

М. П. ИСАЕНКО, С. С. БОРИШАНСКАЯ,
Е. Л. АФАНАСЬЕВА

ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ ГЛАВНЕЙШИХ МИНЕРАЛОВ РУД В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ

ДОПУЩЕНО
МИНИСТЕРСТВОМ ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ



МОСКВА «НЕДРА» 1978

Исаенко М. П., Боришанская С. С., Афанасьева Е. Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. М., «Недра», 1978. 255 с.

Настоящая книга является практическим руководством по определению рудных минералов в отраженном свете. Она состоит из двух частей. В первой части дано краткое описание основных свойств рудных минералов и методов их диагностики в отраженном свете (количественное и качественное определение отражения, твердости, цвета, анизотропии, внутренних рефлексов, магнитности), а также освещено применение микрохимического и парагенетического анализа руд. Приведены главнейшие типоморфные минеральные ассоциации руд. Во второй части книги помещены определительные и описательные таблицы, в которых сведены данные о диагностических свойствах более чем 300 минералов. Таблицы обеспечивают надежную микроскопическую диагностику практически всех наиболее распространенных рудных минералов.

Книга предназначена в качестве учебного пособия по рудной микроскопии для студентов геологических специальностей высших учебных заведений, а также будет полезна преподавателям, аспирантам и специалистам геологических организаций, занимающимся изучением руд и диагностикой рудных минералов.

Табл. 31, ил. 46, список лит. — 124 назв.

Рецензент: Кафедра полезных ископаемых Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

ПРЕДИСЛОВИЕ

На современном этапе важной задачей является комплексное использование руд с бедным содержанием металлов и максимальное сокращение потерь полезных ископаемых при их добыче и переработке.

Рудная микроскопия — изучение рудных минералов в отраженном свете — применяется для определения минерального состава, строения руд и их концентратов. Это один из главных методов, с помощью которого минералог, горный инженер-геолог и обогатитель наиболее эффективно исследуют руды и организуют их обогащение. Рудная микроскопия особенно действенна в сочетании с такими методиками исследования минералов, как рентгеноструктурный, спектральный и химический анализы, а также рентгеноспектральный микроанализ.

Цель настоящего учебного пособия — познакомить учащихся с современными методами диагностики рудных минералов в отраженном свете и методикой работы с набором специальных таблиц, с помощью которых можно точно определить минерал. В таблицах помещены данные о более чем 300 рудных минералах. Диагностика минералов основана на определении их отражения, твердости и проведении микрохимических реакций. Книга дополняет существующие учебники и справочники по рудной микроскопии (Вахромеев 1956; Волинский, 1947, 1949, 1966; Рамдор, 1962; Юшко, 1966, 1971; Эльснер, 1961 и др.).

В основу учебного пособия положена одноименная книга авторов, опубликованная в 1972 г. Настоящее учебное пособие значительно дополнено и улучшено. В нем помещено краткое изложение теории оптических свойств рудных минералов, описание приборов для количественного определения отражения. Составлены новые определительные таблицы для отдельных групп минералов (теллуриды и селениды золота, серебра, висмута, свинца; сульфосоли серебра, свинца, меди; группа минералов никеля и кобальта; группа минералов золота, серебра, платины, иридия) и типов руд (медистые песчаники, руды черных металлов); составлены новые описательные таблицы для группы самородных металлов. Отдельные методички и основные описательные таблицы (I, II, III) переработаны в соответствии с новыми данными минералогии и рудной микроскопии.

Предлагаемое учебное пособие написано группой сотрудников кафедры полезных ископаемых Московского геологоразведочного института (МГРИ) и кафедры минералогии Московского университета (МГУ). При его составлении авторы опирались на свой многолетний опыт педагогической и исследовательской деятельности в области рудной микроскопии и геологии полезных ископаемых. Общее руководство работой осуществлено проф. М. П. Исаенко. Глава 2 «Оптические свойства рудных минералов и методы их изучения» написана Л. И. Вяльсовым.

Авторы приносят глубокую благодарность за критические замечания, советы, отзывы на книгу, полученные от С. А. Вахромеева (Иркутский политехнический институт), Ю. С. Бородаева (МГУ) и Э. Харласа (ГДР).

ГЛАВНЕЙШИЕ СВОЙСТВА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

При диагностике рудного минерала под микроскопом в отраженном свете применяется комплекс методов, с помощью которых изучаются его физические и химические свойства.

Физические свойства рудного минерала подразделяются на две группы: 1) оптические свойства (цвет, коэффициент отражения, двуотражение, эффект анизотропии, внутренние рефлексии, поляризационные фигуры); 2) собственно физические свойства (твердость, магнитность, кристалломорфные особенности).

Химические свойства рудного минерала исследуются с применением диагностического и структурного травления и качественным микрохимическим анализом. Диагностика рудного минерала всегда начинается с определения оптических и физических свойств, из которых главные — коэффициент отражения и твердость, а также выборочно применяются микрохимические методы. В книге рекомендуется широко использовать дополнительный диагностический признак минералов — парагенезис.

Глава I

Отбор образцов руд для микроскопических исследований и изготовление полированных шлифов

Микроскопия руд широко применяется главным образом в минералогии, геологии рудных месторождений, а также в обогащении и металлургии. Методы отбора и характер проб, используемых для проведения геолого-минералогических и технологических исследований, существенно отличаются.

ОТБОР ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении геолого-минералогических работ производится систематический отбор рудных образцов для микроскопических исследований. В дальнейшем из образцов изготавливаются полированные шлифы, обладающие зеркальной отражающей поверхностью — основной объект изучения руд под микроскопом. Методика, масштабы и объемы отбора образцов определяются конечной целью работ: геолого-минералогическая характеристика месторождений или отдельных рудных тел; детальное исследование различных типов руд (минеральных, текстурно-структурных, промысленных) и закономерностей их пространственного размещения; выяснение явлений зональности; проведение парагенетического анализа и обсуждение вопросов генезиса

оруденения; минералого-технологическая характеристика руд для решения задач обогащения.

Подобные комплексные геолого-минералогические исследования должны проводиться планомерно и систематически в процессе разведки месторождения, причем минералогическое картирование и опробование должны сопутствовать геологическому картированию и разведочному опробованию на всех стадиях разведочных работ.

Классические примеры проведения минералогического картирования на месторождениях Урала и Забайкалья описаны и рассмотрены Н. В. Петровской, М. Б. Бородаевской, М. С. Сахаровой и др.

Геолого-минералогическое картирование проводится в масштабе 1:2 000—1:100, сопровождается детальной документацией, на современном этапе часто фотодокументацией горных выработок, и минералогическим опробованием. Минералогическое опробование заключается в отборе рудных образцов по сечениям вкрест простирания рудного тела. Выбор параметров сети зависит от степени сложности и изменчивости формы рудного тела, распределения оруденения, состава и строения руды, содержания промышленных и вредных компонентов, и должен быть установлен экспериментально.

Е. Л. Афанасьева (1971—1974 гг.) проводила минералогическое картирование и опробование на нескольких подземных горизонтах Кафанского и Шаумянского месторождений Армении. Кафанское месторождение представлено кварц-пирит-халькопиритовыми жилами простой и сложной формы (рис. 1). Опытным путем было установлено, что достаточен интервал опробования в 5 м; отбор минералогических проб проводился через 5 м по линиям вкрест простирания жилы (см. рис. 1). Месторождение Шаумянское представлено серией кварц-полиметаллических жил с более изменчивой и разнообразной минерализацией; в этом случае опробование производилось через 2 м по линиям вкрест простирания жил. На обоих месторождениях в стандартных случаях отбирались образцы из жилы, а также из минерализованных участков лежащего и всячего бока.

При проведении геолого-минералогического картирования на зарисовке или фотографии горной выработки (рис. 2) помимо геологоструктурных данных показаны минералогические особенности рудных тел; разнородные минеральные ассоциации и типы руд, их взаимоотношения в пространстве (границы, пересечения), текстурно-структурные разновидности руды, характер контактов и минерализация всячего и лежащего бока.

Из различных типов минерализации отбираются образцы для изготовления полированных, прозрачных шлифов и кусочки руды для химико-минералогических исследований; место взятия и номер образца отмечаются на зарисовке или фотографии (см. рис. 2). Кроме того, отбираются более крупные образцы, размером 9×12 см и больше, характеризующие минеральные ассоциации, текстурно-структурные типы руды, генетические отношения: явления пересечения, брекчирования агрегатов разновозрастных минеральных ассоциаций и др. (рисунки 3 и 4). В дальнейшем из них могут быть изготовлены шлифованные образцы размером примерно 9×12 см. На полированной поверхности образцов можно наблюдать мельчайшие детали строения руды и сложные взаимоотношения минеральных агрегатов. С крупными полированными образцами удается получить превосходные фотографии. Они также пригодны для изучения с лупой и под микроскопом, при небольших увеличениях; при работе с большими увеличениями требуется высокое качество полированной поверхности, которое трудно получить на большой площади.

Для изготовления полированного шлифа в лабораторию должен



Рис. 1. Кровля очистного блока. Отбор образцов из пирит-халькопиритовой жилы производится по поперечным сечениям через 5 м (I—I, II—II). Месторождение Кафан, Армянская ССР

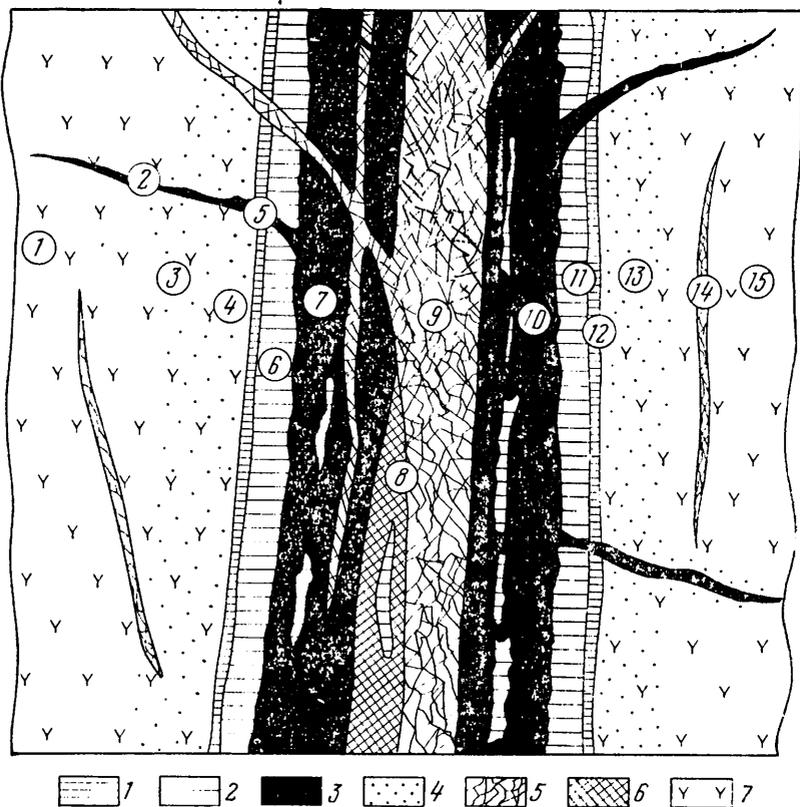


Рис. 2. Схема отбора образцов из забоя жилы с целью изучения минерального состава и строения руды. Жила сложена разновозрастными минеральными ассоциациями. В кружках показаны номера отобранных образцов. Месторождение Кафан, Армянская ССР

1 — гребенчатый кварц; 2 — белый массивный кварц; 3 — халькопирит-сфалеритовая ассоциация; 4 — околожильная вкрапленность сфалерита; 5 — халькопирит-галенитовая ассоциация; 6 — розовый крупнозернистый кальцит; 7 — вмещающая порода

поступить образец руды в виде кубика с ребром 3 см; такая величина шлифа наиболее удобна для полирования и изучения под микроскопом. Из одного пункта обычно отбирается несколько кусочков руды такого размера, представительно отражающих ее особенности.

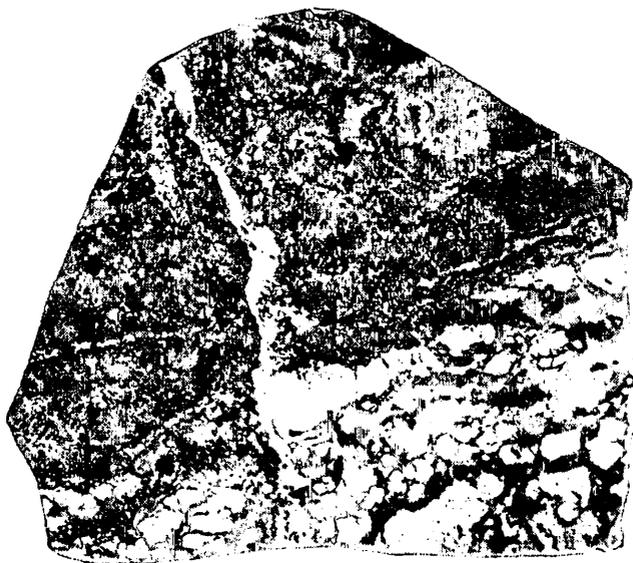


Рис. 3. Приполированный образец из контакта теннантит-халькопиритовой жилы. В зальбанде развита кварц-пиритовая ассоциация, в центре — пирит-теннантит-халькопиритовая. Пирит-сфалерит-халькопиритовый прожилок, отходящий от жилы, пересекает кварц-пиритовую ассоциацию. Месторождение Кафан, Армянская ССР



Рис. 4. Приполированный образец из руды брекчиевой текстуры. Брекчия сложена обломками кварцевого порфирита (светло-серое), обломками сфалерита (темно-серое), сцементированными молочно-белым кварцем и светло-коричневым сфалеритом второй генерации. Натуральная величина. Месторождение Кафан, Армянская ССР

Рекомендуется также отбирать крупные образцы размером 9×12 см и более, иллюстрирующие интересные взаимоотношения минеральных агрегатов. На образце расчерчивают сетку для распиловки

с целью изготовления полированных шлифов; на зарисовку или фотографию образца наносят расположение и номера шлифов. Этот метод совершенно необходим при изучении руд крупноагрегатного и неоднородного сложения, крупнозернистого строения: конкреционные, полочатые текстуры и т. д.

Для специальных исследований (микроструктурный анализ и др.) могут быть отобраны ориентированные образцы, которые размечаются и этикетируются особым способом для изготовления ориентированных полированных шлифов.

В полевой лаборатории производится дальнейшая обработка рудного материала, полученного из горных выработок. Образцы с каждого пункта изучаются визуально и под биноклем, маркируются, в случае необходимости зарисовываются. Образцы, предназначенные для изготовления полированных, прозрачных шлифов, маркируются и этикетируются; в этикетке помимо общих данных отмечается необходимость соблюдения особых условий при изготовлении шлифа.

В полевом журнале приводится детальное описание образцов, отмечается количество полированных образцов, полированных и прозрачных шлифов, количество проб для разнообразных исследований. Чтобы идентифицировать жильные минералы и характеризовать их сростания с непрозрачными рудными минералами, необходимо иметь прозрачно-полированные шлифы. Для изготовления прозрачно-полированного шлифа выбирают представительный образец руды подходящего размера, который распиливают на две части. Одну часть образца (размером 3×3×3 см) направляют на изготовление полированного шлифа, другую — прозрачно-полированного.

ОТБОР ПРОБ ИЗ ДРОБЛЕННОГО РУДНОГО МАТЕРИАЛА

Шлихи из морских песков, россыпных месторождений, раздробленные руды, породы и продукты обогащения состоят из рудных и нерудных частиц. При проведении минералогического анализа дробленного материала решаются две основные задачи: идентификация минералов частиц, подсчет количественных соотношений мономинеральных частиц и сростков.

Пробы из россыпных месторождений отбирают при геолого-минералогическом картировании по сечениям вкост простирания рудных тел. На различных стадиях технологического цикла производится отбор проб из продуктов дробления и обогащения руды; опробуются раздробленная рудная масса, концентраты, промежуточные продукты, хвосты. Пункты взятия проб отмечаются на технологической схеме.

Каждую пробу очень тщательно сокращают, чтобы получить небольшой представительный объем (от 2 до 4 см³) с целью брикетирования и изготовления полированного шлифа. Сокращение производится при правильном перемешивании по методу кольца и конуса или с помощью микроразделителя. Если проба для брикетирования состоит из различных по размерам частиц, то она должна быть разделена на фракции по крупности частиц. Каждая фракция точно взвешивается, разделяется и брикетируется. Если материал пробы загрязнен воздействием флотирующих и других реагентов, то перед брикетированием он должен быть тщательно промыт.

Как указывает Ю. Кэмерон (1966), обработка каждого нового дробленного материала из рудных частиц представляет собой специальную проблему, которая должна решаться исходя из конкретных условий.

ПОЛИРОВАННЫЕ ШЛИФЫ ИЗ ПЛОТНЫХ РУД

Качество полированных шлифов имеет очень важное значение для рудной микроскопии. Совершенный полированный шлиф должен обладать превосходной зеркальной отражающей поверхностью, с минимальным количеством царапин, ямок, трещин, выступов. В плохо приготовленных шлифах невозможно изучать мельчайшие включения, тонкозернистые срастания минералов, каемки на границах твердых минералов, проводить точные количественные оптические измерения, подсчет количественных соотношений минералов. Плохое качество полированного шлифа (углубления, царапины) резко проявляется на микрофотографиях, которые настолько искажаются, что часто невозможно увидеть соответствие между объяснительным текстом и фотографией руды.

Совершенный полированный шлиф очень трудно изготовить, так как большей частью рудный образец представляет собой неоднородный агрегат минералов, различающихся по твердости, размеру выделений, пластичности, прочности и пористости. В настоящее время изготовлению полированных шлифов придается большое значение и в ряде лабораторий применяются современные, усовершенствованные методы: автоматические станки, использование алмазных абразивов и т. д.

Полированные шлифы готовятся из образцов руды или брикетов цементированных частиц раздробленного рудного материала (продуктов обогащения, песков, тяжелых минеральных фракций и др.). Зеркальная плоская поверхность полированного шлифа получается в результате шлифовки, а затем полировки. Изготовление полированного шлифа можно производить ручным способом (с использованием специальных станков) и машинным способом (на автоматических станках).

Процесс изготовления шлифа состоит из следующих основных операций: 1) подготовка образца: пропитка (закрепление), обдирка или распиловка для получения плоской поверхности; 2) шлифовка плоской поверхности; 3) полировка. Основные операции полирования разделяются на ряд более мелких, которые проводятся на вращающихся дисках с применением абразивных порошков различной крупности и твердости. В процессе шлифовки и полировки происходит последовательная смена грубых абразивов на более тонкие.

Рыхлые, хрупкие, трещиноватые руды перед обработкой подвергаются цементации в закрепляющем веществе. Для этого обычно используется канифоль, реже канадский бальзам, бакелит, зубопротезный цемент и др. Закрепление, проварка, холодная цементация хрупких руд производятся дополнительно несколько раз в процессе обдирки и шлифовки. Плотные руды закрепляются после обдирки и шлифовки.

Шлифовка ведет к постепенному истиранию, выравниванию плоской поверхности шлифа и проводится с применением более грубых абразивных порошков: карборунда, электрокорунда, естественного корунда. Эти абразивы представляют собой порошки, которые классифицируются по крупности частиц. Для грубой шлифовки используются порошки с размером частиц 28—14 мкм, для тонкой шлифовки—от 10 до 7 мкм, с последовательным уменьшением частиц в зависимости от стадии шлифовки. В результате шлифовки образуется ровная шероховатая плоская поверхность. После смены абразивов полированный шлиф тщательно очищается и высушивается.

Полировка производится с целью полного сглаживания шероховатости и получения зеркальной отражающей поверхности. Для полировки шлифов применяются порошки некоторых оксидов метал-

лов (окись хрома, окись алюминия, окись магния, окись железа), размер частиц которых измеряется долями микрона. Ю. Кэмерон (1966) рекомендует применять магнезию.

В процессе полировки основное значение имеют пластические деформации. Вследствие тонкого истирания, при полировке на вращающихся кругах, покрытых сукном, появляется рельеф поверхности шлифа и поверхностные пленки на выделениях минералов. Относительный рельеф минералов в полированном шлифе (зерна твердых минералов выступают над зернами более мягких) используется при диагностике для характеристики относительной твердости минералов. Однако в результате длительной полировки получается резкий рельеф, который сильно ухудшает качество шлифа и мешает наблюдению границ сростаний зерен минералов разной твердости, такой шлиф не годится для фотографирования. Изготовление полированных шлифов с незначительным рельефом или совсем «безрельфных» производится «вручную» — особыми способами на жесткой основе и на автоматических станках.

Следует особо отметить необходимость соблюдения чистоты при любой операции изготовления шлифа. Образцы, шлифовальные и полировальные диски должны тщательно очищаться от абразива предыдущей стадии и частиц выкрашивающихся минералов данного или других шлифов.

ПОЛИРОВАННЫЕ ШЛИФЫ ИЗ ДРОБЛЕНОГО МАТЕРИАЛА

Изготовление полированных шлифов из дробленого материала (продукты обогащения, пески, тяжелые минеральные фракции) в настоящее время привлекает пристальное внимание не только специалистов по рудной микроскопии, но и технологов, обогатителей. Для решения задач обогащения (степень чистоты и минеральный состав концентрата, промежуточного продукта и хвостов, выяснение причин потерь и разубоживания и др.) приходится изучать очень мелкие частицы, размером до 5 мкм и ниже, а в них — мельчайшие каемки-покрытия и включения минералов. Необходимым условием успешной работы является изготовление совершенных полированных шлифов из тонко раздробленного материала.

Из пробы рудных частиц отбирается представительный объем для брикетирования, а затем изготовления полированных шлифов, с применением специальных методов деления пробы. Материал проб для брикетирования должен быть очищен от загрязняющих веществ: флотационных реагентов и др., которые могут вызвать агломерацию частиц и в дальнейшем помешать микроскопическим исследованиям. Для борьбы с агломерацией используется также разделение (классификация) частиц по размерам, по массе.

В качестве цементирующей среды для получения брикетов используются пластмассы: зубопротезный цемент АКР-7, полистирол, стиракрил и т. д. Дальнейшая обработка брикета ведется по схеме, рассмотренной для плотной руды, с некоторыми особенностями технологии.

Как уже указывалось, высокое качество полированной поверхности шлифа является необходимым условием успешных и точных микроскопических исследований. Для количественных оптических исследований (дисперсия R и др.), для электронного зондирования необходимы безрельфные шлифы высшего класса полировки.

Можно выделить главные и второстепенные дефекты полированной поверхности. К главным относятся углубления и крупные царапины; грубый рельеф, сильное загрязнение шлифа абразивным порошком

или частицами минералов других шлифов, тени и пленки полирования. Второстепенные недостатки шлифа меньше бросаются в глаза и поэтому часто не учитываются, хотя также играют важную роль, приводя к значительным ошибкам.

Мелкие углубления на твердых минералах, сопровождающиеся царапинами на шлифе, свидетельствуют о выкрашивании мелких включений: золото в пирите, станий в сфалерите, висмут в сафлорите и др. Самостоятельные выделения мягких минералов (висмут, молибденит, графит, аргентит и т. д.) могут быть покрыты царапинами или могут полностью выкрашиваться. Очень тонкие царапины на мягких минералах усиливают эффект анизотропии при скрещенных николях.

Возникновение ложных структур часто наблюдается для легко окисляющихся минералов: пирротина, кубанита, халькопирита и др. По капиллярным трещинкам проникает вода и вызывает их окисление в шлифе. Главная мера борьбы — высушивание после каждой операции. В полированных шлифах — брикетах из частиц дробленого рудного материала — может происходить вдавливание в цемент более тяжелых частиц. В этом случае необходимо делать поперечные сечения шлифа.

Появление значительного рельефа обуславливает ошибки при диагностике и количественных подсчетах тонких каемок по границам минералов. В этом случае невозможны количественные подсчеты минералов, слагающих каемки, так как каемки затеваются и загрязняются абразивным порошком; то же происходит с микровключениями и микропрожилками как рудных, так и жильных минералов. Недостатки полированной поверхности, обусловленные резким рельефом, наиболее влияют при изучении шлифов — брикетов из тонко раздробленных рудных частиц. В то же время для решения вопросов обогащения характеристика каемок — покрытий и микровключений — имеет первостепенное значение.

Следует отметить, что все эти недостатки полированной поверхности или большинство из них могут быть полностью устранены в случае применения особых методик обработки шлифа «вручную» и при автоматическом способе изготовления шлифов. Высокая квалификация и опытность, искусство мастеров-шлифовальщиков является необходимым условием достижения хороших результатов как при ручном, так и при автоматическом способе изготовления шлифов.

Глава 2

Оптические свойства рудных минералов и методы их изучения

В этой главе рассмотрены теория отраженного света, приборы и методы количественных измерений оптических констант рудных минералов, визуальные методы наблюдения оптических свойств рудных минералов.

При диагностике рудных минералов оптическим методам исследования отводится особое место ввиду их специфических особенностей. Оптические методы, во-первых, относятся к числу неразрушающих методов контроля в отличие от метода измерения микротвердости, лазерного микроспектрального анализа, микрохимического анализа. Во-вторых, с их помощью можно изучать мельчайшие микровыделения рудных минералов, используя сравнительно простую аппаратуру, доступную практически каждому исследователю. В-третьих, и это глав-

ное, количественные оптические методы являются экспрессными, так как информация об оптических свойствах может быть получена за короткий промежуток времени. Разумеется, что и оптические методы исследования имеют ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение. Одним из таких факторов является необходимость иметь тщательно отполированную поверхность шлифа. А так как количественная оценка оптических свойств основана на измерении светового потока, отраженного от образца, то состояние полированной поверхности существенно сказывается на результатах измерений. Поэтому, с одной стороны, основной проблемой получения сопоставимых данных по оптическим свойствам рудных минералов является унификация и стандартизация методов и способов приготовления полированных шлифов высокого качества. С другой, необходимо стандартизировать и условия измерений оптических свойств, поскольку в разных руководствах даются противоречивые рекомендации по методике измерений и введению корректирующих поправок.

Недооценка многих факторов, которые могут влиять на результаты измерений, а также отсутствие единых стандартных эталонов привели к тому, что данные об оптических свойствах рудных минералов, приводимые в различного рода справочных руководствах, пособиях, монографиях, существенно различаются. Действительно, анализ данных об отражении рудных минералов, опубликованных до 1968 г., показывает, что полученные результаты недостоверны и поэтому нет смысла их сопоставлять между собой или с данными последних лет, так как неизвестны систематические ошибки измерений. Однако в последние годы благодаря введению международных эталонов отражения, улучшению параметров микрофотометрических приборов, унификации некоторых приемов измерения данные, получаемые разными авторами, в большинстве случаев являются сопоставимыми и на их основе могут быть созданы различные варианты определительных таблиц, облегчающие диагностику рудных минералов в полированных шлифах.

Учитывая, что при изучении рудных минералов в полированных шлифах мы прежде всего получаем информацию об их оптических свойствах, необходимо вкратце рассмотреть основные особенности кристаллооптики рудных минералов, а также комплекс приборов и методов, применяющихся в рудной микроскопии. Это позволит сочетать представления о возможностях современных объективных методов исследования оптических свойств с успешным использованием данных по оптическим константам, приводимых в таблицах для предварительной диагностики минералов. Более подробную информацию об оптических свойствах рудных минералов и методах их исследования начинающий исследователь найдет в монографиях И. С. Волинского (1966), Ю. Н. Кэмерона (1966), Р. Галопена и Н. Генри (1975), Л. Н. Вяльсова (1976), а также в справочнике «Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости» (1973), составленном М. С. Безсмертной, Т. Н. Чвилевой, Л. С. Агроскиным и др.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМИ ПОСТОЯННЫМИ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

При падении света — электромагнитного излучения — на зеркальную поверхность кристалла происходит взаимодействие световой волны с электронным остовом кристалла. При этом возникает преломленная волна, которая распространяется в глубь кристалла, и отраженная волна, идущая в противоположном направлении. Амплитуды преломленной и отраженной волны зависят от амплитуды падающей вол-

ны, а также от угла падения света на образец и угла преломления. Если угол падения — величина, задаваемая исследователем, то угол преломления зависит от состава и структуры кристалла, т. е. определяется его оптическими постоянными.

Оптическими постоянными рудных минералов являются показатель преломления n , коэффициент поглощения k и коэффициент отражения R , который может быть найден по n и k из уравнений, приведенных ниже. Однако в рудной микроскопии экспериментально определяются коэффициенты отражения в воздухе и иммерсии, а затем уже по этим данным вычисляются n и k .

Коэффициент отражения R — величина, характеризующая отношение интенсивности отраженного света I_r к интенсивности падающего света I_0 :

$$R = \frac{I_r}{I_0}. \quad (1)$$

При этом предполагают, что здесь имеет место зеркальное отражение, т. е. диффузное отражение, обусловленное микронеровностями поверхности шлифа, настолько мало, что его можно не учитывать.

Взаимосвязь между R и n для изотропных прозрачных минералов можно выразить формулами Френеля:

$$\begin{aligned} R &= \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2; \\ n &= \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (2) позволяют вычислять значения n из измерений показателя отражения R и обратно, когда исследуемое вещество граничит с воздухом, показатель преломления которого принимается равным единице. Если показатель преломления среды n_u , граничащей с веществом, отличается от единицы, то расчеты следует вести по другим уравнениям:

$$\begin{aligned} R_u &= \left(\frac{n-n_u}{n+n_u} \right)^2; \\ n &= n_u \left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Если известны значения n , то значения R_u можно вычислить, пользуясь следующей формулой:

$$R_u = \left[\frac{1 + \sqrt{R} - n_u(1 - \sqrt{R})}{1 + \sqrt{R} + n_u(1 - \sqrt{R})} \right]^2. \quad (4)$$

Взаимосвязь между R , n и k описывается формулой Бера для случая нормального падения света на поверхность изотропного поглощающего минерала, которая граничит с воздухом,

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (5)$$

Если рассматривать отражение света на границе между минералом и средой с показателем преломления n_u , то формула Бера видоизменяется:

$$R_u = \frac{(n-n_u)^2 + k^2}{(n+n_u)^2 + k^2}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что, измеряя показатели отражения R и R_u , можно вычислить оптические постоянные n и k из системы двух уравнений:

$$\begin{cases} n = \frac{0,5 (n_u^2 - 1)}{n_u \left\{ \frac{1 + R_u}{1 - R_u} \right\} - \frac{1 + R}{1 - R}}, \\ k = \sqrt{\frac{(n + 1)^2 \cdot R - (n - 1)^2}{1 - R}}. \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения (6), (7) — фундаментальные для рудной микроскопии, так как измерения R в двух средах с разными показателями преломления дают возможность определить n и k тех рудных минералов, размеры выделений которых достигают нескольких микрон. Рудные минералы гексагональной, тетрагональной и тригональной сингонии относятся к оптически одноосным минералам, ромбической, моноклиальной и триклинной сингоний — к оптически двуосным кристаллам. Для слабопоглощающих одноосных кристаллов показатели отражения зависят соответственно от показателей преломления обыкновенного луча n_o и необыкновенного n_e

$$\begin{aligned} R_o &= \left(\frac{n_o - n_u}{n_o + n_u} \right)^2; \\ R_e &= \left(\frac{n_e - n_u}{n_e + n_u} \right)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

У двуосных кристаллов выделяются три главных показателя преломления: n_g , n_m и n_p , которые функционально связаны с R_g , R_m и R_p уравнениями, аналогичными уравнениям (8).

У одноосных поглощающих кристаллов, используя представление о комплексном показателе преломления, можно написать для главных показателей отражения R_o и R_e следующие выражения:

$$\begin{aligned} R_o &= \frac{(n_o - n_u)^2 + k^2}{(n_o + n_u)^2 + k^2}; \\ R_e &= \frac{(n_e - n_u)^2 + k^2}{(n_e + n_u)^2 + k^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Величина $|R_o - R_e|$ называется двуотражением $-\Delta R$

$$\Delta R = |R_o - R_e|.$$

Если $R_o > R_e$, то по аналогии с прозрачными кристаллами оптический знак минерала отрицательный. Если $R_o < R_e$, то оптический знак положительный.

Следует иметь в виду, что у поглощающих минералов величины n и k экспериментально не определяются и оптический знак кристалла более удобно устанавливать из измерений коэффициентов отражения. Оптический знак анизотропных поглощающих кристаллов, определенный из измерений R , может не совпасть с оптическим знаком, вычисленным по данным n , поскольку экстремальные значения R , n , k в анизотропных поглощающих кристаллах могут не совпадать в одном и том же направлении. Поэтому условимся оптический знак поглощающего кристалла определять, используя лишь данные о коэффициентах отражения.

В соответствии с этим двуосный минерал будет иметь отрицательный знак, если $(R_3 - R_2) < (R_2 - R_1)$. Положительный знак характерен для тех минералов, у которых $(R_3 - R_2) > (R_2 - R_1)$. Если $(R_3 - R_2) = (R_2 - R_1)$, то оптический знак становится нейтральным.

Рассмотрим принцип обозначения главных показателей отражения двусных кристаллов. В работах Ж. Орсея и М. Берека (1937) они обозначаются через R_1 и R_2 . В более поздних работах встречаются символы R_g , R_m , R_p . Однако по мере накопления экспериментальных данных стало очевидно, что вследствие дисперсии оптических констант спектры отражения минерала в определенном диапазоне длин волн могут пересекаться (ковеллин, умангит, миллерит, арсенопирит и др.). Следовательно, для таких минералов символы R_g , R_m , R_p не могут употребляться. Для любого двусного кристалла вне зависимости от сингонии можно выделить три главных показателя отражения: больший — R_3 , меньший — R_1 и показатель, отвечающий круговому сечению, — R_2 . Если минерал имеет пересекающиеся спектры отражения, то условимся присваивать указанные символы, начиная с области длин волн, расположенной в более коротковолновом диапазоне от точки пересечения спектров.

Для двусных минералов оптические константы связаны следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{(n_1 - n_u)^2 + k_1^2}{(n_1 + n_u)^2 + k_1^2}; \\ R_2 &= \frac{(n_2 - n_u)^2 + k_2^2}{(n_2 + n_u)^2 + k_2^2}; \\ R_3 &= \frac{(n_3 - n_u)^2 + k_3^2}{(n_3 + n_u)^2 + k_3^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величину ($R_3 - R_1$) назовем максимальным двуотражением двусного кристалла

$$\Delta R_{3,1} = |R_3 - R_1|.$$

Индексы при $\Delta R_{3,1}$ обозначают соответствующее сечение. Следовательно, в двусном кристалле для главных сечений можно определять три значения ΔR : $\Delta R_{3,1}$; $\Delta R_{2,1}$; $\Delta R_{3,2}$. Наибольшее диагностическое значение имеет величина $\Delta R_{3,1}$, т. е. максимальное двуотражение.

Так как главные показатели отражения определяются лишь при наличии строго ориентированных сечений или путем статистических измерений R для большого числа разноориентированных сечений, то больший и меньший показатели отражения любых сечений, кроме главных, условимся обозначать через R_3 и R_1 . Двуотражение этих сечений будем обозначать через $\Delta R_{3,1}$. Двуотражение одноосных и двусных кристаллов можно охарактеризовать и относительной величиной, вычисленной по формуле, предложенной И. С. Вольным:

$$\Delta R_{\text{отн}} = \left(1 - \frac{R_1}{R_3}\right) 100\%. \quad (11)$$

Эта величина важна при визуальной оценке эффектов оптического контраста, так как в уравнение (11) вместо R_1 и R_3 можно подставить соответствующие показатели отражения двух минералов, зерна которых имеют общую границу. Физиологическая чувствительность глаза в желто-зеленой области спектра такова, что при благоприятных условиях микроскопических наблюдений в отраженном свете удается зафиксировать $\Delta R_{\text{отн}}$ в пределах $3 \div 5\%$.

Величины n и k анизотропных поглощающих минералов вычисляются из измерений R в воздухе и иммерсии по формулам, аналогичным (7). При этом в промежуточные расчеты входят такие выраже-

ния, как $\frac{1+R}{1-R}$. Можно показать, что этот параметр зависит в основном от величины n , т. е.

$$\begin{aligned}\frac{1+R}{1-R} &= \frac{1}{2} \left(n + \frac{1}{n} + \frac{k^2}{n} \right); \\ \frac{1+R_u}{1-R_u} &= \frac{1}{2N} \left(n + \frac{N^2}{n} + \frac{k^2}{n} \right).\end{aligned}\tag{12}$$

В связи с этим параметр $\frac{1+R}{1-R}$ также можно использовать для диагностики рудных минералов.

ДИСПЕРСИЯ ОТРАЖЕНИЯ И ЦВЕТ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Оптические параметры n , k и R исследуемого минерала могут изменяться в зависимости от длины волны монохроматического света, падающего на образец. Это явление называется дисперсией оптических постоянных. Можно выделить два основных типа дисперсии.

Для первого типа характерно уменьшение значений оптических постоянных с увеличением длины волны. Этот тип дисперсии получил название нормальной и наблюдается у минералов прозрачных или слабопоглощающих с небольшими значениями n . Во втором случае значения R возрастают с увеличением длины волны света. Это тип аномальной дисперсии. К нему относятся преимущественно минералы с высокими значениями n и k . Разумеется, что понятия «нормальный» и «аномальный» совершенно условны, так как в том и другом случае дисперсия оптических параметров обусловлена индивидуальными особенностями состава и структуры минерала, или, точнее, особенностями его энергетической (зонной) структуры. С этой точки зрения любой вид дисперсии является нормальным для данного минерала, а аномалии, которые иногда наблюдаются, обусловлены соответствующими изменениями в составе и структуре минерала. Для относительно большого числа рудных минералов дисперсия оптических свойств и, в частности, коэффициента отражения, носит более сложный характер и их нельзя отнести к указанным выше типам. В этом случае можно говорить о наличии смешанной дисперсии.

Однако более удобно классифицировать рудные минералы по другому признаку. Поскольку исследователь в первую очередь экспериментально определяет коэффициенты отражения минерала для разных длин волн, то в основу классификации должна быть положена форма спектра отражения. Спектр отражения — это совокупность абсолютных значений R минерала для различных длин волн света. На практике чаще всего измеряют спектр отражения в видимом диапазоне. Измерения R в ультрафиолетовой и инфракрасной области выполняются лишь отдельными исследователями и пока широко не распространены из-за отсутствия соответствующей аппаратуры. Однако информация о форме спектра отражения даже в видимой области может быть успешно использована для диагностики многих рудных минералов. Анализ оптических свойств более 300 рудных минералов показывает, что можно выделить 12 типов спектров отражения рудных минералов (Вяльсов, 1973), как видно из рис. 5.

Указанные типы спектров отражения выделяются исходя из положения максимума отражения на кривой. Для 1-го типа, например, максимум отражения находится в ультрафиолетовой области спектра; 2-го — он наблюдается в синем диапазоне длин волн; 3-го — в желто-зеленой области спектра, а 9-го — лежит в инфракрасной области. Подавляющее большинство спектров отражения имеет простую струк-

туру и их можно охарактеризовать коэффициентом частной дисперсии F , который равен разнице между значениями R для двух длин волн. Выбор длин волн может быть произвольным, но желательно вычислять коэффициент F для крайних участков спектра. Оптимальными являются, например, длины волн 480 и 680 нм, так как для самых крайних длин волн значения R могут быть занижены. Параметр F характеризует крутизну спектра отражения в выбранном диапазоне длин волн. Аналогичный (по методу вычисления) коэффициент используется и в оптике прозрачных кристаллов для оценки дисперсии

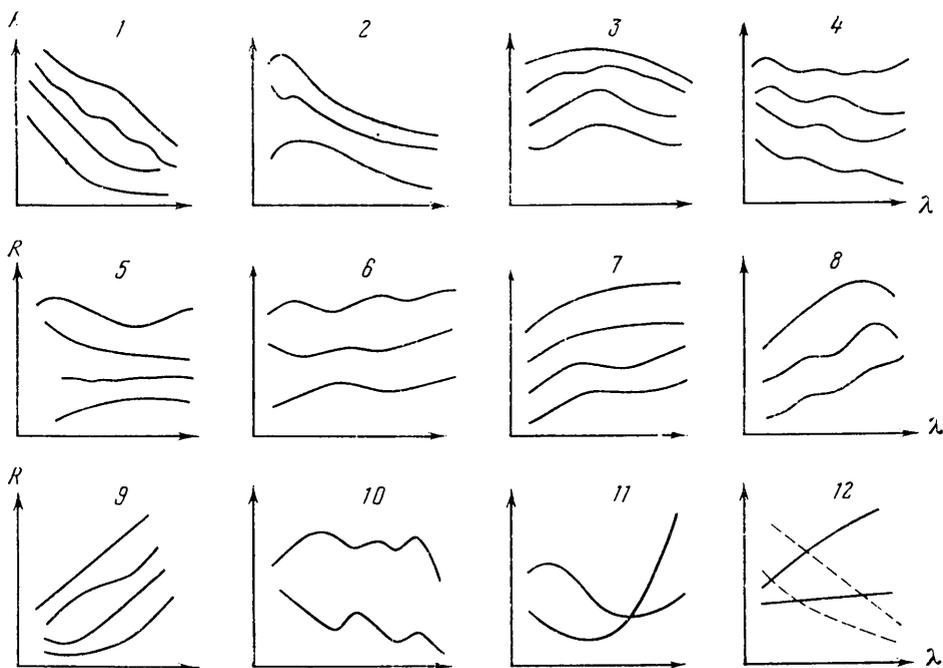


Рис. 5. Наиболее характерные типы спектров отражения рудных минералов

показателя преломления. Следовательно, выделенные типы спектров отражения можно описать параметром F , который вычисляется по формуле

$$F = R_{480} - R_{680}. \quad (13)$$

В данном случае у спектров отражения с нормальной дисперсией знак F будет положительным.

Перейдем к рассмотрению особенностей отдельных типов спектров отражения, изображенных на рис. 5. Необходимо отметить, что спектры, показанные на рис. 5, обобщенные, они в значительной степени сглажены, так как излишняя детализация чрезвычайно затруднила бы отнесение реальных спектров отражения к тому или иному типу.

Тип 1. Наиболее характерными представителями этого типа являются спектры отражения аурипигмента, бенжаминита, буланжерита, вейссита, галенита, галхаита. Максимум отражения у них находится, по-видимому, в ультрафиолетовой области. Спектры отражения часто имеют слабые перегибы, осложняющие форму кривой. У многих минералов после спада значений R наблюдается плато в желтой и красной части спектра, как у галенита. Крутизна спектров большая, параметр $F > 3\%$.

Тип 2. К этому типу относятся спектры отражения алтанта, аргентита, берцелианита, браунита, висмутина, гетероморфита. Максимум отражения явно выражен и находится в синей или сине-зеленой области видимого диапазона. Значения R на краю спектра падают, но у некоторых минералов имеется тенденция к подъему значений R (средняя кривая), что свидетельствует о наличии максимумов отражения в ультрафиолетовой области. Крутизна спектров остается большой, значения F для большинства минералов лежат в диапазоне 4—6%.

Тип 3. К этому типу могут быть отнесены спектры отражения айкинита, грейтонита, зелигманита, колорадонита, костовита и других минералов, имеющих широкий максимум отражения в желто-зеленой, желтой, оранжевой частях спектра. Значения F могут быть малы (≤ 3), но знак F положителен, т. е. проявляется тенденция к спаду значений R в сторону более длинных волн. Иногда широкий гребень осложнен мелкими максимумами, как показано на второй кривой. У некоторых минералов максимум отражения выражен более отчетливо, кроме того, наблюдается минимум в красной или синей части спектра.

Тип 4. К этому типу отнесены спектры отражения андорита, бурнонита, виттита, вольфахита, воынскита, галенобисмутита, галита. На кривых выявляется несколько слабых максимумов, расположенных в синей и желтой частях спектра. Параметр F положителен, хотя значения его могут быть относительно малы. Значения R в красной части спектра могут незначительно увеличиваться, иногда наблюдается плато, но чаще всего отмечается понижение значений R .

Тип 5. В этот тип выделены спектры отражения алабандина, аргиродита, бетехтинита, виттихенита, вольфрамита, гауерита, магнетита и других минералов, имеющих пологий характер дисперсии R . Сюда же отнесен и спектр отражения ульманита с характерным минимумом в средней части. Для таких спектров отражения значения будут также близки к нулю. У большинства минералов величина $F > 3$, знак же F может быть как положительным, так и отрицательным.

Тип 6. К этому типу отнесены спектры отражения аурустибита, висоцкита, глаукодота, самородного железа, иридийной платины. На кривых отмечаются слабые максимумы, местоположение их может быть любым, однако тенденция к увеличению значений R в длинноволновую область спектра явно выражена и параметр F всегда отрицателен. Значения F лежат в диапазоне 4—6%.

Тип 7. Характерными представителями этого типа являются спектры отражения джерфшерита, домейкита, жозента А, звягинцевита. Структура спектров отражения проста, но иногда отмечаются слабые максимумы или плато в желтой и оранжевой областях спектра. Основные максимумы отражения находятся, по-видимому, в инфракрасной области. Параметр F также всегда отрицателен.

Тип 8. К этому типу отнесены спектры отражения аварунита, геверсита, германита, дискразита. У некоторых минералов в красной части спектра наблюдается один максимум, но большей частью кривые осложнены несколькими широкими максимумами и перегибами. Параметр F отрицателен. Амплитуда F может достигать больших значений. Этот тип спектров диаметрально противоположен типу 2.

Тип 9. В этот тип включены спектры отражения альгодонита, борнита, брейтгауптита, виоларита, висмута, гаухекоринита и других минералов, значения R которых резко возрастают с увеличением длины волны. Структура спектров проста, но у некоторых минералов (брейтгауптит) в синей части спектра наблюдается ярко выраженный минимум. Параметр F отрицателен, абсолютные значения F достигают 9—10% и более.

Тип 10. К этому типу относятся спектры отражения сульванита и молибденита. Структура спектров отражения этих минералов очень сложна. Имеется несколько сильных максимумов, местоположение которых может быть любым. Значения F могут быть малы, а знак F может изменяться. Этот тип спектров отражения встречается очень редко, и диагностика минералов, имеющих спектры отражения такого рода, затруднений не вызывает.

Все перечисленные 10 типов включают спектры отражения как изотропных минералов, так и анизотропных минералов. У анизотропных минералов при выделении того или иного типа спектров за основу берутся спектры отражения для показателя R_m или R_g , если R_m определить не удается.

Кроме того, у анизотропных минералов выделяются еще два типа спектров, характерные для минералов, обладающих сильным двуотражением.

Тип 11. К этому типу относятся спектры отражения минералов, изменяющих оптический знак. Это явление заключается в том, что спектры отражения одного минерала, относящиеся к показателям R_{\max} и R_{\min} , пересекаются, т. е. для некоторой длины волны ΔR равно нулю. При этом параметр F для одних показателей может быть положительным, для других — отрицательным. В некоторых случаях знак F не изменяется, например у миллерита.

Тип 12. В этот тип выделяются минералы, обладающие сильной дисперсией двуотражения. Знак F при этом может быть любым. Амплитуда F для одних показателей отражения в 2—3 раза больше, чем для других.

У анизотропных минералов, относящихся к типу 12, существует еще одна особенность, связанная с величиной F . Так у одних минералов значения $F_g > F_p$ (антимонит), у других $F_g < F_p$ (айкинит). Эту особенность можно также выразить количественно через параметр G , который равен

$$G = F_g - F_p. \quad (14)$$

Знак G может быть как положительным, так и отрицательным. По знаку и величине G можно идентифицировать многие двуотражающие рудные минералы.

Дисперсия коэффициента отражения обуславливает и цвет рудных минералов, наблюдаемый в полированных шлифах, поскольку цветной оттенок в первом приближении соответствует той части спектра, где имеет место наибольшее отражение. Однако, если спектр отражения является объективной характеристикой минерала, то цвет в значительной степени — субъективное ощущение наблюдателя. Поэтому несколько исследователей даже при одинаковых условиях освещения и наблюдения будут воспринимать цветовой оттенок одного и того же минерала несколько по-разному в силу индивидуальных особенностей зрения. Существуют колориметрические методы анализа спектров отражения, позволяющие получить взаимосвязь между дисперсией отражения и зрительным восприятием цвета минерала. Эти методы применительно к задачам рудной микроскопии описаны в работе Х. Пиллера (1967). Результаты измерений отражения в видимой области после математической обработки могут быть представлены в трехмерной системе цветовых координат x, y, z , где координата x соответствует цвету, y — насыщенности, а z — яркости. Если величину z взять фиксированной, то координаты x и y можно нанести на хроматическую диаграмму, подобную той, которая показана на рис. 6.

По данным Х. Пиллера, почти все минералы, за исключением наиболее сильно окрашенных, ложатся близко к центру графика, т. е.

имеют слабо выраженный и мало насыщенный цветовой оттенок. Аналогичный вывод можно сделать, анализируя величины F для рудных минералов. По данным автора, у 130 минералов значения F лежат в пределах $\pm 5\%$ абс. Величина F также характеризует цветовой

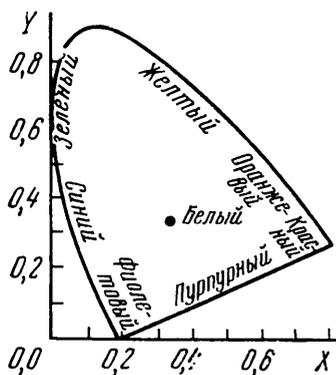


Рис. 6. Хроматическая диаграмма для оценки цвета рудных минералов в отраженном свете.

Координата x соответствует цвету, а y — его насыщенности, значения координат x и y получают путем математической обработки спектров отражения

оттенков минералов (рис. 7). На рис. 7 показано распределение некоторых рудных минералов по окраске в отраженном свете в зависимости от значений R для длины волны 580 нм и F . Из рис. 7 видно, что цветовой оттенок минерала зависит от величины и знака F . Так, для

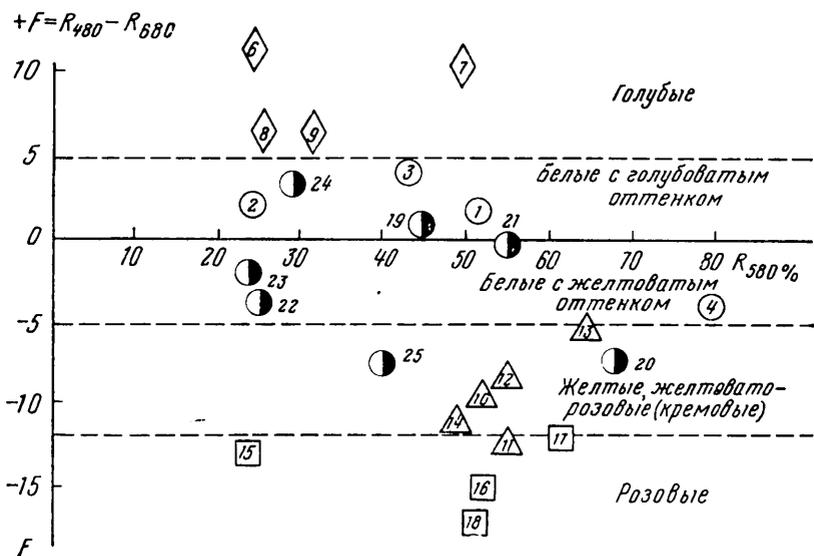


Рис. 7. Распределение некоторых рудных минералов по их окраске в отраженном свете в зависимости от параметров R_{580} ; $F = R_{480} - R_{680}$

I — белые и серовато-белые: 1 — арсенопирит, 2 — алабадин, 3 — галенит, 4 — платина, 5 — сфалерит; II — голубоватые и голубовато-белые: 6 — берцелланит, 7 — клаусталит, 8 — прустит, 9 — халькозин; III — желтые и желтовато-белые: 10 — годлевскит, 11 — миллерит, 12 — пирит, 13 — фрудит, 14 — халькопирит; IV — розовые и розовато-белые: 15 — борнит, 16 — брейтгауптит, 17 — мелонит, 18 — никелин; V — сложные (смешанные) цвета: 19 — айкиннит (кремово-белый), 20 — алтаит (зеленовато-белый), 21 — волинскит (бледно-голубовато-розовый), 22 — германит (буровато-розовый), 23 — станнин (серовато-белый с оливковым оттенком), 24 — теннантит (серовато-белый с зеленоватым оттенком), 25 — кубанит (желтый с розоватым оттенком)

минералов насыщенных голубоватых оттенков знак положителен, а амплитуда F превышает 5% . По мере уменьшения F оттенок делается менее насыщенным и цвет таких минералов кажется белым. У минералов с желтоватыми и розоватыми оттенками параметр F отрицателен.

По мере увеличения F насыщенность оттенка возрастает. Смешанные оттенки не могут быть выражены одной или двумя величинами F , однако и в этом случае знак и амплитуда F определяют преобладание в смешанном типе окраски того или иного тона.

Следует указать на те трудности, которые возникают при стремлении использовать цвет рудных минералов как объективный диагностический признак, даже путем использования колориметрических расчетов. Во-первых, зрительное восприятие цветового оттенка зависит не только от индивидуальных особенностей зрения, но и от типа микроскопа, точнее от оптической системы, которая применяется в том или ином микроскопе. Если в микроскопе используются, например, призмённые анализатор и поляризатор, то воспринимаемые в этом случае цвета минералов будут отличными от тех, которые наблюдаются при работе с пленочными поляроидами. Имеет значение плотность фильтров, тип объектива, поглощение света другими оптическими деталями. Во-вторых, даже при анализе цвета с помощью одного и того же микроскопа в одинаковых условиях освещения зрительные ощущения зависят от ассоциации минералов, срastaющихся с исследуемым. Так, галенит в отдельных крупных выделениях кажется белым, но в срастаниях с розовыми минералами имеет отчетливый голубоватый оттенок. Особенно изменяются воспринимаемые глазом оттенки у минералов со сложной формой спектра и относительно пологими $F_{\text{мал}}$. В-третьих, никакая математическая обработка не может увеличить объективных различий между спектрами отражения двух или более минералов, т. е. колориметрические методы не могут дать принципиально новой информации.

Именно по этим причинам зрительное ощущение цвета рудного минерала в отраженном свете трудно и практически невозможно использовать как надежный диагностический признак, так как субъективные данные, приводимые разными исследователями, несопоставимы и не могут быть выражены количественно. Колориметрические же методы позволяют лишь представить, какой оттенок имел бы исследуемый минерал при определенных условиях освещения и наблюдения. Влияние срастаний с другими минералами, а также реальные отклонения от средней чувствительности глаза при этом не учитываются.

Однако различие в цветовых оттенках минералов следует широко использовать как вспомогательный диагностический признак, облегчающий визуальную диагностику минералов начинающим исследователям. Именно из-за особой чувствительности глаза различать тончайшие нюансы цвета исследователь избавлен от необходимости определять каждое зерно, применяя точные объективные методы. Опыт и зрительная память позволяют легко выделить среди множества зерен рудных минералов в шлифе то, которое слегка отличается по оттенку и заслуживает детального исследования. В этих случаях зрительные ощущения подводят редко, да и то лишь тогда, когда наблюдается необычная или не встречавшаяся ранее ассоциация рудных минералов.

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, НАБЛЮДАЕМЫЕ ПРИ СКРЕЩЕННЫХ НИКОЛЯХ

Использование в рудной микроскопии поляризованного света дает возможность проводить исследования оптических свойств минералов как при одном николе, так и при скрещенных или не полностью скрещенных николях. Изотропные минералы при скрещенных николях в ортоскопическом ходе лучей кажутся темными, почти черными и не просветляются при вращении зерна. В сходящемся свете (коноскопический ход лучей), используя сильные объективы с большой

апертурой, можно наблюдать характерную для изотропного минерала поляризационную фигуру — черный крест на светлом фоне, как показано на рис. 8, а. При вращении изотропного зерна вокруг оптической оси микроскопа фигура не изменяется. Возникновение поляризационных фигур при коноскопических наблюдениях обусловлено как вращением плоскости колебаний света, возникающим при отражении, так и вращением, вызванным анизотропией оптических свойств. Для изо-

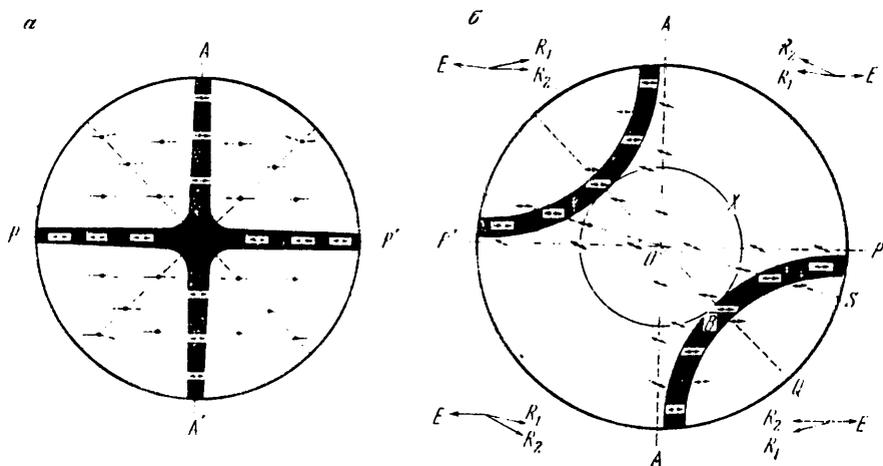


Рис. 8. Поляризационные фигуры изотропного (а) и анизотропного (б) минералов. PP' — плоскость поляризатора; $A'A'$ — плоскость анализатора. Стрелки показывают направления колебаний лучей, отраженных от различных точек поля зрения. Вращение, вызванное минералом, происходит по часовой стрелке. Малые диаграммы по краям чертежа иллюстрируют соотношения, которые имеют место в точках каждого квадранта, расположенных на пересечении окружности X с диагоналями, проходящими через квадранты под углом 45° к ортогональным диаметрам. E — азимут колебания падающего луча; R_1 — азимут колебания отраженного луча после вращения отражения; R_2 — азимут колебания отраженного луча после вращения отражения и вращения, вызванного анизотропией минерала

тропных минералов имеет место лишь вращение плоскости колебаний при отражении, поэтому черный крест не распадается при вращении зерна.

При коноскопических наблюдениях анизотропных минералов следует учитывать и вращение, обусловленное анизотропией. Когда сечение анизотропного минерала находится в одном из нормальных положений, то вращение плоскости колебаний, связанное с анизотропией, отсутствует. Поэтому в задней фокальной плоскости объектива виден черный крест, распадающийся на две изогиры при повороте анализатора. Возникновение такой поляризационной фигуры обусловлено только вращением плоскости колебаний, возникающим при отражении, т. е. в этом случае имеют место те же явления, что и для изотропных минералов. Однако для минералов моноклинной и триклинной сингонии в некоторых разрезах возможно проявление дисперсии погасания. В этом случае четкий черный крест наблюдается только в монохроматическом свете. При повороте сечения от положения угасания начинает проявляться вращение плоскости колебаний, обусловленное анизотропией. Оно действует и вдоль ортогональных диаметров в отличие от вращения отражения. Следовательно, темнота по этим направлениям отсутствует. В пределах квадрантов поля зрения имеет место суммарный эффект вращения. Направление вращения вследствие анизотропии постоянно для всех точек, а направление вращения отражения в двух парах противоположных квадрантов различное. В одной паре квадрантов оба вращения складываются и эти квадранты ярко освещены. В другой паре квадрантов оба вращения

имеют противоположные направления и вычитаются. При этом в некоторых точках оба вращения взаимно компенсируются и отраженный свет гасится анализатором.

В результате наблюдаемые две изогри (рис. 8, б) являются геометрическим местом точек, в которых произошла компенсация и сохранилось первоначальное направление колебаний PP' . В диагональных положениях сечения, т. е. при 45° к нормальному положению, расхождение изогр максимально. При дальнейшем вращении сечения изогры сближаются вплоть до полного восстановления креста, что соответствует положению погасания.

Ориентируя анизотропный минерал под 45° к его нормальному положению, можно восстановить крест путем соответствующего поворота анализатора из положения скрещивания. Угол поворота анализатора и будет характеризовать вращение, обусловленное анизотропией. У сильно поглощающих минералов необходимо учитывать влияние эллиптичности, т. е. измеренный таким способом угол вращения не является истинным значением угла вращения плоскости колебания. Поэтому Ю. Кэмерон предложил называть этот угол видимым углом вращения — $A_r = \gamma_{45}$. Из уравнения (15) следует, что

$$A_r = \sqrt{\frac{R_1}{R_3}} = \frac{1 - \operatorname{tg} \gamma_{45}}{1 + \operatorname{tg} \gamma_{45}}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что коэффициент анизотропии A_r является одной из констант анизотропных рудных минералов. При этом имеется в виду, что значения A_r определены для главных сечений минералов. Весьма важно, что видимый угол вращения может быть определен визуально по методике, предложенной Ю. Кэмероном (1966), и рассчитан на основе измеренных показателей отражения, т. е. имеется возможность сопоставления измеренных значений R_1/R_3 .

Вследствие дисперсии показателей отражения видимый угол вращения также испытывает дисперсию, из-за которой изогри имеют цветные каймы. Однако окраска кайм зависит не только от дисперсии угла вращения, вызываемого анизотропией минерала, но и от дисперсии вращения отражения. В общем случае необходимо также учитывать дисперсию эллиптичности и дисперсию погасания. Последняя проявляется, впрочем, только для триклинных и моноклинных (за исключением некоторых срезов) минералов. Как видно, интерпретация наблюдаемых эффектов в сходящемся свете оказывается достаточно сложной.

Анализ оптических свойств рудных минералов в сходящемся свете следует широко использовать для отличия изотропных минералов от анизотропных, при поисках круговых изотропных сечений анизотропных минералов, а также для правильной установки анизотропных сечений в положение погасания. Иногда могут быть полезны и данные об угле вращения, полученные путем визуальных наблюдений. Однако предпочтительнее измерения спектров отражения, поскольку они выполняются намного быстрее, точнее и в большем диапазоне длин волн. Зная же главные показатели отражения для данного сечения, легко рассчитать по уравнению (15) видимый угол вращения для любой длины волны.

В ортоскопическом ходе лучей при повороте анизотропного зерна через каждые 90° наблюдаются четыре положения минимума интенсивности отраженного света. Эти положения соответствуют «нормальным» положениям анизотропного сечения. Из-за частичной эллиптической поляризации отраженного света угасания бывают неполными, что наблюдается и у изотропных минералов, обладающих высокими значениями R и k (медь, золото, серебро и др.), При частичном скре-

шивании положения угасания фиксируются неточно через 90° (в крайнем случае через 180°). В четырех положениях, отстоящих от нормальных на 45° , наблюдается максимум интенсивности отраженного света. Эти положения называются диагональными. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, сложно зависит от основных показателей преломления и поглощения данного сечения минерала, от азимута большой оси сечения и степени эллиптичности волн, проникающих в минерал, а также от коэффициента преломления среды, в которой ведутся наблюдения. Дисперсия оптических констант приводит к тому, что интенсивность прошедшего через анализатор света для разных волн будет различной. Вследствие этого в диагональном положении зерно кажется окрашенным в тот или иной цвет, наблюдается цветовой эффект анизотропии. Цветовые эффекты могут возникать и вблизи от нормального положения сечения, т. е. при небольших поворотах по часовой или против часовой стрелки от положения погасания. Если зерно установлено в нормальном положении, то при небольшом повороте анализатора от положения скрещивания в ту или другую сторону также могут наблюдаться цветовые эффекты. Во всех перечисленных случаях фиксируемые глазом цветовые оттенки минерала могут быть отличными друг от друга. С теоретической точки зрения правильнее называть цветовым эффектом анизотропии — эффект появления цветового оттенка при диагональном положении зерна и точно скрещенных николях. Однако на практике под цветовыми эффектами анизотропии понимают эффекты, возникающие при повороте зерна от положения угасания.

Цветовые эффекты анизотропии — один из характерных диагностических признаков многих анизотропных рудных минералов, но поскольку их оценка осуществляется визуально, то здесь уместны все те замечания, которые были высказаны выше относительно цвета в отраженном свете. Поэтому необходимы и объективные измерения цветовых эффектов анизотропии, позволяющие получать точные и сопоставимые данные.

Точная формула, описывающая интенсивность света, отраженного от анизотропного минерала и прошедшего через анализатор, была получена М. Береком (Berek, 1937). Однако ее практическое использование затруднялось тем обстоятельством, что для расчетов необходимо было знать точные значения оптических констант n и k для исследуемого сечения. Усовершенствуя методы расчета оптических свойств анизотропных рудных минералов, предложенные М. Береком, Л. Н. Вяльсов (1975) предложил объективные методы измерения цветовых эффектов анизотропии, наблюдающиеся при диагональном положении зерна. Те же методы могут быть использованы и для оценки цветовых эффектов при любом положении анизотропного минерала и анализатора.

Интенсивность света, прошедшего через скрещенные николи при диагональном положении сечения, — $(R_+)_{\max}$ можно вычислить по следующей формуле:

$$(R_+)_{\max} = \bar{R}_{\text{изм}} - \bar{R}_{(\parallel)}. \quad (16)$$

Здесь $\bar{R}_{\text{изм}}$ — коэффициент отражения, измеренный с одним николем при диагональном положении зерна; $\bar{R}_{(\parallel)}$ — коэффициент отражения, измеренный при параллельных николях и том же положении зерна. Измерения $\bar{R}_{\text{изм}}$ и $\bar{R}_{(\parallel)}$ выполняют с помощью обычной фотометрической аппаратуры и микроскопа, оснащенного вращающимся анализатором. При измерениях используют тот же комплект эталонов, учитывая, что отражение изотропного эталона при параллельных николях такое же, как и при одном николе. Используя низкоотражающие эта-

лоны, а также эталонные сечения анизотропных минералов с вычисленными величинами $(R_+)_{\max}$, можно вести детальные исследования оптических свойств и при скрещенных николях. Естественно, что в этом случае чувствительность аппаратуры должна быть выше обычной на один-два порядка. Например, легко получить серию кривых (R_+) при повороте сечения от нормального положения на фиксированные углы.

Николи при этом точно скрещены. Другая серия кривых получится при нормальном положении зерна и повороте анализатора на фиксированные углы. Третья серия будет наблюдаться при одновременном повороте зерна и анализатора. Теоретически все указанные кривые могут быть вычислены, хотя зависимости от n , k и других параметров очень сложны. Однако анализ показывает, что для расчета требуются точные значения n и k , которые опять-таки вычисляются по данным R , измеренным в воздухе и иммерсии. Поэтому прямые измерения указанных величин (R_+) будут более точными, чем вычисляемые по соответствующим уравнениям. Учитывая, что даже у близких по оптическим свойствам анизотропных минералов характер дисперсии n и k может быть несколько различным, следует ожидать, что объективная оценка цветовых эффектов даст дополнительную информацию, которая позволит однозначно диагностировать сходные рудные минералы.

ВНУТРЕННИЕ РЕФЛЕКСЫ

У прозрачных и полупрозрачных минералов при скрещенных николях или косом освещении иногда наблюдаются своеобразные световые блики — так называемые внутренние рефлексy. Они обусловлены тем, что падающий свет проходит в глубь прозрачного минерала и испытывает отражение под другими углами от трещин или иных дефектов внутри минерала. При этом первоначальное направление колебаний света может измениться (особенно это характерно для оптически активных минералов, таких, как кварц, киноварь) и часть света пройдет через анализатор. Внутренние рефлексy имеют яркую окраску в красноватых, коричневатых, оранжевых, реже зеленых и синих тонах. У нерудных минералов обычно наблюдаются бесцветные внутренние рефлексy. Поскольку внутренние рефлексy обнаруживаются лишь у ограниченного числа рудных минералов, то они имеют диагностическое значение. У минералов с аномальной дисперсией отражения, относящихся к 8 и 9 типам (см. рис. 5), внутренние рефлексy не наблюдаются. Отсутствуют они и у минералов с значениями $R > 44\%$.

С физической точки зрения цвет внутренних рефлексов характеризует начало края поглощения, т. е. ту область спектра, где прозрачность минерала резко падает, а значения R соответственно сильно возрастают. Фотометрические исследования внутренних рефлексов позволяют приблизительно оценить ширину запрещенной зоны рудного минерала — одну из фундаментальных констант твердых тел. В кристалле происходит объединение отдельных энергетических уровней электронов в энергетические зоны, состоящие из множества близрасположенных уровней. Нижнюю полностью заполненную зону называют валентной зоной, верхнюю — зоной проводимости. Между ними находится запрещенная энергетическая зона. Энергетический зазор между потолком валентной зоны и дном зоны проводимости называют шириной запрещенной зоны E_g , которая измеряется в электрон-вольтах. Зная длину волны, можно вычислить соответствующую этой длине энергию фотонов по формуле

$$E = \frac{1,24}{\lambda (\mu)}. \quad (17)$$

Когда энергия квантов мала и не может возбудить электрон для перехода из валентной зоны в зону проводимости, световая волна слабо взаимодействует с кристаллом, и он будет прозрачен для этих волн. Это явление характерно для нерудных минералов, у которых $E_g \approx 3$ эВ, что соответствует коротковолновой части спектра. Рудные минералы, имеющие ширину запрещенной зоны 2 эВ, будут прозрачны для фотонов, имеющих энергию < 2 эВ. Однако, начиная с 2 эВ, значения k будут резко возрастать — фотоны поглощаются и минерал становится непрозрачным. Поэтому цвета внутренних рефлексов будут определяться длинами волн, большими 620 нм ($E < 2$ эВ), т. е. будет преобладать красная составляющая спектра. По мере уменьшения значений E_g интенсивность внутренних рефлексов падает, а окраска изменяется от красной до темно-красной. Следовательно, у минералов с $E_g < 1,7$ эВ внутренние рефлексы будут наблюдаться лишь в инфракрасном микроскопе. Такова простейшая физическая интерпретация возникновения эффекта внутренних рефлексов.

Влияние внутренних рефлексов может исказить результаты измерений отражения прозрачных и полупрозрачных рудных минералов, что необходимо учитывать путем фотометрической оценки интенсивности рефлексов при скрещенных николях. Более сложен учет рефлексов при исследовании анизотропных минералов. В этом случае зерно устанавливают на погасание по коноскопической поляризационной фигуре. Измеряется интенсивность рефлексов при нормальном положении шлифа и вносятся соответствующие поправки, если необходимо измерить R при диагональном положении зерна. Более простым способом исключения влияния рефлексов является использование пучков с малой апертурой, а также поиск участка зерна, где внутренние рефлексы не проявлены.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Коэффициент отражения R , как уже указывалось, есть физическая величина, характеризующая отношение интенсивности отраженного света к интенсивности падающего, т. е. для определения R необходимо и достаточно провести два измерения. Методы определения R , в основе которых лежит этот принцип, называются прямыми, а значения R , получаемые при использовании прямых методов, принято называть абсолютными. Однако коэффициент отражения минерала можно определить иначе, используя, например образец-эталон, для которого тем или иным путем установлены абсолютные значения R . Тогда достаточно измерить интенсивность света, отраженного от эталона $I_{эт}$, и интенсивность света, отраженного от минерала I_m . Расчет R минерала ведется по формуле, которую следует считать идеальной

$$R_m = \frac{I_m}{I_{эт}} \cdot R_{эт}. \quad (18)$$

Такого рода измерения принято называть сравнительными. Сравнительные методы также позволяют найти абсолютные значения R_m , если известны абсолютные значения $R_{эт}$. Когда интенсивность света, отраженного от минерала, сравнивается с интенсивностью света, отраженного от эталона, для которого неизвестны абсолютные значения R , то коэффициент отражения последнего условно принимают за 100%. В этом случае получают относительные значения коэффициента отражения минерала, а измерения R называют относительными.

Интенсивности отраженного света I_m и $I_{эт}$ могут быть оценены либо в процессе визуальных наблюдений — субъективные методы оценки, либо в процессе измерений, выполняемых посредством фото-

приемников, которые преобразуют световую энергию в электрическую — объективные методы регистрации. Субъективные методы в отличие от объективных не позволяют определить отдельно значения I_M и $I_{от}$, что является одним из существенных их недостатков. В рудной микроскопии используются оба метода оценки интенсивностей, но наиболее широко распространены объективные фотоэлектрические методы измерения R .

В 1930 г. французский ученый Орсель создал фотоэлектрический окуляр и разработал объективный сравнительный метод исследования оптических свойств рудных минералов. Используя этот метод, Орсель получил значения R в видимой области спектра для некоторых широко распространенных рудных минералов, определил их осноть, оптический знак, двуотражение, вычислил по данным измерений R в воздухе и иммерсии оптические параметры n и k .

Окуляр Орделя мог быть использован при любом способе освещения полированного шлифа, т. е. с помощью призмы Наше или пластинки Бека. Система Орделя относится к типу однолучевых приборов. Это значит, что свет, отраженный от образца, а затем от эталона, проходит одну и ту же оптическую систему и регистрируется одним и тем же фотоприемником. Следовательно, оптическая длина пути остается неизменной при замене образца эталоном, и наоборот. Этот принцип используется и в современных конструкциях микрофотометрических насадок. В последующие годы многими исследователями из разных стран были разработаны конструкции фотоэлектрических окуляров, насадок и микрофотометрических приборов.

Большинство из них описано в монографии Л. Н. Вяльсова (1976), например, ФМЭ-1, ФМЭП, ПООС-1, МПМ-01 и др. Спектральный диапазон измерений R , зависящий от источника света, чувствительности ФЭУ (фотоэлектронный умножитель), линейности и т. д., составляет для ФМЭ 470—640 нм.

В настоящее время фирма «ЛОМО» перешла к выпуску фотометрической насадки ФМЭП.

В 1964 г. во Всесоюзном научно-исследовательском геологическом институте (ВСЕГЕИ) была разработана микрофотометрическая насадка ПООС-1 (авторы разработки В. Е. Клейнбок и Г. Н. Бурэ) по схеме, предложенной Н. В. Королевым. С 1966 г. насадка ПООС-1 серийно изготавливается. Прибор ПООС-1 отличается от ФМЭ наличием малогабаритного монохроматора с дифракционной решеткой. Описание прибора ПООС-1 приведено в работе Г. Н. Бурэ, В. Е. Клейнбока (1965). Спектральный диапазон измерений R на приборе ПООС-1 равен 400—700 нм, но в красной части спектра чувствительность резко падает. Приборы ФМЭ-1, ФМЭП и ПООС-1 относятся к приборам однолучевого типа и предназначены для сравнительных измерений. Для получения абсолютных значений R минералов нужен соответствующий комплект эталонов.

Аналогичные приборы выпускаются и многими зарубежными фирмами. Наилучшим из них является микрофотометр МПМ-01, разработанный фирмой «Оптон» (ФРГ). В этом приборе световой поток модулируется с помощью obtюратора, т. е. измерения ведутся на переменном токе, что повышает помехоустойчивость отсчетно-регистрирующей системы. В качестве диспергирующего элемента используется непрерывный интерференционный фильтр, позволяющий изучать оптические свойства минералов в диапазоне 400—700 нм. Высокая производительность при измерениях R достигается тем, что в регистрирующей системе используется малогабаритный компьютер с цифрочастотным устройством. Наличие компьютера при высокой стабильности прибора позволяет избежать операции по замене образца эталоном для

каждой длины волны. С этой целью в память компьютера предварительно вводятся абсолютные значения R эталона для нужных длин волн. Затем для этих же длин волн определяется интенсивность света, отраженного от эталона. Эти данные вводятся в компьютер, и машина вычисляет необходимые поправочные коэффициенты. Дальнейшие вычисления осуществляются автоматически, причем цифропечатающее устройство печатает на бланке абсолютные значения R минерала для каждой длины волны и отображает форму спектра отражения. К сожалению, высокая стоимость прибора МРМ-01 препятствует его широкому использованию при рядовых исследованиях и диагностике рудных минералов по оптическим свойствам.

Полная автоматизация измерений R достигнута в двулучевом микроспектрофотометре МСФП, разработанном фирмой ЛОМО на основе схемы прибора «Блеск», описанной в работе Л. С. Агроскина, Г. В. Папаяна и Л. П. Раутиана (1972). Измерения R на приборе МСФП занимают несколько минут, причем спектр отражения в абсолютных единицах записывается самописцем. МСФП — единственный в мире двулучевой поляризационный микроспектрофотометр, специально предназначенный для исследования оптических свойств микрообъектов, и его выпуск является крупным достижением отечественного приборостроения. Однако, как и МПМ-01, прибор МСФП из-за высокой стоимости пока доступен лишь отдельным лабораториям. В связи с этим необходимо создать надежный высокопроизводительный микроспектрофотометр, относительно простой по конструкции и доступный всем исследователям, занимающимся изучением вещественного состава руд. По-видимому, такой прибор будет разработан в ближайшие годы, и объективная диагностика рудных минералов по оптическим свойствам в отраженном свете станет обычным видом исследования в рудной микроскопии.

Эталоны отражения. Как уже указывалось выше, приборы для измерения отражения предназначены для сравнительных измерений R , поэтому при определении абсолютных значений коэффициентов отражения рудных минералов требуется соответствующий комплект эталонов.

К веществам, которые могут служить эталонами, предъявляется ряд требований. Они должны быть оптически изотропными и однородными, иметь одинаковые оптические характеристики для разных участков поверхности. Поверхность эталона либо должна быть идеально отполированной, либо должна быть получена напылением или осаждением металла на подложку с тем, чтобы свести к минимуму диффузное отражение. Эталоны должны быть химически стойкими, т. е. значения R не должны изменяться со временем. С целью стандартизации условий измерений оптических свойств рудных минералов в 1962 г. при Международной минералогической ассоциации была создана Международная комиссия по рудной микроскопии (КРМ). Одним из этапов ее деятельности явилось создание единой серии эталонов для измерения R в интервале от 0 до 100%. Комиссией были рекомендованы следующие вещества для изготовления эталонов:

		Диапазон значений R , %
Нейтральное стекло		0—15
Синтетический карборунд	SiC	15—25
Кремний*	Si	25—45
Пирит	FeS ₂	45—65
Металл, напыленный на стекло		65

* В последние годы КРМ рекомендует использовать в качестве эталона карбид вольфрама вместо кремния и пирита.

Отражение эталонов по инициативе КРМ должно было измеряться в Национальной физической лаборатории (НФЛ) Англии прямыми методами.

По условиям аттестации R эталонов в НФЛ, угол падения света на образец составляет 7° , апертурный угол падающего пучка $\sim 4^\circ$, размер измеряемого участка 2 мм. В то же время при измерениях R с помощью микроспектрофотометров используются участки, имеющие от 5 до 100 мк. Отношение между двумя площадями колеблется от 400 до 160 000. Поэтому к однородности эталона предъявляются повышенные требования. В настоящее время комплект международных эталонов находится в лаборатории минераграфии Института геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии АН СССР (ИГЕМ). Он включает нейтральное стекло, карборунд и кремний. Абсолютные значения R карборунда и кремния для разных длин волн приведены в табл. 1, там же указаны значения R пирита, которые также были измерены прямыми методами.

Таблица 1

**АБСОЛЮТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ R ДЛЯ КАРБОРУНДА, КРЕМНИЯ И ПИРИТА
В ДИАПАЗОНЕ 440—660 нм***

Длина волн, нм	Карборунд SiC	Кремний Si	Пирит FeS ₂	Длина волн, нм	Карборунд SiC	Кремний Si	Пирит FeS ₂
440	21,1	42,9	41,2	560	20,3	36,5	54,3
460	20,9	41,2	44,4	580	20,2	35,9	54,7
480	20,8	39,9	47,8	600	20,1	35,5	54,7
500	20,6	38,8	50,3	620	20,0	35,0	54,8
520	20,5	37,9	52,1	640	20,0	34,7	55,2
540	20,4	37,1	53,7	660	20,0	34,4	55,8

* Значения для карборунда и кремния получены в Национальной физической лаборатории Англии, пирита — в ИГЕМ АН СССР на установке «ПИОР».

В качестве эталонов можно использовать как указанные, так и другие материалы или минералы, но тогда их оптические характеристики должны быть измерены прямыми методами или получены путем сравнительных измерений с использованием международных эталонов. Если по каким-либо причинам сравнительную аттестацию провести не удастся, то при условии хорошего качества полированной поверхности карборунда, кремния и пирита можно полагать, что действительные значения R «вторичных» эталонов будут незначительно отличаться от приводимых в табл. 1, т. е. для последующих расчетов можно воспользоваться табличными значениями R . Это позволит произвести оценку показателей отражения рудных минералов с ошибкой 5—10% отн. Однако для точных измерений R наличие комплекта достоверных эталонов является совершенно необходимым условием. В табл. 1 даны значения R некоторых важнейших эталонов.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Измерение спектров отражения рудных минералов является основным методом в рудной микроскопии, с помощью которого удается получить наиболее полную информацию об оптических свойствах. Однако существуют и другие менее известные методики исследования оптических свойств поглощающих минералов, дающие качественно иную информацию, например, информацию об осности и оптическом знаке,

ширине запрещенной зоны, форме поверхности показателя отражения и т. д. Все эти методы также основаны на оценке интенсивности отраженного света при одном никеле или при скрещенных николях, но эталонов с известными абсолютными значениями R в ряде случаев не требуется, а систематическими погрешностями аппаратуры можно пренебречь. Поэтому такого рода исследования должны получить более широкое распространение и на них необходимо обратить внимание начинающих исследователей.

Способы исследования оптических свойств, основанные на визуальных наблюдениях в сходящемся свете, не перспективны, так как та же информация может быть получена с большей точностью и с меньшими затратами времени путем обработки измеренных показателей отражения.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ В ВОЗДУХЕ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ПАДЕНИИ СВЕТА. ИСПЫТАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИБОРА

Основные правила работы с микрофотометрической аппаратурой изложены в соответствующих заводских инструкциях и предписаниях, поэтому мы не будем их рассматривать, считая, что прибор полностью подготовлен к проведению измерений. Однако каждому исследователю надо убедиться в том, что фактические характеристики прибора отвечают паспортным данным. При этом имеется в виду стабильность и воспроизводимость отсчетов, дрейф нуля, утомляемость ФЭУ и т. д. Проверки такого рода абсолютно необходимы как для заводских приборов, так и для установок лабораторного типа, собранных из отдельных узлов и блоков.

Вначале проверяется стабильность показаний отсчетно-регистрирующего устройства и дрейф нуля. Для этого на столик микроскопа устанавливается наиболее высокоотражающий эталон или минерал, например пирит, галенит, халькопирит. Снимают показания с отсчетного устройства для той длины волны, где отмечается наиболее высокая чувствительность фотоприемника. Снятие отсчетов производят через каждые 5—10 мин, контролируя одновременно и место нуля. С помощью самопишущего потенциометра типа ЭПП-09 или КПС-4 удобно фиксировать изменение отсчетов при относительно малой скорости движения диаграммной ленты. Положение нуля* регистрируется после перекрытия светового потока, попадающего на фотоприемник специальным затвором или шторкой. При этом установка образца и условия измерений должны сохраняться неизменными, чтобы исключить влияние дополнительных погрешностей. Обычно в инструкциях указано время непрерывной работы прибора, поэтому отсчеты снимают в течение этого промежутка.

В процессе проверки можно выяснить, что изменение показаний обусловлено дрейфом нуля, т. е. абсолютное число делений сохраняется неизменным в течение всего периода работы прибора. Это свидетельствует о высокой стабильности источника света и всех остальных блоков. На практике часто показания изменяются в тех или иных пределах. Соответствующая обработка полученных отсчетов позволяет оценить случайную ошибку, обусловленную нестабильностью прибора, и сравнить ее с паспортными данными или намеченными характеристиками. Если отклонения превышают допустимые нормы при повторении измерений в течение нескольких дней, значит прибор неисправен.

* В ряде отсчетных устройств дрейф нуля можно измерить, если он происходит по направлению увеличения отсчетов, тогда место нуля преднамеренно сдвигается, с тем, чтобы имелась возможность контроля дрейфа нуля и в обратную сторону.

поэтому необходимо обратиться за консультацией к заводу-изготовителю.

У некоторых приборов при незначительном дрейфе нуля показания постепенно уменьшаются и иногда довольно существенно. Это явление чаще всего связано с утомляемостью фотокатода ФЭУ. Этот эффект можно уменьшить кратковременной засветкой ФЭУ интенсивным потоком света, но полностью избавиться от него в приборах однолучевого типа не всегда удается. В этом случае строят график, по оси абсцисс которого откладывается время в минутах, а по оси ординат—соответствующие показания прибора. Анализ графика позволяет установить период утомляемости фотокатода ФЭУ, показать, что отсчеты либо совсем не изменяются, либо изменяются в допустимых пределах. Аналогичные измерения выполняются в коротковолновой и длинноволновой частях спектра.

Изменение показаний свидетельствует * или о недостаточно высокой стабильности питания лампы накаливания, или о ненадежности ФЭУ и приемно-регистрирующего блока. Поэтому прежде всего проверяют стабильность источника света, подключая его к другому стабилизатору. При отсутствии стабилизатора в опак-иллюминатор микроскопа вставляют лампочку накаливания малой мощности, которая питается от комплекта низковольтных батарей или аккумуляторов. Медленная разрядка батарей не препятствует выяснению причин кратковременных флуктуаций отсчетов. Появление таких флуктуаций свидетельствует о неисправности именно приемно-регистрирующего блока. Галопен и Генри рекомендуют использовать для проверки стабильности прибора радиоактивный фосфоресцирующий источник, дающий постоянный световой поток.

Если устройство опак-иллюминатора не позволяет использовать маломощную лампу накаливания, а радиоактивный источник света отсутствует, то можно изготовить простейший имитатор стабильного светового потока. С этой целью применяют низковольтную лампочку (3,5 В), точечную или ирисовую полевую диафрагму, объектив с тубусом 160 мм, маленькое зеркальце и осветительную линзу. Оптическая ось имитатора располагается перпендикулярно оптической оси микроскопа. Зеркальце устанавливается под углом 45° к обеим осям; монтируют его во втулку, которая надевается на корпус объектива имитатора. Размер полевой диафрагмы выбирают в соответствии с диаметром диафрагмы опак-иллюминатора микроскопа. Если фотометрическая насадка типа ФМЭ или ПООС смонтирована на штативе микроскопа МИН-8, то вместо конденсорной системы устанавливают опак-иллюминатор типа ОИ-8 или ОИ-12, который и используется в качестве имитатора.

Проверив стабильность показаний прибора, необходимо убедиться в том, что линейность характеристик также не изменяется со временем. С этой целью снимают показания ** для двух эталонов, например для карборунда и пирита. Эталоны устанавливают поочередно, измеряя один и тот же участок. При этом следует удостовериться, что плоскость эталона перпендикулярна оптической оси микроскопа, чтобы избежать погрешностей, обусловленных установкой эталонов. Такую проверку также выполняют при длительном режиме эксплуатации в течение одного дня. Целесообразно измерять отношение коэффициентов отражения двух эталонов (2—3 раза) и на протяжении более длительного периода. Тогда можно оценить надежность аппаратуры, а также заметить резкие колебания, свидетельствующие либо о неус-

* Необходимо учитывать и класс точности отсчетного прибора.

** Перед каждым снятием показания обязательно корректируют положение нуля.

правности отдельных блоков, либо об изменении характеристик эталонов.

Если отношение отсчетов $N_1:N_2$ сохраняется неизменным в течение 5—6 ч работы, то и рабочие измерения можно производить в этот период. Фиксируемые флуктуации должны быть случайными и укладываться в пределы паспортных данных. Хуже, если $N_1:N_2$ медленно уменьшается или увеличивается. Это свидетельствует о систематической погрешности, изменяющейся со временем. В этом случае также строят график, учитывающий изменение $N_1:N_2$ в зависимости от времени работы. Интервал, на протяжении которого вариации $N_1:N_2$ соответствуют паспортным данным, и определит максимальную продолжительность работы прибора в течение одного дня. Аналогично проверяются приборы с внутренним стандартом и двулучевые микроспектрофотометры.

Далее проверяется перпендикулярность оптической оси микроскопа к плоскости его предметного столика. Для этого на столик микроскопа устанавливается тщательно изготовленное плоскопараллельное зеркало. Центрируют объектив при помощи юстировочных винтов. Затем прикрывают апертурную диафрагму и при удаленном окуляре наблюдают ее изображение в задней фокальной плоскости объектива. Если изображение диафрагмы сильно смещено и движется по кругу, то имеется перекося предметного столика микроскопа. Этот дефект исправляется в заводских условиях. При правильной сборке столика изображение диафрагмы при визуальном наблюдении не смещено и в процессе фотометрических измерений изменений показаний при вращении предметного столика не происходит. Для проверки прессика используют достаточно большую однородную и хорошо отполированную поверхность кристалла пирита. Пирит устанавливают на предметное стекло с пластилином, и производят действия, рассмотренные выше. Изменение показаний прибора свидетельствует о необходимости тщательной подгонки прессика.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ИЗОТРОПНЫХ МИНЕРАЛОВ

Перед тем как измерить спектры отражения конкретных минералов устанавливают количество рассеянного света при удаленном объекте и заданных условиях измерений. Полученный отсчет вычитают из показаний прибора, полученных при измерении спектров отражения минерала R_m и эталона $R_{эм}$. Если уровень рассеянного света невелик, то этой поправкой пренебрегают, так как погрешность взаимно компенсируется ошибкой, обусловленной пороговой чувствительностью. Ошибку следует учитывать и при большом уровне рассеянного света, но фактическая суммарная поправка зависит от конструктивных особенностей конкретного прибора.

При однолучевом методе измерений главным условием получения относительно точных результатов является постоянство всех параметров при замене образца эталоном и наоборот. Однако при переходе от одной длины волны к другой в результате влияния различных факторов отсчеты изменяются, т. е., чтобы сохранить оптимальный уровень показаний, необходимо изменить условия измерений и соответственно чаще производить установку эталона. Радикально эта проблема решается лишь в приборах с внутренним стандартом и в двулучевых микроспектрофотометрах. На практике чаще используют специальные столики (столик Ланхама, описанный в монографии Галопена и Генри, 1975), мостики и другие приспособления. При этом надо учитывать, что при измерении спектра отражения изотропного минерала и этало-

на необходимо найти такое положение предметного столика, чтобы показания прибора отвечали максимальным. Выполнение этого условия хотя и усложняет сохранение постоянства установки исследуемого образца и эталона, но уменьшает ошибку, обусловленную незначительным наклоном препарата *.

При отсутствии приспособлений для быстрой замены образца эталоном: следует применять блок нелинейности, состоящий из переключателя и набора переменных проволочных резисторов. Число резисторов соответствует числу длин волн, при которых определяются величины спектра отражения. Блок подключается к отсчетному устройству, настраивают его с той длины волны, при которой показания прибора минимальны (это обычно синяя часть спектра). При изменении длины волны отсчеты резко увеличиваются. В этом случае подгонкой соответствующего резистора устанавливают оптимальный отсчет. Затем переходят к другой длине и действия повторяют. При смене длины волны подключают нужный резистор с помощью переключателя. Применение блока нелинейности позволяет провести измерения спектра отражения для всех длин волн (в начале для образца, а затем и для эталона). Стабильность показаний, разумеется, должна сохраняться в течение этого периода. При подключении резисторов электрические параметры изменяются, следовательно, необходимо фиксировать и положение нуля.

Исследование оптических свойств рудных минералов можно проводить при полностью открытой апертурной диафрагме осветителя. Однако, чтобы избежать погрешностей, обусловленных эффективным углом падения пучка (особенно при использовании призматического рефлектора), необходимо выполнить измерения при двух положениях поляризатора: 0 и 90° . Соответственно, для каждого из указанных положений проводят измерения $R_{\text{эт}}$. После обработки полученных данных найденные значения $R_{\text{м}}$ усредняют. Если результаты измерений отличаются друг от друга незначительно (в пределах точности), систематической ошибкой за счет эффективного угла можно пренебречь. В этом случае ограничиваются измерениями спектра отражения при одном положении поляризатора или устанавливают поляризатор под 45° к плоскости симметрии микроскопа.

Начинающим исследователям рекомендуется провести серию измерений при различных установках поляризатора, используя несколько эталонов с максимальной разницей между величинами R . Сравнивая данные, полученные при разных апертурах светового пучка, можно исследовать величину ошибки, обусловленную наличием эффективного угла падения, и степень ее исключения расчетным путем и установкой поляризатора под 45° .

При измерении спектров отражения изотропных минералов, обладающих внутренними рефлексами, нужно учитывать влияние дополнительного светового потока, обусловленного отражением от плоскостей, находящихся в толще кристалла на некотором удалении от полированной поверхности. Если не учитывать внутренние рефлексы, то значения R могут быть завышены. Поскольку внутренние рефлексы наблюдают в белом свете при скрещенных николях, то исследователь в большинстве случаев может выбрать подходящий для измерений участок, который кажется наиболее темным. Если возможность выбора такого участка отсутствует, необходимо исследовать влияние внутренних рефлексов и внести соответствующую поправку.

* Для исключения ошибок, обусловленных наклоном зерна, необходимо использовать специальные наклоняющиеся столики.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МИНЕРАЛОВ

При исследовании оптических свойств анизотропных минералов особое внимание следует обращать на правильную установку шлифа относительно оптической оси микроскопа, так как определение значений R_g и R_p требует вращения предметного столика. Если исследователь не может правильно установить шлиф с помощью специальных приспособлений и столиков, то можно рекомендовать следующий прием исключения ошибки, обусловленной наклоном столика. Предположим, что при измерении основных показателей отражения сечения анизотропного минерала получены отсчеты для R_g , равные 52 дел. и 48 дел. (при повороте на 180°), а для R_p соответственно 38 дел. (максимальный отсчет из двух). Тогда приближенно можно считать, что при повороте сечения на 90° занижение данных составит $\frac{52-48}{2} = 2$ дел. Сле-

довательно, более правильный отсчет для показателя R_p будет равен 40 дел. Если применить устройство для выравнивания шлифа, то можно измерить величины R_g и R_p с большей точностью и оценить степень исключения ошибки при указанном выше способе. Интенсивность внутренних рефлексов для анизотропных минералов исследуется так же, как и для изотропных, но только измерения проводятся при нормальных положениях сечения. Поскольку наличие внутренних рефлексов свидетельствует о незначительном коэффициенте поглощения, то эллиптичность волн, проникающих в кристалл, пренебрежимо мала. Поэтому световой поток, фиксируемый при скрещенных николях для сечения, находящегося в нормальном положении, может быть обусловлен только внутренними рефлексами.

Как указывалось выше, измерение коэффициентов отражения при одном поляризаторе и в параллельных николях дает возможность определить и параметры анизотропии. Следовательно, для получения максимальной информации об оптических свойствах анизотропных минералов необходимо выполнить следующий комплекс операций.

Во-первых, тщательно проверить установку поляризатора и анализатора. Плоскость, в которой лежат оптические оси осветителя и микроскопа, является плоскостью симметрии микроскопа, и направление колебаний поляризатора должно быть либо перпендикулярно к этой плоскости (0°), либо параллельно ей (90°). Соответственно и анализатор должен устанавливаться в два положения. Предварительно на столик микроскопа кладут шлиф с биотитом и наблюдают его в проходящем свете, используя при этом включенный анализатор. Пусть направление вертикальной нити окуляра (С—Ю) совпадает с направлением колебаний, пропускаемых анализатором, и перпендикулярно к плоскости симметрии микроскопа. В этом случае кристалл биотита будет казаться темноокрашенным. Затем на столик микроскопа устанавливают шлиф с пиритом, включают поляризатор и поворачивают его до положения полного угасания. Для проверки используют коноскопическую фигуру, наблюдаемую при удаленном окуляре. Появление четкого черного креста свидетельствует о том, что николи скрещены. Для коноскопических наблюдений нужно применять сильные объективы с большой апертурой.

Затем анализатор выключают и измеряют интенсивность потока, отраженного от пирита. Поворачивают поляризатор в одну и другую сторону относительно первого положения на небольшие углы и фиксируют отсчеты прибора. Находят два положения, для которых отсчеты прибора совпадают. Среднее между этими позициями поляризатора будет соответствовать точной его установке на 90° . После фиксации по-

ляризатора проверяют положение анализатора с помощью коноскопической фигуры или фотометрическими измерениями. Для этого также находят такие две позиции, в которых показания прибора одинаковы. Среднее между ними отвечает точной установке анализатора в скрещенное положение. Затем, используя шлиф с биотитом, разворачивают крест нитей соответственно найденному положению анализатора.

После установки поляризатора и анализатора переходят к измерениям спектров отражения исследуемых выделений минералов. Вращая столик микроскопа, отмечают соответствие показаний прибора основным показателям отражения. Если показания через 180° изменяются в пределах точности измерений, то поверхность шлифа установлена правильно. В другом случае фиксируют азимуты столика микроскопа, для которых показания, соответствующие основным показателям отражения, максимальны. Отмечают разницу для показателя R_g между двумя крайними положениями, чтобы внести поправку, как указано выше. Для 45-градусных положений сечений эта поправка уменьшается вдвое. После измерения значений R в двух нормальных положениях сечение устанавливают под 45° так, чтобы отсчеты прибора были максимальны и для этой позиции. Таким образом определяют величину $\bar{R}_{\text{изм}}$.

Далее включают анализатор и поворачивают его на 90° . При параллельных николях фиксируют показания прибора, пропорциональные $\bar{R}_{(\parallel)}$. Обработка полученных данных и внесение нужных поправок производится так же, как и для изотропных минералов. Измеренные коэффициенты R_g , R_p , $\bar{R}_{\text{изм}}$, $\bar{R}_{(\parallel)}$ позволяют вычислить значения $(R_+)_{\text{max}}$, а также параметры анизотропии.

Для проверки теоретических формул величину $(R_+)_{\text{max}}$ можно измерить прямым методом. С этой целью при максимальной чувствительности прибора в скрещенных николях измеряют интенсивность потока, отраженного от сечения, находящегося в одном из 45-градусных положений. В качестве эталона используют низкоотражающие стекла, значения R которых рассчитываются по известным показателям преломления. При тех же параметрах аппаратуры снимают показания для эталонов при параллельных николях. Эти отсчеты и применяют при расчете коэффициента $(R_+)_{\text{max}}$. Аналогично исследуют и показатель $(R_+)_{\text{min}}$, но тогда измеряют и интенсивность потока, отраженного от изотропного эталона при скрещенных николях, которую сравнивают к нулю.

Так как внутренние рефлексы могут давать такой же эффект, как и эллиптичность волн, проникающих в кристалл, то для более точного определения $(R_+)_{\text{min}}$ сечение анизотропного минерала, установленное в нормальном положении, несколько смещают, не нарушая его ориентировки. Как правило, интенсивность потока, обусловленного внутренними рефlekсами, при перемещении светового зонда сильно колеблется, а величина $(R_+)_{\text{min}}$ практически не изменяется.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОСТИ И ОПТИЧЕСКОГО ЗНАКА МИНЕРАЛА

Впервые относительно способа определения оптического знака одноосных минералов было упомянуто в работе Ж. Орсея (Orsel, 1930), где приведены данные об оптическом знаке некоторых широко распространенных рудных минералов. И. С. Вольнский в примечании к переводу работы Ж. Орсея обратил внимание на необходимость статистических измерений R в разных сечениях при определении оптического знака, как на наиболее многообещающий прием. Вопросы установления осности и оптического знака более детально разработаны Ю. Кэмероном (1966) и Л. Н. Вьяльсовым (1976), там же приведены

данные об оптическом знаке некоторых двусосных минералов. Необходимо еще раз подчеркнуть, что понятие об оптическом знаке двусосных минералов довольно условно, т. е. оптический знак характеризует только соотношение между $(R_g - R_m)$ и $(R_m - R_p)$. Оптический знак (в указанном понимании) и осьность анизотропных минералов весьма удобно определять, если результаты измерений R для одной длины волны наносить на диаграмму (рис. 9). По оси абсцисс откладываются значения $R_g = R_3$, по оси ординат — значения $R_p = R_1$. На прямой,

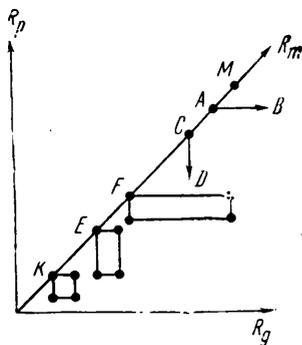


Рис. 9. Оптический знак и осьность рудных минералов на $R_g - R_p$ -диаграмме. Точки соответствуют результатам статистических замеров

проведенной к оси абсцисс под углом 45° , откладываются значения $R_m = R_2$. Каждая точка на диаграмме соответствует одному исследуемому сечению. Таким образом, коэффициенты отражения изотропных минералов будут изображены на диаграмме (см. рис. 9) точками, лежащими на прямой R_m . Одноосные минералы представлены здесь отрезками прямых AB или CD . Точкам A и C отвечают значения R_m . Оптически отрицательным минералам будут соответствовать отрезки типа CD , параллельные оси ординат ($R_m > R_p$), а оптически положительным — отрезки AB , параллельные оси абсцисс ($R_p > R_m$). Двусосные минералы будут представлены прямоугольниками, одна из вершин которых лежит на прямой R_m . Для оптически отрицательных минералов большая сторона прямоугольника E параллельна оси ординат, для оптически положительных F — параллельна оси абсцисс. Если прямоугольник принимает форму квадрата, то оптический знак минерала становится неопределенным K или нейтральным.

В любых сечениях одноосных минералов один из показателей отражения совпадает с R_o , а другой изменяется от R_o до R_g или R_p по прямой AB или CD . Для сечений двусосных минералов возможны любые значения \bar{R}_1 и \bar{R}_2 (помимо постоянного значения R_m), лежащие в пределах площади прямоугольника. Если при статистических замерах R минералов низших сингоний данные нанести на предлагаемую $R_g - R_p$ -диаграмму, то получится один из прямоугольников, приведенных на рис. 9. Степень достоверности формы такого прямоугольника будет определяться количеством изученных сечений и точностью измерений, зависящей от стабильности установки, совершенства полировки, установки образца и т. д. Плохая воспроизводимость результатов приводит к размыванию четкой формы фигуры. Следовательно, необходимо увеличить не только число сечений, но и число измерений. Несовершенство полировки, почти не изменяя формы прямоугольника, сдвигает его вниз по диагонали, поэтому измерения следует выполнять для сечений с максимально хорошей полировкой. Разумеется, если в шлифе встречаются зерна, для которых фиксируются только промежуточные значения R , а изотропные сечения или сечения с малым двуотражением отсутствуют, то оптический знак двусосного минерала определить нельзя. Для получения однозначного решения относительно

осности и оптического знака необходимо исследовать как можно больше разноориентированных зерен, тогда случайные ошибки измерений будут сказываться незначительно, и показатели R_g , R_p , R_m можно определить достаточно четко даже при отсутствии главных сечений. Чем больше $(R_g - R_m) : (R_m - R_p)$, тем меньше нужно сечений для определения знака. Особенно тщательный анализ данных требуется при установлении осности минералов, так как число неблагоприятных факторов, искажающих величину ΔR , велико. Поэтому контроль установки

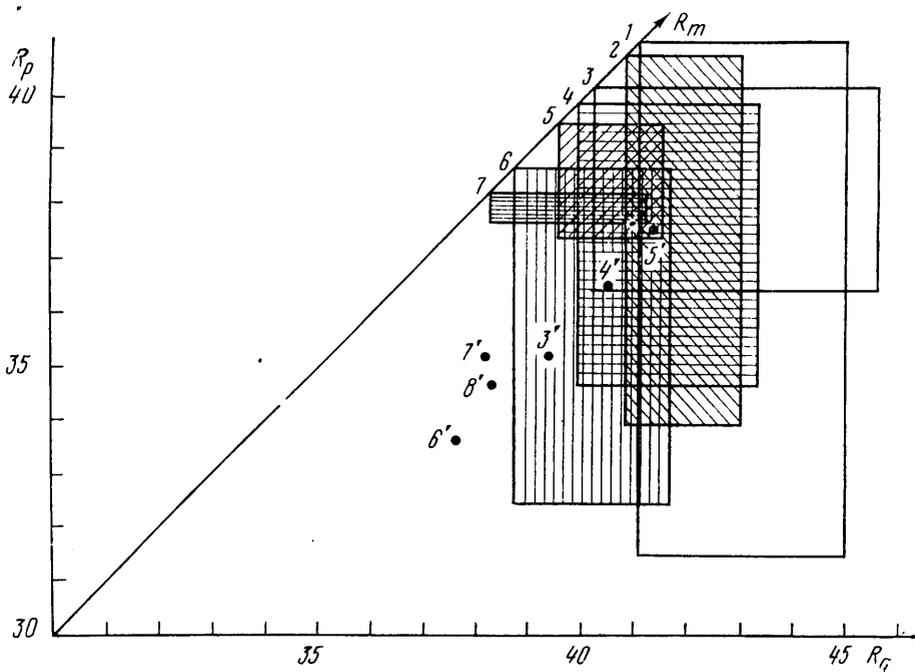


Рис. 10. Оптический знак сульфоантимонидов свинца («К диагностике...», 1968). R_m : 1 — антимонит, 2 — семсент, 3 — менегинит, 4 — булаажерит, 5 — геокронит, 6 — плагнонит, 7 — цинкениит. $R_g - R_p$: 3' — менегинит, 4' — булаажерит, 5' — геокронит, 6' — плагнонит, 7' — цинкениит, 8' — джемсонит

плоскости шлифа нужно проводить по изотропным или слабодвуотражающим минералам, находящимся вблизи исследуемого зерна. Когда величина $(R_g - R_m)$ или $(R_m - R_p)$ относительно мала, но большая часть точек на диаграмме ложится на прямую, то изучаемый минерал, скорее всего, относится к одноосным. Оптический знак при этом определяется однозначно. Когда двусосьность выражена достаточно отчетливо и имеется много разноориентированных сечений, то установить оптический знак очень легко.

При исследовании осности и оптического знака на $R_g - R_p$ -диаграмму можно наносить непосредственно отсчеты, снимаемые с регистрирующего прибора, без пересчета на абсолютные значения R , т. е. эталоны для этой цели не требуются. Такой способ упрощает ход статистических измерений R и поиск сечений с главными показателями R_g , R_p и R_m , который проводится обычно при одной длине волны. После того как наметились границы прямоугольника или отрезка прямой, нетрудно установить и приближенную ориентировку нового сечения. Если в исследуемом зерне отмечается один из главных показателей, то выполняют измерения для всех длин волн и рассчитывают абсолютные значения R . Затем находят зерно с другим главным показателем

телем и т. д. Таким образом, используя R_g — R_p -диаграмму, определяют осноть, оптический знак и сечения с главными показателями отражения. Эталоны при этом требуются только для расчета абсолютных значений R . Соотношения же типа $R_g : R_p$; $R_g : R_m$; $R_m : R_p$; $(R_g - R_p) : (R_g + R_p)$; $(R_g - R_m) : (R_m - R_p)$ и т. п. вычисляются для любой длины волны без использования эталонов. В общем случае полезно строить R_g — R_p -диаграммы, охватывая большинство минералов, в том числе и те, у которых главные показатели еще точно не установлены. Сравнение фигур позволяет наметить ряд минералов с оптическими свойствами, близкими к исследуемому, при одной длине волны. Например, на рис. 10 показаны фигуры, характеризующие соотношения между главными показателями отражения для сульфогалогенидов свинца (Вяльсов, 1969). Там же нанесены данные, полученные Н. Н. Мозговой с соавторами («К диагностике...», 1968). Эти исследователи не проводили статистических измерений, их результаты относятся к сечениям с произвольной ориентировкой (см. рис. 10). Поэтому для двусосных минералов желательно не только привести данные о показателях R'_g и R'_p , но и построить R_g — R_p -диаграмму, по которой можно легко установить, сколько сечений было промерено и каков вероятный оптический знак минерала. У сульфогалогенидов свинца область перекрытия прямоугольников, относящихся к разным минералам, относительно большая. Следовательно, при ограниченном числе сечений диагностика минералов этой группы становится трудной. Приходится сопоставлять спектры отражения в воздухе и иммерсии, учитывать нюансы дисперсии двуотражения и т. д.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ В ИММЕРСИИ

Оптические свойства минералов в иммерсии можно исследовать двумя методами: 1) при измерениях R используют иммерсионные объективы и эталоны, абсолютные значения коэффициентов отражения которых определяются прямыми методами; 2) измерения R в иммерсии выполняют с помощью обычных «сухих» объективов, но на образец помещают каплю иммерсии и накрывают покровным стеклом. Этот метод был предложен в 1947 г. Кэмбоном, мы для краткости условимся называть его методом покровного стекла.

В настоящее время аттестация высокоотражающих эталонов в иммерсии еще не проводилась, хотя схемы соответствующих приборов уже разработаны. Можно надеяться, что в ближайшем будущем проблема калибровки эталонов будет решена, и измерение спектров отражения минералов в иммерсии станет доступным каждому исследователю. Методика измерения R в иммерсии детально описана в работе Л. Н. Вяльсова (1976).

ВИЗУАЛЬНЫЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

При исследовании полированных шлифов с целью диагностики рудных минералов визуально определяются оптические свойства: отражение, двуотражение, цвет, эффект анизотропии, внутренние рефлексы и поляризационные фигуры.

Отражение

Отражение— свойство полированной поверхности минерала отражать определенное количество падающего на него света. Это свойство наблюдается без анализатора. Рудные минералы сильно отражают свет и выглядят в полированном шлифе светлыми, яркими. Жильные

минералы слабо отражают свет и кажутся поэтому серыми, темно-серыми. Яркость рудных минералов в полированном шлифе неодинакова.

Наиболее яркими, блестящими выглядят самородные металлы, арсениды, антимониды, теллуриды с $R > 60\%$; менее яркими, но очень светлыми — сульфиды с $R = 30-60\%$; светло-серыми и серыми — окислы с $R = 10-30\%$; темно-серыми в полированных шлифах — нерудные минералы (силикаты, окислы, карбонаты, сульфаты), у них очень низкое отражение (у кварца $R = 4\%$).

Отражение рудного минерала представляет собой отношение интенсивности света, отраженного минералом I_r , к интенсивности света, падающего на него I_0 , и выражается в процентах:

$$R = \frac{I_r}{I_0} 100\%.$$

Показатель отражения R зависит от показателя преломления минерала и показателя преломления среды (воздуха или иммерсионного масла) — между минералом и фронтальной линзой объектива, а также от показателя поглощения.

Для изотропных и анизотропных прозрачных минералов величина R может быть вычислена по формуле Френеля

$$R = \frac{(n - n_u)^2}{(n + n_u)^2}, \text{ или } R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2},$$

где n — показатель преломления минерала; n_u — показатель преломления среды (в воздухе $n_u = 1$, в кедровом масле $n_u = 1,516$).

Для изотропных абсорбирующих минералов

$$R = \frac{(n - n_u)^2 + k^2}{(n + n_u)^2 + k^2},$$

где k — показатель поглощения минерала.

Чем выше значения n и k минерала, тем больше его отражение. Большое значение R обуславливается либо высокими значениями k , либо высокими значениями n , либо большими значениями n и k и n . Отражение минерала в воздухе выше, чем в масле (см. табл. 2). Величина R минерала изменяется для различных волн монохроматического света. Так, у галенита в воздухе в зеленом свете ($\lambda 546$) R равно 43,4%, в оранжевом ($\lambda 589$) — 41,6%, в красном ($\lambda 650$) — 40,0% (Рамдор, 1962). Это явление называется дисперсией отражения.

Для анизотропных рудных минералов количественно определяют два показателя отражения для одноосных минералов R_0 , R_e , три — для двuosных R_g , R_m , R_p ; один — для изотропных R . Для изотропных и анизотропных минералов, кроме того, определяется показатель отражения в воздухе (R_v) и в иммерсионной среде (R_u). Качественная оценка отражения минерала производится по относительной яркости в шлифе при сравнении его с другим рядом расположенным минералом. Более тусклый или темный минерал из двух сравниваемых имеет более низкое отражение, наиболее светлый или яркий минерал — более высокое; точность визуального определения $R \pm 5\%$.

В воздухе отражательную способность минерала наблюдают при небольших увеличениях ($4\times$, $7\times$, $9\times$), небольшие различия, едва заметные в воздухе, часто усиливаются в масляной иммерсии. Для качественной оценки R рекомендуются иммерсионные объективы слабых увеличений ($-11\times$). Качественно оценить R можно на сравнительном и рудном микроскопах при сопоставлении с эталонами или с известными рудными минералами в шлифе. За эталоны берутся свежееотполированные минералы: пирит $R_v = 54,5\%$; галенит $R_v = 43,4\%$; сфалерит $R_v = 18\%$, шеелит $R_v = 10\%$.

На изменение отражения влияют следующие факторы.

1. Важное значение имеет отличное качество полировки минерала. При большом количестве трещин, царапин, выбоин и пор на полированной поверхности минерала R снижается на несколько процентов (например, у гидроокислов марганца, железа и т. д.). Поэтому выбирают в шлифе зерна без трещин и царапин, устанавливают их в поле зрения и сравнивают с эталоном.

2. Визуальное определение интенсивности R ясноокрашенных минералов необходимо проводить с помощью соответствующих светофильтров — синего, зеленого, оранжевого, желтого, красного (например, для халькопирита — с желтым; для ковеллина — с синим и т. д.), чтобы при наблюдении цвет минерала не оказывал влияния на величину R . У минерала R будет выше с тем светофильтром, окраска которого близка к окраске минерала, и наоборот. Светофильтр устанавливается в щель опак-иллюминатора или накладывается сверху на окуляр.

3. Отражение анизотропных минералов изменяется с ориентировкой зерен, поэтому величину R_{\max} необходимо оценивать на наиболее ярких и светлых зернах.

4. Для некоторых минералов изменения величины R обусловлены изменениями их химического состава — изоморфными примесями химических элементов (например, для минералов — твердых растворов, для сфалерита и т. д.).

Двуотражение

Двуотражение является одним из характерных свойств минерала и обозначается символом ΔR . Диагностическое значение исключительно велико. Двуотражение наблюдается у анизотропных рудных и жильных минералов с поляризатором при вращении столика микроскопа на 360° .

Для сильно анизотропных минералов при вращении столика микроскопа характерны отчетливые изменения отражения и реже цвета. При этом зерна минерала разной ориентировки, расположенные в шлифе рядом, заметно отличаются друг от друга по цвету и отражению. Описанный эффект называется двуотражением и численно выражается разностью главных показателей отражения минерала: $\Delta R = R_g - R_p$. Например, абсолютное значение ΔR молибденита $44 - 15 = 29\%$; антимонита $44 - 30 = 14\%$; графита $23 - 4 = 19\%$; ковеллина $20 - 5 = 15\%$, кальцита $6 - 2 = 4\%$ и т. д. У изотропных минералов двуотражение отсутствует.

И. С. Волинским было предложено выражать степень оптической анизотропности минералов, используя понятие относительная величина двуотражения,

$$\Delta R_{g,p \text{ отн}} = \frac{R_g - R_p}{R_g} 100\%.$$

У минералов с $\Delta R_{\text{отн}} < 5\%$ (кварц, барит) двуотражение в воздухе незаметно. Минералы с $\Delta R_{\text{отн}} \approx 10 - 15\%$ (гематит, джемсонит и др.) имеют слабое двуотражение. Минералы с $\Delta R_{\text{отн}} \approx 30\%$ (антимонит, кальцит) характеризуются сильным двуотражением. Минералы с $\Delta R_{\text{отн}} \approx 45 - 70\%$ (молибденит, графит, валлернит) отличаются исключительно сильным двуотражением. Двуотражение рудных минералов определяется качественно и количественно.

Визуально у анизотропных минералов по интенсивности различаются сильное и слабое двуотражение.

Сильное двуотражение минерала наблюдается в воздухе с объективами малого увеличения (4, 7 \times ; 9 \times) и характеризуется различной яркостью, реже цветным эффектом. Например, у молибденита эффект двуотражения выражается в изменении яркости зерен минерала при вращении столика микроскопа от белого, светло-серого до серого тона, у ковеллина цветовой эффект двуотражения—цвет его изменяется от светло-голубовато-серого до темно-синего с нежным сиреневым оттенком.

Слабое двуотражение наблюдается только в агрегате разноориентированных зерен исследуемого минерала, в иммерсии, с объективами малого увеличения (11 \times).

Двуотражение выражено как у непрозрачных, так и у полупрозрачных минералов. У некоторых прозрачных минералов с высоким двупреломлением наблюдается сильное двуотражение (например, у карбонатов Ca, Mg, Fe, Pb, Zn). Кварц, барит, гипс и полевые шпаты не имеют двуотражения.

При изучении двуотражения минерала в поле зрения микроскопа устанавливается мономинеральный участок, где имеется несколько разноориентированных зерен. Лучше всего изучать двуотражение на таких минералах, как молибденит, антимонит, ковеллин, пирротин, арсенопирит, кальцит.

Цвет

Цвет рудного минерала в отраженном свете—важный диагностический признак. Ощущение цвета возникает в сетчатке глаза под влиянием световых волн. По длине волны в спектре видимого света выделяют три участка: длинноволновой (красный и оранжевый цвета) средневолновой (желтый и зеленый цвета), коротковолновой (голубой, синий, фиолетовый цвета). Спектральные пределы видимых глазом цветов:

Фиолетовый,	длина	волны	390—450	нм
Синий	»	»	450—480	»
Голубой	»	»	480—510	»
Зеленый	»	»	510—550	»
Желтый	»	»	550—585	»
Оранжевый	»	»	585—620	»
Красный	»	»	620—760	«

Цвет минерала в отраженном свете зависит от его показателей преломления и поглощения или от дисперсии отражения. Если минерал для определенной длины волны имеет наибольшее значение отражательной способности, чем для других длин волн монохроматического света, то этот минерал в отраженном свете будет обладать цветом или оттенком, соответствующим характерной волне. Например, наибольшая величина отражения 23,7% в воздухе для ковеллина измерена в синем свете, наибольшая величина отражения 44,4% в воздухе для халькопирита измерена в оранжевом свете (табл. 2).

Визуально цвет минерала определяется по сравнению с цветом окружающих минералов на рудном или сравнительном микроскопе. Обычно цвет исследуемого минерала сравнивается с цветом эталонов—галенита, сфалерита, халькопирита, пирита. С галенитом сравниваются все минералы, со сфалеритом—минералы с R меньше, чем у сфалерита. При этом устанавливается цветовой оттенок минерала. Определение цвета представляет большую трудность для начинающего исследователя. Точность визуального определения цвета минерала приобретается после значительной практики и требует очень опытного глаза. Чем больше работает исследователь с аншлифами, тем

СТАНДАРТНАЯ ТАБЛИЦА

(Принята в 1964 г. Международной комиссией рудной микроскопии при Международной минералогической ассоциации.)

Минерал, химический состав, сингония	Число микротвердости по Бинккерсу, кгс/мм ² при величине груза 100 г и экспозиции вдавливания 15 с.	λ , нм	Монохроматический свет	Показатели отражения, %				Примечание
				в воздухе		в масле		
				R_p	R_q	R_p	R_q	
Халькопирит $CuFeS_2$ Тетраг.	186—219 194 с.	470 546* 589 650	Синий Зеленый Оранжевый Красный	43,5—43,7 43,9—43,3 43,9—44,2 39,8—44,1	43,7—43,9 43,9—44,2 44,2—44,4 44,0—44,2	32,2—32,4 32,4—32,6 34,2—34,5 34,7—35,0	32,3—32,6 32,5—32,8 34,4—34,8 35,3—35,6	$R_p=0$ $R_q=E$
Хромит (Mg, Fe)(Cr, Al, Fe) ₂ O ₄ Кубич.	1195—1210 1206 (300 г) с.	470 546 589 650	Синий Зеленый Оранжевый Красный	14,0—14,4 13,8—14,2 11,0—11,5 10,8—11,4		5,3—5,5 5,2—5,4 3,5—3,7 3,4—3,6		
Ковеллин CuS Гексаг.	69—78 72 ст, вг, вып	470 546 589 650	Синий Зеленый Оранжевый Красный	7,7—8,1 7,0—7,4 6,7—7,1 6,6—7,0	23,1—23,7 22,1—22,7 21,5—22,1 20,9—21,5	2,0 2,0 5,1—5,3 6,4—6,6	9,4—9,6 8,8—9,2 17,8—18,2 20,6—21,0	$R_p=0$ $R_q=E$
Стилбит Sb ₂ S ₃ Ромбич.	42—109 77 с.	450 546 589 650	Синий Зеленый Оранжевый Красный	32,9—33,3 32,5—33,1 28,1—28,7 26,3—26,9	42,8—43,4 42,6—43,2 38,4—39,0 36,2—36,8	26,8—27,2 26,5—26,9 22,4—22,8 22,3—22,7	36,9—37,3 36,7—37,1 32,0—32,2 32,3—32,7	

Форма отпечатка вдавливания: с. — совершенная; ст. — слабо трещиноватая; т. — трещиноватая; вг — вогнутая; вып — выпуклая.
* Для 546 нм значения должны быть приведены обязательно.

лучший он диагност. Каждый наблюдатель должен давать свое собственное описание цвета минерала. Глаз человека обладает большой чувствительностью к очень слабым различиям цвета и яркости двух объектов, расположенных рядом.

По цвету рудные минералы в отраженном свете делятся на две группы: 1) бесцветные и слабоокрашенные; 2) ясноокрашенные. К бесцветным относится подавляющая масса рудных минералов. Цвет их белый, светло-серый и серый. Эталонами бесцветных минералов являются следующие: галенит—цвет белый; сфалерит—серый; шеллит—темно-серый; кварц—темно-серый. Слабоокрашенные минералы—это бесцветные минералы со слабыми оттенками бледных пастельных тонов: голубоватые, желтоватые, розоватые, коричневатые, зеленоватые. Оттенок цвета минерала определяется на фоне галенита или в масле. Слабоокрашенные минералы меньше распространены, чем бесцветные.

Группа ясноокрашенных, или цветных, минералов самая небольшая. Цвет ясноокрашенных минералов легко устанавливается под микроскопом. Выделяются минералы желтого, розового и синего цвета. Эталонами ясноокрашенных минералов являются: халькопирит—желтый; борнит свежееотполированный—розовый; ковеллин—синий.

При определении цвета исключительно большую роль играет фон окружающих минералов. Халькопирит в контакте с галенитом отчетливо желтый, рядом с золотом воспринимается как зеленовато-желтый.

Цвет минерала в воздухе отличается от цвета минерала в масляной иммерсии. Для одних минералов такие различия в цвете незначительны, для других—цветовой оттенок резко усиливается.

Факторы, влияющие на определение цвета минералов. Для определения цвета минерала под микроскопом необходимо соблюдать следующие условия.

1. Установка микроскопа: выключают анализатор, хорошо центрируют освещение микроскопа, лампе сообщается полный накал, широко раскрывают обе диафрагмы, вставляют слабые объективы (4, 7 \times и 9 \times); желательно установить стеклянную пластинку в опке.

2. В поле зрения микроскопа помещают хорошо отполированные и чистые поверхности исследуемого минерала и эталона или исследуемого минерала и известного минерала.

Эффект анизотропии

Эффект анизотропии—основной качественный диагностический признак. Рудные минералы в поляризованном отраженном свете подразделяются на изотропные и анизотропные. В группу изотропных минералов в основном входят минералы кубической сингонии и аморфные. В группу анизотропных—минералы остальных сингоний.

Изотропный минерал при скрещенных николях становится темным и не просветляется при повороте столика на 360°. Некоторые рудные минералы кубической сингонии (например, кобальтин и борнит) часто слабо анизотропны. Это аномальная анизотропия. Анизотропные минералы при скрещенных николях обнаруживают изменение цвета или яркости. Наблюдается четырехкратное угасание анизотропного кристалла через каждые 90° при вращении столика микроскопа. Для одних минералов характерно прямое угасание (мелонит, висмутин, никелин, энаргит и др.), а для других—косое (люционит, фаматинит, вольфрамит, малахит и др.). Некоторые минералы сопровождаются цветовым эффектом анизотропии.

Поляризационные окраски, наблюдаемые в анизотропном минерале при скрещенных николях, обусловлены главным образом диспер-

сней двуотражения. Их можно наблюдать как в воздухе, так и в масле, при этом в масле они лучше выражены. Они проявляются в скрещенных николях при наиболее ярком освещении. Например, у ковеллина цвет изменится от красного до синего, у арсенопирита от голубоватого до розового, у пирротина от желтого до фиолетового и т. д. Цветовые эффекты анизотропии различны в зависимости от сечения зерен и полноты скрещивания николей.

Цветовые эффекты не всегда хорошо наблюдаются по следующим причинам:

— поляризационные окраски минералов постоянны только в том случае, когда николи точно скрещены; правильная установка николей контролируется чередованием положений темноты строго через 90° при вращении столика микроскопа; отчетливое изменение цвета происходит при малых поворотах кристалла в обоих направлениях от положения темноты; положением не вполне скрещенных николей пользуются при наблюдении слабого эффекта анизотропии, незаметного при строго скрещенных николях;

— поляризационные цвета визуально воспринимаются различными наблюдателями по-разному;

— интенсивность и даже оттенки поляризационного цвета минерала изменяются в зависимости от марки микроскопа; необходимо также тщательно устанавливать объективы.

У минералов с бесцветным эффектом анизотропии при скрещенных николях с вращением столика микроскопа изменяется интенсивность освещенности. В результате минералы становятся серыми, светло-серыми (например, вольфрамит, киноварь, рутил, ильменит, гематит). Для минералов гексагональной, тетрагональной, ромбической, моноклинной, триклинной сингонии большинство сечений анизотропно, однако некоторые сечения будут казаться полностью изотропными. Поэтому наблюдение эффекта анизотропии всегда необходимо производить на нескольких зернах минерала. У большинства полупрозрачных и прозрачных минералов эффект анизотропии слишком слаб, за исключением нескольких карбонатов, и маскируется внутренними рефлексами.

При скрещенных николях у некоторых минералов отчетливо проявляется двойниковое и зональное строение.

По интенсивности эффекта поляризации анизотропные минералы разделяются на три группы: сильно анизотропные, отчетливо анизотропные, слабо анизотропные.

Сильно анизотропные минералы — эффект анизотропии заметен в монокристаллах при вращении столика микроскопа (молибденит, графит, антимонит, ковеллин, пирротин и др.).

Отчетливо анизотропные минералы — эффект анизотропии наблюдается в агрегате разноориентированных зерен (вольфрамит, киноварь, буланжерит, касситерит, ильменит).

Слабо анизотропные минералы — показывают эффект анизотропии только в агрегате разноориентированных зерен, особенно при наблюдении в иммерсии (халькопирит, бурнонит).

При изучении эффекта поляризации рудных минералов необходимо проверить установку микроскопа с помощью сильно анизотропного минерала (например, антимонита), для чего шлиф с таким минералом ставится на столик микроскопа, включается анализатор, затем, вращая поляризатор, добиваются более отчетливого эффекта анизотропии этого минерала. После проверки установки микроскопа ставят на его столик шлиф с испытуемым минералом и при одном поляризаторе проверяют правильность установки в горизонтальном положении при

вращении столика микроскопа на 180° . Шлиф установлен правильно, если при повороте столика на 180° не произошло заметного изменения в освещенности всего поля зрения. Затем включают анализатор и определяют эффект поляризации.

Внутренние рефлексy

Внутренние рефлексy наблюдаются у небольшой группы полупрозрачных и прозрачных минералов с R ниже 44%. Внутренними рефлексами называются цветные и бесцветные лучи, отраженные от внутренних элементов минерала (трещины спайности, твердых и жидких включений), а также от границ зерен. Они идут изнутри минерала со всей поверхности или образуют одиночные или групповые световые блики. Различают цветные рефлексy (красные, коричневые, желтые, зеленые, синие, оранжевые) и бесцветные. Цвет внутренних рефлексов имеет важное диагностическое значение. Например, для кинновари характерны красные внутренние рефлексy, для касситерита — желтовато-коричневые, желтые, редко красные и т. д. Цвет внутренних рефлексов сходен с цветом минерала, наблюдаемым макроскопически в штучках, или с цветом его черты на фарфоровой пластинке.

Бесцветные внутренние рефлексy встречаются главным образом у перудных прозрачных минералов с R 5—10%.

У прозрачных и полупрозрачных минералов в полированных шлифах наблюдают внутренние рефлексy при полностью скрещенных николях с объективами $9\times$, $40\times$ и сильным освещением. При этом просматриваются многие зерна минерала. Внутренние рефлексy минерала в шлифе определяют также в косом свете. Для этого вынимают лампочку из осветителя и направляют свет на полированный шлиф.

У полупрозрачных минералов внутренние рефлексy слабо выражены и наблюдаются с трудом. Однако их можно выявить в порошке, полученном при царапании полированной поверхности; порошок изучают в скрещенных николях, в косом свете или в масле.

Количество внутренних рефлексов зависит от состава минерала. Например, в маложелезистом сфалерите они многочисленны; в сильнोजелезистом сфалерите, сфалерите с включениями халькопирита и пирротина редки или совсем отсутствуют.

По интенсивности проявления внутренних рефлексов минералы разделяются на три группы:

1) внутренние рефлексy отсутствуют — главным образом группа непрозрачных рудных минералов с $R > 44\%$;

2) слабые внутренние рефлексy — группа полупрозрачных рудных минералов с R 10—44% (вольфрамит, гематит, теннантит и др.); наблюдаются также в порошке минерала или в иммерсии при скрещенных николях с объективами $9\times$, $40\times$ и сильным освещении; порошок минерала изучают на поверхности шлифа;

3) сильные внутренние рефлексy — группа полупрозрачных минералов с R 18—30% и прозрачных минералов с $R < 18\%$ (кинноварь, куприт, аурипигмент, реальгар, гринокит, сфалерит, малахит, азурит, кальцит, кварц и др.); сильные внутренние рефлексy наблюдаются в скрещенных николях с объективами $9\times$ или под бинокляром, или в косом свете. Хорошо видны рефлексy в плохо приготовленных шлифах.

Поляризационные или коноскопические фигуры

Эти фигуры появляются при наблюдении рудного минерала в сходящемся отраженном свете. Применяя объективы больших увеличений ($40\times$ и более), получают в рудном микроскопе сходящийся свет. Для

того чтобы иметь свободное поле зрения, вставляют отражательную пластинку опака и полностью открывают все диафрагмы. Микроскоп наводят на выбранное для исследования зерно, николи скрещивают. В рудном микроскопе МИН-9 вынимают обычный окуляр и заменяют его накладным. Поляризационные фигуры можно наблюдать при скрещенных николях с линзой Бертрана или вообще без окуляра.

В сходящемся отраженном свете фигуры у изотропных и анизотропных минералов различные. Ниже приведено их описание по Кэмерону (1966).

Поляризационные фигуры изотропных минералов. В строго скрещенных николях изотропные сечения дают черный крест на белом или почти белом поле (см. рис. 8, а). параллельный нитям окуляра. Крест не изменяется при вращении столика микроскопа с полированным шлифом. При повороте поляризатора (микроскоп МИН-9) черный крест распадается на две изогирь, расходящиеся по диагонали в противоположные квадранты. У одних минералов изогирь остаются черными, у других же они обнаруживают цветные каймы или дисперсию изогирь. Оттенки, отчетливость и ширина цветных кайм у каждого минерала различные. В одном случае каймы на вогнутых сторонах изогирь будут красного цвета, а на выпуклых — синего. В другом соответственно синего и красного. Например, сравним фигуру, возникающую у хромита, дигенита, тетраэдрита. К сожалению, многие изотропные минералы дают фигуры с очень слабыми дисперсионными каймами. Поляризационные фигуры самородного золота, серебра и меди обнаруживают другой тип дисперсии — дисперсию эллиптичности. Если получить поляризационную фигуру (черный крест) свежееотполированного золота и повернуть поляризатор, то изогирь начнут расходиться обычным способом. Концы изогирь остаются черными. Средние же их части размыты и окрашены в желтый или оранжевый цвет. Это свойство может быть использовано, чтобы отличить мелкие зерна золота от зерен пирита и халькопирита.

В процессе изучения дисперсионных кайм поляризационных фигур рудных минералов нужно соблюдать некоторую осторожность. Желательно проверить поляризационную фигуру вращением поляризатора последовательно по часовой стрелке и против нее от скрещенного положения. В том случае, когда поляризационные фигуры окажутся одинаковыми в обоих парах квадрантов, наблюдатель может быть уверен, что оптические аномалии, обусловленные несовершенством оптической системы микроскопа, отсутствуют.

Поляризационные фигуры анизотропных минералов. На изотропных сечениях, перпендикулярных к оси C одноосного минерала, фигура выглядит так же, как и для изотропного минерала. Черный крест не расходится при вращении столика.

На других кристаллографических сечениях анизотропного минерала при точно скрещенных николях черный крест изменяется с поворотом столика микроскопа (см. рис. 8, а, б). При четырех положениях столика, отстоящих друг от друга на 90° , фигура представляет собой черный крест на белом поле. Смещение столика от этих положений вызывает распад фигуры на две изогирь, которые передвигаются в стороны от центра поля. При полном повороте столика на 360° изогирь расходятся дважды в северо-западный и юго-восточный квадранты поля и дважды — в северо-восточный и юго-западный квадранты, причем движение в одном направлении чередуется с движением в другом направлении. Величина расхождения изогирь (в положениях 45° , 135° , 225° , 315°) зависит от кристаллографической ориентировки сечения и изменяется от нуля в срезах одноосного минерала, перпендикулярных к оси C , до максимума в срезах, параллельных оси C . Величина мак-

симального расхождения изогир сильно колеблется от минерала к минералу. Наименьшее расхождение, которое еще можно наблюдать, обнаруживает халькопирит. Крест у этого минерала при вращении столика лишь слегка нарушается, и настоящего расхождения изогир не происходит. Ковеллин имеет наибольшее расхождение изогир из известных рудных минералов. При 45-градусном положении изогир поляризацонной фигуры этого минерала лежат за пределами поля зрения, если наблюдаемое сечение зерна вырезано параллельно оси *C*. В белом свете некоторые анизотропные минералы обладают цветными каймами. Начинающему исследователю рекомендуется изучить поляризацонные фигуры анизотропных минералов, на примере халькопирита, ковеллина, молибденита.

ПРИМЕНЕНИЕ ИММЕРСИИ В РУДНОЙ МИКРОСКОПИИ

Наблюдения в иммерсии широко используются в рудной микроскопии. Для работы с иммерсией применяют специальные иммерсионные жидкости и иммерсионные объективы, рассчитанные на использовании определенных иммерсионных жидкостей. Между фронтальной линзой объектива и полированным шлифом помещают иммерсионную жидкость, в качестве которой обычно используют кедровое масло с показателем преломления $n=1,516$.

Вследствие применения иммерсии увеличивается разрешающая способность объектива и четкость изображения, так как возрастает показатель преломления среды между объективом и полированным шлифом. Это видно из анализа формулы

$$A = n_u \sin U,$$

где A — апертура объектива, U — половина угла конического светового пучка, n_u — показатель преломления среды. Поэтому иммерсионные объективы позволяют получить большие увеличения, чем сухие.

Применение иммерсии способствует дополнительному углубленному изучению оптических свойств минерала — отражения, цвета; под влиянием иммерсии возрастает сила оптических контрастов — эффекты двуотражения и анизотропии, интенсивность и цвет внутренних рефлексов.

Наблюдаемые в иммерсии явления можно объяснить, анализируя основную формулу оптики отраженного света:

$$R = \frac{(n - n_u)^2 + k^2}{(n + n_u)^2 + k^2},$$

где R , n , k — соответственно показатели отражения, преломления и поглощения минерала, а n_u — показатель преломления среды между объективом и полированным шлифом.

Из формулы следует, что при наблюдении в иммерсии значения показателя отражения минерала уменьшаются, так как возрастает показатель преломления среды n_u . Наиболее резкое снижение R в иммерсии наблюдается для минералов прозрачных и полупрозрачных, у которых k стремится к нулю. По мере возрастания k , которому сопутствует возрастание R , разница между показателями отражения в воздухе и в иммерсии становится менее резкой. Отсюда следует, что чем меньше R у минерала, тем сильнее его отражение снижается в иммерсии; в результате этого двуотражение минерала в иммерсии возрастает.

Цвет минерала при наблюдении в иммерсии более ясно выражен, отчетливо различаются оттенки: например, у теннантита хорошо виден зеленоватый оттенок, у тетраэдрита — коричневатый. Иногда возника-

ют аномальные окраски — например, ковеллин в иммерсии становится красным.

Как следует из анализа формулы Френеля, при наблюдениях в иммерсии также усиливаются эффекты анизотропии и степень проявления внутренних рефлексов.

Основными результатами применения иммерсии являются:

1. Повышение разрешающей способности объектива.
2. Уточнение сравнительной оценки отражения минералов, особенно обладающих близкими значениями R .
3. Обнаружение слабого двуотражения и слабой анизотропии.
4. Характеристика цвета и оттенка цвета минерала.
5. Обнаружение слабых внутренних рефлексов.

Глава 3

Физические свойства рудных минералов и методы их изучения

Физические свойства рудных минералов, такие, как твердость, магнитность и кристалломорфные особенности, существенно облегчают их диагностику.

Твердость

Твердость — одна из главных констант рудного минерала. Твердостью рудного минерала называется способность его полированной поверхности оказывать сопротивление при царапании, при шлифовании и при микровдавливании. Минералам свойственна различная твердость в зависимости от кристаллографических направлений. Применяются два метода определения твердости минералов: качественный и количественный.

Качественное определение твердости минерала методом царапания. В минераграфической практике широко применяется определение твердости рудных минералов методом царапания стальной и медной иглами. Твердость стальной иглы (швейной) равна 5, а медной 3, по Моосу.

Конец иглы вводят в поле зрения при объективе 4, 7 \times , 9 \times и опускают до соприкосновения с полированной поверхностью минерала. Установив иглу под углом к поверхности минерала, проводят ею по направлению к руке. Следует рукой устойчиво опереться о столик микроскопа. Если у минерала твердость ниже иглы, тогда на полированной поверхности образуется царапина. Большинство рудных минералов хрупки и дают порошок при царапании иглой. У некоторых минералов по сторонам вдоль царапины появляется стружка. Если минерал ковкий и вязкий, то игла оставляет желобок.

В определительных таблицах минералы по твердости царапания подразделяются на три группы: 1) минералы низкой твердости (до 3, по Моосу) царапаются медной иглой; 2) минералы средней твердости (от 3 до 5, по Моосу) царапаются стальной иглой, но не царапаются медной; 3) минералы высокой твердости (выше 5, по Моосу) царапаются с трудом или не царапаются совсем стальной иглой.

На специальном приборе микросклерометре С. Б. Талмейдж определял твердость царапания минералов алмазным острием под определенной нагрузкой, каждый раз получая на полированной поверхности минерала царапину стандартной ширины. По твердости царапания он подразделил минералы на семь групп, с соответствующими буквенными обозначениями, выделив для каждой группы минерал-эталон

ШКАЛА ТВЕРДОСТИ И СТАНДАРТНЫХ МИНЕРАЛОВ

Минерал-эталон, химический состав, сингония	Твердость					Микротвердость, кгс/мм ² Форма отпечатка вдавливания	Поведение при полировании
	по Моосу	по Талмей-джу	по Вольнскому	по царапанию	по рельефу		
Аргентит Ag_2S Кубич.	2—2,5	A	I	Низкая	<галенита	20—30 (В) 24 20—30 (Л) с., вогн.	Плохое
Галенит PbS Кубич.	2,5	B	II	Низкая	>аргентита <сфалерита	71—84 (В) 76 64—110 (Л) с.	Хорошее
Халькопирит CuFeS_2 Тетрагон.	3,5—4	C	III	Средняя	>галенита <сфалерита <пирротина	126—219 (В) 194 с.	Хорошее
Сфалерит ZnS Кубич.	3,5	D	IV	Средняя	>галенита >халькопирита >блеклой руды <пирротина , <магнетита	186—209 (В) 198 153—270 (Л) с., вогн.	Хорошее
Теннатит (блеклая руда) Кубич.	3,5—4,5	D	IV	Средняя	>галенита <сфалерита <пирротина	320—361 (В) 338 308—397 (Л) с.	Отличное
Никелин NiAs Гексаг.	5—5,5	E	V	Высокая	>пирротина <пирита <сафлорита	328—455 (В) 392 412—489 (Л) с.	Отличное
Магнетит Fe_3O_4 Кубич.	5,5	F	VI	Высокая	>сфалерита <гематита	530—699 (В) 560 535—695 (Л) с.	Хорошее
Ильменит FeTiO_3 Тригон.	5—6	G	VII	Высокая	>магнетита <гематита	519—703 (В) 611 593—735 (Л) с., трещ., вогн., вып.	Хорошее
Пирит FeS_2 Кубич.	6—6,5	F	VII	Высокая	>арсенопирита >гематита <кобальтина	1027—1240 (В) 1165 1144—1374 (Л) трещ.	Плохое, хорошее

Примечания. 1. (В) — число микротвердости по Виккерсу; (Л) — число микротвердости по Лебедевой. 2. Форма отпечатка вдавливания: с. — совершенный; вып. — выпуклый; вогн. — вогнутый; т. — трещиноватый; сл. трещ. — слабо трещиноватый.

(табл. 3). В табл. 3 приведена твердость по данным различных следователей.

При проведении испытаний твердости методом царапания необходимо помнить о том, что твердость анизотропных минералов изменяется в зависимости от ориентировки зерен (антимонита, вольфрамит и др.), а изотропных — в зависимости от кристаллической структуры: у скрытокристаллических разновидностей минералов твердость ниже чем у полнокристаллических. Например, колломорфный мельниковит-пирит и кристаллический пирит будут отличаться по твердости.

Качественное определение твердости по относительному рельефу. При изготовлении полированного шлифа рудообразующие минералы имеют различное сопротивление истиранию. В результате этого при шлифовке и полировке на сукне твердые минералы стачиваются более медленно, чем мягкие, поэтому во всех полированных шлифах более твердые минералы слегка возвышаются над окружающими их мягкими минералами. При этом твердый минерал имеет положительный рельеф, а мягкий минерал отрицательный.

Относительную твердость минералов по рельефу определяют по правилу световой полоски, а световая полоска хорошо видна даже в хорошо полированных шлифах. Для этого устанавливают в поле зрения микроскопа границу срастания испытуемого минерала и минерала с известной твердостью, частично прикрывают апертурную диафрагму и медленно поднимают тубус микроскопа. При подъеме тубуса световая полоска будет двигаться в сторону мягкого минерала, при опускании тубуса полоска передвигается в сторону твердого минерала. Явление световой полоски можно наблюдать с объективами средних увеличений ($9\times$); если при этом увеличении световой полоски не заметно, то нужно использовать объектив более сильный ($40\times$).

Правило световой полоски следует использовать при сравнении рельефа минералов близкой твердости, а также при определении твердости минералов, представленных в виде мелких включений в другом минерале, твердость которого известна.

На определительных таблицах каждый минерал (расположенный справа) с большей микротвердостью имеет обычно более высокий рельеф по сравнению с минералами (расположенными слева) с меньшей микротвердостью. Однако в ряде случаев прямая корреляция не наблюдается.

Рудные минералы принято разделять на группы по высоте относительного рельефа в полированных шлифах. И. С. Волинский предложил объединить минералы по высоте относительного рельефа в семь групп в соответствии с числом классов Талмейджа (см. табл. 3). По Талмейджу группы минералов обозначены буквами, по Волинскому те же самые группы обозначены римскими цифрами (табл. 4).

Твердость минерала по рельефу не всегда может быть выявлена в скрытокристаллическом и аморфном агрегате, например, в агрегате окислов железа и марганца.

Количественное измерение твердости методом микровдавливания. Твердость или микротвердость полированной поверхности минерала может быть измерена под микроскопом путем вдавливания алмазного наконечника (индентора) при определенных нагрузках. Микротвердость является одной из главных констант для диагностики минерала. Измеряют минимальные, максимальные величины микротвердости и вычисляют средние.

Форма и качество фигуры вдавливания также отличаются (рисунки 11, 12, табл. 2). Комиссией по рудной микроскопии приняты следующие символы для обозначения характера отпечатка: с. — совершенный; вып. — выпуклый; т. — трещиноватый; сл. тр. — слабо

СИСТЕМАТИКА МИНЕРАЛОВ ПО ВЫСОТЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РЕЛЬЕФА В ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФАХ
По В. Айтенобадату (1971), И. С. Вольскому (1966), Ю. Кэмерону (1966) и др.

I группа $H < N$ < борнита	II группа галенита < $H < N$ < борнита	III группа галенита < $H < N$ < борных руд	IV группа бесцветных руд < $H < N$ < платины самородной	V группа сфалерита < $H < N$ < бирротина	VI группа сафлорита < $H < N$ < арсениопирита	VII группа арсениопирита < $H < N$ < пирита
Иодидит Бромит Керагарит Аргентит Висмут самородный Синее самородный Яланг Ауларит Науманит Тиманит Клаусталит Экскеборнит Клокманнит Уманит Берцелланит Экварит Гуавахуанит Селен самородный Гессит Алмаз Петлит Колорадон Нагаяит Хедлейт Верлит Жоэнт Грюндингит Чикловант Тетрадинит Теллуриовисмутит Вейссит Риккердит Сильванит Вулканит Патронит Сера самородная Реальгар Фрейслёбенит Полибазит Пирсент	Галенит Лещенбахит Грейтонит Иорданит Дюфренуазит Ратит Ливенгит Баумгауэрит Сарторит Шапбахит Ширмерит Эмлектит Висмутит Галеновисмутит Козалит Айкнит Альскант Реобанит Тунгстенит Франкенит Цинлиндрит Тылит Герценберзит Бурнонит Зелигманнит Лаутит Золото самородное Электрум Серебро самородное Сурыма самородная Астацитабарит Канюварь Ливингстонит Потарит Дискразит Сурыма — мышьяк (смешан- ные кристаллы) Мышьяк самородный Халькостит Витнит	Борнит Халькопирит Кубанит Валлерит Реньерит Нигллит Молибденит Грабит Мелонит Фробергит Германит Бестхитнит	Фробергит Тетразарит Тенантит Фаматинит Энаргит Домейкит Альгодонит Медь самородная Тенорит Парамелаконит Куприт Станнит Петрозент Хизелудит Миллерит Гаухекоринит Алабандин Гринокит Сфалерит Вюртцит	Куперит Палладий Аллопалладий Стибиопалладинит Платина самородная Браггит Железо самородное Аварит Виноларит Бравоит Пентлацит Гудмундцит Косенит Вилламаннит Линненит Эггенит Полидинит Никелин Брейтгауптит Мауерит Скуттерудит Раммельсбергит Парараммельсбергит Сафлорит	Дёлингит Герсдорфит Ульманит Сперскийит Лиспидокрокит Гетит Гетеролит Цинкит Манганозит Гарцерит Рамделлит Пирролизит Криптомелан Манганит Пенломелан Цезаролит Плагтиерит Коронадит Гаусманит Якобсит Магнетит Браунит Голландит Биксбит Франклинит Хромит Ильменит Рутил Псевдобрукит Перовскит Христофит Шселит Ферберит Вольфрамит Гюбернит Глаукодоит Арсениопирит	Кобальтин Ураннит Гематит Марказит Пирит Сверриллит Лаурит Колумбит Танталит Касситерит Тодорокит Литиофорит

I группа $H < H < H$	II группа галенита $H < H < H$ борнита	III группа галенита $H < H < H$ блеклых руд	IV группа блеклых руд $H < H < H$ платины самородной	V группа сфалерита $H < H < H$ пирротина	VI группа сафлорита $H < H < H$ арсенопиррита	VII группа арсенопиррита $H < H < H$
Прустит Лиаргирит Миаргирит Стефанит Самсонит Штернберлит Аргиродит Каффинит Гутчисонит Кермесит Антимонит Лорандит Вробит Калаверит Кренерит Монтбрейнит Эмпрессит Бертьерит Андорит Овхинит Геокронит Феллепит Цинкит Плагонит Семсейт Буланжерит Джемонит Менегенит Кобеллит Халькофанит Штрөмейерит Ковеллин Халькозин Неолитенит Паржерит Сульванит						

Примечание. Шрифтом выделены минералы, наиболее распространённые и характерные для группы.

трещиноватый, вогн.—вогнутый. Для большинства рудообразующих минералов микротвердость и твердость по рельефу, как правило, совпадают, но наблюдаются исключения, когда микротвердость минерала ниже, чем твердость по рельефу (молибденит и халькопирит, сфалерит и теннантит и др., табл. 5). Это объясняется характером кристаллической структуры минерала, от которой зависят спайность, хрупкость, ковкость, вязкость, а также химический состав минерала.

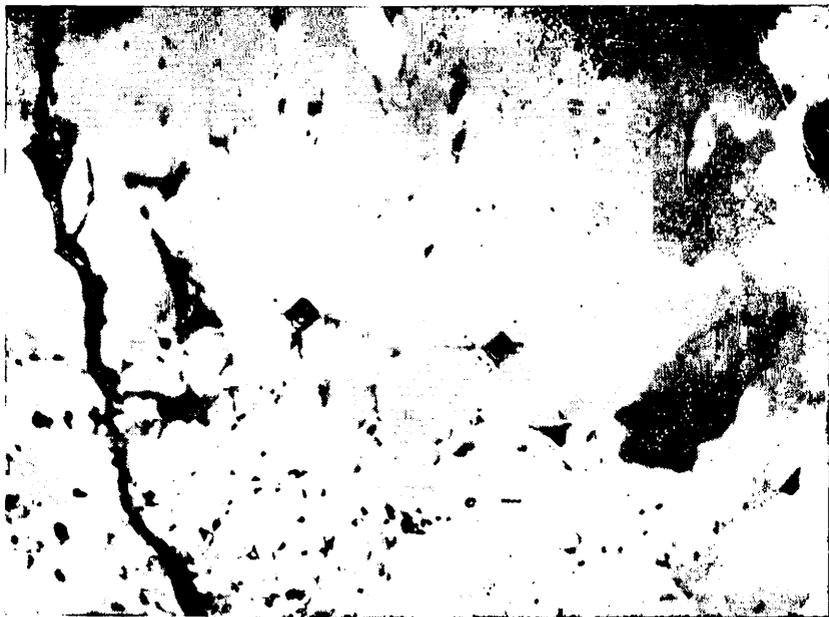


Рис. 11. Фигурки вдавливания (черное) с небольшими трещинками от алмазной пирамидки, на люционите (светло-серое). Нагрузка 20 г. Месторождение Кафан, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 165$



Рис. 12. Форма отпечатков (индентор Виккерса)

Для измерения микротвердости минералов применяются различные модели микротвердометров. В СССР применяется микротвердометр ПМТ-3 фирмы ЛОМО. Устройство этого прибора и методика работы на нем детально описаны в работах М. М. Хрушова (1947), С. И. Лебедевой (1977) и Г. А. Ильинского (1963).

В приборе ПМТ-3 используется четырехгранная алмазная пирамида с углом 136° . Микротвердометры могут применяться для изучения зерен размером до 1μ в диаметре.

В каждом микротвердометре при испытании микротвердости минерала алмазная пирамида под нагрузкой свободно погружается в зерно минерала и выдерживается в течение некоторого времени. В микротвердометре ПМТ-3 нагрузка колеблется от 10 до 300 г. Отпечаток пирамиды измеряют, и по величине диагонали вычисляют

Таблица 5

**СООТНОШЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ И ТВЕРДОСТИ ПО РЕЛЬЕФУ
ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МИНЕРАЛОВ**

Распределение минералов в порядке увеличения твердости по рельефу	Среднее значение микротвердости по Виккерсу, кгс/мм ²	Пределы колебаний микротвердости по Виккерсу, кгс/мм ²	Примечание
Аргентит	24	20—30	
Галенит	76	71—84	
Борнит	103	97—105	
Халькопирит	194	186—219	
Молибденит	17	16—19	
Тетраэдрит	351	328—367	
Теннантит	338	320—361	
Сфалерит	198	186—209	
Пирротин	248	230—259	Анизотропное сечение
Никелин	336	328—348	То же
Магнетит	560	530—599	
Ильменит	536	519—553	
Рутил	1139	1074—1210	
Арсенопирит	1094	1048—1127	
Гематит	755	739—822	Микрокристаллический агрегат
Марказит	1113	941—1288	
Пирит	1165	1027—1240	

микротвердость при данной нагрузке. Величины твердости вдавливания выражаются отношением нагрузки (в кгс) к площади поверхности отпечатка (в мм²).

Измерение микротвердости на приборе ПМТ-3 проводится в следующей последовательности.

1. Регулируют прибор по контрольному эталону; измеряют микротвердость прозрачного кристалла каменной соли при нагрузке 5—10 г. Среднее арифметическое из пяти отпечатков должно соответствовать 20,0—22,5 кгс/мм². Для обычных целей используют объектив 40× и окуляр 10×.

2. На предметном столике отрегулированного прибора устанавливают чистый, отлично полированный шлиф под объективом таким образом, чтобы зерно исследуемого минерала находилось в центре поля зрения (на перекрестке нитей окуляра). Для повседневной работы можно устанавливать шлиф на пластинке, хотя он может деформироваться даже при слабых нагрузках и исказить получаемые результаты.

3. На индентор помещают груз определенной массы. Для получения оптимального размера отпечатка для каждого минерала рекомендуется соответствующая оптимальная нагрузка (табл. 6).

4. Предметный столик с полированным шлифом поворачивают за рукоятку на 180° (до упора), чтобы исследуемый минерал попал точно под алмазную пирамиду индентора.

5. Индентор опускают в течение 15 с; медленно поворачивают рукоятку арретира индентора одним пальцем левой руки до упора, и отнимают руку от прибора.

6. Давление алмазной пирамиды на полированную поверхность минерала выдерживается 15 с, затем пирамиду возвращают в исходное положение с помощью рукоятки арретира.

7. Снимают нагрузку, поворачивают столик и измеряют диагональ отпечатка с помощью микрометричного окуляра. В течение 2—3 мин. для исследуемого минерала может быть измерено примерно 4—5 отпечатков с точностью до 5%.

**ВЕЛИЧИНЫ НАГРУЗОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ОТПЕЧАТКОВ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОРЯДКА ТВЕРДОСТИ МИНЕРАЛОВ**
По И. С. Волинскому, 1966

Группа твердости		Пределы микротвердости по Виккерсу, кгс/мм ² при грузе в 100 г	Стандартная нагрузка, г		
по Лебедевой	по Моосу		по Лебедевой	по Янгу и Миллману	по Тубо
I очень мягкие	1—2	0—60	5—10	15	—
II мягкие	2—3	60—120	10—20	25	15—25
III средней твердости	3—4	120—200	20—50	50	50—100
	4—5	200—550			
IV твердые	5—7	550—1100	50—100, иногда 200	—	100—200
V очень твердые	7	1100—1400 1400	200, для очень хрупких 100	100	300—350

Число микротвердости H вычисляют по формуле (Хрушов, Беркович, 1943)

$$H = \frac{1,854 \cdot P}{d^2},$$

где P — нагрузки на индентор, г; d — длина диагонали отпечатка, мм.

Для удобства работы показатель микротвердости H находят по справочным таблицам, используя величину P и длину диагонали d (Лебедева, 1963).

8. Обрабатывают результаты измерения микротвердости, определяют микротвердость $H_{ср}$ минерала путем вычисления среднего арифметического из нескольких значений микротвердости.

При исследовании изотропного или слабо анизотропного по твердости минерала ($K_H \leq 1,2$) в полированных шлифах $H_{ср}$ вычисляют из 5—7 замеров микротвердости, полученных на различных сечениях зерен. При исследовании минерала со средневыраженной анизотропией твердости ($K_H = 1,12—1,20$) $H_{ср}$ вычисляют из 9—13 замеров и по возможности на различных зернах.

При исследовании минерала сильно анизотропного по твердости ($K_H > 1,20$) $H_{ср}$ вычисляют из 30—40 замеров. Для исследования твердости лучше готовить полированные брикеты из дробленой фракции (0,5—1 мм).

Коэффициент анизотропии твердости в минералах вычисляют по формуле

$$K_H = \frac{H_{\max}}{H_{\min}},$$

где H_{\max} — максимальное, а H_{\min} — минимальное значения твердости, полученные в одном минерале (Лебедева, 1963).

На получаемые значения микротвердости влияют следующие факторы:

1) явления векториальности твердости, наблюдающиеся даже в минералах кубической сингонии, поэтому в различных сечениях зерен одного и того же минерала могут быть большие колебания значений

микротвердости. Некоторые анизотропные минералы обнаруживают резкую изменчивость микротвердости в зависимости от ориентировки зерен (например, молибденит);

2) микротвердость минерала зависит от изоморфных примесей, в частности, она значительно колеблется в минералах, представляющих собой твердые растворы;

3) наблюдается анизотропия твердости в минералах из месторождений различного генезиса. Например, В. И. Сияков (1966) приводит следующие значения $H_{\text{ср}}$ (кгс/мм²) для магнетита: магматический 647; скарновый 560; гидротермальный 758; метаморфогенный 509;

4) величина микротвердости зависит от размеров зерен. В гелевых и скрытокристаллических агрегатах микротвердость ниже, а в средне- и крупнозернистых агрегатах — выше;

5) на величину микротвердости влияет применяемая нагрузка. Установлено, что величина микротвердости падает с увеличением нагрузки. Поэтому нужно указывать величину этой нагрузки. Первоначальная нагрузка равна 100 г;

6) груз должен быть выбран так, чтобы диагонали отпечатка имели длину 20—25 мкм. Слишком маленькие отпечатки не проникают сквозь плотный поверхностный слой.

Магнитность

Магнитность — свойство, характерное для небольшой группы рудных минералов. К числу сильно магнитных минералов относятся: самородное железо, магнетит, магномагнетит, франклинит, поликсен, пирротин, кубанит, реньерит и др.

Определение магнитности минералов с помощью магнитной стрелки и магнитной стальной иглы. Крупные выделения магнитных минералов в полированных шлифах исследуются с помощью магнитной стрелки. Шлиф подносят к стрелке (северному или южному полюсу) и наблюдают за ее поведением. Магнитные минералы притягивают конец стрелки к поверхности шлифа. Намагниченная стальная игла притягивает порошок минерала, полученный при царапании полированной поверхности.

Исследование магнитности минералов в рудах методом магнитной порошкографии. Если магнитный минерал представлен мелкими выделениями (сотые доли — несколько миллиметров в поперечнике), которые вкраплены в немагнитные минералы, и его количество изменяется долями или несколькими процентами, то для определения магнитности применяется метод магнитной порошкографии. Этот метод используется при диагностике магнитных минералов, а также для отличия похожих в отраженном свете магнитных минералов от немагнитных и слабомагнитных (троилит — пирротин, магнетит — маггемит, моноклинный пирротин — гексагональный пирротин и др.). Метод применяется также при изучении структур распада с магнитными минералами (магнетит + ильменит; пирротин + пентландит).

Методика магнитной порошкографии состоит в том, что суспензию наносят пипеткой на всю поверхность или на некоторые участки полированного шлифа при горизонтальном положении столика микроскопа. Она выдерживается на поверхности шлифа 1—2 мин. Время подбирается экспериментально. По истечении времени осадение шлифа наклоняется и суспензия смывается несколькими каплями спирта или дистиллированной водой. После высыхания шлифа изучают картину осадения в отраженном свете с одним николем и в скрещенных николях, с воздушными и иммерсионными объективами. Ми

нерал, обладающий магнитными свойствами, покрывается пленкой магнитного порошка.

Следует отметить, что магнитные порошки осаждаются не только на ферромагнитных зернах, выходящих на полированную поверхность шлифа, но могут отмечать ферромагнитные включения, расположенные ниже поверхности шлифа на глубине 0,01—0,1 мм.

Фигуры осаждения порошка на магнитных минералах можно фотографировать (например, формы срастания магнетита и ильменита). Выбранный участок шлифа следует фотографировать два раза: до покрытия магнитным порошком, с одним никелем или при скрещенных николях, и после покрытия магнитным порошком, без анализатора. Снимки должны быть сделаны точно с одного и того же участка шлифа.

Удаление порошка с полированной поверхности шлифа производится замшей или сухой ватой; если порошок полностью не снимается, шлиф смачивают спиртом и снова протирают.

Техника изготовления магнитной суспензии приведена в статье Т. С. Дубинко и Н. Д. Ветошкина (1965).

Кристалломорфные особенности рудных минералов

Под кристалломорфными особенностями минерала понимаются форма минеральных индивидов и их внутреннее строение. На определенных таблицах показаны форма и внутреннее строение зерен минералов. При диагностике минерала внимательно наблюдают форму, внутреннее строение его зерен, твердые включения в них и границы срастания с другими минералами.

Форма кристаллов и минеральных зерен в шлифе. Форма сечения кристаллов некоторых минералов очень типична и может быть использована при диагностике. Представление о полной кристаллической форме минерала может быть составлено при наблюдении ряда сечений кристалла в полированных шлифах. Так, кубы могут дать в сечении прямоугольники, равносторонние или прямоугольные треугольники.

Минеральные индивиды правильной кристаллической формы называются идиоморфными. В виде хорошо образованных кристаллов и метакристаллов отлагаются рудные минералы с большой силой кристаллизационного роста и высокой твердостью.

Кристаллы и метакристаллы по форме сечений подразделяются на изометричные и удлинённые. Изометричные сечения имеют более или менее одинаковые измерения во всех направлениях в плоскости шлифа. Длина удлинённых кристаллов в несколько раз больше ширины. Изометричные формы сечений характерны для пирита, магнетита, кобальтина, хромита, уранинита и других минералов (рис. 13). Удлинёнными формами обладают все призматические, столбчатые, шестоватые, таблитчатые и игольчатые кристаллы. Например, призматические формы характерны для антимонита, арсенопирита, вольфрамита и др.; таблитчатые или пластинчатые — для молибденита, гематита, кубанита, людвигаита и др.; игольчатые — для рутила, джемсонита, гётита и др. (рисунки 14, 15).

Кроме идиоморфных кристаллов в сечении шлифа встречаются зерна аллотриоморфных форм. Аллотриоморфными называются зерна неправильной формы. Они характерны для минералов с низкой кристаллизационной способностью, например для сфалерита, халькопирита, пирротина и др. (рисунки 16, 17, 18).

Для ряда минералов характерна колломорфная форма выделений: сферическая, почковидная и фестончатая; такие формы часто наблю-

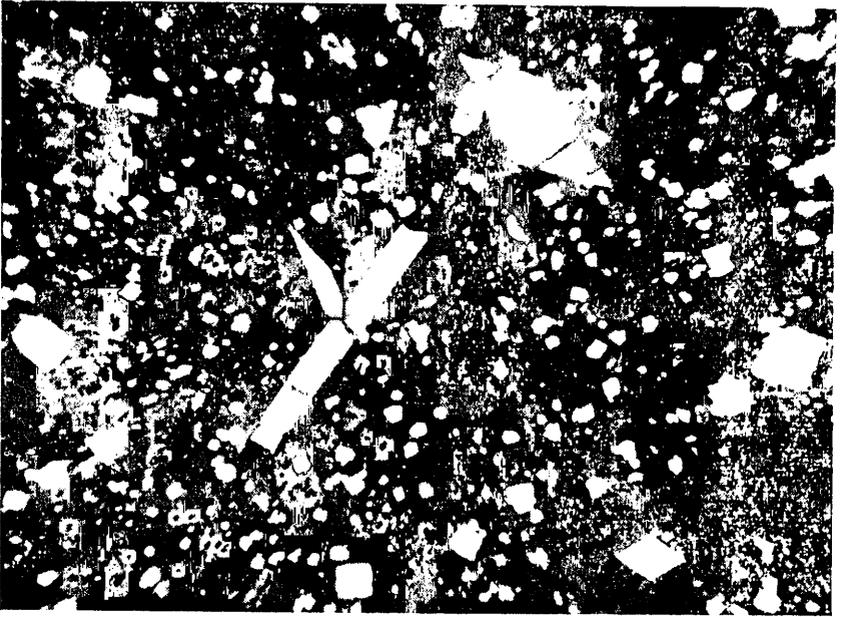


Рис. 13. Изометричная форма метакристаллов пирита (белое) и удлиненная ромбическая форма метакристаллов арсенопирита (белое). Месторождение Бакырчак, Казахская ССР. Полированный шлиф. $\times 90$

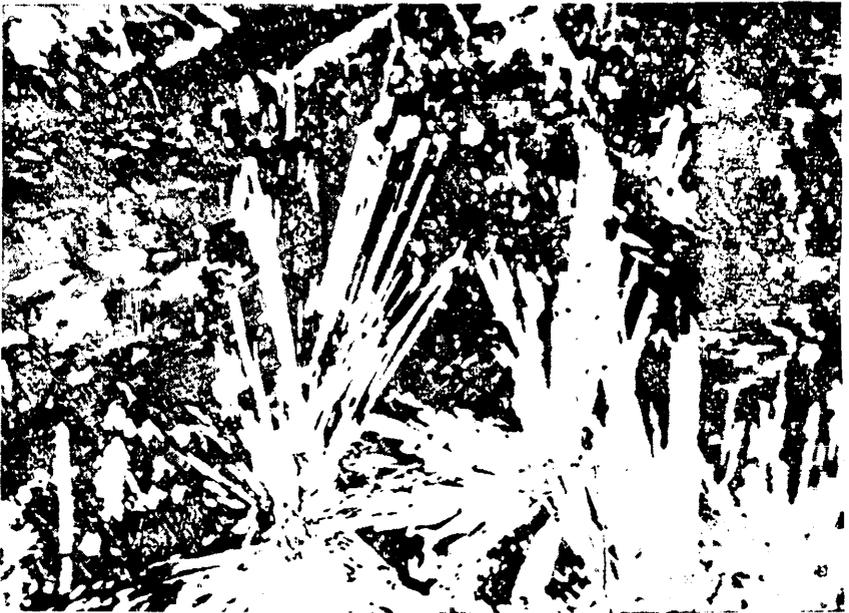


Рис. 14. Удлиненные игольчатые кристаллы людовигита (белое) в породе (серое). Сибирское месторождение, СССР. Полированный шлиф. $\times 50$



Рис. 15. Пластины кубанита (белое) в халькопирите (серое). Черное — пустотки, трещинки. Месторождение Талнах, Красноярский край. Полированный шлиф. $\times 50$.
Никколи скрещены



Рис. 16. Выделения фалерита (серое) в кварце (черное). Белое — пирит. Месторождение Тейское, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 40$

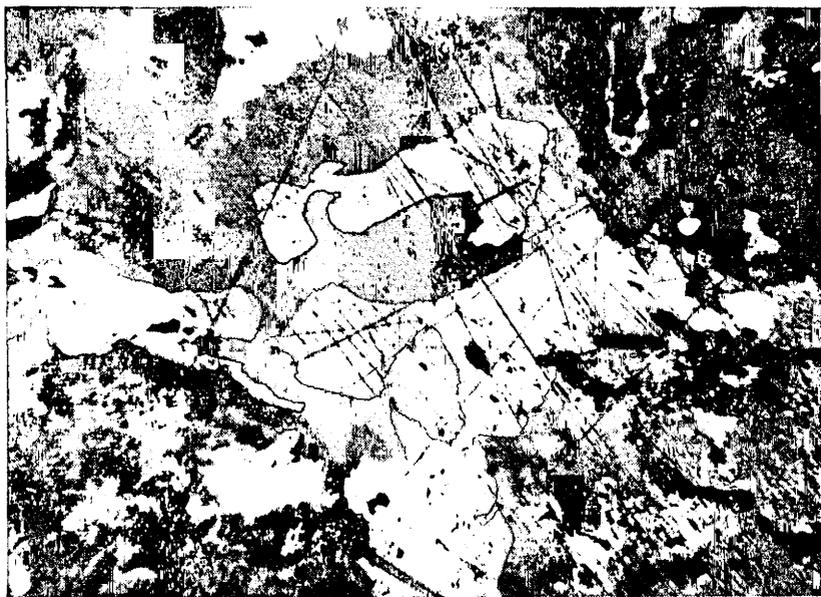


Рис. 17. Выделения халькопирита (белое) в породе (темно-серое). Черное — ямки. Месторождение Агарак, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 90$



Рис. 18. Дендритовидные выделения самородного висмута в сафлорите (белое). Черное — ямки, трещины. Месторождение Аннаберг, ГДР. Полированный шлиф. $\times 50$

даются у гётита, псиломелана, настурана, марказита, реже у вюрцитита, халькопирита, пирита и др. (рисунки 19, 20, 21, 22).

Раскристаллизованные коллоидные агрегаты имеют радиально-лучистое строение в почках и волокнистое строение в полосках и про-

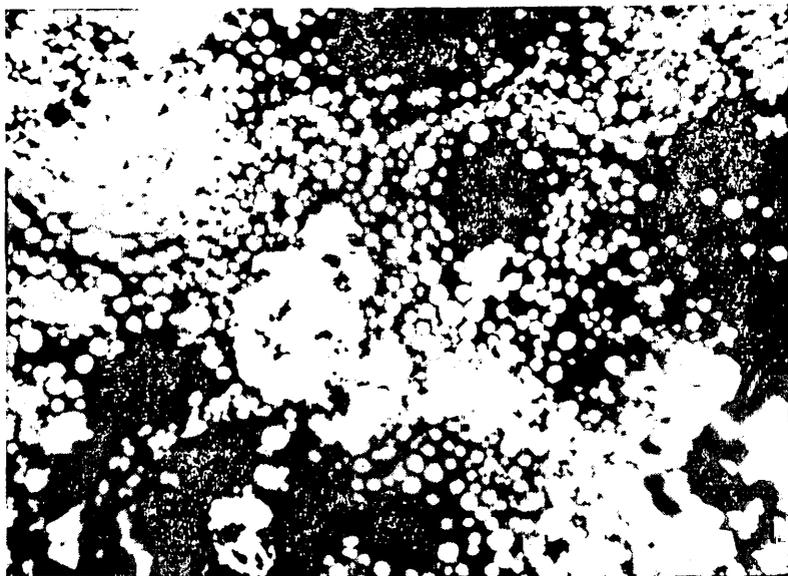


Рис. 19. Коллоидная форма (шарики) выделений пирита (белое) в кварце (черное). Месторождение Кафан, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 120$

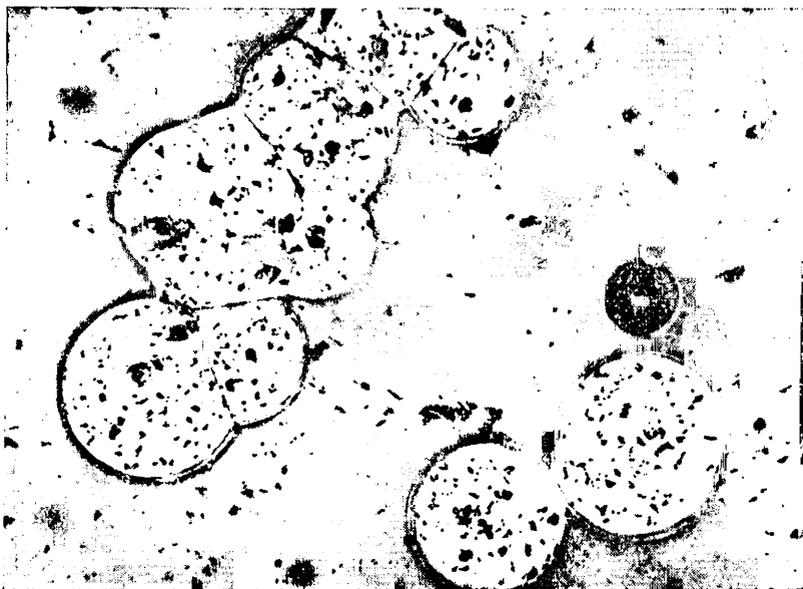


Рис. 20. Коллоидная форма (шарики) выделений настурана (белое) в породе (темно-серое). Месторождение Аннаберг, ГДР. Полированный шлиф. $\times 90$

жилках. В процессе перекристаллизации минералов образуются кристаллобласти линзовидной, пластинчатой и овальной формы. При дроблении хрупкие минералы распадаются на обломки и осколки.

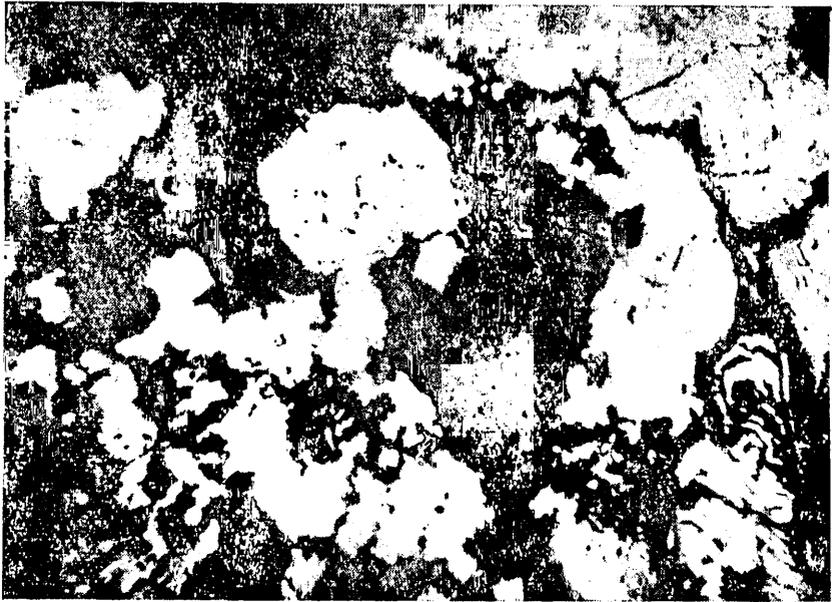


Рис. 21. Колломорфная, почковидная и концентрически-зональная форма выделений халькопирита (белое) и сфалерита (серое) в нерудных минералах (темно-серое). Месторождение Риддер, Алтай. Полированный шлиф. $\times 90$



Рис. 22. Колломорфная, фестончатая форма выделений псиломелана (белое). Черное— ямки. Месторождение Чиатурское. Полированный шлиф. $\times 90$

Внутреннее строение минеральных индивидов. При диагностике минерала иногда имеет большое значение внутреннее строение его зерен: спайность, двойниковое и зональное строение. В полированных шлифах благодаря особенностям их приготовления спайность рудных минералов обычно слабо выражена. Часто спайность хорошо выявляется после структурного травления, в результате разрушения тонкой пленки полирования, или при окислении, или дефор-



Рис. 23. Халькозин (белое) с трещинками спайности по (001) и усыхания в борните (серое). Черное — ямки. Месторождение Кафан, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 90$

мации. Обычно трещины спайности и фигуры выкрашивания наблюдаются в крупнозернистых агрегатах и в полированных шлифах плохого качества.

Спайность рудных минералов обнаруживается в шлифах в виде одной или нескольких систем параллельных трещин различной степени отчетливости. Некоторые минералы имеют от одной до трех систем трещин, в зависимости от числа плоскостей спайности в минерале и от ориентировки полированной поверхности. Если имеются три или четыре направления спайности, могут образоваться своеобразные фигуры выкрашивания, треугольные и четырехугольные (рисунки 23, 24, 25). Треугольники выкрашивания характерны для минералов кубической сингонии (галенита, алтанта, пентландита, сфалерита, магнетита и др.).

Трещины спайности в минерале помимо структурного травления могут быть выявлены в процессе окисления и при динамометаморфизме; например, окисление галенита в англезит обычно происходит вдоль трещинок кубической спайности.

Двойниковое строение наблюдается в минералах под микроскопом. Различают двойники роста, превращения и давления. Двойники роста характерны для многих рудных и нерудных минералов, например антимонита, станина, сфалерита, халькопирита, марказита, магнетита, ильменита, гематита, силъванита, геоскронита, кальцита

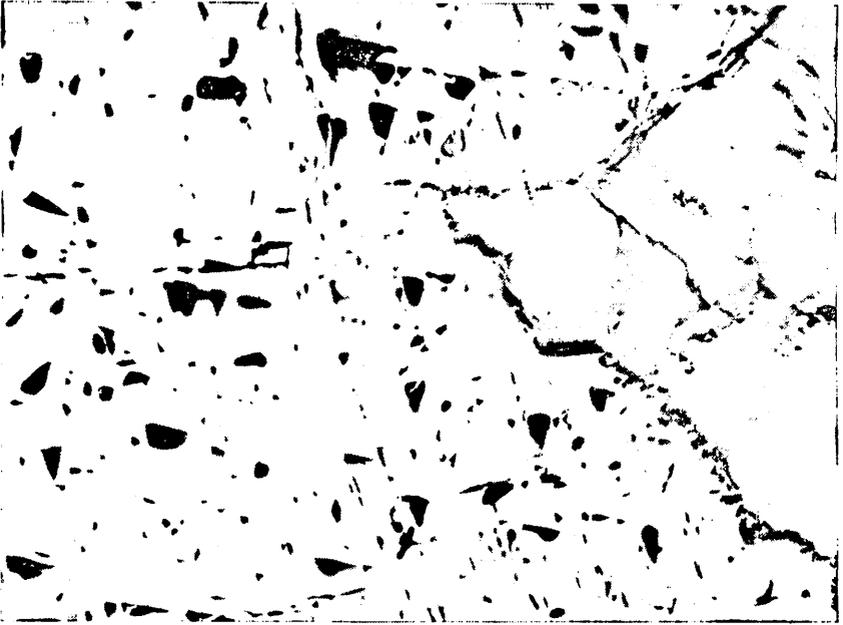


Рис. 24. Пентландит (белое) с треугольниками выкрашивания по спайности. Пирротин (светло-серое) разбит трещинками. Черное — ямки. Месторождение Талнах, Красноярский край. Полированный шлиф. $\times 90$

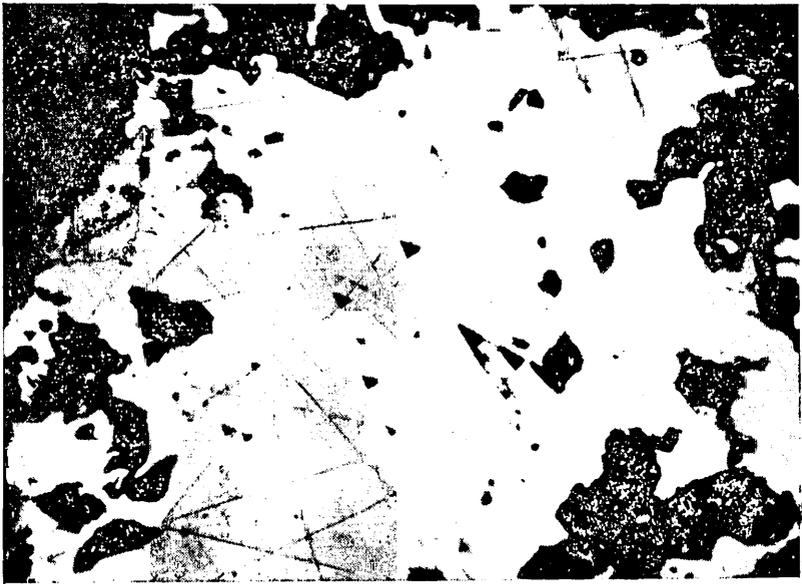


Рис. 25. Галенит (серое) с треугольниками выкрашивания, замещается алланитом (белое). Черное — нерудные минералы. Месторождение Кафан, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 90$

и др. Двойники роста бывают простые и полисинтетические (рис. 26). В зернах минералов двойники представляют собой узкие и широкие строго прямолинейные пластинки. Двойники роста могут быть разви-



Рис. 26. Двойники роста в халькопирите. Протравлен в парах царской водки. Месторождение Каджаран, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 90$



Рис. 27. Звездочки-тройки сафлорита (белое). Черное — нерудные минералы. Месторождение Аннаберг, ГДР. Полированный шлиф. $\times 250$

ты в некоторых зернах мономинерального агрегата и отсутствовать в других зернах того же агрегата. У некоторых минералов наблюдается решетчатые двойники, например у бурнонита.

Двойники превращения имеют пластинчатую или веретенообразную форму и часто перекрещиваются. Они встречаются лишь в некоторых зернах. Наблюдаются в высокотемпературном крупнозернистом халькопирите, кубаните, пирротине, аргентите, станнине, шапбахите, халькозине, самородном висмуте и др.

Полисинтетические двойники давления возникают в зернах при динамометаморфизме. Ярким примером могут служить молибденит, антимонит, пирротин, ковеллин и др. При этом во всех зернах образу-



Рис. 28. Зональное строение кристаллов арсенопирита. Протравлен в HNO_3 конц. в течение 1 мин. В центре кварц (черное). Месторождение Тейское, Армянская ССР. Полированный шлиф. $\times 90$

ются тонкие пластинки двойников одинаковой ширины, часто смятые и деформированные. В зернах помимо двойников давления наблюдаются волнистое погасание, трещины дробления, искривление трещин спайности. Звездочки-тройники наблюдаются в агрегатах сафлорита (рис. 27) и арсенопирита.

Двойниковое строение для некоторых минералов характерно и поэтому заслуживает пристального изучения. Например, двойникование сфалерита помогает отличать его от вуртцита, особенности двойникования раммельсбергита от парараммельсбергита, двойниковое строение халькопирита — от золота (после травления) и т. д.

В анизотропных минералах двойники различаются в скрещенных николях. При вращении столика микроскопа просветленные пластины угасают, а темные, наоборот, просветляются. В изотропных минералах двойники выявляются структурным травлением, например, сфалерит и халькопирит травят в парах царской водки в течение 15—20 с (см. табл. 6).

Зональное строение характерно для многих минералов, а для некоторых (смальтина, герсдорфита, кобальтина, касситерита, арсенопирита, сафлорита, бравоита и пирита) эта особенность строения постоянна и может быть использована как диагностический признак (рис. 28). В минералах обнаруживают зональность роста,

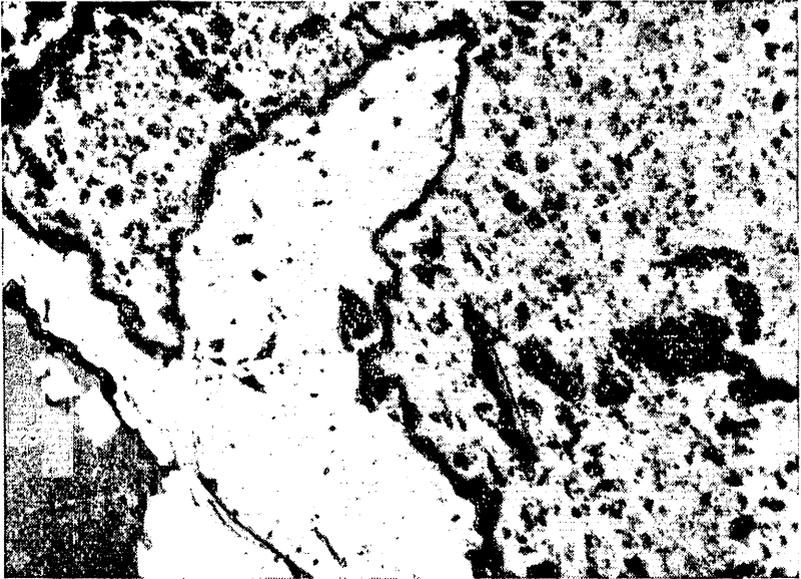


Рис. 29. Сфалерит (серое) с эмульсией халькопирита (белое). Касситерит — темно-серое, шагреневая поверхность; станный — светло-серое, образует каемки, прожилки; арсенопирит — белое, кристаллики — ромбики; черное — кварц. Восточное Забайкалье, полированный шлиф. $\times 120$

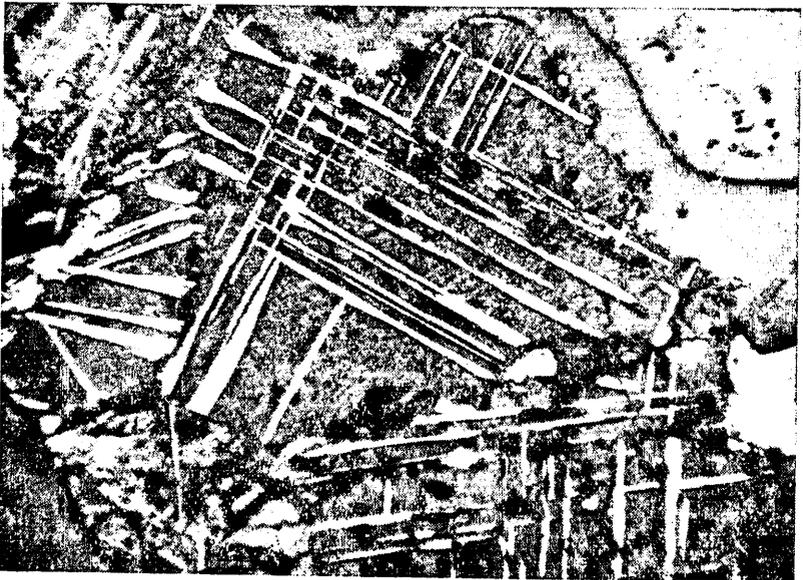


Рис. 30. Магнетит (темно-серое, протравлен) с включениями пластинок ильменит (белое). Месторождение Алексеевское, полированный шлиф. $\times 90$

которая проявляется в отдельных кристаллах в виде кристаллически-зонального строения, свидетельствующего о последовательности отложения вещества вокруг центра кристаллизации.

Зональное строение характерно для кристаллов и метакристаллов и отсутствует в кристаллообластах. В натечных агрегатах гётита, псиломелана, настурана и других наблюдается концентрически зональное строение (см. рисунки 20, 21).



Рис. 31. Пирротин (серое, протравлен) с пламенивидными включениями пентландита II (белое). Магнетит — серое, слева внизу; пентландит I — белое, справа вверх. Месторождение Талнах, Красноярский край, полированный шлиф. $\times 90$

Твердые включения, образовавшиеся в процессе распада твердого раствора, имеют важное значение для диагностики минерала, например, для сфалерита характерны каплевидные включения халькопирита (рис. 29), пирротина и станнина; в титансодержащем магнетите развиты тельца распада ильменита в виде эмульсии, пластинок и решеток (рис. 30); в магматическом пирротине наблюдаются мелкие включения пентландита — продукта распада твердого раствора (рис. 31).

Глава 4

Химические свойства рудных минералов и методы их изучения в полированных шлифах

При диагностике минералов в отраженном свете изучаются также их химические свойства. Наиболее распространенными микрохимическими методами являются диагностическое травление и качественный микрохимический анализ.

В настоящее время в связи с бурным развитием физических и оптических методов диагностики микрохимические методы в большой

степени потеряли свою значимость. Однако, по мнению авторов, полностью игнорировать их нецелесообразно, так как в некоторых случаях результаты, полученные этими простыми методами, исключают применение более трудоемких специальных методов (химических, рентгеноструктурный, термический анализы и др.). Так, например, антимонит от травления КОН покрывается специфическим для него ярко-желтым налетом, а цинкениит после длительного травления КОН выявляет присущую ему структуру «пальмовых палочек», что дает возможность легко определить эти минералы.

Систематическое изучение рудных минералов реакциями травления было начато в 1910—1916 гг. различными исследователями и вылилось в два основных направления. Первое направление отражено в работах В. Мердоха, В. Деви, С. Фарнхама, М. Н. Шорта, С. А. Юшко и др. Эти исследователи применяли диагностическое травление главным образом для определения минералов, на основе чего разработали схемы первых определителей. Установлено, что методика диагностического травления наиболее применима к сульфидам и сульфосолям и имеет небольшое значение при диагностике окислов и силикатных рудных минералов. Второе направление представлено работами В. Ван дер Вина, Г. Шнейдерхена, П. Рамдора, А. Г. Бетехтина, А. Д. Генкина, А. Д. Филимоновой, Т. И. Шадлун и др. Они разработали методику травления не только для диагностики минералов, но в первую очередь для выявления структуры минеральных агрегатов и внутреннего строения зерен.

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ И СТРУКТУРНОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Методика травления основана на различном поведении полированной поверхности минералов при действии химических реактивов. Для травления применяются реактивы определенной концентрации. Необходимы следующие стандартные реактивы: HNO_3 концентрированная*; HCl концентрированная; KCN , 20%-ный раствор (вес. %); FeCl_3 , 20%-ный раствор (вес. %); KOH , 40%-ный раствор (вес. %); HgCl_2 , 5%-ный раствор (вес. %); царская водка (3 части концентрированной HCl и 1 часть концентрированной HNO_3); H_2O_2 , 30%-ная концентрация.

Реактив H_2O_2 применяется при определении некоторых марганцовых минералов. Для минералов, совершенно не реагирующих с другими реактивами, иногда применяют царскую водку.

Растворы кислот следует хранить в капельницах с тонкооттянутыми пипетками, с притертыми пробками, а растворы солей — в капельницах с резиновыми пробками. Емкость капельниц 10—20 см³. Капельницы с реактивами для устойчивости устанавливаются в деревянную подставку или пластмассовую коробку с гнездами.

Методика травления. При проведении травления соблюдается определенная последовательность действий. Исследуемый минерал помещают в центр поля зрения микроскопа. На свежую и чистую полированную поверхность шлифа под микроскопом накладывает капля реактива. При этом применяются объективы, далеко отстоящие от поверхности шлифа (4, 7[×] или 9[×]), т. е. с большим фокусным расстоянием. Реактив наносится с помощью тонкооттянутой пипетки, тонкой стеклянной палочки или бумажной стрелки. После каждого реактива пипетку или палочку следует промыть водой и просушить фильтровальной бумагой, а бумажную стрелку обрезать. Капля раствора размером в 0,5—1 мм накладывает на мономинеральное вы-

* В работах М. Н. Шорта (1934) и П. Рамдора (1962) применяются для диагностического травления HNO_3 (1:1), HCl (1:1).

деление. Испытание минерала травлением продолжается в течение 1 мин. Некоторые минералы травятся реактивами медленно в течение 3—5 мин (например, магнетит в HCl); другие минералы при воздействии реактива моментально чернеют (например, галенит в HNO_3).

Наблюдения за травлением минерала производятся под микроскопом с момента соприкосновения капли с поверхностью минерала. Наблюдатель фиксирует следующие положительные результаты травления: действие паров реактива, вскипание на поверхности минерала, образование «пятна» на поверхности минерала, выявление структурных элементов минерала.

При действии паров реактива на полированной поверхности минерала вокруг капли образуется цветная или темная кайма. Под действием кислот некоторые минералы вскипают медленно или бурно. Так, галенит медленно вскипает от действия HNO_3 и на его поверхности выделяются единичные пузырьки газа (H_2S). При бурном вскипании выделяются многочисленные пузырьки газа (H_2S или CO_2). Это характерно для кальцита, арсенопирита и др. Пузырьки газа хорошо наблюдать в скрещенных николях.

Через 1 мин поднимают тубус микроскопа и промокают фильтровальной бумагой каплю реактива, а затем на травленное место накладывают влажную фильтровальную бумагу и осторожно прижимают указательным пальцем некоторое время. После снятия капли реактива результаты травления просматривают под микроскопом. Если реактив положительно действует на минерал, то на полированной поверхности образуется «пятно» или выявляются структурные особенности минерала; если реактив действует отрицательно — полированная поверхность не изменяется.

При интенсивном травлении минерала образуются пятна черного цвета или иризирующие. Если полированная поверхность минерала под действием реактива растворяется, образуется шероховатое серое, бурое или совсем черное пятно. Иногда полированная поверхность минерала окисляется, в этом случае образуется радужное иризирующее пятно желтой, красной, зеленой, синей и коричневой окраски. При слабом травлении выявляются структурные элементы минерала — границы зерен, трещинки спайности, зональное и двойниковое строение зерен.

Некоторые минералы обладают векториальным травлением, на одних кристаллографических сечениях зерен они травятся реактивами интенсивно, на других сечениях — слабо или совсем не травятся. Поэтому неизвестный минерал желательно протравить одним и тем же реактивом несколько раз и на разных сечениях зерен.

Перед нанесением следующего реактива на минерал полированную поверхность хорошенько промывают. Если минерал протравился предыдущим реактивом, шлиф следует дополировать. Реактивы наносят на минерал выборочно, чтобы: 1) различать минералы с близкими физическими и оптическими свойствами, например, арсенопирит и леллингит по-разному травятся HNO_3 (см. определительную таблицу V), и 2) подтвердить диагностику минерала, произведенную по физическим и оптическим свойствам, например для антимонита результаты травления КОН очень характерны.

Исследователю, применяющему диагностическое травление, следует учитывать некоторые факторы, влияющие на результаты травления. Капля реактива не должна выходить за пределы одного минерала. Ведь если она попадет на сrostок двух минералов, могут возникнуть электролитические пары, которые изменяют характер травления минерала; в контакте галенита с борнитом при травлении раствором хлорного железа реакция протекает сильнее в борните, в то время как га-

ленин остается неизменным. Как известно, галенит в обычных условиях от этого реагента моментально иризирует. В большинстве минеральных ассоциаций эти электролитические эффекты слишком слабы и почти не влияют на реакцию травления.

При проведении диагностического травления большое влияние также оказывают окружающие минералы. Если испытуемый минерал окружен минералами, более легко поддающимися травлению кислотами, то реакция с испытуемым минералом может быть отрицательной. Так, например, в окружении карбонатов сильно травящиеся рудные минералы могут остаться неизменными, так как кальцит и другие карбонаты нейтрализуют кислоты.

Нередко на результаты травления влияют изоморфные примеси в минерале, а также различная восприимчивость к травлению различно ориентированных зерен одного и того же минерала. В некоторых случаях слабый эффект травления не позволяет однозначно решить — отрицательный или положительный характер оно имеет. На процесс травления часто отрицательно действует плохое качество полирования шлифов.

Характер диагностического травления минералов отражен в определенных таблицах (I—VI), в виде различной интенсивности штриховки секторов круга.

При диагностике рудных минералов применяется структурное травление. Оно позволяет выявить внутреннее строение зерен (двойники, зональность роста, фигуры деформации), трещинки спайности и границы зерен, а также внутреннее строение агрегатов — аллотриоморфнозернистое, идиоморфнозернистое и т. д.

Структурное травление основано на том, что растворимость минерала изменяется в зависимости от кристаллографической ориентировки зерен. В плоскости шлифа одни кристаллы минерала будут растворяться быстрее, чем другие, а в отдельных кристаллах будут по-разному травиться двойники и зоны роста.

Структурное травление осуществляется в парах реактива и жидким реактивом. В последнем случае накладывают большую каплю реактива (2—3 мм и более) на поверхность шлифа или сплошь погружают полированную поверхность минерала в реактив на часовом стекле. При травлении в парах реактива, например в парах царской водки, полированная поверхность минерала устанавливается над широким горлышком склянки с царской водкой. По истечении определенного промежутка времени результаты структурного травления в парах реактива наблюдают под микроскопом. При этом полированную поверхность шлифа нельзя вытирать.

Структурное травление минералов производится специальными реактивами в течение определенного времени (табл. 7).

КАЧЕСТВЕННЫЙ МИКРОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Качественный микрохимический анализ применяется для определения отдельных химических элементов, присутствующих в минерале, а также для изучения химического состава руд. С помощью микрохимического анализа можно различать в отраженном свете рудные минералы и в особенности минералы окисленных руд, сходные по своим оптическим и физическим свойствам, например: церуссит и смитсонит, теннантит и тетраэдрит и др.

Для качественного микрохимического анализа составляется набор реактивов, которые подразделяются на две группы: растворители и проявители. *Растворителями* принято называть такие реактивы, которые используются для растворения минерала с целью получения ис-

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ФОРМЫ И СТРОЕНИЯ ЗЕРЕН НЕКОТОРЫХ РУДНЫХ
МИНЕРАЛОВ В ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФАХ

Минерал	Формула	Поляризованный отраженный свет		Структурное травление	
		Явления анизотропии	Результаты наблюдений	Главные реагенты	Экспозиция
Антимонит	Sb_2S_3	Сильно анизотропный	+	КОН (20%-ный раствор)	1—10 с (стереть осадок)
Арсенопирит	$FeAsS$	Сильно анизотропный	+	1) HNO_3 (1:1) 2) 1 ч. КОН конц. + + 1 ч. H_2O_2 (30%-ный раствор)	1) 1 мин 2) 10—60 с
Блеклые руды	$Cu_{12}Sb_4S_{13}$ — $Cu_{12}As_4S_{13}$	Изотропный	—	1 ч. HCl конц. + + 1 ч. CrO_3 (50%-ный раствор)	1—2 мин
Борнит	Cu_5FeS_4	Изотропный	—	1 в KI (10 г I + 1,2 г KI + 50 см ³ H_2O)	20—60 с
Галенит	PbS	Изотропный	—	1) 7 ч HCl (конц.) + + 10 ч. H_2O 2) HCl (1:2) 3) 75—85 ч. HNO_3 (конц.) + 15—25 ч. C_2H_2OH Смесь способна взрываться	1) несколько минут 2) 2—10 с 3) 2—10 с
Гематит	Fe_2O_3	Сильно анизотропный	+	1) HCl (1:1) + электри- ческий ток 2) HF конц.	— 2) 1—2 мин
Кобальтин	$CoAsS$	Изотропный	—	1 ч. $KMnO_4$ + 1 ч. H_2O + 1—2 капли H_2SO_4	30 с
Ковеллин	CuS	Сильно анизотропный	+	—	—
Магнетит	Fe_3O_4	Изотропный	—	HCl конц.	2—5 мин
Манганит	$MnO_2 \times$ $\times Mn(OH)_2$	Сильно анизотропный	+	HF конц.	От 30 с до несколь- ких минут
Марказит	FeS_2	Сильно анизотропный	+	1) насыщенный раствор HNO_3 конц. + CaF_2 2) 1 ч. $KMnO_4$ (насыщен- ный водный раствор) + + 1 ч. КОН (20%-ный раствор)	1) от 1—2 мин до несколь- ких минут 2) 20—30 с
Молибденит	MoS_2	Сильно анизотропный	+	—	—
Никелин	$NiAs$	Сильно анизотропный	+	HNO_3 (1:1)	30—60 с
Пирит	FeS_2	Изотропный	—	1) насыщенный раствор HNO_3 конц. + CaF_2 2) 1 ч. $KMnO_4$ (насыщен- ный водный раствор) + + 1 ч. КОН (20%-ный раствор)	1) от 1—2 мин до несколь- ких минут 2) 20—30 с

Минерал	Формула	Поляризованный отраженный свет		Структурное травление	
		Явления анизотропии	Результаты наблюдений	Главные реагенты	Экспозиция
Пирротин	FeS	Сильно анизотропный	+	1) HCl конц. 2) KOH (20%-ный раствор)	1) 1 мин 2) 1—2 мин
Станнин	Cu ₂ FeSnS ₄	Слабо анизотропный	—	HNO ₃ (1:1)	—
Сфалерит	ZnS	Изотропный	—	1) пары царской водки (слегка разбавленной) 2) 1 ч. HCl конц. + + 1 ч. CrO ₃ (50%-ный раствор)	Несколько секунд
Ульманнит	NiSbS	Изотропный	—	HNO ₃ конц.	30—60 с
Халькозин	Cu ₂ S	Изотропный, слабо анизотропный	—	HNO ₃ конц.	3—10 с
Халькопирит	CuFeS ₂	Слабо анизотропный	—	Пары царской водки	15—30 с
Энаргит	Cu ₃ AsS ₄	Сильно анизотропный	+	KCN (20%-ный раствор)	60 с

Знак (+) характеризует положительные результаты наблюдений формы и строения зерен в поляризованном отраженном свете; знак (—) отрицательные результаты.

пытуемого раствора (п. р.). В эту группу входят кислоты различной концентрации (азотная, соляная, серная, уксусная), царская водка, аммиак различной концентрации, перекись водорода (30%-ная) и вода. Для получения перлов необходимы сухие реактивы — сода, селитра, бура, фосфорная соль и едкие щелочи.

Проявителями принято называть реактивы, которые используются в реакциях для открытия химических элементов в испытуемом растворе, например: желтая кровяная соль применяется для определения в испытуемом растворе Fe³⁺, Mo⁴⁺, Cu²⁺, U⁶⁺; йодистый калий — для определения Pb и т. д.

Для проведения микрохимических реакций применяются жидкие и твердые реактивы. Жидкие реактивы хранят в капельницах емкостью 10—20 см³ с тонкооттянутыми пипетками-капиллярами, закрытыми резиновыми колпачками. Твердые реактивы хранят в стеклянных баночках емкостью 10—20 см³. На баночках и капельницах надписывается формула или название реактива. Жидкие реактивы устанавливаются на деревянную подставку с высверленными гнездами для капельниц. Всего на такой подставке помещаются до 40 капельниц. В первом ряду обычно располагаются растворители, во втором и третьем — проявители. Каждый реактив имеет постоянное место на подставке. Не рекомендуется вынимать капельницы с реактивами из подставки. Для проведения микрохимического анализа необходимо также иметь фильтровальную бумагу, нарезанную полосками 5×7 см; фотобумагу, отмытую в гипосульфите, высушенную и нарезанную листочками 5×6 см; предметные и часовые стекла, песочные часы 1, 2, 3, 5 мин; пипетки и стеклянные палочки; фарфоровые пластинки, фарфоровые чашки ем-

костью 200—300 см²; платиновую пластинку и проволочку, прибор для электротравления, ручной пресс для отпечатков.

Для проведения микрохимического анализа в полевых и лабораторных условиях оборудованы полевые лаборатории, снабженные набором реактивов и всеми необходимыми материалами (ЛОР, ЛРЭ и др.). Качественный микрохимический анализ проводится методами: кристаллоскопическим, капельным, отпечатков и окрашивания.

Кристаллоскопический метод

Кристаллоскопический метод основан на свойстве химического элемента образовывать нерастворимые осадки с проявителем. Осадки отличаются цветом и формой кристаллов. При проведении кристаллоскопического анализа соблюдают следующую последовательность в работе.

1. Растворение минерала с целью получения испытуемого раствора (минерал+растворитель) — это самая ответственная часть операции. Испытуемый раствор получается при растворении минерала в кислотах или щелочах. Труднорастворимые минералы сплавляют с содой или бурой в ушке платиновой проволоки, а затем перл растворяют в HCl (1:1). Растворение минерала производится на полированном шлифе или на предметном стекле растворяется порошок минерала. Капля растворителя наносится на полированную поверхность минерала и выдерживается определенное время (от 1 до 5 мин). Полученный испытуемый раствор остается на полированной поверхности или переносится пипеткой на предметное стекло.

2. Открытие элемента в испытуемом растворе производится путем соединения капли раствора и капли проявителя на шлифе, на стеклянной или фарфоровой пластинке. На шлифе часто выпадает скрытокристаллический или аморфный осадок. Для получения кристаллического осадка поступают следующим образом: каплю испытуемого раствора помещают рядом с каплей проявителя на стеклянной пластинке и острым концом стеклянной или деревянной палочки проводят соединяющий каналчик между этими каплями, по которому реактив постепенно вливается в каплю раствора. Иногда в каплю испытуемого раствора вводят мельчайшую крупинку сухого реактива — проявителя.

3. Полученный осадок изучается на полированном шлифе под микроскопом в скрещенных николях или под бинокляром; на предметном стекле — под микроскопом в проходящем свете. Наблюдатель записывает цвет и форму кристаллов осадка.

Кристаллоскопический анализ наиболее широко применяется в практике минералогических исследований. Реакция и метод детально описаны в работах И. М. Коренмана (1955 г.) и С. А. Юшко (1966).

Примеры реакций кристаллоскопического анализа.

1. *Открытие свинца в сульфидах (галените, буланжерите, джемсоните, бурноните и др.) с KI (5%-ный раствор).* Минерал в течение 1—2 мин растворяют в HNO₃ конц., затем остаток кислоты тщательно снимают фильтровальной бумагой. Травленный участок минерала или шлифа смачивают 5%-ным раствором KI. Образуется осадок йодистого свинца желтого цвета.

Аналогичную реакцию дает висмут.

2. *Открытие сурьмы в сульфидах и антимонидах с KI и CsCl.*

Минерал растворяется на шлифе в HNO₃ конц. в течение 1—2 мин. Избыток кислоты высушивается фильтровальной бумагой. Травленное место смачивается каплей HCl 1:1, а затем с противоположных участков капли вносятся в небольшом количестве сначала тонкорастертый KI, а затем CsCl. Образуется осадок кирпично-красного цвета комплексной соли сурьмы, хлористого цезия и йода.

Аналогичную реакцию дает висмут.

3. *Открытие мышьяка в сульфидах и арсенидах.* Минерал + HNO₃ конц. на шлифе. Экспозиция 5 мин + порошок (NH₄)₂MoO₄. Осадок лимонного цвета образуется через 1—2 мин. Цвет осадка хорошо наблюдать на белом фоне фильтровальной бумаги.

Аналогичную реакцию дает фосфор.

4. *Открытие ртути в киновари.* Минерал растворяется на шлифе в капле царской водки (ц. в.) в течение 5 мин. Избыток кислоты высушивается фильтровальной бумагой. Травленое место смачивается каплей HCl 1:20, вносится в небольшом количестве проявитель — тонкорастертый порошок $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, затем KCNS . Образуется осадок синего цвета (призмы и дендриты).

Капельный метод

Капельный метод позволяет открывать химический элемент в капле испытуемого раствора по характерному цветному пятну на фильтровальной бумаге при добавлении капли проявителя. Этот метод наиболее чувствителен в микрохимическом анализе, что обусловлено абсорбирующими свойствами фильтровальной бумаги. На фильтровальной бумаге увеличивается концентрация растворенного вещества в определенных участках капельного пятна — в центре или на периферии.

Детальное описание реакции и методики проведения капельного анализа дано в работах Ф. Файгля (1937), Н. А. Тананаева (1954). Методика проведения анализа такова:

1. Испытуемый раствор получают путем растворения минерала на полированном шлифе или в крупинках на предметном стекле в капле растворителя (минерал+растворитель). При этом обязательно соблюдается рекомендованная экспозиция травления минерала растворителем.

2. Каплю испытуемого раствора переносят на фильтровальную бумагу (фильтровальная бумага+испытуемый раствор). С шлифа каплю испытуемого раствора снимают, промокая фильтровальной бумагой. С предметного стекла каплю переносят пипеткой. Величина пятна должна быть не более 2—3 мм в диаметре.

3. Открытие элемента в испытуемом растворе. В центр капельного пятна на фильтровальной бумаге ставят пипетку с проявителем. Образуется цветное пятно в центре или кольцо на периферии капельного пятна, указывающее на присутствие искомого элемента. Большинство цветных пятен после высыхания устойчивы и могут быть использованы в качестве иллюстраций в отчетах, курсовых и дипломных проектах.

Примеры реакций капельного анализа.

1. *Открытие Fe^{3+} в сульфидах.* Минерал + HNO_3 конц. Экспозиция 1 мин, фильтр. бумага + и. р. + $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Пятно синего цвета.

2. *Открытие Cu в хорошо растворимых сульфидах (халькозин, дигенит, борнит) и оксидах (куприт, тенорит).* Капельным методом Cu открывается в минералах с ферроцианидом калия (желтой кровяной солью) $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ в кислой среде; с рубеановой кислотой $\text{CNCS}_2 \cdot \text{NH}_2$ и с бензоннооксимом в нейтральной или щелочной среде:

а) минерал+ HNO_3 (1:1); экспозиция 2 мин, фильтр. бумага+и.р.+ NH_4OH +рубееановая кислота; пятно серо-зеленого до черного цвета, мешает никель;

б) минерал+ HNO_3 (1:1), экспозиция 2 мин, фильтр. бумага+и.р.+ NH_4OH +бензоннооксим, пятно зеленого цвета;

в) минерал+ HNO_3 (1:1), экспозиция 2 мин, фильтр. бумага+ $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$, пятно розово-коричневого цвета, мешают Fe^{3+} , Mo^{4+} , U^{6+} .

3. *Открытие Cu в труднорастворимых сульфидах (халькопирит, теннантит, тетраэдрит, энаргит).* Минерал+ HNO_3 конц. или ц. в. Экспозиция 5 мин, фильтр. бумага+и.р.+ NH_4OH +рубееановая кислота. Пятно серо-зеленого до черного цвета. Мешает никель.

4. *Открытие Ni в сульфидах, арсенидах, антимонидах.* Капельным методом Ni хорошо открывается двумя реактивами: с диметилглиоксимом, реакция Л. А. Чугаева; с рубееановой кислотой:

а) минерал+ HNO_3 конц., экспозиция 1—2 мин, фильтр. бумага+и.р.+ NH_4OH +диметилглиоксим, пятно малиново-розового цвета;

б) минерал+ HNO_3 конц., экспозиция 1—2 мин, фильтр. бумага+и.р.+ NH_4OH +рубееановая кислота, пятно сине-фиолетового цвета, мешает медь.

5. *Открытие Mo^{4+} в сульфидах (молибденит, джорджизит).* Минерал+ HNO_3 (1:1). Экспозиция 3—5 мин, фильтр. бумага+и.р.+ксантогенат калия, свежеприготовленный водный раствор. Пятно розового, красного или фиолетового цвета. Пятно выцветает через 20—30 мин.

6. Открытие Mo^{6+} в молибдатах, окислах (вульфенит, повеллит, ферромolibдит). Минерал + HNO_3 (1 : 1). Экспозиция 1—3 мин. фильтр. бумага + и.р. + $K_4Fe(CN)_6$. Пятно коричневого цвета. Мешает Cu^{2+} , U^{6+} .

Метод отпечатков

Метод отпечатков основан на свойстве химического элемента давать с проявителем цветные пятна на фотобумаге. Метод отпечатков позволяет: 1) по цвету отпечатка устанавливать наличие химического элемента, 2) по рисунку отпечатка изучать форму выделений минерала, строение руды и определять количество минерала в руде, 3) подбирать определенный растворитель или проявитель и получать отпечаток на фотобумаге только данного минерала или группы минералов (например, отпечаток молибденита, халькопирита, галенита, церуссита, смитсонита, пиролюзита, алабандина и т. д.). Приготовленные этим методом отпечатки можно хранить в течение длительного времени и использовать в качестве иллюстраций в отчетах, курсовых и дипломных проектах (рис. 32—41).

Для анализа отбираются свежеприготовленные полированные шлифы или пришлифовки любого размера, а также образцы зерна. Штуфы, шлифы и керны тщательно очищаются от пыли и пленок окисления. Приготавливается фотобумага, покрытая тонким слоем желатина, путем промывки обычной фотобумаги (лучше тонкой, глянцевой) в 20%-ном растворе гипосульфита. Затем фотобумагу промывают в воде, высушивают, нарезают листиками требуемого размера и хранят в пакетах или в стеклянных банках. Фотобумага может быть заменена бесцветным целлофаном.

Из других материалов отбирают: зеркальные стекла размером 30×30 см (или 90×12 см), ручной пресс для отпечатков — пресс с грузом или обыкновенный ручной пресс для установки полированных шлифов, фильтровальную бумагу, несколько фарфоровых чашек, необходимые реактивы для микрохимического анализа данного типа руд, песочные часы, прибор для электротравления и т. п.

Растворение минерала на фотобумаге (фотобумага + растворитель + шлиф) — это одна из наиболее ответственных операций в анализе. Фотобумагу, отмытую от бромистого серебра, смачивают в растворителе. Пропитывание бумаги растворителем продолжается от нескольких секунд до 1 мин. Избыток растворителя всегда снимают фильтровальной бумагой. На приготовленную фотобумагу накладывают полированную поверхность шлифа, который лучше прижать к фотобумаге, чтобы обеспечить полное соприкосновение полированной поверхности с бумагой, при помощи пресса с грузом или рукой. Травление продолжается определенный промежуток времени. Недодержка и передержка одинаково вредны.

Некоторые минералы (например, галенит, халькопирит и др.), нерастворимые или трудно растворимые в кислотах и щелочах, требуют предварительной обработки перед травлением на фотобумаге.

Рассмотрим несколько примеров.

Халькопирит перед травлением обрабатывают в течение 2—5 мин в парах царской водки до получения тусклой серой пленки $CuCl_2$ на полированной поверхности минерала. После травления минерала в парах царской водки шлиф плотно прижимают к фотобумаге, смоченной раствором аммиака. Травление продолжается 5 мин. Затем фотобумагу проявляют в рубановой кислоте. Появляется отпечаток серозеленого цвета.

Некоторые минералы перед травлением на фотобумаге подвергаются сплошному травлению, например образец или шлиф с галенитом

погружают полированной поверхностью в чашку с HNO_3 конц. Травление продолжается 1 мин. На галените образуется пленка серого цвета нитрата свинца. Затем образец осторожно промывают в воде, высушивают на фильтровальной бумаге и накладывают на фотобумагу, смоченную йодистым калнем (5%-ный раствор). Моментально появляется отпечаток йодистого свинца желтого цвета.

Травление растворителем минерала, проводящего электричество, усиливается с помощью постоянного электрического тока на специальном приборе. Устанавливается следующее направление тока при определении катионов: провод отрицательным полюсом присоединяется к фотобумаге, пропитанной растворителем, а положительным полюсом — к минералу в полированном шлифе. Шлиф в этом участке тщательно очищают. При открытии серы устанавливают обратное направление тока в цепи: минус — к минералу, плюс — к бумаге.

Проявление отпечатка (фотобумага + проявитель). Полученный отпечаток в сыром виде погружают в реактив-проявитель (например, рубеоновая кислота, йодистый калий, раствор желтой соли) (см. рисунки 32—41), отвечающий площади минерала, содержащего данный химический элемент. Каждый раз после проявления отпечаток промывают в воде в течение 1—3 мин. Затем отпечаток высушивают, обрезают и наклеивают в отчет.

Отпечатки можно с успехом получить из керна буровых скважин. Кери плотно заворачивается в фотобумагу, пропитанную растворителем. После этого фотобумага проявляется соответствующим проявителем. Таким образом приготавливаются отпечатки с пришлифовок, шлифов и кернов руды, в которых наглядно можно показать наличие соответствующих химических элементов, количество рудного минерала, размеры его выделений и структурно-текстурные особенности строения руды.

Примеры реакций методом отпечатков.

1. *Открытие Pb в сульфидах.* Полированную поверхность минерала на шлифе смачивают HNO_3 конц. до потускнения. Затем избыток кислоты тщательно снимают фильтровальной бумагой. Фотобумагу смачивают в растворе KJ , слегка просушивают на фильтровальной бумаге и накладывают на полированную поверхность минерала. Образуется прямой отпечаток желтого цвета.

2. *Открытие Zn в сфалерите, вюрцитите.* Фотобумага + HNO_3 конц. + HCl конц. + 0,1%-ный раствор $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (в равных количествах) + шлиф. Предварительно полированная поверхность минерала травится в парах и.в. до потускнения. Экспозиция 3 мин + $\text{HgCl}_2 \cdot \text{KCN}$. Отпечаток фиолетового цвета. Промыть отпечаток в воде от роданистого железа.

3. *Открытие Fe^{3+} в сульфидах.* Фотобумага + HNO_3 конц. + шлиф. Экспозиция 1 мин + $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Отпечаток синего цвета. Мешают Cu , Mo , U .

4. *Открытие Mn^{4+} в окислах.* Фотобумага + уксуснокислый бензидин + шлиф. Экспозиция 3 мин. Отпечаток от голубого до синего и до бурого цвета.

5. *Открытие Mn^{2+} в алабандине.* Фотобумага + HNO_3 конц. + шлиф. Экспозиция 3—5 мин + $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$. Отпечаток бурого цвета.

6. *Открытие Si в халькопирите, теннантите, тетраэдрите, энаргите.* Полированная поверхность минерала на шлифе обрабатывается 3—5 мин в парах царской водки до образования серой пленки. После травления шлиф плотно прижимают к фотобумаге, смоченной раствором аммиака. Травление на фотобумаге продолжается 3—5 мин. Затем фотобумагу проявляют в рубеоновой кислоте. Появляется отпечаток серо-зеленого цвета.

7. *Открытие Si в халькозине, борните, тенорите, куприте.* Фотобумага + HNO_3 (1:1) + шлиф. Экспозиция 1—3 мин + рубеоновая кислота + NH_4OH . Отпечаток серо-зеленого до черного цвета. Отпечатки черного цвета получаются на хорошо растворимых минералах.

8. *Открытие Ni в сульфидах, арсенидах.* Фотобумага + NH_4OH + шлиф, протравленный в парах ц.в. Экспозиция 3—5 мин + диметилглиоксим. Отпечаток красного цвета.

9. *Открытие As в сульфидах, арсенидах.* Фотобумага + 5 ч. NH_4OH + 1 ч. H_2O_2 (30%-ной) + шлиф. Экспозиция 1—3 мин + AgNO_3 . Отпечаток шоколадно-коричневого цвета.

10. *Открытие Se в селенидах.* Фотобумага + HNO_3 (1:1) + шлиф. Экспозиция 2 мин + тиомочевина. Отпечаток красного цвета.

Фазовый микрохимический анализ

Фазовый микрохимический анализ руд основан на различной растворимости минералов, содержащих один и тот же химический элемент, или на применении различных проявителей. С помощью фазового анализа определяется не только химический элемент, но и минерал, содержащий его. Обычно подбирают такой растворитель, который растворяет только один минерал из группы минералов, содержащих данный элемент, или, наоборот, растворяет все слагающие руду минералы, за исключением одного минерала.

При проведении фазового анализа методом отпечатков начинают обработку полированного шлифа или зерна, применяя наиболее слабые растворители. При этом на отпечатке получаются участки, отвечающие площади распространения в полированном шлифе наиболее растворимого минерала. Остальные отпечатки, полученные с помощью более сильных растворителей, соответствуют нескольким минералам, но все же отличаются друг от друга по интенсивности окраски.

Реакции фазового микрохимического анализа руд черных, цветных, редких и радиоактивных металлов, проводимые капельным методом отпечатков, приведены в табл. 8.

Метод окрашивания, или пленочный

Метод окрашивания, или пленочный, применяется для изучения минерального состава руд и рудовмещающих пород. Хорошие результаты окрашивания руд получаются на шлифованных штуфах, в полированных шлифах, в прозрачных шлифах без покровных стекол. При реакциях окрашивания на поверхности минерала образуется цветная пленка.

Окрашивание минералов основывается на физических и химических явлениях. Некоторые минералы (например, каолинит, серицит и др.) обладают способностью адсорбировать вещество органических красок: каолинит поглощает частицы растворенной в воде краски (кристалл-фиолет или метиленовый голубой), серицит поглощает частицы родамина В.

В других минералах при воздействии реактивов развиваются химические реакции. Процесс окрашивания рассматривается как обменная реакция между красителем и минералами. В этом случае на поверхности минералов образуются пленки определенного состава и цвета. Например, на анкерите при действии HCl (1:20) и 5%-ного раствора $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ развивается пленка турбулевой сини, на церусците при действии HCl (1:1) + 5% KI — пленка йодистого свинца желтого цвета, на скородите при действии 20%-ного раствора KOH — пленка коричневого цвета гидроокислов железа и т. д.

При окрашивании выявляется структура мономинеральных участков и строение кристаллических зерен. В этих случаях окрашивание минералов также зависит от размеров зерен и иногда развивается с различной интенсивностью на определенных кристаллографических сечениях (например, у кальцита, у родохрозита и т. д.). Устанавливается обратная зависимость между способностью минералов к окрашиванию и степенью их кристалличности. Аморфное и скрытокристаллическое вещество в один и тот же промежуток времени окрашивается сильнее, чем среднезернистые и крупнозернистые агрегаты этого же вещества. Лучше всего красятся листоватые и волокнистые минералы.

Окрашивание минералов производится, в общем случае, следующим образом. Препарат помещают в фарфоровую чашку с реактивом-красителем (лучше, когда он весь покрыт реактивом). Процесс окра-

ФАЗОВЫЙ МИКРОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
Железные руды					
<i>Сульфаты</i>					
Пизанит	Вода	2	$K_3Fe(CN)_6$		В пизаните обнаруживаются Fe^{2+} и Ca^{2+}
Мелантерит					
Ярозит	HCl (1:1)	2			
<i>Карбонаты</i>					
Монгеймит					В монгеймите обнаруживаются Fe^{2+} и Zn
Анкерит, Fe-доломит	HCl (1:20)	2			Анкерит реакция на Ca, Mg
Сидерит	HCl (1:1)	2	$K_3Fe(CN)_6$		
<i>Сульфиды</i>					
Пирит	HNO_3 (1:1)	2	а) $K_4Fe(CN)_6$; $K_3Fe(CN)_6$	а) синий	В минералах обнаруживаются Fe^{2+} , Fe^{3+} , а также S, As, Cu
Марказит	HNO_3 конц.	1	б) NH_4CNS + антипириин	б) красный	
Пирротин	HNO_3 (1:20) + эл.	0,1—0,5			
Арсенопирит	ток 4—8 В				
Халькопирит					
Борнит					
<i>Оксиды</i>					
Магнетит, мушкетовит			$K_4Fe(CN)_6$ $K_3Fe(CN)_6$		В минералах обнаруживаются Fe^{2+} , Fe^{3+} , а также Mg и Ti
Магнетит		3—5			
Ильменит	HCl. конц.				
Гётит, лепидокрокит					
Гидрогётит					
Гематит, мартит					
Гидрогематит					

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Силикаты</i>					
Шамозит	HCl конц.	3—5	а) $K_3Fe(CN)_6$ б) $K_4Fe(CN)_6$	а) синий б) красный	В минералах открывается Fe^{2+} , Fe^{3+}
Тюрингит					
Марганцевые руды					
<i>Оксиды</i>					
Пирролюзит	Уксуснокислый бензидин	1—3	Прямой отпечаток	Темно-синий, бурый	В минералах открывается Mn^{4+}
Психомелан, вад					
Вернадит					
<i>Браунит</i>					
Гаусманит	HNO_3 (1:1)	2	$K_3Fe(CN)_6$	Красно-бурый	В минералах Mn^{2+} , Mn^{3+} открывается
Манганит					
<i>Сульфиды</i>					
Алабандин	HNO_3 конц.	3—5	$K_3Fe(CN)_6$	Красно-бурый	
<i>Карбонаты</i>					
Родохрозит	HNO_3 (1:1)	2			В минералах открывается Mn^{2+}
<i>Силикаты</i>					
Родонит	HCl конц.	5			



Рис. 32.



Рис. 33.



Рис. 34.



Рис. 35.



Рис. 36.



Рис. 37.

- Рис. 32. Отпечаток меди в куприте (темно-зеленое). Растворитель NH_4OH , экспозиция 60 с; проявитель—рубеановая кислота
- Рис. 33. Отпечаток меди в энаргите (темно-зеленое). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 30 с; проявитель — рубеановая кислота
- Рис. 34. Отпечаток меди в халькопирите (темно-зеленое). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 30 с; проявитель—рубеановая кислота
- Рис. 35. Отпечаток железа в анкерите (синее). Растворитель HCl (1 : 1), экспозиция 1 мин, проявитель — $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$
- Рис. 36. Отпечаток железа в пирите (синее) и меди в энаргите (красновато-коричневое). Растворитель HNO_3 (1 : 1), экспозиция 2 мин; проявитель — $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$
- Рис. 37. Отпечаток молибдена в повеллите (коричневое). Растворитель HNO_3 (1 : 1), экспозиция 30 с, проявитель — $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$



Рис. 38.



Рис. 38а.



Рис. 39.



Рис. 40.



Рис. 40а.



Рис. 41.

Рис. 38. Отпечаток никеля в пентландите (малиновое). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 15 с, проявитель—диметилглиоксим

Рис. 38а. Отпечаток никеля в пентландите (темно-синее). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 15 с, проявитель—рубеновая кислота

Рис. 39. Отпечаток никеля в пентландите (малиновое). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 15 с, проявитель—диметилглиоксим

Рис. 40. Отпечаток никеля в ульманите (малиновое). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 15 с, проявитель—диметилглиоксим

Рис. 40а. Отпечаток никеля в ульманите (темно-синее). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 15 с, проявитель—рубеновая кислота

Рис. 41. Отпечаток никеля в хлоантите (фиолетово-синее) и никелине (темно-синее). Растворитель NH_4OH с электрическим током, экспозиция 15 с, проявитель—рубеновая кислота

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
Медные руды					
<i>Сульфаты</i>					
Халькантит	Вода, подкисленная HNO_3	2			
Брошантит					
Пизантит					В пизантите и борните открывается Fe^{2+}
<i>Карбонаты</i>					
Малахит	а) NH_4OH (10%) б) HNO_3 (1:20)	0,5—1			
Азурит					
<i>Оксиды</i>					
Куприт	а) NH_4OH (25%) б) HNO_3 (1:10)	1—2	а) рубановая кислота б) $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ в) бензойнооксим	а) серо-зеленый б) розово-коричневый в) ярко-зеленый	
Тенорит					
<i>Силикаты</i>					
Хризоколла	б) HCl (1:1)	5			
<i>Самородные элементы</i>					
Самородная медь	а) NH_4OH (25%) б) HNO_3 (1:1)	1—2			

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Сульфиды легкорастворимые</i> Халькозин, дигенит	а) NH_4OH (1:1) NH_4OH + эл. ток 4—8 В. б) HNO_3 (1:1) HNO_3 + эл. ток 4—8 В	1—2 0,6—0,4 0,5—1 0,6—0,4	а) рубеновая кислота б) $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ в) бензоинооксим	а) серо-зеленый б) розово-коричневый в) ярко-зеленый	
<i>Сульфиды трудно-растворимые</i> Ковеллин Халькопирит Эзаргит Теннантит Тетраэдрит	NH_4OH (1:1) + эл. ток 4—8 В NH_4OH (1:1) предварительно полированная поверхность минерала травится в парах ц. в. в течение 5 мин	0,5 5 5	а) рубеновая кислота б) бензоинооксим	а) серо-зеленый б) ярко-зеленый	В соответствующих минералах открывается Fe^{3+} , As, Sb
Цинковые руды					
<i>Сульфаты</i> Госларит	Вода, подкисленная каплями HNO_3		$\text{HgCl}_2 + \text{KCNS} + \text{Cu}(\text{NO}_3)_2$		
<i>Силикаты</i> Каламин, виллемит	HNO_3 (1:20)	1—2		Светло-фиолетовый	При растворении порошка ка- ламина в HCl выпадает сту- день SiO_2 . При определении аурихальцита необходима реак- ция капельного анализа на медь
<i>Окислы</i> Цинкит					

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
Карбонаты Гидроцинкит Аурихальцит Смитсонит	HNO_3 (1:40) HNO_3 (1:1)	1—2			
Сульфиды Сфалерит Вурцит	Полированную поверхность минералов обрабатывают парами ц. в. в течение 3—5 мин HNO_3 конц. + + HCl конц. + + 0,1% Cu (NO_3) ₂	2	$\text{HgCl}_2 + \text{KCNS}$	Светло-фиолетовый	
Свинцовые руды					
Карбонаты Церуссит					
Сульфаты Англезит	HNO_3 (1:1)	2	KI (5%-ный раствор)	Желтый	В соответствующих минералах реакции на Mo, Sb, Cu, Fe
Молибдаты Вульфенит					

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Сульфиды</i>					
Галенит	Политроvanная поверхность минерала травится в HNO ₃ конц. и просушивается фильтровальной бумагой	1—2	KI (5%-ный раствор)	Желтый	В соответствующих минералах реакции на Sb, Cu, Fe
Буланжерит					
Бурнонит					
Джемсонит					
Молибденовые руды					
<i>Молибдаты</i>					
Вульфенит	HNO ₃ (1:1)	0,4—0,3 0,5—1	K ₃ Fe (CN) ₆	Коричневый	В соответствующих минералах реакция на Pb, Fe ²⁺
Повеллит					
<i>Оксиды</i>					
Ферримолибдит	HCl конц.	2—3			
<i>Сульфиды</i>					
Молибденит	HNO ₃ (1:1)	1—3	Ксантогенат калия	Фиолетово-красный, окрашивание выцветает через 20 мин	Реакция на S
Джорджинит					
Никелевые руды					
<i>Сульфаты</i>					
Моренозит	Вода, подкисленная HNO ₃	1—3			

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Карбонаты</i> Заратит	NH_4OH (10%)	0,5—1			Заратит вскипает в HCl (1:20)
<i>Арсенаты</i> Аннабергит Форбезит		0,5—3			
<i>Арсениды</i> Никелин Хлоангит Смальтин Раммельсбергит Герсдорфит	NH_4OH конц. NH_4OH конц. + эл. ток 4—8 В	0,5—2 5—15 с	а) диметилглиоксим б) рубеоановая кислота	а) малиновый б) сине-фиолетовый	В соответствующих минералах реакция на As, Co, S, Sb
<i>Англимониды</i> Ульманит Брейтгауптит					
<i>Сульфиды</i> Вюларит Бравонт					

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Труднорастворимые сульфиды</i>					
Пентландит Миллерит	Минерал травится в парах и. в. в течение 2—3 мин., затем NH_4OH конц., NH_3OH конц. + эл. ток 4—8 В	0,5—1 5—15 с	а) диметилглиоксим б) рубеоановая кислота	а) малиновый б) сине-фиолетовый	
Полидимит					
<i>Силикаты никеля</i>					
Гарнерит			а) диметилглиоксим + аммиак б) рубеоановая кислота + аммиак	а) малиновый б) сине-фиолетовый	
Ревдинскит	Царская водка	3—10			
Кобальтовые руды					
<i>Сульфаты</i>					
Биберит	Вода, подкисленная каплями HNO_3	2—3			
<i>Карбонаты</i>					
Сферокобальтит Кобальтсмитсонит	HCl (1:20)	1	а) α -нитрозо- β -нафтол + NH_4OH б) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	а) красновато-бурый б) коричневатого-бурый	Карбонаты от HCl (1:20) бурно вскипают
<i>Оксиды</i>					
Гетерогенит (стеннерит) Асболоан	HCl (1:1)	1			В соответствующих минералах реакция на Zn , Ni , Mn^{2+} , As , Mg , S , Cu , Fe^{3+}

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Арсенаты</i> Эритрин Розелит Кеттигит Форбесит	HCl (1:10)	1	а) α -нитрозо- β -нафтол + NH_4OH б) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	а) красновато-бурый б) коричневатого-бурый	
<i>Сульфиды</i> Линнеит Зигенит Карролит	HNO_3 (1:10) или (1:1)	1—3			
Кобальтин Глаукокодот	а) HNO_3 конц. NH_4OH (1:1) + эл. ток 4—8 В	3—3 0,5			
<i>Арсениды</i> Смальтин Сафлорит Скуттерудит	а) HNO_3 (1:1) NH_4OH (1:1) + эл. ток 4—8 В	1—3 0,5	α -нитрозо- β -нафтол	Красновато-бурый	В соответствующих минералах реакция на Zn , Ni , Mn^{2+} , As , Mg , S , Cu , Fe^{3+}
Урановые руды					
<i>Сульфаты</i> Йоганнит Цилеит	$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	1—3	Прямой отпечаток	Шоколадно-коричневый	В соответствующих минералах реакция на Cu , K , Ca , P , Pb , As , SiO_2
<i>Карбонаты</i> Шрекингерит	HNO_3 (1:20)	3			

Минералы	Растворитель	Экспозиция, мин	Проявитель	Цвет отпечатка или пятна	Другие микрохимические реакции
<i>Вакадалы</i> Карнотит Тюжмунит	HNO_3 (1:20)	1—3 0,5—1			В соответствующих минералах реакция на Cu, K, Ca P, Pb, As, SiO_2
<i>Фосфаты</i> Фосфуранилит Отенит Торбернит Ренардит	HNO_3 (1:1)	0,5—3			
<i>Арсенаты</i> Цейнерит	HNO_3 (1:1)	1—3	$\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	Шоколадно-коричневый	
<i>Силикаты</i> Уранофан Казолит	HCl (1:1)	1—3			
<i>Оксиды</i> Уранинит (кристаллический) Браннерит Урановая смолка Урановая чернь (аморфный)	HNO_3 конц. HNO_3 (1:1)	3—5 3—5			

Примечание. а), б) и в) обозначены растворители, проявитель и результат реакции для I, II и III варианта.

шивания происходит в определенный промежуток времени и обычно подбирается экспериментально. После окрашивания препарат промывают в воде и высушивают, но не вытирают, так как в этом случае могут быть разрушены пленки.

При изучении каолинизированных и серицитизированных рудовмещающих горных пород приготовлялось несколько прозрачных открытых шлифов из одного образца. Шлифы тщательно изучались до окрашивания, а затем помещались в раствор кристалл-виолет, в метиленовый голубой, в родамин В. После окрашивания шлифы вновь изучались, и результаты окрашивания серицита и каолинита в различных красителях сравнивались.

В полевых условиях окрашивание легкорастворимых минералов (анкерита, сидерита, церуссита, скородита и др.) рекомендуется производить капельным методом. Капля реактива наносится на крупинки минерала или шлиф при помощи пипетки. При этом экономят реактивы и получают хорошие результаты.

Методика окрашивания карбонатов. Метод окрашивания является одним из главных методов диагностики карбонатных минералов в рудах и породах в полевых и лабораторных условиях. Такие карбонаты, как кальцит, доломит, магнезит, сидерит, анкерит брейнерит и др., характеризуются близкими физическими и химическими свойствами. Они весьма сходны между собой по внешнему виду. Оптические константы различных карбонатных минералов также близки. Поэтому для диагностики карбонатных минералов в полевых условиях применяют разбавленную соляную кислоту. Главнейшие карбонаты по их взаимодействию с HCl (1:20) на холоде разделяются на четыре группы (табл. 9).

Таблица 9

ГРУППЫ КАРБОНАТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С HCl

Группы	Взаимодействие с HCl (1:20) на холоде в течение 1 мин	Минералы
I	Бурно вскипают с шипением	Кальцит, арагонит, витерит, стронцианит, бисмутин, малахит, сфериокобальтит
II	Медленно вскипают	Анкерит, смитсонит, родохрозит
III	Очень медленно вскипают в порошке	Церуссит, брейнерит, доломит
IV	Не вскипают даже в порошке	Сидерит, магнезит

Если различные карбонаты образуют тесные прорастания и с помощью соляной кислоты разделить их не удастся, тогда применяются реакции окрашивания. Ниже приведено описание методики окрашивания наиболее распространенных карбонатов.

Окрашивание и структурное травление карбонатов производится в растворе HCl + ализарин рот + $K_3Fe(CN)_6$ для массовых определений в полированных и открытых прозрачных шлифах. Экспозиция выдерживается 30—45 с. После окрашивания шлиф промывается под сильной струей воды. Результаты окрашивания таковы: кальцит — яркий розовато-красный; манганокальцит — слабая розовая окраска; железистый кальцит — бледно-фиолетовый; анкерит — синий; доломит, сидерит, родохрозит этим реактивом не окрашиваются, даже при экспозиции 6—8 мин и более.

Арагонит. Окрашивание арагонита в концентрированном растворе нитрата кобальта применяется для отличия арагонита от кальцита. Зерна карбоната, или штуф, или полированный шлиф кипятятся в течение 5—6 мин в концентрированном растворе нитрата кобальта. Рекомендуется применять нитрат кобальта такой концентрации, чтобы раствор после кипячения оставался окрашенным в красновато-розовый цвет. Арагонит

всегда окрашивается в фиолетовый цвет, кальцит не изменяется или приобретает слабый розоватый или голубой оттенок. В нитрате кобальта также окрашиваются витерит и стронцианит в фиолетовые тона.

Кальцит, арагонит и другие хорошо растворимые в HCl (1:20) карбонаты. Для отличия карбонатных минералов I группы (см. табл. 9) от карбонатных минералов II, III и IV групп применяются реакции с фиолетовыми чернилами и азотнокислой медью.

А. Реакция с фиолетовыми чернилами или анилиновой краской кристалл-виюлет проводится следующим образом. Перед употреблением готовят на часовом стекле 2—3 капли фиолетовых чернил (один чернильный порошок, растворенный в 100 мл воды), к которым добавляют по каплям HCl (1:20) до тех пор, пока чернила не изменят фиолетовый цвет на темно-зеленый. Полученный раствор помещают на поверхность зерна, штуфа или открытого прозрачного или полированного шлифа. Раствор вступает в реакцию с карбонатом; в результате обменных реакций поглощается энергия соляной кислоты и восстанавливается цвет чернил до нормального — фиолетового. Кальцит и арагонит восстанавливают цвет чернил в течение 10—30 с, а другие карбонаты, менее растворимые в HCl (1:20), — в больший промежуток времени. По истечении 1 мин, каплю реактива снимают фильтровальной бумагой. Кальцит и арагонит окрашиваются чернилами в фиолетовый цвет, а другие карбонаты не изменяются.

Б. В 20%-ный раствор азотнокислой меди погружаются зерна, штуфы, открытые прозрачные и полированные шлифы с карбонатами на 5 ч. Затем препарат без промывки погружается на несколько секунд в концентрированный аммиак. После обработки аммиаком препарат тщательно промывают водой и слегка высушивают. Синеглубокое окрашивание остается только на кальците и арагоните. Доломит, сидерит, анкерит, магнетит и другие карбонаты не окрашиваются.

Анкерит, Fe-доломит, брейнерит, сидерит и другие железосодержащие карбонаты. Окрашивание железосодержащих карбонатов проводится в реактиве 1 ч. HCl (1:20) + 1 ч. 1%-ного раствора $K_2Fe(CN)_6$ и выполняется фазовым анализом, который основан на различной растворимости карбонатов в HCl (1:20). Карбонат погружают в свежеприготовленный реактив. При этом анкерит и Fe-доломит окрашиваются в синий цвет в течение 1 мин, брейнерит окрашивается в сине-голубой цвет в течение 3—5 мин, а сидерит окрашивается в зеленовато-синий цвет в течение 10—12 мин.

Магнетит. Окрашивание с дифенилкарбазидом. Кусочек или зерна магнетита погружают в фарфоровый тигель с 5—10 каплями щелочноспиртового раствора дифенилкарбазида и кипятят 5 мин. Затем красную жидкость сливают, и минерал промывают горячей водой до исчезновения окрашивания промывных вод. Магнетит окрашивается в красно-фиолетовый цвет (интенсивный или слабый). Иногда порошок кипятят в нескольких порциях воды до прекращения окрашивания последней. Доломит и кальцит в растворе дифенилкарбазида не окрашиваются. Доломит подвергается окрашиванию лишь после прокаливания.

Приготовление раствора дифенилкарбазида: 1—2 г дифенилкарбазида растворяют в 100 см³ спирта при слабом нагревании, затем прибавляют 3 см³ 25%-ного раствора NaOH или KOH, образуется раствор красного цвета благодаря выделению натриевой соли дифенилкарбазида. Раствор кипятят в течение 5—10 мин до полного растворения щелочи. Для окрашивания необходимо применить свежеприготовленный раствор дифенилкарбазида.

Церуссит. Окрашивание в KI. Минерал растворяется в течение 1 мин в HCl (1:1). Избыток кислоты снимается фильтровальной бумагой. Затем минерал смачивается 5%-ным раствором KI. Выпадает осадок йодистого свинца желтого цвета. При этом англезит также окрашивается.

Смитсонит. Окрашивание в ртутно-родановой соли. Минерал растворяется в течение 2 мин в растворе $Cu(NO_3)_2 + HCl$ (1:1). Затем на травленое место помещается реактив ртутно-родановой соли ($HgCl_2 + KCNS$). Выпадает осадок лилового цвета двойной роданистой соли цинка и меди.

Методика окрашивания минералов группы гидрoалюмосиликатов. Изучение минерального состава руд и пород из зоны окисления также проводится с применением окрашивания. Обычно окрашиванию всегда предшествует детальное минералогическое изучение образца. Исследованию подвергаются светлоокрашенные породы и минералы — белые, серые и реже зеленые. Глинистые минералы хорошо окрашиваются в органических красителях благодаря большой их адсорбционной способности.

Наиболее доступной и универсальной краской является метиленовый голубой. Она используется при окрашивании глин в качестве важнейшего реактива; эта краска окрашивает монтмориллонит в густой темно-лиловый цвет, каолинит в фиолетовый, а монотермит в серо-зеленый. Очень ценный органический краситель — солянокислый бензидин, хорошо растворимый в воде. Бесцветный раствор солянокислого бензидина окрашивает монтмориллонит в синий цвет.

Каолинит. Хорошо окрашивается водными растворами кристалл-фиолет (фиолетовые чернила), метилен-блау (синие чернила). В отличие от серицита каолинит не окрашивается спиртовым раствором кристалл-фиолет, водным и спиртовым раствором роданина В. У каолинита, окрашенного водным раствором кристалл-фиолет, наблюдается резкий плеохроизм от интенсивного фиолетового до малинового цвета. У галлуазита и монтмориллонита в большинстве случаев плеохроизм не проявляется.

Окрашивание каолинита в краске метиленовой голубой. Кусок глины или минерала массой в 0,5 г помещают в пробирку с водой; затем растирают стеклянной палочкой и добавляют 5—10 см³ раствора метиленовой голубой и взбалтывают; дают постоять 15—20 мин. Каолинит и каолинитовая глина окрашиваются в фиолетовый цвет, который не изменяется от добавки KCl. Окраска гидрослюда изменяется от добавления KCl: фиолетово-синий, синий или голубой цвет в зависимости от возрастания количества гидрослюда).

Монтмориллонит. Окрашивается в насыщенном водном растворе бензидина. Темно-голубое до интенсивно синего окрашивание монтмориллонита обычно появляется сразу, а иногда только через несколько часов. Монтмориллонит окрашивается в более густой цвет, чем окраска раствора самого красителя. Бензидин совсем не окрашивает каолинит, слабо окрашивает гидрослюда.

Проведение окрашивания. В пробирку всыпают 0,5 г глины или измельченной пробы и приливают 2 см³ воды и 1 см³ раствора бензидина. Глины кил, гумбрин и другие окрашиваются сразу в синий цвет, бентонитовые глины большей частью окрашиваются медленно и не так интенсивно. Во многих случаях хороший результат в процессе окрашивания дает добавление очень слабого раствора аммиака. При высыхании монтмориллонитовые глины обесцвечиваются. Бейделлит часто остается голубым и при высыхании.

Серицит. Хорошо окрашивается водным и спиртовым растворами органических красок (кристалл-фиолет, метиленовой голубой, роданин В). По мере возрастания размеров чешуек способность его к окрашиванию постепенно падает и мусковит совершенно не окрашивается. Перетертый и смятый серицит из тектонических зон дробления окрашивается значительно быстрее, чем неизмененный серицит.

Реакции окрашивания, применяемые для определения некоторых рудных минералов, первичных и вторичных.

Англезит. Минерал в шлифе, образце или крупинке смачивается раствором KI. Моментально образуется желтое окрашивание в результате выделения йодистого свинца. Другие минералы свинца при этом не окрашиваются.

Вульфенит, ванадинит, плюмбоарозит, пироморфит, крокоит. Растворяют в HNO₃ (1:1) в течение 2 мин, а затем раствором KI окрашивают в желтый цвет.

Госларит. Минерал смачивается раствором азотнокислой меди, а затем раствором ртутно-родановой соли, образуется аморфный осадок лилового цвета.

Гидроцинкит, монгеймит, аурихальцит и другие гидрокарбонаты цинка. Минерал растворяется в HNO₃ (1:10) в течение 2—3 мин, затем обрабатывается раствором азотнокислой меди и ртутно-родановой соли; образуется осадок лилового цвета, двойной роданистой соли ртути и цинка.

Скородит. Окрашивание в растворе KOH. Минерал в земляных массах, в образцах или полированном шлифе смачивается раствором KOH. Моментально образуется красновато-бурый осадок гидроокиси железа.

Реальгар. Окрашивание в KOH. Минерал травится KOH в течение 2—3 мин. Раствор реактива окрашивается в коричневый до черного цвет. Минерал окрашивается быстрее в коричневый до черного цвет вблизи трещин и в тонком порошке.

Минералы урана. Окрашивание светлых вторичных минералов урана в желтой кровяной соли. Минерал растворяется в HNO₃ конц. в течение 2—3 мин. На травленое место помещается раствор K₂Fe(CN)₆, образуется пленка коричневого цвета.

Касситерит. Крупинки или зерна касситерита помещаются на цинковую пластинку и обрабатываются HCl (1:1). Через 1—2 мин на поверхности зерен касситерита образуется пленка металлического олова. В полированных шлифах касситерит травится HCl (1:1), в каплю добавляют порошок металлического цинка. Экспозиция 2 мин. Затем смесь снимают фильтровальной бумагой. Образуется пленка олова на шлифе.

Шеелит. Крупинки или зерна шеелита помещают в маленький фарфоровый тиглек, затем добавляют HCl конц. и зернышко металлического олова. Смесь подогревается в течение 3—5 мин. Зерна шеелита окрашиваются в синий цвет.

Пиролозит, манганит, псиломелан и вад. Крупинки или порошок минерала смачиваются раствором уксуснокислого бензидина, реактив и минералы окрашиваются в синий цвет.

Глава 5

Типоморфные минеральные ассоциации руд и их значение при диагностике рудообразующих минералов

Руда представляет собой набор типоморфных минеральных ассоциаций и парагенезисов. Каждая минеральная ассоциация является продуктом специфических геологических и физико-химических условий; она образуется в определенную стадию процесса минерализации. Типоморфные минеральные ассоциации в руде определяют тип рудной формации месторождений полезных ископаемых.

Термином рудная формация принято обозначать генетическую группу месторождений, обладающих сходным вещественным составом руд и вмещающих пород. В рудной формации может быть выделена одна или несколько типоморфных минеральных ассоциаций, развитых в определенных количественных отношениях.

В развитии учения о парагенетических минеральных ассоциациях и о парагенетическом анализе минеральных сообществ большое значение имели работы В. И. Вернадского, А. Г. Бетехтина, Д. С. Коржинского, Н. В. Петровской, Т. Н. Шадлун, Р. Гаррелса и др.

Понятие типоморфная минеральная ассоциация означает закономерное сообщество минералов, совместно образовавшихся в близких геологических и физико-химических условиях. В состав минеральной ассоциации входит группа типоморфных минералов, которые по количеству подразделяются на главные ($1-p \cdot 10\%$), второстепенные ($0,1-1\%$), редкие ($0,01-0,1\%$) и очень редкие ($<0,01\%$). Среди минералов данной ассоциации могут встречаться реликтовые, метаморфические и вторичные минералы, которые образовались в иных условиях и относятся к другим ассоциациям.

Внутри минеральной ассоциации при геолого-минералогическом изучении выделяются узкие парагенетические группы минералов, или парагенезисы минералов. Парагенетическая минеральная ассоциация представляет собой закономерное совместное нахождение двух или нескольких минералов в минеральной ассоциации, отложившихся одновременно в равновесных условиях и образующих сростания с прямыми границами, редко с признаками слабой коррозии одного минерала другим.

Таким образом, в минеральной ассоциации можно выделить один или несколько парагенезисов, формирование которых происходило на определенной стадии процесса минерализации. При диагностике рудообразующих минералов важно знать и учитывать вещественный состав парагенетических минеральных ассоциаций, так как каждый минерал представляет собой характерную составную часть в группе минералов своей ассоциации. Перечень минералов в типоморфной минеральной ассоциации устанавливают при изучении целой группы сходных месторождений. Отдельные месторождения могут содержать лишь большую или меньшую часть всего состава минералов данной ассоциации.

В диагностических таблицах «Определителя» одним из важных критериев диагностики минерала являются парагенезисы.

В табл. 10 приведены сведения о минеральном составе типоморфных ассоциаций в рудах из различных генетических типов месторождений.

ТИПОМОРФНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ И МИНЕРАЛЫ В РУДАХ

Генетический тип месторождений	Минеральный состав ассоциаций		
	Типы руд	главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Собственно магматические	Хромитовые руды в дунитах, перидотитах и серпентинитах	1. Хромит, оливин, пироксены 2. Серпентин, магнезит	Хромицинедры, платина, поликсен, осмистый иридий, иридийстая платина, другие минералы группы платины, никелин и др.
	Руды самородной платины и платиноидов в дунитах, перидотитах и пироксенитах	1. Оливин, пироксены 2. Поликсен, самородная Pt и другие минералы платины, хромит	Иридийстая платина, осмистый иридий, титаномагнетит, диаллаг, серпентин, пентландит, пирротин, кубанит, магнетит и др.
	Титаномагнетитовые или ильменит-магнетитовые руды в габбро и пироксенитах	1. Пироксены, основные плагиоклазы, роговая обманка, оливин 2. Магнетит, ильменит, шпинель, гематит, апатит	Рутил, брукит, анатаз, пирит, пирротин, халькопирит, борнит, хлорит, лейкоксен, биотит, кубанит, пентландит, шпинель, ульвит, серпентин, тальк, актинолит, гранат, биотит, эпидот, кальцит, гейкелит, пирофанит, браннерит и др.
	Медно-титаномагнетитовые руды в габбро и пироксенитах	1. Диоксид, основной плагиоклаз 2. Ильменит, магнетит, шпинель, гематит, апатит, амфиболы 3. Халькопирит, борнит, пирит, эпидот, соссуриг	Рутил, лейкоксен, хлорит, кварц, альбит и др.
Собственно метасоматические	Ильменит-гематитовые руды в лабрадоритах	1. Основные плагиоклазы, пироксены, амфиболы 2. Ильменит, гематит, магнетит, шпинель	Рутил, пирротин, пирит, халькопирит, апатит, перовскит, оливин и др.
	Магнетитовые и апатит-магнетитовые руды в сиенитах	Магнетит, апатит, полевые шпаты	Гематит, диопсид, амфиболы, турмалин, циркон, биотит, кварц, карбонаты, редко сульфиды

Генетический тип месторождений	Типы руд	Минеральный состав ассоциаций	
		главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Собственно магматические	Сульфидные медно-никелевые руды в габбро-чорнитах и перидотитах	1. Плагноклазы, пироксены, оливин 2. Пирротин, пентландит, халькопирит, талнахит, магнетит	Сперриллит, минералы платиновой группы, пирит, арсенопирит, леллингит, марказит, миллерит, арсениды никеля и кобальта, кубанит, вюллерит, борнит, сфалерит, галенит, валлернит, линненит, молибденит, шеслит, гематит, полидимит, бравонит, золото и др.
Пегматитовые	Nb—Ta—U—Mo—Sn—W руды в пегматитах	Тангалит, колумбит, касситерит, вольфрамит, молибденит, уранинит, кварц, полевые шпаты, слюды, циркон, сподумен, берилл, флюорит	Минералы урана и тория, монацит, флюорит, пирохлор, ильменорутил, турмалин, сфен, кальцит, магнетит и др.
Карбонатитовые	Редкометалльные, апатит-магнетитовые, флогопитовые карбонатиты	Карбонаты (кальцит, доломит, анкерит, манганосидерит), апатит, магнетит, пирохлор, флогопит	Бадделенит, гачеттолит, циркон, перовскит, колумбит, гематит, паризит, бастнезит, флюорит, борнит, эгирин, гидрослюда, сфен, ильменит, монацит, оливин, нефелин, борнит, халькопирит, сфалерит, галенит и др.
Постмагматические скарпные	Магнетитовые руды	1. Гранаты (андрадит, гроссуляр), пироксены (диопсид, геденбергит и др.), скаполит 2. Магнетит, гематит, маггемит, кальцит	Флогопит, везувин, лодвигит, котонг, ильвант, волластонит, апатит, плагиноклаз, мусковит, пренит, флюорит, кварц, пирит, сидерит, халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, марказит, арсенопирит, кобальтин, глаукокодот, саффорит, эпидот, актинолит, хлорит, мушкетовит
	Кобальтин-магнетитовые руды	1. Пироксены, гранаты 2. Магнетит, гематит, маггемит 3. Амфиболы, эпидот, кальцит 4. Кварц, Со-пирит, халькопирит, кобальтин	Хлорит, шмальтин, глаукокодот, арсенопирит, пирит, халькопирит, везувин, скаполит, волластонит, плагиноклаз, слюда, апатит, флюорит, скуттерудит, актинолит, дашкесанит, леллингит, саффорит и др.

		Минеральный состав ассоциаций	
Генетический тип метаморфозов	Типы руд	главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Постмагматические скарновые	Пирротин-халькопиритовые руды	1. Гроссуляры, андрадит, диопсид, геденбергит 2. Халькопирит, борнит, пирротин, пирит	Сфалерит, магнетит, мушкетовит, блеклая руда, молибденит, галенит, арсенопирит, гематит, линнеит, кубанит, валлернит, марказит, бурнонит, эпидот, хлорит, актинолит, тальк, кальцит, кварц, ильвант и др.
	Молибденит-шеслитовые	1. Гранаты, пироксены 2. Молибденит, шеслит, молибдошеслит, кварц, кальцит, скаполит	Возувиан, актинолит, плагиоклаз, волластонит, флюорит, пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, повеллит, альбит, хлорит, апатит, сфен, касситерит, уралит, марматит, гунггенит, эпидот, гематит, вольфрамит, висмут, золото, цеоциты и др.
	Галенит-сфалеритовые руды	1. Гранаты, пироксены (геденбергит и др.) 2. Галенит, сфалерит, марматит, халькопирит, пирит, пирротин, висмутин, кварц, хлорит	Магнетит, гематит, волластонит, актинолит, кварц, карбонат, родонит, пирит, халькопирит, марказит, арсенопирит, теннантит, тетраэдрит, сташинн, аргентит, висмутин, франклинит, цинкит и др.
Постмагматические гидротермальные	Касситерит-кварцевые и вольфрамит-кварцевые руды в грейзенах	1. Кварц, мусковит, бсрилл 2. Касситерит, вольфрамит, молибденит	Лениндолит, шинвальдит, топаз, турмалин, флюорит, микроклин, биотит, альбит, гематит, магнетит, шеслит, колумбит, браннерит, пирротин, пирит, арсенопирит, висмутин, висмут и др.
	Молибденит-кварцевые руды в грейзенах	1. Кварц, мусковит 2. Молибденит	Вольфрамит, пирит, жшльбертит, флюорит, ильменорунд, микрсклин

Генетический тип месторождений		Минеральный состав ассоциаций		
		Типы руд	главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Постмагматические гидротермальные	Золото-арсенопирит-кварцевые руды в березитах	1. Кварц, арсенопирит, пирит 2. Золото самородное, теллуриды золота, Рb-Vi сульфосоли	Халькопирит, пирротин, лёллингит, молибденит, теллуриды Bi, Ag, Pb, висмутин, висмут, магнетит, глаукокодот, теннантит, тетраэдрит, шеелит, кронит, буланжерит, семсейит, бурнонит, плагионит, джемсонит, цинкениит, галенит, сфалерит, турмалин, хлорит, серицит, апатит и др.	
	Золото-пирит-кварцевые руды в березитах (золото-сульфидные руды)	1. Кварц, серицит, фуксит, пирит (Au) 2. Золото самородное	Арсенопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, теллуриды Au, Ag, Bi, айкиннит, буланжерит, кронит, джемсонит, семсейит, плагионит, цинкит, халькопирит, висмутин, висмут, шеелит, бурнонит, карбонаты и др.	
	Золото-серебряные руды с теллуrom и селеном	Золото, серебро, электрум, алтаит, сильванит, калаверит, креннерит, пирит, арсенопирит, петцит, тессит, агентит, пираргирит, полибазит, прустит	Валтеринит, галенит, нагиагит, халькопирит, бертьерит, алабандин, сфалерит, карбонаты, кварц, халцедон, адуляр	
	Молибденит-кварцевые руды во вторичных кварцитах	1. Кварц 2. Молибденит	Вольфрамит, шеелит, пирит, халькопирит, топаз, серицит, монацит, касситерит и др.	
Медно-мышьяковые руды	Медные и медно-молибденовые руды во вторичных кварцитах	1. Кварц 2. Молибденит 3. Халькопирит, пирит, энаргит	Теннантит, борнит, сфалерит, галенит, эмплектит, виттихенит, люционит, арсенопирит, магнетит, золото, гематит, шеелит, рутил, лейкоксен, хлорит, серицит, андалузит, карбонаты	
	Медно-мышьяковые руды	1. Кварц 2. Энаргит, теннантит, тетраэдрит, халькопирит, борнит, халькозин	Пирит, арсенопирит, станный, сфалерит, висмутин, ковеллин, дигенит, кубанит, турмалин и др.	

Минеральный состав ассоциаций			
Генетический тип месторождений	Типы руд		
главные минералы и парагенезисы			
второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций			
Постмагматические гидротермальные	Медноколчеданные, серноколчеданные, полиметаллически-колчеданные руды в вулканогенно-осадочных породах и в кристаллических сланцах	1. Кварц, серицит, хлорит, пирит 2. Пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, борнит, теннантит, энаргит, халькозин	Арсенопирит, магнетит, гематит, висмутин, телуриовисмутин, алтант, гессит, айкинит, золото, серенор, аргентит, реньерит, лазаревичит, люшонит, идаит, ковеллин, рутил, гипс, ангидрит, дикиит, барит, карбонаты, кварц, серицит, хлорит, пирротин, марказит и др.
	Руды медистых песчаников	Халькопирит, борнит, халькозин, джарлент, дигенит	Ковеллин, сфалерит, галенит, пирит, линнеит, арсенопирит, марказит, теннантит, джезказганит, магнетит, гематит, рутил, кварц, полевые шпаты, карбонаты и др.
	Медные руды в основных эффузивах	1. Цеолиты (ломонтит, датолит), калыцит 2. Медь самородная, халькозин, джарлент, дигенит	Адуляр, пренит, хлорит, эпидот, кварц, пумпеллит, анкерит, серицит, серебро, арсениды, медь и др.
	Касситерит-сульфидные руды	Касситерит, пирротин, галенит, сфалерит, висмутин, станнин, пирит, кварц, турмалин, железистый хлорит	Арсенопирит, халькопирит, цинлиндрит, киллит, канфильтит, булажерит, вольфрамит, магнетит, карбонаты и др.
	Руды «пятиэлементной» формации (U, Ni, Co, Bi, Ag)	Настуран, серебро, висмут, никелин, раммельсбергит, скуттерудит, смальтин, хлоантит, саффорит, мышьяк, аргентит, висмутин, гематит, доломит, анкерит, кварц, сидерит, флюорит, барит, алабандин	Касситерит, хлорит, кальцит, пирротин, арсенопирит, пирит, марказит, сфалерит, галенит, халькопирит, блеклые руды, прустит, пираргирит, борнит, виттихенит, глаукокод, брейтгауптит, герсдорфит, миллерит, парараммельсбергит, дискразит, станнин

Генетический тип месторождений	Типы руд	Минеральный состав ассоциаций	
		главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Постмагматические гидротермальные	Урановые руды с селенидами	Настуран, барит, флюорит, кварц, карбонаты, умангит, флюкманит, клау-сталит, берцелманит	Гематит, прустит, тимманит, пираргирит, халькопирит, галенит, айкинит, пирит, никелин, раммельсбергит, хасит, тротгалин и др.
	Полиметаллические руды (Pb, Zn, Cu, Cd, Ag)	1. Пирит, кварц 2. Галенит, сфалерит, буланжерит, халькопирит, пирит, пирротин, блеклые руды, карбонаты, барит	Касситерит, борнит, вюрцит, ковеллин, станин, халькозин, дигенит, гематит, штромемерит, теннантит, тетраэдрит, фрейбергит, стефанит, прустит, пираргирит, бурюнит, грейтонит, иорданит, джемсонит, аргентит, менегинит, арсенопирит, марказит, золото, серебро, серпичит и др.
	Свинцово-цинковые руды в карбонатных породах	Галенит, сфалерит, кальцит, доломит, пирит	Аргентит, фрейбергит, халькопирит, сульванит, теннантит, пирит, марказит, анкерит, барит, кварц и др.
	Сурьмяные руды	1. Кварц 2. Антимонит, бертьерит 3. Флюорит, карбонат 4. Антимонит, киноварь	Арсенопирит, пирит, каолинит, халцедон, опал, шеелит, ферберит, рельгар, аурипигмент, теллуриды, Au, Ag и др.
	Ртутные, сурьмяно-ртутные руды	1. Кварц 2. Киноварь, метациннабарит, антимонит	Бертьерит, тетраэдрит, швацит, арсенопирит, марказит, гудмундит, аурипигмент, барит, дикиит, накрит, каолинит, карбонаты, флюориты, цеолиты и др.
	Мышьяковые руды	Рельгар, аурипигмент, карбонаты, халцедон, опал, кварц	Антимонит, киноварь, пирит, мельниковит, марказит, арсенопирит, каолинит и др.

Генетические типы месторождений	Типы руд	Минеральный состав ассоциаций	
		главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Месторождения выветривания остаточно	Железные руды (железистые латериты)	Гётит, гидрогётит, гематит, гидрогематит, кварц, хальцедон, опал, нонтропит, магнезит	Псилломелан, асболоан, гарниерит, хромит, редниксит, каолинит, гидраргиллит и др.
	Спикатные никелевые руды	Гарниерит, редниксит, пимелит, шухардит, опал, хальцедон, магнезит, нонтропит, галлуазит, монтмориллонит	Асболоан, хромит, гидроокислы железа, серпентин и др.
	Железные руды (шляпы на колчеданных месторождениях)	Гётит, гидрогематит, гидрогётит, лепидокрокит, ярозит, каолинит, опал, хальцедон, церуссит, англезит, ковелин	Золото, куприт, тенорит, медь самородная, дельфосит, малахит, азурит, кальцит, гипс, халькантит, мелангерит, нисломелан и др.
Инфильтрационные	Медные руды (зона вторичных сульфидов под железными шляпами)	Борнит, халькозин, джарлент, ковеллин, дигенит	Аргентит, штроейерит, марказит, халькопирит; реликты пирита, халькопирита, сфалерита, галенита, блеклых руд; золото, серебро
Осадочные	Железные руды	Гидрогётит, гётит, гематит, лепидокрокит, шамозит, сидерит, опал, кварц, каолинит	Магнетит, псилломелан, пиролюзит, пирит, марказит, пирротин, вивиннит, родохрозит и др.

Генетические типы месторождений	Типы руд	Минеральный состав ассоциаций	
		главные минералы и парагенезисы	второстепенные, редкие минералы и минералы других ассоциаций
Осадочные	Марганцевые руды	Пиrolюзит, псиломелан, манганит, родонит, родохрозит, опал, карбонаты	Алабадин, браунит, гаусманит, якобит, гидрокислы железа, марказит и др.
Метаморфизованные	Железные руды в кварцитах и железитлах	Магнетит, гематит, кварц	Амфиболы, слюды, эгирин, пирит, пирротин, мартит, маггемит, сидерит, ильменит
	Марганцевые руды	Браунит, гаусманит, родонит, якобит, хлориты, биксбит, голландит	Эпидот, пироксены, гранаты, магнетит, пирролюзит, гематит
	Золото-урановые руды в конгломератах	Золото, браунерит, уранинит, ураноторит, тухолит	Хромит, пиркон, алмаз, Os, Ir, минералы группы платины, арсенопирит, пирит, пирротин, скуттерудит, смальтин, хлорангит, кальцит, данаит, кубанит

Глава 6

Описание рудных минералов по результатам макроскопического и микроскопического изучения

Начиная изучать руду, исследователь должен тщательно просмотреть изготовленные из нее полированные и прозрачные шлифы под микроскопом, с малыми и большими увеличениями. Описание шлифов и образцов выполняется по определенному плану: 1) описание минералов; 2) строение руды (текстура, структура); 3) последовательность выделения минералов; 4) промышленные типы руд.

Характеристика рудообразующих минералов составляется в следующей последовательности: 1) название минерала и его формула; 2) количество минерала в различных типах руд; 3) генерация минерала; для каждой генерации приводятся сведения о форме и величине мономинеральных выделений, о форме, величине и внутреннем строении зерен, о характере сростаний с другими минералами; 4) характерные диагностические особенности минерала. Текст иллюстрируется зарисовками, микрофотографиями и отпечатками.

Описание рудообразующих минералов проводится в порядке их распространенности или последовательности выделения в руде. Вначале описываются рудные, а затем нерудные минералы. Рудные минералы могут быть разделены на группы по металлам, например, минералы молибдена, меди и др. (Мовсесян, Исаенко, 1974). В каждой группе минералы того или другого металла разделяются по химическому составу на классы. Внутри каждой группы минералы располагаются в следующем порядке: вначале гипогенные, затем гипергенные.

Описания последующих шлифов лишь дополняют предыдущие.

После того как все шлифы будут просмотрены и изучены, составляется сводное описание по отдельным жилам или участкам месторождения. Ниже приводится пример такого сводного описания рудных минералов на основе просмотра шлифов и макроскопического изучения руды.

Минералы молибдена в рудах медно-молибденового месторождения Каджаран (Исаенко, 1966). В рудах месторождения Каджаран были установлены следующие минералы молибдена: молибденит, повеллит, ферримолибдит, молибденсодержащие гётит, гидрогётит и гидротематит.

Молибденит. Один из главных рудообразующих минералов. В сульфидных медно-молибденовых рудах выделяются три генерации молибденита.

Морфогенетические свойства. *Крупночешуйчатый молибденит первой генерации* образует мономинеральные агрегаты в интрузивных вмещающих породах и в раздробленных кварцевых жилах. Форма агрегатов — вкрапленность, гнезда, прожилки, друзы и цемент в брекчиях. Размеры отдельных чешуек обычно колеблются от 1 до 10 мм (а иногда и больше), размеры отдельных выделений — от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Молибденит выделяется позже кварца, анортоклаза, альбита и мелкочешуйчатого биотита. Главная масса молибденита развивается метасоматическим путем.

Метасоматические выделения молибденита чаще всего развиты в кварцевых жилах и реже в горных породах. Наиболее интенсивно молибденит замещает безрудный кварц. Чешуйки молибденита обычно наполнены реликтами кварца. Прожилкообразные выделения молибденита сосредоточены в раздробленных призальбандовых зонах кварцевых жил и прожилков. Они характеризуются гребенчатым сложением

нием, причем молибденитовые чешуйки растут от зальбанда внутрь кварцевых жил, расположены в интерстициях шестоватых кварцевых зерен и развиты по трещинам в них. Реже встречаются выделения, сложенные чешуйками молибденита, вытянутыми параллельно зальбандам. Метасоматические прожилки молибденита развиты в кварцевых жилах вдоль зальбандов. Иногда они выходят из кварцевых жил и прожилков во вмещающую боковую породу. Мощность прожилков изменчива, нередко они прерываются.



Рис. 42. Форма сростаний молибденита (серое) с халькопиритом (белое). Ямки — черное. Полированный шлиф. $\times 40$

Вкрапленность метакристаллов молибденита развита в кварцевых диоритах, монзонитах и приурочена к микроскопическим трещинкам, к брекчированным зонам или к скоплениям биотита. Наблюдались метакристаллы молибденита в раннем халькопирите (рис. 42). Молибденит первой генерации пересекает и корродирует прожилки и участки раннего пирита, кварца и халькопирита. Поздние генерации халькопирита, борнита, сфалерита, серицита, кварца и карбонатов развиваются в молибдените по трещинкам спайности. Поздний халькопирит и борнит часто образуют с молибденитом коррозионные графические и субграфические сростания. Пластинки молибденита первой генерации сильно смяты, иногда перетерты до тончайшей массы, образующей черные глинки трения. Для большинства чешуек молибденита характерны полисинтетические двойники давления, фигуры смятия, блочное и волнистое погасание.

Мелкочешуйчатый молибденит второй генерации с размерами чешуек от 0,02 до 1 мм всегда ассоциирует с серым мелкозернистым мозаичным кварцем. Молибденит и кварц слагают в штокверках (Каджаран, Центральный участок) главную массу молибденит-кварцевых прожилков мощностью от 1—2 мм до 2 см. Молибденит-кварцевые прожилки при выклинивании иногда переходят в тонкие (0,1—0,2 мм) молибденитовые. Волосовидные молибденитовые прожилки развиваются по многочисленным трещинкам в рудовмещающих породах и в

жильном кварце. В жильном кварце молибденит встречается в виде единичных чешуек и радиально-лучистых сростаний. Чешуйки молибденита располагаются в кварцевых прожилках параллельно простиранию или перпендикулярно к зальбандам, иногда в беспорядке.

Молибденит второй генерации наиболее широко распространен в сульфидных медно-молибденовых прожилково-вкрапленных рудах. На Каджаранском месторождении количество мелкочешуйчатого молибденита с глубиной увеличивается.

Тонкочешуйчатый молибденит третьей генерации с размерами чешуек в тысячные доли миллиметра изредка встречается в сульфидно-кварцевых и сульфидных прожилках. Молибденит этой генерации наблюдался в прожилках темно-серого среднезернистого кварца в виде розеток и единичных зерен, разбросанных в беспорядке. Встречаются мелкие спутанноволокнистые выделения молибденита в среднезернистом халькопирите.

Чешуйки молибденита первой, второй и третьей генераций, подвергшиеся динамометаморфизму, интенсивно смяты, расщеплены, а иногда перекристаллизованы. Развитие процессов динамометаморфизма привело к возникновению двух вторичных морфогенетических разновидностей молибденита: расщепленного и идиобластического.

Расщепленный молибденит встречается в брекчированных сульфидно-кварцевых и сульфидных прожилках и жилах. Он представлен мельчайшими субмикроскопическими пластинками в кварце, сульфидах и редко в карбонатах. Расщепленные чешуйки молибденита и тончайшие обломки сульфидов (пирита и халькопирита) придают кварцу синевато-серую окраску.

Идиобластический молибденит формируется при перекристаллизации в твердом состоянии молибденитовых глинок трения. Он не содержит включений и не имеет фигур смятия, встречается редко.

Диагностические свойства. Молибдениты Каджаранского месторождения характеризуются обычными оптическими и физическими свойствами. Число микротвердости, измеренное на приборе ПМТ-3, составляет 19—23 кгс/мм². Плотность крупночешуйчатого молибденита первой генерации из кварцевой жилы (проба 3777, месторождение Каджаран) равна 4,644—4,655; она более низкая по сравнению со стандартными образцами, что объясняется загрязненностью минерала тончайшими включениями кварца.

Химическими и спектральными анализами в молибдените обнаружены кремний, алюминий, магний, железо, кальций, медь, рений, селен, теллур, свинец, марганец, титан, серебро. В единичных пробах молибденита были определены кадмий, цирконий, вольфрам, олово, кобальт и никель.

В молибдените первой и второй генераций постоянно присутствуют рений, селен и теллур в количестве 0,01—0,1%. Рений и селен обнаружены во всех пробах молибденита. В молибдените первой и второй генераций обычны примеси меди и железа (0,01—0,1%). Перечисленные элементы входят в состав халькопирита и пирита, образующих тесные сростания с молибденитом.

В зоне окисления молибденит первой и второй генераций замещается главным образом повеллитом, реже гётитом и еще реже ферри-молибдитом. Отдельные чешуйки и мелкие агрегаты молибденита в жильном кварце иногда нацело замещены повеллитом. Часть молибденита в трещиноватых зонах растворяется в процессе выщелачивания, о чем свидетельствуют характерные пустоты в кварце.

Повеллит. Повеллит имеет гипергенное происхождение и распространен в полуокисленных и окисленных рудах. На месторождении Каджаран развит в количестве до 1—5% в молибденит-кварцевых жи-

лах и в минерализованных участках монзонитов как на северном, так и на южном склонах горы Каджаран. Более широко распространен в окисленных рудах по сравнению с ферримолибдитом, особенно в нижних частях зоны окисления на глубине более 8—10 м от поверхности. В раздробленных молибденит-кварцевых жилах повеллит встречается на глубине более 200 м от поверхности (штольни 32 и 34).

Морфогенетические свойства. Встречаются три разновидности повеллита: 1) псевдоморфный; 2) кристаллизующийся в трещинах (зональный) и 3) перекристаллизованный. Преобладает повеллит первой разновидности.

Псевдоморфный повеллит метасоматически замещает крупно- и среднечешуйчатый, реже мелкочешуйчатый, молибденит. Агрегаты молибденита в окисленных и смешанных рудах иногда замещены повеллитом полностью, а чаще лишь по периферии выделений или по трещинкам спайности.

Повеллит образует по молибдениту типичные псевдоморфозы в виде пластин, изогнутых и смятых чешуек с сохранением всех деталей внутреннего строения молибденита: двойников, трещинок спайности и т. д. Имеет волокнистое строение. В большинстве случаев в псевдоморфном повеллите наблюдаются реликты молибденита в виде тонких полосок и чешуек. После травления псевдоморфоз повеллита в HNO_3 конц. выявляются участки *перекристаллизованного повеллита*, для которого характерны изометричные зерна размером в 0,02 мм и меньше, а также гранобластовая структура. Перекристаллизация псевдоморфного повеллита начинается по периферии его выделений и вдоль трещинок.

Зональный повеллит выделяется по трещинкам в жильном кварце и в рудовмещающих породах. Он образует прожилки, линзочки и скопления неправильной формы. Нередко прожилки зонального повеллита соединяются с его псевдоморфозами. Тонкие пленки зонального повеллита наблюдаются на поверхности кристаллов вторичного кальцита. Для повеллита, образующегося при заполнении трещин, характерны зерна изометричной формы с зональным внутренним строением. Зональность роста в зернах повеллита развивается в виде четырехугольников и многоугольников сложной формы.

В верхних горизонтах зоны окисления повеллит замещается ферримолибдитом и гётитом. В нижних горизонтах повеллит или замещается опалом, или выщелачивается, образуя пустотки.

Диагностические свойства. Повеллит в полуокисленных и окисленных рудах представлен разновидностями серого, светло-серого, желтовато-зеленого, желтовато-серого и редко белого цвета. Желтовато-зеленый повеллит обычно развит на границе с реликтами молибденита и является ранней по времени образования разновидностью, которая при дальнейшем выветривании приобретает вид рыхлой мучнистой массы белого или серого цвета.

Число микротвердости, измеренное на приборе ПМТ-3, составляет 200—300 кгс/мм². Хорошо полируется. Трещинки спайности, унаследованные при замещении молибденита, остаются на поверхности минерала. В прозрачных шлифах слабо анизотропен, двупреломление очень слабое. Показатель преломления n_e равен $1,946 \pm 3$ (измерен с фосфорной жидкостью).

Отражение повеллита низкое $R=9—11\%$. В отраженном свете повеллит темнее сфалерита и гётита и светлее кварца; цвет серый. Внутренние рефлексы сильные, бесцветные, желтоватые или зеленоватые. Эффект анизотропии маскируется внутренними рефлексами. Двухотражение незаметно. При травлении HNO_3 конц. образуется серое пятно, выявляются трещинки спайности и зональное строение. В HCl конц.

быстро темнеет, появляется налет темно-бурого цвета; FeCl_3 , HgCl_2 , KOH , KCN не действуют.

Внутренняя структура минерала выявляется при травлении в HNO_3 конц. в течение 3—5 мин.

Повеллит в ультрафиолетовых и катодных лучах характеризуется интенсивной зеленовато-желтой люминесценцией.

По данным спектрального анализа, постоянными примесями в минерале являются: кремний, железо, магний, медь, марганец; спорадические элементы: Na, Cr, Al, As, Pb, Ag, Bi, Co, Ni, Ti, Sn, Ga.

Ферримолибдит. Встречен в верхних частях зоны окисления. Иногда развит и на больших глубинах в сильно раздробленных сульфидно-кварцевых жилах (Каджаран, жила 6, штольня 32). Вокруг выделений ферримолибдита сульфиды обычно лимонитизированы или выщелочены.

Морфогенетические свойства. Ферримолибдит образует почки и рыхлые корочки охристой массы, местами пигментные пятна лимонно-желтого цвета с буроватым оттенком. Он окрашивает породу и жильный кварц в характерный серо-желтый цвет. Его тонко- и мелкозернистые почковидные выделения обрастают более крупными волокнами.

Для индивидов ферримолибдита наиболее характерна волокнистая форма. Обычно он развит в виде сплошной спутанноволокнистой или мохоподобной массы. Значительно реже встречаются розетки, в которых отдельные лучики представляют пачки, сложенные многочисленными волокнами ферримолибдита. Более толстые волокна ферримолибдита при большом увеличении представляют собой пучки из нескольких параллельно сросшихся тонких индивидов. Длина пучков в розетках достигает 1,5—2 мм, а длина отдельных волокон до 0,1—0,2 мм при толщине их порядка 0,001—0,0005 мм.

Выделяются две разновидности ферримолибдита: псевдоморфный и кристаллизующийся в пустотах. Преобладает вторая.

Псевдоморфный скрытокристаллический ферримолибдит замещает пластинки молибденита с сохранением их формы. В таких участках можно наблюдать наслаивающиеся один на другой слоистые агрегаты ферримолибдита. Иногда ферримолибдит образует плоские волокнистые или веерообразные агрегаты между чешуйками разрушенного молибденита, уже распавшегося на мелкие пластинки. Он замещает тонкорастертый молибденит на зеркалах скольжения, а также развивается в виде каемок по периферии крупных выделений молибденита. Образуется как более поздний минерал по повеллиту в присутствии гидроокислов железа. Псевдоморфный ферримолибдит замещается гётитом. Между ними наблюдаются постепенные переходы.

Другая разновидность ферримолибдита, заполняющая пустотки, обычно отлагается в виде радиальнолучистых, волокнистых и почковидных агрегатов на поверхности кварца и породообразующих минералов, часто покрытых бугристой коркой гидроокислов железа. Иногда он заполняет пустотки в лимоните в виде мелких пачек и розеток. Наблюдаются розетки ферримолибдита на корочках малахита.

Ферримолибдит подвергается дальнейшему разложению, переходя в лимонит, при этом по нему развивается бурая гелевая масса гётита и гидрогётита.

Диагностические свойства. По данным спектральных анализов, в ферримолибдите постоянно присутствуют следующие элементы: железо, кремний, алюминий, медь, магний и марганец. Из других элементов в некоторых пробах минерала были обнаружены Ca, Ba, Pb, Ag, Sb, Ti, V, Cr, Sn, In.

Показатель преломления ферримолибдита был определен с фосфорными жидкостями: по $N_g > 2,065$ (верхний предел набора фосфорных жидкостей), по $N_p = 1,721 \pm 2$.

Для волокнистого ферримолибдита получены рентгенограммы по методу порошков. В двух случаях, когда проба ферримолибдита снималась с растиркой, линии на снимках отсутствуют. Фон интенсивный. По заключению Н. Н. Слудской (лаборатория ИГЕМ), растертая масса ферримолибдита представляет рентгеноаморфное вещество.

Гидроокислы железа. Широко распространены на месторождении; как показывают химические и спектральные анализы, содержат постоянную примесь молибдена. Таким образом, часть окисленного молибдена заключена в гётите, гидрогётите, лепидокроките, гидротематите. Перечисленные минералы образуются при замещении молибденита, повеллита и ферримолибдита, а также сульфидов меди, железа и железистых карбонатов. По-видимому, молибден присутствует в лимоните или в виде мельчайших реликтов молибденовых минералов, или в виде изоморфной примеси. Вероятно, имели место такие явления, как адсорбция молибдена гидроокислами железа из поверхностных растворов или совместное их отложение при нейтрализации растворов.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФОВ НАЧИНАЮЩИМ ИССЛЕДОВАТЕЛЕМ

Обучение студентов навыкам диагностики рудных минералов в отраженном свете может быть разделено на четыре приема. Из них первые три приема основаны на применении качественных методов исследования.

Первый прием наблюдений. Студент тщательно очищает поверхность шлифа от пыли, пленок; устанавливает полированный шлиф в рабочее положение. Под микроскопом, при небольших увеличениях, в отраженном свете просматривается шлиф и выявляется сколько различных минералов (без точного названия) присутствует в шлифе — на основе различия в цвете, яркости, качестве полированной поверхности, по относительному рельефу, а также по форме кристаллов и спайности. Шлиф изучают под микроскопом в воздухе и масле. Для работы подбираются полированные шлифы из полиминеральных, среднезернистых руд, например, медно-молибденовых, медно-колчеданных, медно-никелевых, полиметаллических, антимонит-киноварных и т. д. Результаты наблюдений записываются в тетрадь.

Второй прием наблюдений. Студент изучает в полированных шлифах большую группу распространенных минералов. Систематически исследует оптические, физические и химические свойства известного минерала, например, пирита, арсенопирита, антимонита и т. д. Студент приучается визуально определять отражение в процентах. Результаты наблюдений для каждого минерала записываются в табл. II и сравниваются с аналогичными данными в определительных и описательных таблицах. Полированный шлиф подбирается таким образом, чтобы изучаемый минерал слагал крупные выделения.

Самыми распространенными минералами-эталоном для изучения оптических, физических и химических свойств являются: антимонит, аргентит, арсенопирит, блеклая руда, борнит, буланжерит, висмут, висмутин, вольфрамит, галенит, гематит, графит, золото, ильменит, кальцит, касситерит, кварц, кобальтин, ковеллин, кубанит, куприт, магнетит, малахит, марказит, медь, молибденит, никелин, пентландит, пираргирит, пирит, пиролюзит, пирротин, сафлорит, смальтин, ульманит, халькозин, халькопирит, хромит, шеелит.

**ОБРАЗЕЦ ЗАПИСИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ
В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ**

Минерал Формула Сингония	Оптические свойства					Физические свойства				Химические свойства	
	R, %	ΔR	Цвет	Эффект анизотропии A ₁ A ₂ I	Внутренние реф- лексы	Твердость			Форма и строе- ние зерен	Диагно- стическое травление	Качествен- ный хими- ческий анализ
						Царапанием	По рельефу	H, кгс/мм ²			

Примечание. Минералы: A₁—слабо анизотропные; A₂—отчетливо анизотропные; A₃—сильно анизотропные; И—изотропные минералы; H, кгс/мм²—число микротвердости.

Третий прием наблюдений. Студент самостоятельно определяет название рудного минерала, используя качественные методы исследования и набор определительных и описательных таблиц. Изучаются три-четыре шлифа. Каждый шлиф должен содержать минералы, ранее изучавшиеся студентом, и один или два неизвестных минерала. Неизвестный минерал тщательно описывается и определяется его название. Желательно сравнить его свойства со сходными минералами (например, бертьерит — антимонит, энаргит — люцит и т. д.). Все минералы в шлифе должны быть определены и описаны.

Четвертый прием наблюдений. Самостоятельное измерение количественных констант — отражения и микротвердости, проводится под руководством лаборанта. Работу следует начинать со шлифов, в которых содержится один рудный минерал или он преобладает. Количественные измерения отражения производят на нескольких зернах минерала в полированном шлифе, в стандартном монохроматическом свете (546 нм). Для анизотропных минералов надо найти зерно с максимальным двуотражением и измерить оба показателя отражения. Измерение микротвердости производят в полированном шлифе на нескольких зернах минерала.

ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ И ОПИСАТЕЛЬНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Глава 7

Методика работы с таблицами

Диагностика минерала с помощью таблиц производится по его главнейшим свойствам: твердости, показателю отражения и эффекту поляризации.

Определительные таблицы составлены в системе координат по схеме, предложенной С. Баун и К. Тейлором (1958). В таблицах рудные минералы распределены по значениям их отражения и микротвердости. По оси ординат отложена величина R , по оси абсцисс — среднее число микротвердости H в логарифмическом масштабе. В определительных таблицах показаны и другие свойства рудных минералов: эффект анизотропии, внутренние рефлексии, данные диагностического травления и форма минеральных индивидов. По величине H и R рудные минералы подразделяются на шесть групп (таблицы I, II, III, IV, V, VI). Группы минералов по отражению выделены по сравнению с отражением минерала-эталона; в качестве эталона принят галенит ($R=44\%$).

Таблица I — минералы низкой твердости, $R > 44\%$

Таблица II — минералы низкой твердости, $R < 44\%$

Таблица III — минералы средней твердости, $R > 44\%$

Таблица IV — минералы средней твердости, $R < 44\%$

Таблица V — минералы высокой твердости, $R > 44\%$

Таблица VI — минералы высокой твердости, $R < 44\%$.

В таблицах «точка» минерала наносится по максимальной величине отражения в воздухе.

Диагностика рудного минерала начинается с определения его главнейших констант: отражательной способности R и твердости H . Количественные измерения отражательной способности производятся на специальных приборах, качественное определение R может быть произведено путем приближенной оценки этого свойства при визуальном сравнении R исследуемого минерала с R минерала-эталона (шеллит — 10%, сфалерит — 18%, галенит — 44%, пирит — 54,5%). Количественное определение микротвердости H осуществляется на приборе ПМТ-3, а качественное определение — путем царапания иглами полированной поверхности, по рельефу. По этим двум константам каждый минерал попадает в одну из шести определительных таблиц.

По эффекту анизотропии минералы подразделяются на четыре группы: слабо анизотропные, отчетливо анизотропные, сильно анизотропные и изотропные.

По двуотражению $R_{\max} - R_{\min}$ (ΔR) минералы подразделяются на три группы: двуотражение сильное ($\Delta R = 20 - 5\%$), двуотражение слабое ($R_g - R_p$), двуотражение отсутствует — знака нет.

По внутренним рефлексам минералы подразделяются на три группы: рефлексии сильные, наблюдаемые в воздухе; рефлексии слабые,

наблюдаемые в порошке или в иммерсии; рефлексы отсутствуют — знака нет.

Для минералов с отражением ниже сфалерита ($R \leq 18\%$) внутренние рефлексы, как правило, сильные и представляют собой важный диагностический признак.

На определительных таблицах показана характерная форма минеральных индивидов (идноморфная, аллотриоморфная, пластинчатая, колломорфная, радиально-лучистая и т. д.) и внутреннее строение зерен (двойниковое и зональное).

Для каждого минерала приведены данные по диагностическому травлению. Внутри круга, разделенного на шесть сегментов, показаны результаты диагностического травления в условных обозначениях.

На определительных таблицах справа от названия минерала показаны один или два характерных химических элемента, на которые в диагностических целях рекомендуется провести качественный микрохимический анализ. При диагностике рудных минералов окисленных руд приходится часто пользоваться реакциями качественного микрохимического анализа.

Следующий этап в работе диагноста — детальное изучение и подтверждение исследуемого минерала с помощью описательных таблиц.

В таблицах I, II, III минералы расположены по убыванию отражения и подразделяются на пять групп (см. Указатель к таблицам).

В каждой группе минералы подразделяются на две подгруппы — изотропную и анизотропную. В подгруппах минералы сгруппированы по химическому составу, например: минералы меди, молибдена, железа, свинца, цинка и т. д. Всего в трех описательных таблицах 29 подгрупп. Для каждого минерала в таблицах приведены следующие основные сведения: название, химический состав, характерные элементы-примеси, сингония, отражение R , двуотражение ΔR , цвет, эффект поляризации, внутренние рефлексы, наблюдаемые в воздухе (В) и в иммерсии (МИ); твердость (по Моосу и микротвердость H , кгс/мм², форма отпечатка) и поведение при полировании; относительный рельеф h , микрохимические реакции и методика их проведения, форма и внутреннее строение агрегатов и зерен, парагенезис, дебаеграмма (характерные линии) и отличительные диагностические признаки.

Данные по величине отражения минералов для желтого света приведены по Волюнскому (Вл) для «белого» и зеленого света по Баун (Б), Рамдору (Р), Эльснеру (Э), Снидеевой (С). На основе этих показателей можно точно определить исследуемый минерал.

В данной работе помещены также определительные таблицы VII—XIV, составленные по отдельным группам элементов и по типам руд.

Таблица VII — минералов никеля и кобальта, составители: С. С. Боршанская, Р. А. Виноградова; таблица VIII минералов группы сульфосолей Cu, Pb, Ag, Hg, Tl, Fe, Bi, As, Sb, составители: Е. Л. Афанасьева, М. П. Исаенко; таблица IX теллуридов и селенидов Au, Ag, Bi, Pb, составители: Е. Л. Афанасьева, М. П. Исаенко; таблица X минералов, природных сплавов золота и серебра, платины и иридия, составитель Л. В. Разин; таблица XI минералов осмия, иридия, рутения, составитель Л. В. Разин; таблица XII рудообразующих минералов железных, марганцевых и хромитовых руд, составитель М. П. Исаенко; таблица XIII главных и второстепенных рудных минералов медистых песчаников, составители: М. П. Исаенко, В. М. Федотова; таблица XIV редких и очень редких рудных минералов медистых песчаников, составители: М. П. Исаенко, В. М. Федотова.

В таблицах (VII—XIV) наряду с минералами, включенными в основные определительные таблицы (I—VI), имеются все известные в настоящее время редкие минералы соответствующего элемента. Исследователь, учитывая парагенетические минеральные ассоциации, имеет возможность, пользуясь определительными таблицами VII—XIV, точно определить неизвестный минерал. Все эти таблицы наглядны и удобны в обращении.

К определительным таблицам X и XI имеются описательные таблицы IV, V, VI, в которых приведены подробные сведения о каждом минерале этой группы элементов.

Обилие и противоречивость имеющихся данных по величине отражения рудных минералов, в связи с несовершенством существующих приборов и колебаниями, обусловленными примесями в минералах и другими особенностями, приводят к тому, что различными авторами даются неоднозначные данные.

При составлении VIII и IX определительных таблиц были использованы показатели отражения рудных минералов в воздухе по данным М. С. Безсмертной и др.

ГРАФИКИ ВАРИАЦИЙ ОТРАЖЕНИЯ, МИКРОТВЕРДОСТИ И СПЕКТРЫ ОТРАЖЕНИЯ

Средние значения главных констант рудных минералов: отражения и микротвердости — используются для построения определительных таблиц в системе координат, приведенных в этой книге. В то же время известно, что величины R и H рудного минерала колеблются в зависимости от его оптических, химических, физических свойств, поэтому необходимо строить графики вариации R и H . Примеры таких графиков приведены на рис. 43—47. Графики строятся на миллиметровой бумаге. По оси ординат откладывается величина отражения по Л. Н. Вяльсову (R , %), по оси абсцисс в логарифмическом масштабе — значения микротвердости Виккерса ($\log H$), по данным С. И. Лебедевой, или С. Бауи и К. Тейлора.

На рис. 43 даны площади локализации трех парагенетических групп минералов: теллуриды Au, Ag, Bi, Pb (определятельная таблица IX), сульфосоли (определятельная таблица VIII) и окислы Fe, Mn, Ti, Cr (определятельная таблица XIII). На рис. 44 показаны вариации R и H для некоторых минералов группы сульфосолей Pb, Ag, Cu.

Каждый минерал представлен на графике прямоугольником, положение вершин которого определяется предельными значениями R и H . Для изотропных минералов длина вертикальной стороны равна нулю. Каждый минерал на графике обозначается символом. Как видно из приведенных графиков, поля нескольких минералов перекрываются, поэтому для диагностики неизвестного минерала недостаточно знать только вариации R и H , а необходимо провести весь комплекс изучения оптических, физических и химических свойств под микроскопом.

Л. Н. Вяльсов (1969) показал значение построения графиков $R_g—R_p$ для определения главных показателей отражения, осности и оптического знака минерала. На график наносится группа точек по данным статистических замеров показателей отражения на различных сечениях минерала (см. рис. 9). В случае двуосного минерала по группе точек строится прямоугольник, одна из вершин которого лежит на оси R_m ; положение вершин прямоугольника позволяет определить главные показатели отражения — R_g , R_m , R_p . Положение прямоугольника относительно координатных осей позволяет определить оптический знак минерала.

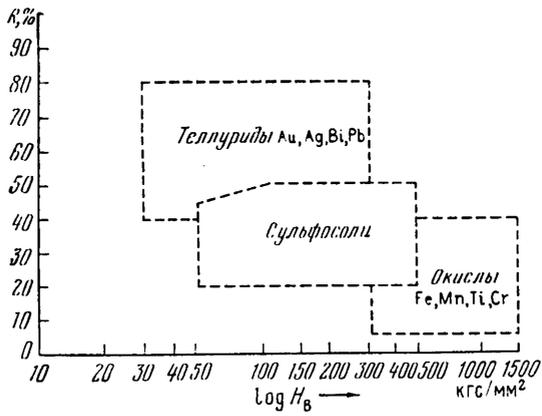


Рис. 43. Общий график. Замеры *R* Л. Н. Вальсова

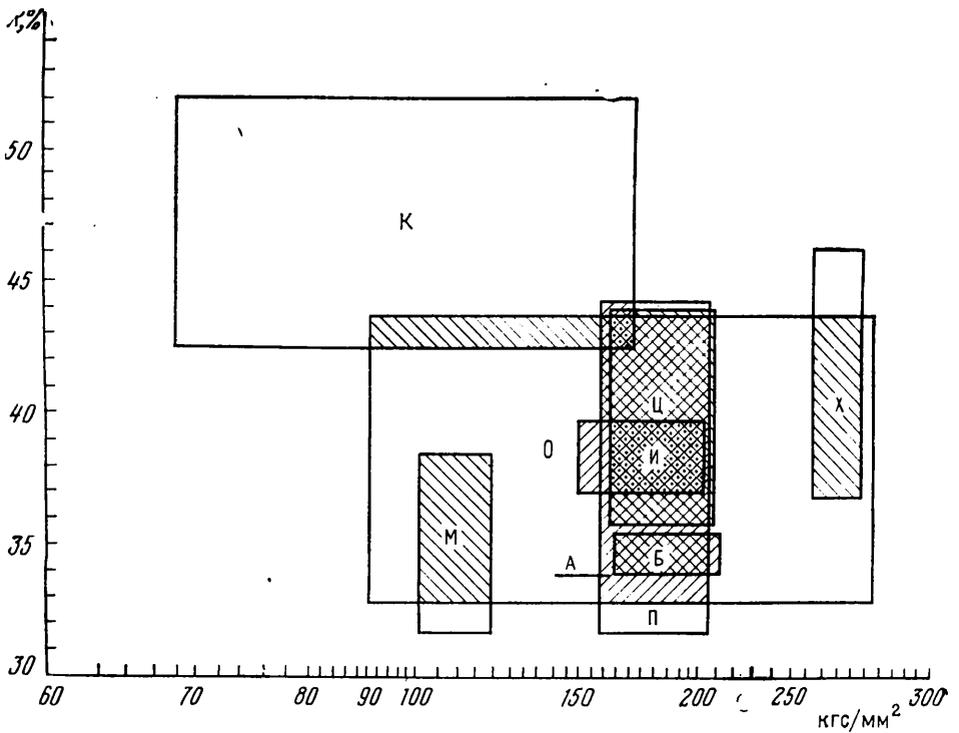


Рис. 44. График вариации *R* и *H* для некоторых минералов группы сульфоселей.
Замеры *R* Л. Н. Вальсова.

А — арсеносульфаниит, Б — бурнонит, И — норданит, К — кобеллит, М — миаргирит, О — овихмит, П — плагнионит, Х — халькостибит, Ц — цинкениит

В случае одноосного минерала ($R_g=R_m$, $R_p=R_m$), прямоугольник превращается в отрезок, отходящий от оси R_m , положение его относительно координатных осей позволяет определить оптический знак минерала. Изотропный минерал на графике обозначается точкой, лежащей на оси R_m .

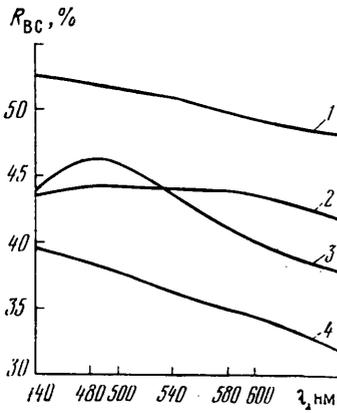


Рис. 45. Спектры отражения кобеллита (1), овихита (2), халькостибита (3), мнгаррита (4) для воздуха. Замеры R Л. Н. Вальсова

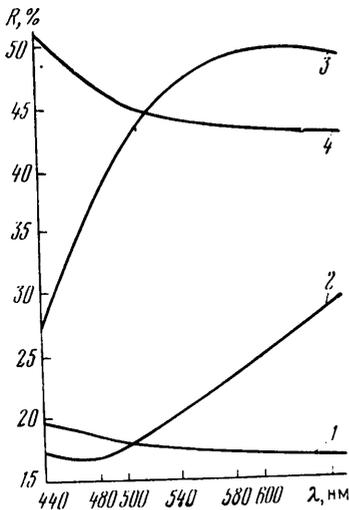


Рис. 46. Спектры отражения сфалерита (1), борнита (2), халькопирита (3), галенита (4) для воздуха. Замеры R Л. Н. Вальсова

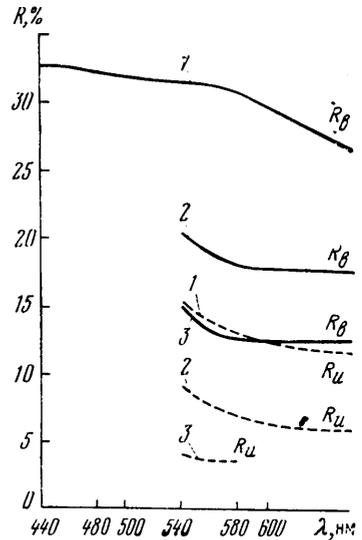


Рис. 47. Спектры отражения гематита (1), рутила (2), хромита (3), для воздуха ($R_{в}$), для иммерсии ($R_{и}$). Замеры R Л. Н. Вальсова

В процессе обучения графики спектров отражения строятся студентами как по результатам собственных измерений, так и по литературным данным. Графики дисперсии отражения характеризуют цвет и оттенок цвета минерала (см. рисунки 45, 46), двуотражение минерала; наглядно показывают изменение отражения минерала в воздухе и в иммерсии (см. рис. 47). Характер кривой спектра R очень важен для идентификации минералов.

Графики спектров отражения строятся на миллиметровой бумаге, в системе координат $R\% - \lambda \text{ nm}$. Значения отражения ($R, \%$) откла-

дываются по оси ординат, значения длин волн света (440, 480, 540, 580, 660 нм) — по оси абсцисс. Удобны для построения графиков масштабы: по оси абсцисс — 1 см на каждые 10 нм длины волны, по оси ординат — 1 см на 1%.

ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ТАБЛИЦ

В примерах 1—7 даны диагностические свойства рудного минерала, наблюдаемые в отраженном свете, и показан ход определения минерала по определительным и описательным таблицам.

В примерах 8—12 приведены только диагностические свойства рудного минерала. Требуется определить название минерала. Ответы помещены в конце раздела.

Пример 1. Минерал имеет низкую твердость, $H=50-59$ кгс/мм², отражение больше пирита и галенита, $R=84-86\%$; изотропный, цвет яркий желтый, внутренние рефлексы отсутствуют. Травление: KCN — медленно чернеет, остальные реактивы не действуют. Образует микроскопические выделения неправильной формы в сульфидах и кварце. По H и R минерал попадает в определительную таблицу 1.

По наиболее характерным признакам (H , R , эффект анизотропии и диагностическое травление) неизвестный минерал определяется как самородное золото или электрум. Систематическое определение минерала проводим, используя описательные таблицы. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 1 описательной таблицы 1.

Пример 2. Минерал имеет низкую твердость, $H=16-26$ кгс/мм², отражение больше пирита и галенита, $R=68\%$; отчетливо анизотропный; цвет светлый розовато-желтый; внутренние рефлексы отсутствуют. Травление: HNO_3 — медленно вскипает и бурет; HCl — медленно бурет, $FeCl_3$ — бурет, иризирует и выявляет структуру; $HgCl_2$ — медленно бурет. Микрохимическая реакция на Bi положительная; на Te — отрицательная. Форма выделений — неправильные зерна с двойниками, редко игольчатая. По H и R минерал попадает в определительную таблицу 1. По наиболее характерным признакам (очень низкая микротвердость, отчетливая анизотропия, форма индивидов) неизвестный минерал определен как самородный висмут. От сходных минералов — теллурувисмута и тетрадимита — он отличается отрицательной реакцией на теллур. Систематическое изучение минерала проводим, используя описательные таблицы. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 2 описательной таблицы 1.

Пример 3. Минерал имеет очень низкую твердость, $H=20-30$ кгс/мм², отражение меньше галенита и больше сфалерита, $R=35-37\%$; изотропный, цвет серо-белый со слабым голубовато-зеленоватым оттенком; внутренние рефлексы отсутствуют. Травление: HNO_3 — медленно бурет, HCl — иногда слегка бурет, $FeCl_3$ — бурет, иризирует; $HgCl_2$ — бурет, иризирует; KCN — бурет до черного. Образует сростание с галенитом и тетраэдритом.

По H и R минерал попадает в определительную таблицу II (слева верхняя часть). По характерным признакам (H , R , эффект поляризации, травление) выбираем минерал аргентит. Систематическое изучение минерала проводим, используя описательные таблицы. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 5 описательной таблицы 1.

Пример 4. Минерал имеет низкую твердость, $H=50-93$ кгс/мм²; отражение больше сфалерита, меньше галенита, $R=21\%$, очень сильная анизотропия и двуотражение; цвет буровато-желтый до серого; внутренние рефлексы отсутствуют. Стандартными реактивами не травится. Микрохимическая реакция на медь и железо положительная. Образует сростание с халькопиритом, кубанитом, пирротинном и пентландитом.

По H и R минерал попадает в определительную таблицу II (справа, середина). По характерным признакам (очень сильная анизотропия и двуотражение, положительная реакция на медь и железо) выбираем минерал валлернит. Систематическое изучение минерала проводим, используя описательные таблицы. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 6а описательной таблицы 1.

Пример 5. Минерал имеет низкую твердость, $H=65-153$ кгс/мм², отражение равно и меньше галенита и больше сфалерита $R=44-30\%$; анизотропия и двуотражение сильные; цвет белый и светло-серый (на разных сечениях зерен), внутренние рефлексы отсутствуют; форма индивидов призматическая, игольчатая, кристаллы и аллотриоморфные зерна, часто с двойниками и фигурами смятия. Травление: HNO_3 — медленно вскипает и чернеет, KOH — бурет, образуется оранжево-красный осадок (смотреть в косом свете).

По H и R минерал попадает в определительную таблицу II (самая верхняя ее часть). По главнейшим признакам (эффект поляризации, двуотражение, положительное травление HNO_3 и KOH) выбираем минерал антимонит. Для проверки проводим

микрохимическую реакцию на сурьму. Рекомендуется сравнить свойства антимонита и джемсонита. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 6а описательной таблицы I.

Пример 6. Минерал имеет низкую твердость, $H=64—98$ кгс/мм², отражение меньше галенита и больше сфалерита $R=30\%$; отчетливо анизотропен; цвет светло-серый; внутренние рефлексы сильные красные. Стандартными реактивами не травится. Форма зерен неправильная. Минерал образует сростания с кварцем и антимонитом.

По H и R минерал попадает в определительную таблицу II. По главнейшим признакам (H , R , сильные внутренние рефлексы) выбираем минерал киноварь или пираргирит. Систематическое определение минерала проводим, используя описательные таблицы. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 6б описательной таблицы I. Проводим микрохимическую реакцию на ртуть в киновари.

Пример 7. Минерал имеет низкую твердость, по Моосу 2,5—3; отражение равно и меньше шеелита, $R=8—9\%$; изотропный; цвет серый; внутренние рефлексы сильные бесцветные. Травление: HNO_3 слегка буреет. Форма минерального агрегата колломорфная; в минерале наблюдаются реликты галенита.

По H и R минерал попадает в определительную таблицу II. По наиболее характерным признакам (сильные внутренние рефлексы, травление, форма индивидов) выбираем в этой таблице англезит. Далее систематическое изучение минералов проводим, используя описательные таблицы. По эффекту анизотропии, H и R исследуемый минерал попадает в подгруппу 9 описательной таблицы I.

Проводим микрохимическую реакцию на свинец в англезите.

Пример 8. Минерал имеет среднюю твердость, $H=195—225$ кгс/мм², на полированной поверхности часто наблюдается совершенная спайность по (111) и треугольники выкрашивания. Отражение выше, чем у галенита, и немного ниже, чем у пирита, $R=53\%$, изотропный; цвет светло-желтый; внутренние рефлексы отсутствуют. Травление: HNO_3 — медленно буреет, остальными реактивами не травится. Микрохимическая реакция на никель и железо положительная. Образует сростания с пиротином и халькопиритом.

Пример 9. Минерал имеет среднюю твердость, $H=308—397$ кгс/мм², отражение выше, чем у сфалерита, и ниже, чем у галенита, $R=28\%$; изотропный; цвет серовато-белый, с голубовато-зеленоватым оттенком; внутренние рефлексы коричнево-красные, заметные в масле или в порошке. Стандартные реактивы не действуют; KCN — иногда слабо буреет.

Микрохимическая реакция на медь и мышьяк положительная. Встречается в ассоциации с халькопиритом, энаргитом, сфалеритом, борнчтом, галенитом и др. Замещает энаргит.

Пример 10. Минерал имеет среднюю твердость, $H=212—329$ кгс/мм², отражение выше, чем у сфалерита, и ниже, чем у галенита, $R=23\%$; сильно анизотропный (цветовой эффект — от фиолетово-красного до светло-зеленого); двутражение слабое; цвет от светло-розового до серо-розового и фиолетового; внутренние рефлексы отсутствуют. Травление: HNO_3 — иногда слабо тускнеет; $HgCl_2$ — иногда слабо буреет; KCN — быстро чернеет; выявляется внутреннее строение зерен. Микрохимическая реакция на медь и мышьяк положительная. Встречается в ассоциации с люцитом, халькопиритом и теннантитом. Замещается теннантитом.

Пример 11. Минерал имеет высокую твердость, $H=948—1226$ кгс/мм², отражение выше пирита, $R=56\%$; изотропный, слабо анизотропный; цвет розовато-белый; внутренние рефлексы отсутствуют. Травление: HNO_3 — иногда медленно слабо тускнеет. Микрохимическая реакция на кобальт положительная. Образует вкрапленность и агрегаты изометрических метакристаллов в скарнах.

Пример 12. Минерал имеет очень высокую твердость, $H=1008—1228$ кгс/мм², полируется плохо, шагреневая поверхность; отражение больше шеелита, меньше сфалерита; $R=12,5\%$; отчетливо анизотропный; цвет серый; двутражение слабое; внутренние рефлексы сильные, цвет бурый, желтый. Травление отрицательное. Формы выделений — изометрические кристаллы с двойниковым строением.

ОТВЕТЫ

Пример 8. Пентландит, определительная табл. III, описательная табл. II, подгруппа 13.

Пример 9. Теннантит, определительная табл. IV, описательная табл. II, подгруппа 15.

Пример 10. Энаргит, определительная табл. IV, описательная табл. II, подгруппа 16.

Пример 11. Кобальтин, определительная табл. V, описательная табл. III, подгруппа 23.

Пример 12. Касситерит, определительная табл. VI, описательная табл. III, подгруппа 28.

**ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ
ТАБЛИЦЫ**

УКАЗАТЕЛЬ К ТАБЛИЦАМ

Номер описательной таблицы	Твердость H , кгс/мм ²	Отражение R , %	Эффект анизотропии	Определительные таблицы	Подгруппы описательных таблиц
I	Низкая $H < 100$	Больше пирита; >54,5	Изотропные Анизотропные	I	1 2
		Больше галенита, меньше пирита; 54,5— —44	Изотропные Анизотропные	I	3 4
		Больше сфалерита, меньше галенита; 44— 18	Изотропные Сильно анизотропные Отчетливо анизотропные	II	5 6а 6б
		Больше шеелита, меньше сфалерита; 18—10	Изотропные Анизотропные	II	7 8
		Меньше шеелита; <10	Изотропные Анизотропные	II	9 10
II	Средняя $100 < H < 500$	Больше пирита; >54,5	Изотропные Анизотропные	III	11 12
		Больше галенита, меньше пирита; 54,5— 44	Изотропные Анизотропные	III	13 14
		Больше сфалерита, меньше галенита; 44— 18	Изотропные Сильно анизотропные Отчетливо анизотропные	IV	15 16а 16б
		Больше шеелита, меньше сфалерита; 18—10	Изотропные Анизотропные	IV	17 18
		Меньше шеелита; <10	Изотропные Анизотропные	IV	19 20

Номер описательной таблицы	Твердость H , кгс/мм ²	Отражение R , %	Эффект анизотропии	Определительные таблицы	Подгруппы описательных таблиц
III	Высокая $H > 500$	Больше пирита; > 54,5	Изотропные Анизотропные	V	21 22
		Больше галенита, меньше пирита; 54,5— 44	Изотропные Анизотропные	V	23 24
		Больше сфалерита, меньше галенита; 44— 18	Изотропные Анизотропные	VI	25 26
		Больше шеелита, меньше сфалерита; 10—18	Изотропные Анизотропные	VI	27 28
		Меньше шеелита; < 10	Анизотропные	VI	29

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ К ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ ТАБЛИЦАМ

Двуотражение сильное ΔR 62-54 %
Двуотражение слабое $R_g - R_p$

ЭФФЕКТ АНИЗОТРОПИИ

- Слабо анизотропные
- Отчетливо анизотропные
- Сильно анизотропные
Не подчеркнуты минералы изотропные

ВНУТРЕННИЕ РЕФЛЕКСЫ

-  Рефлексы сильные, заметные в воздухе
-  Рефлексы слабые, заметные в масле и в порошке

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

-  Не травится
-  Иногда травится
-  Туснеет, слегка буреет
-  Травится, кризирует, буреет
-  Интенсивно травится, чернеет, буреет
-  Бурно вскипает
-  Иногда вскипает
-  Медленно буреет



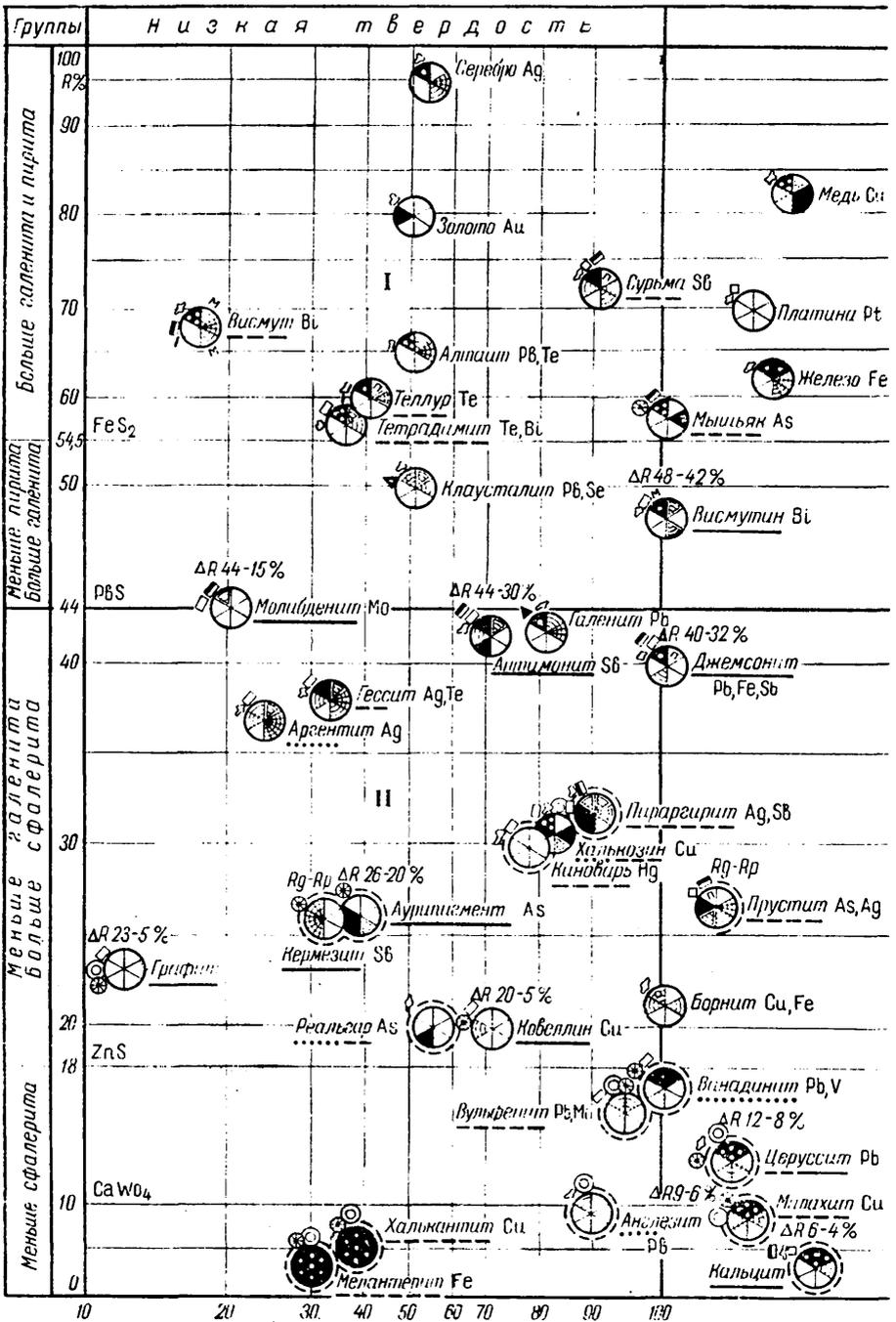
МИКРОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Выполняются на характерные элементы, которые показаны справа от названия минерала, например, Pb для галенита

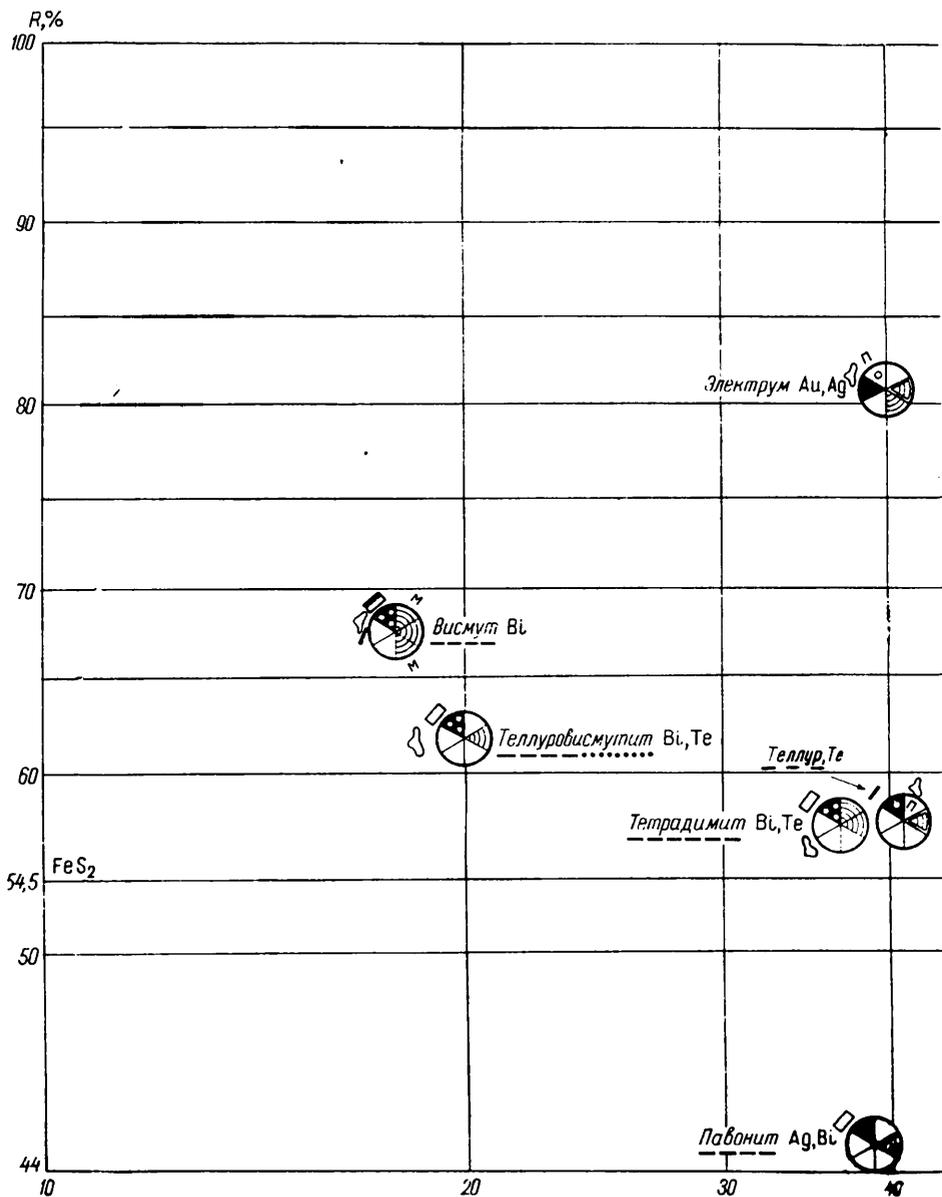
ФОРМА МИНЕРАЛЬНЫХ ИНДИВИДОВ

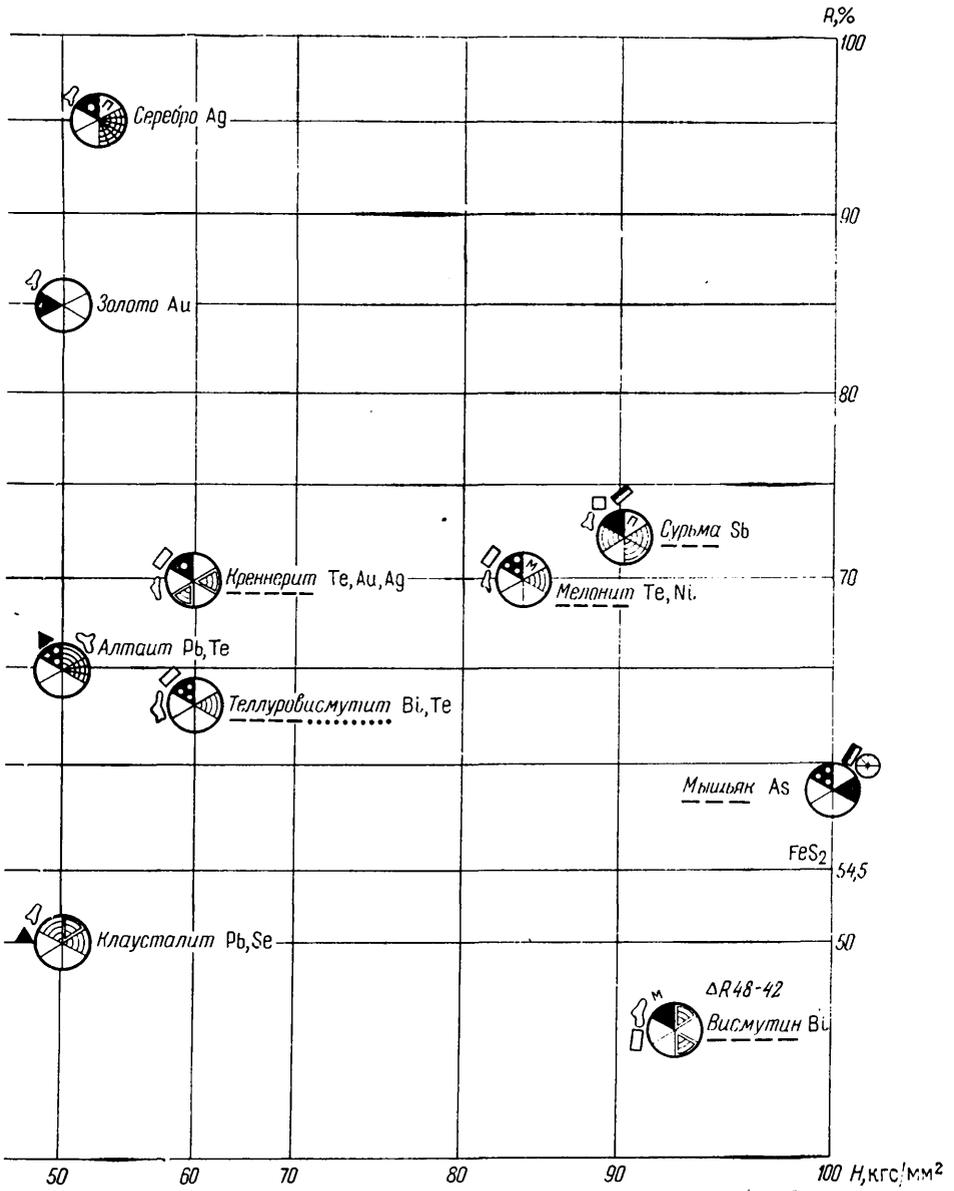
-  Идиоморфная; изометричная, удлиненная
-  Пластинки, иголки
-  Аллотриоморфная
-  Коллоидная, аморфная, скрытокристаллическая
-  Радиально-лучистая, волокнистая
-  Пластинчатые двойники, фигуры смятия
-  Звездочки-триинки
-  Зональное строение
-  Треугольники выкрашивания

СВОДНАЯ ОПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА



Определительная таблица I





Определительная

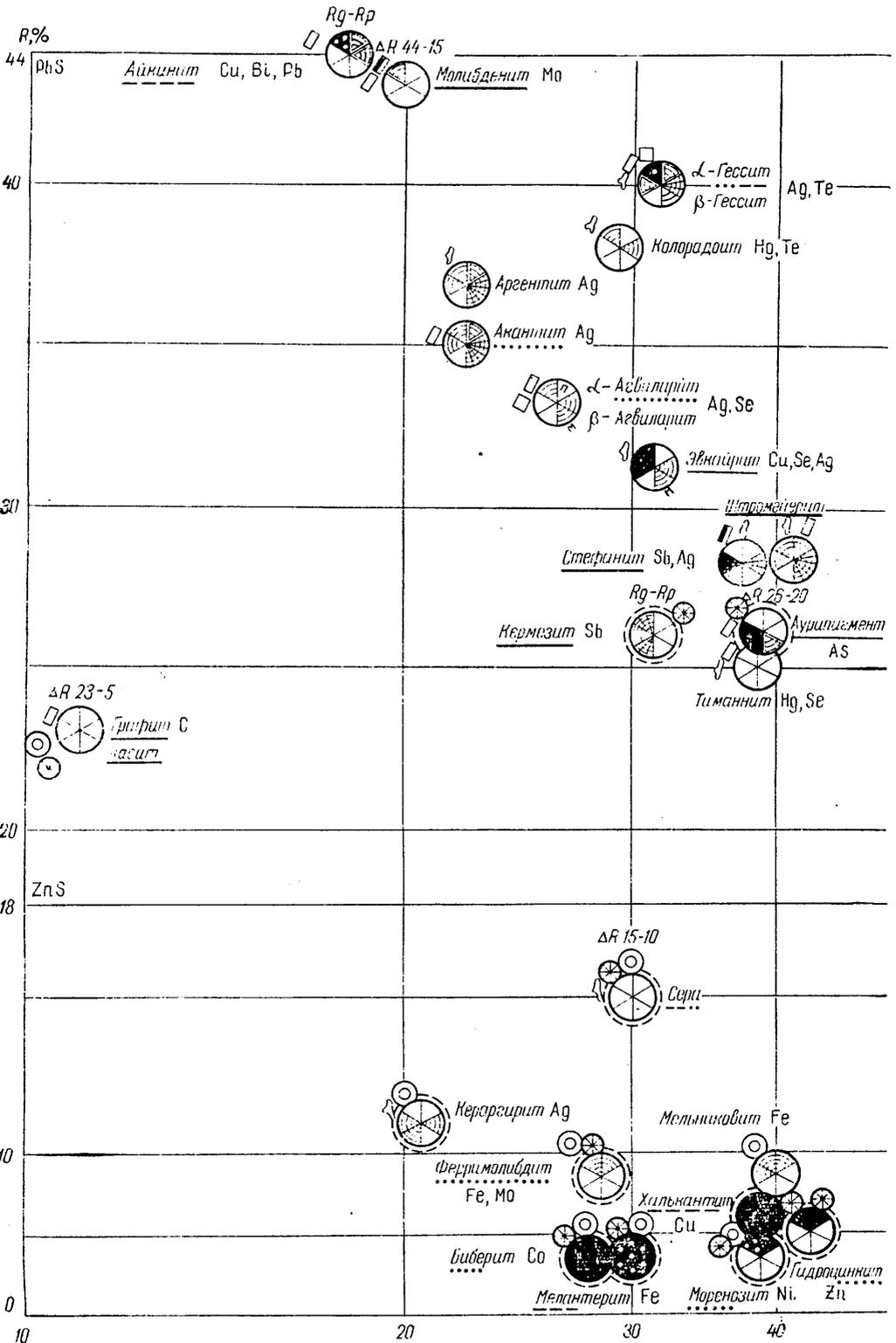
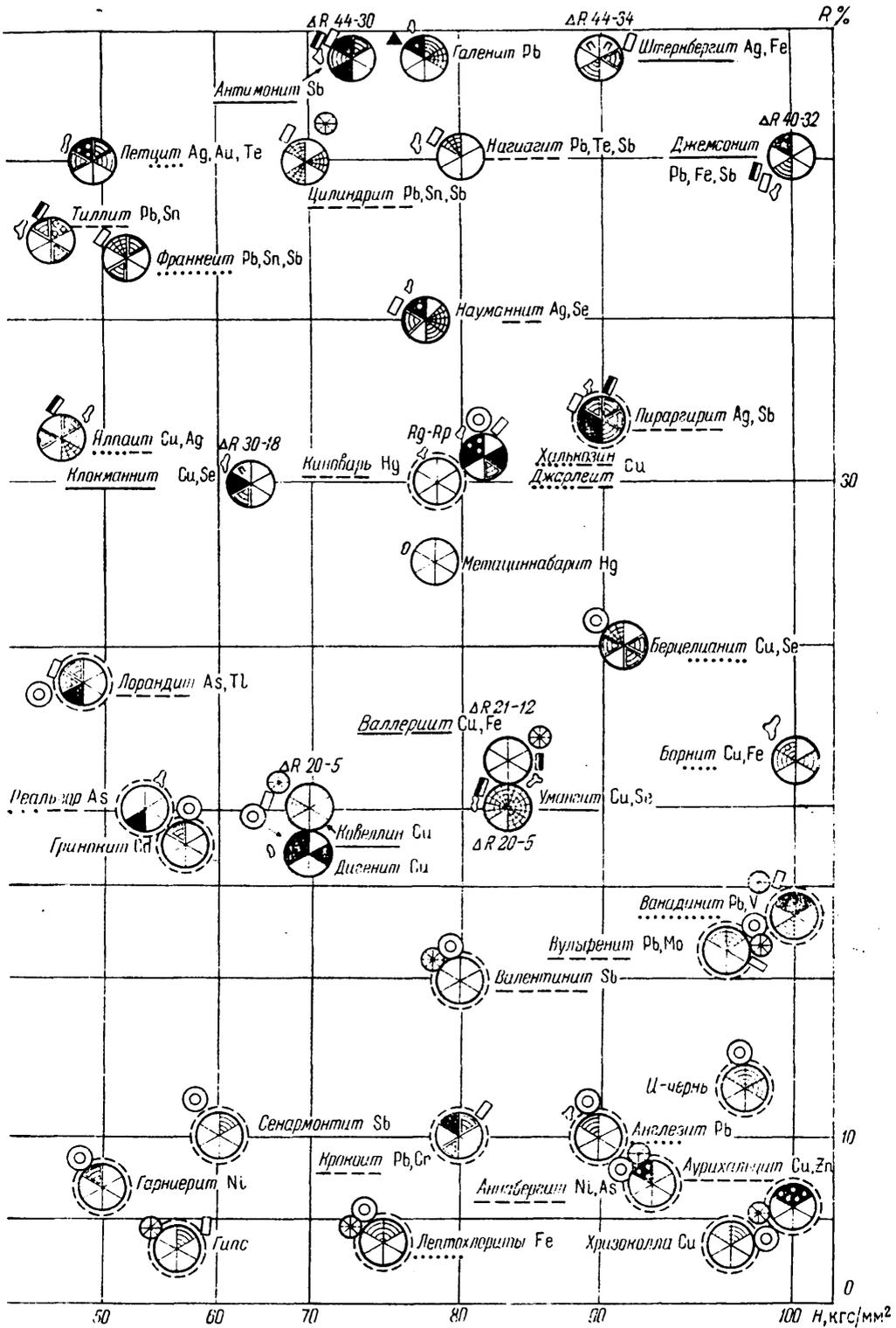


таблица II



Определительная

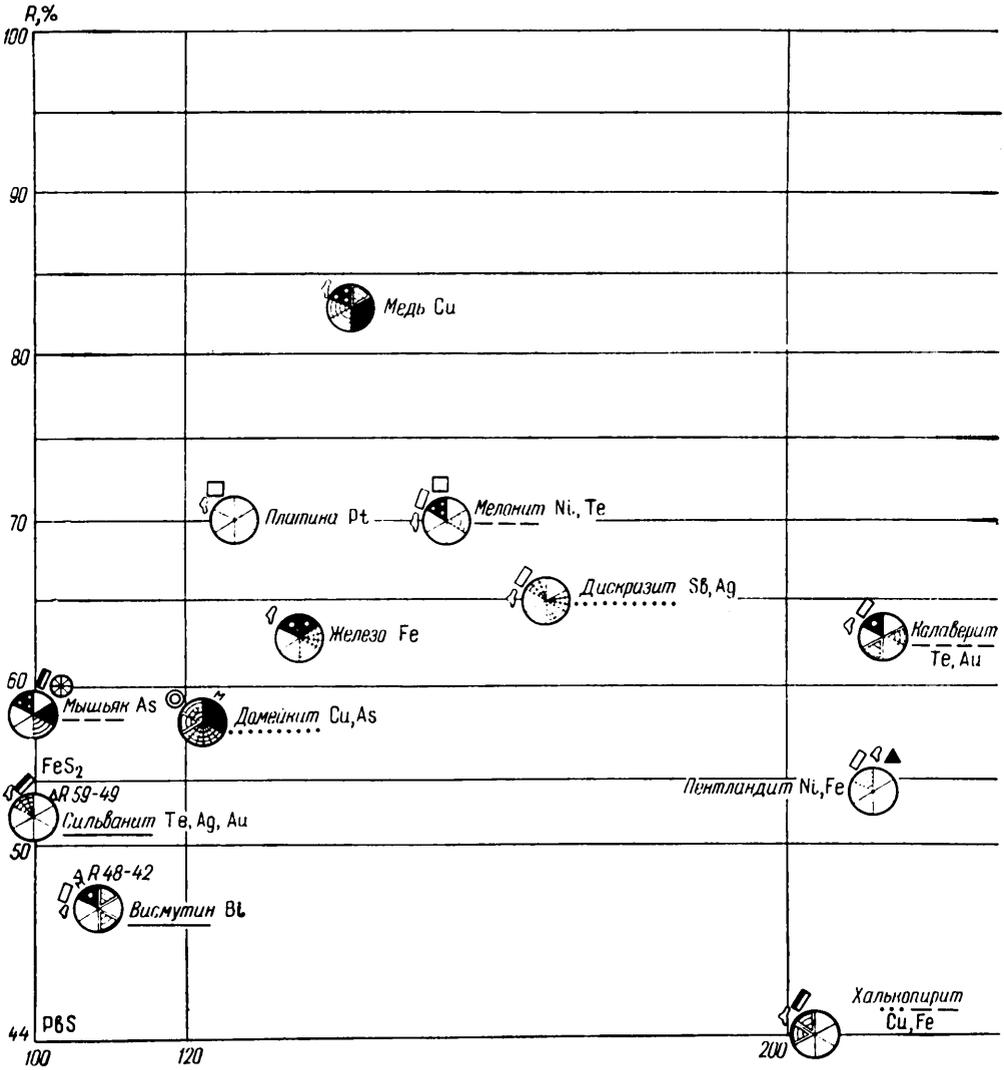


таблица III

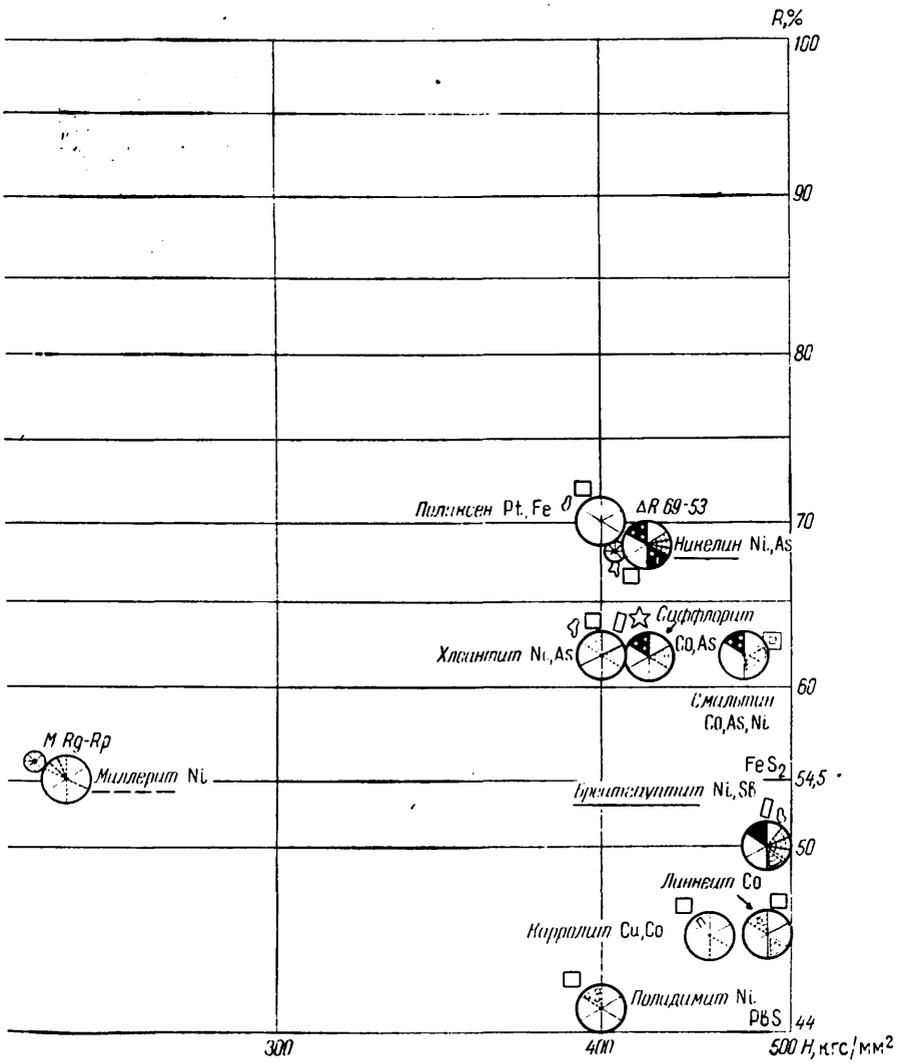
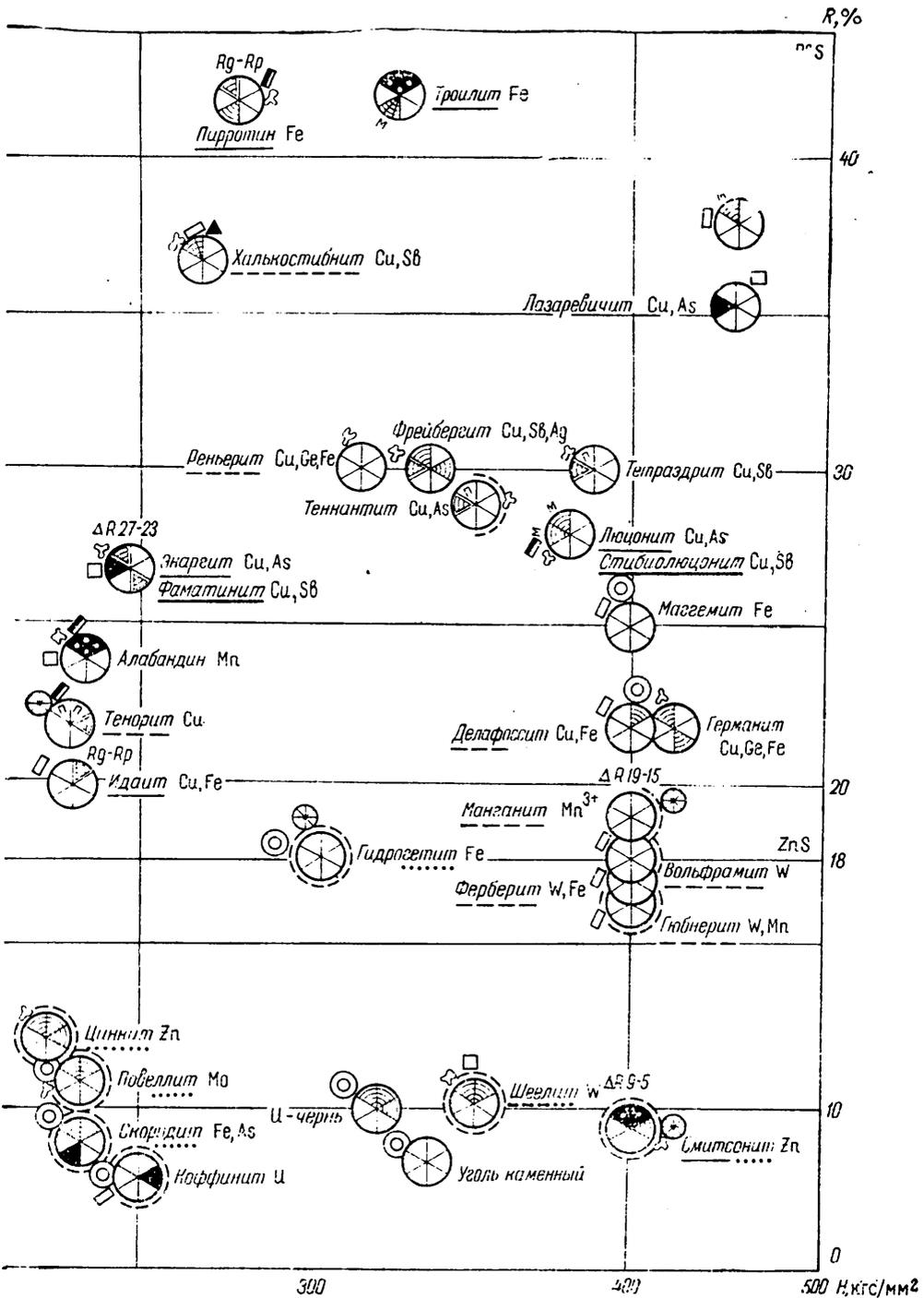


таблица IV



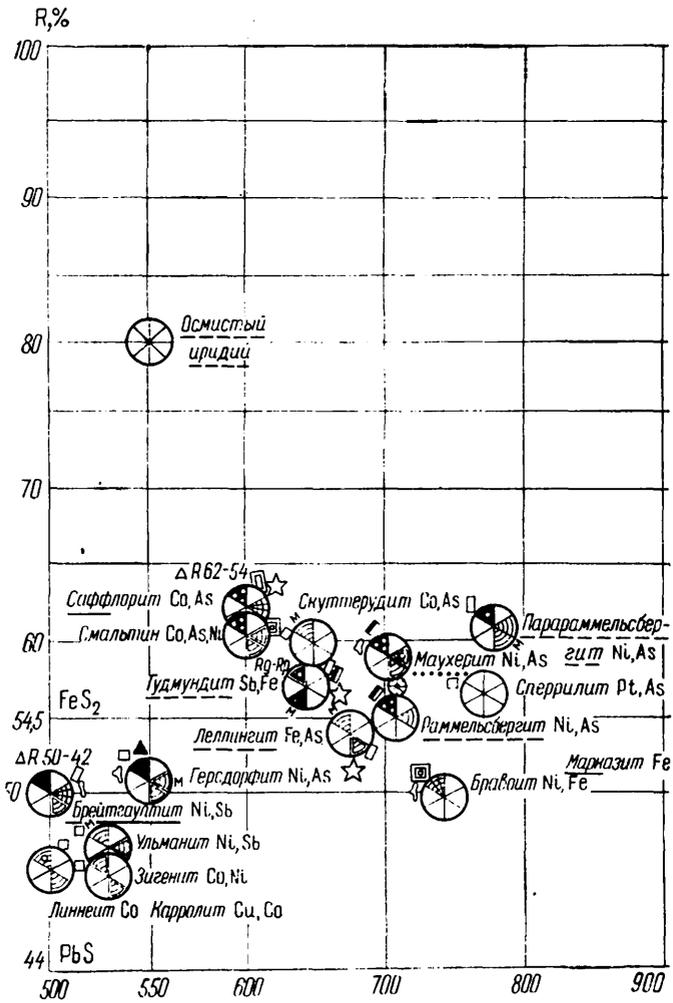
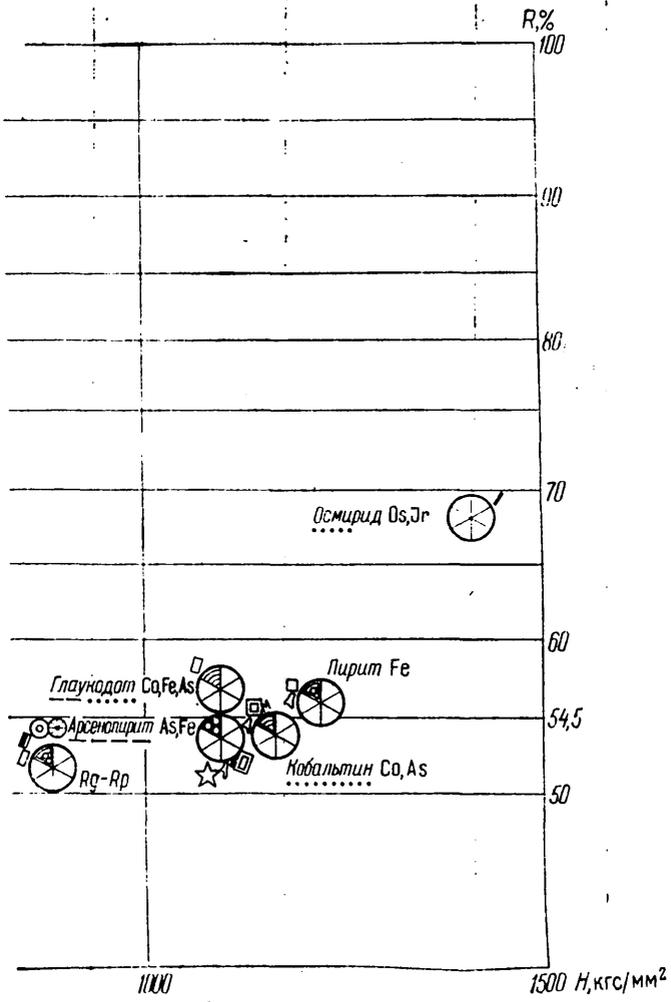


таблица V



Определительная

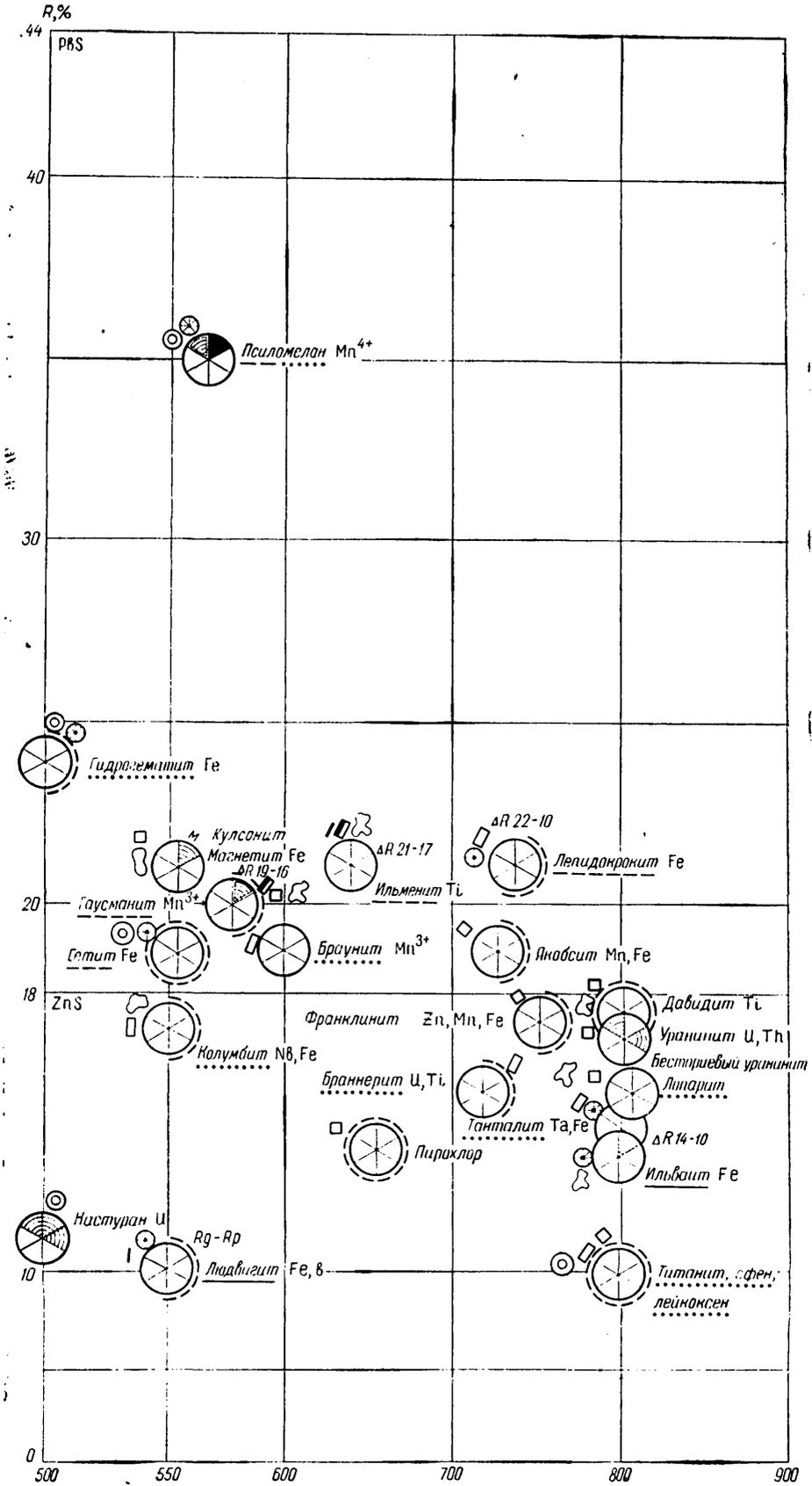
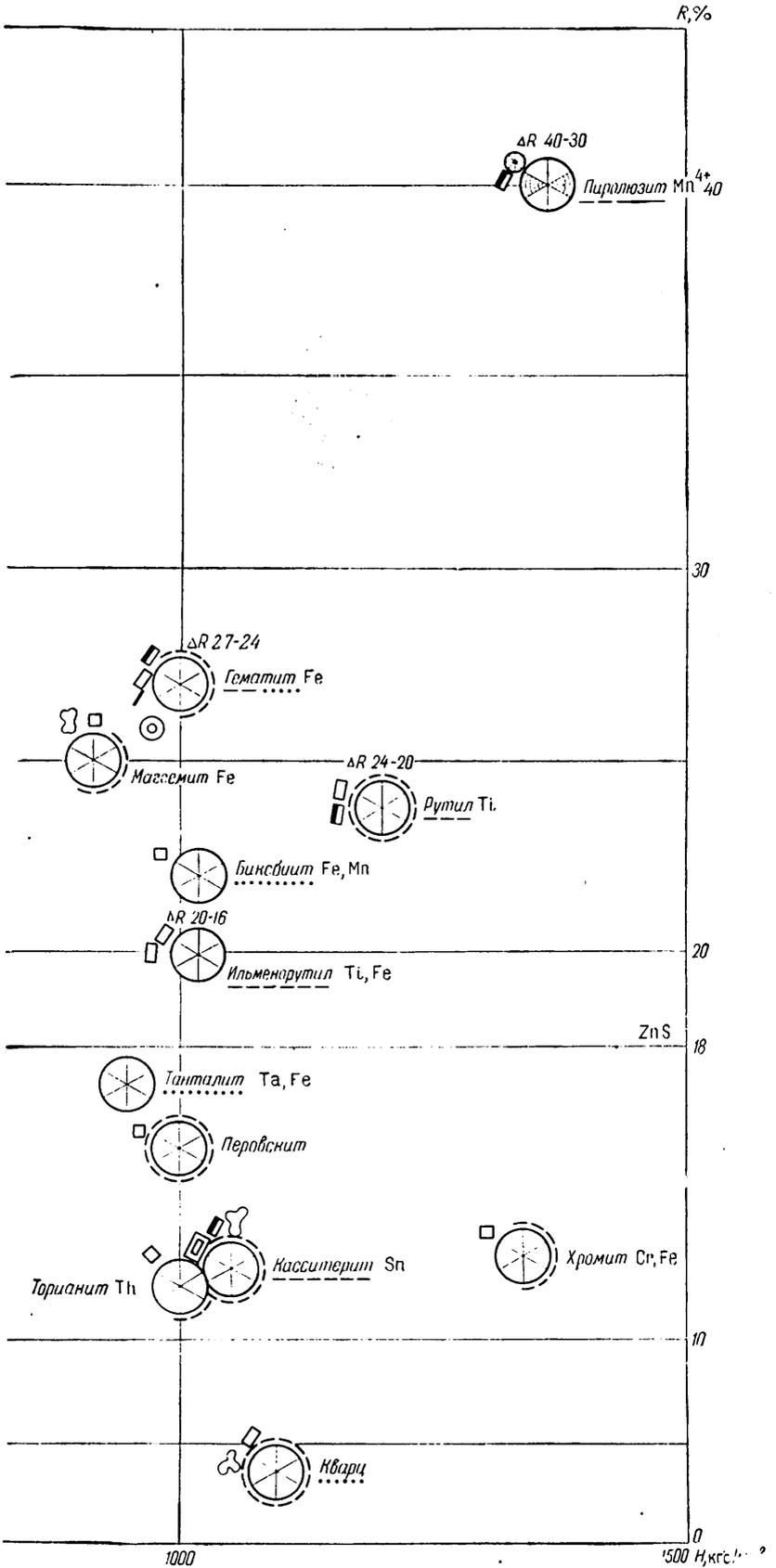


таблица VI



Определительная

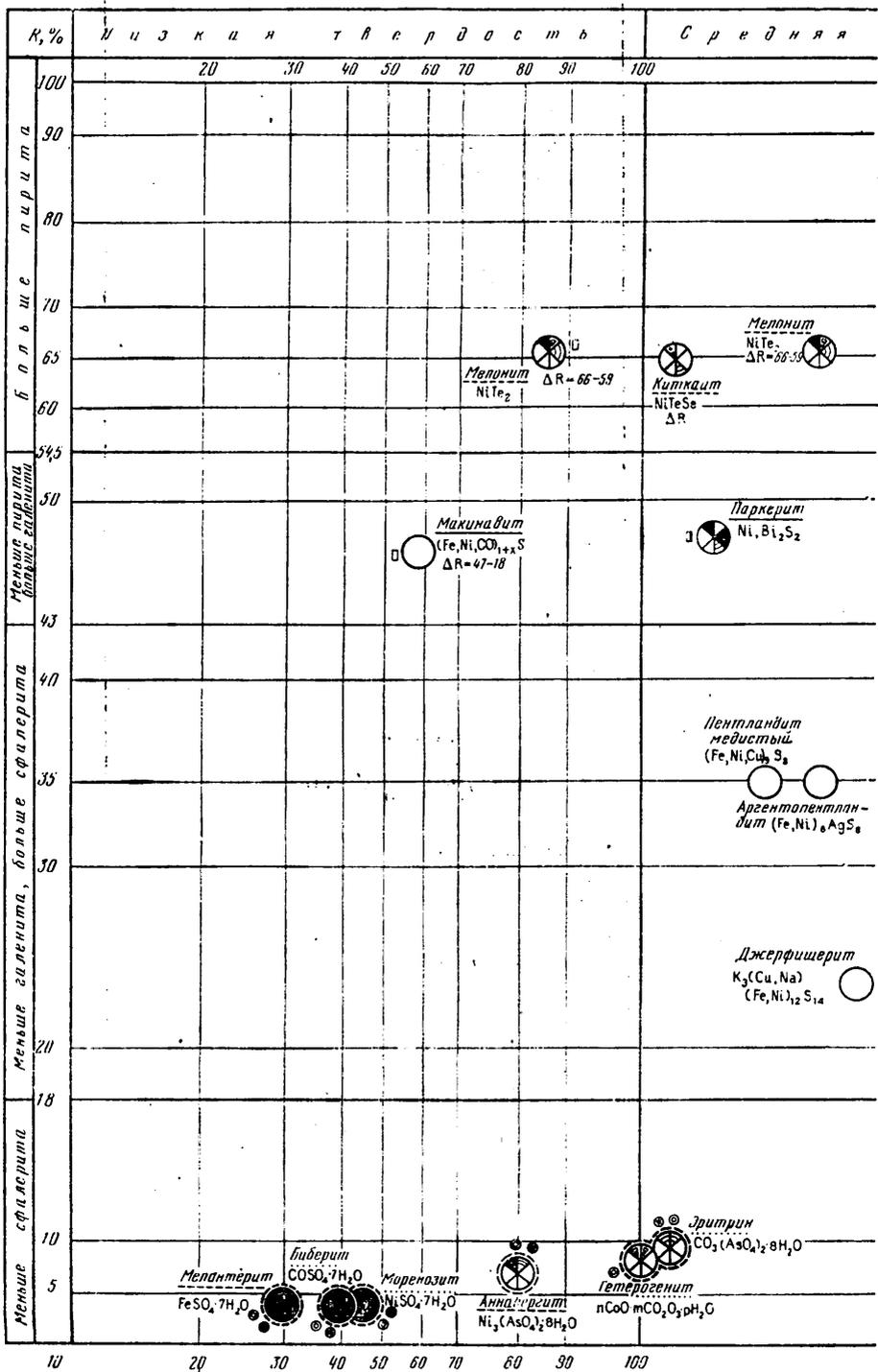
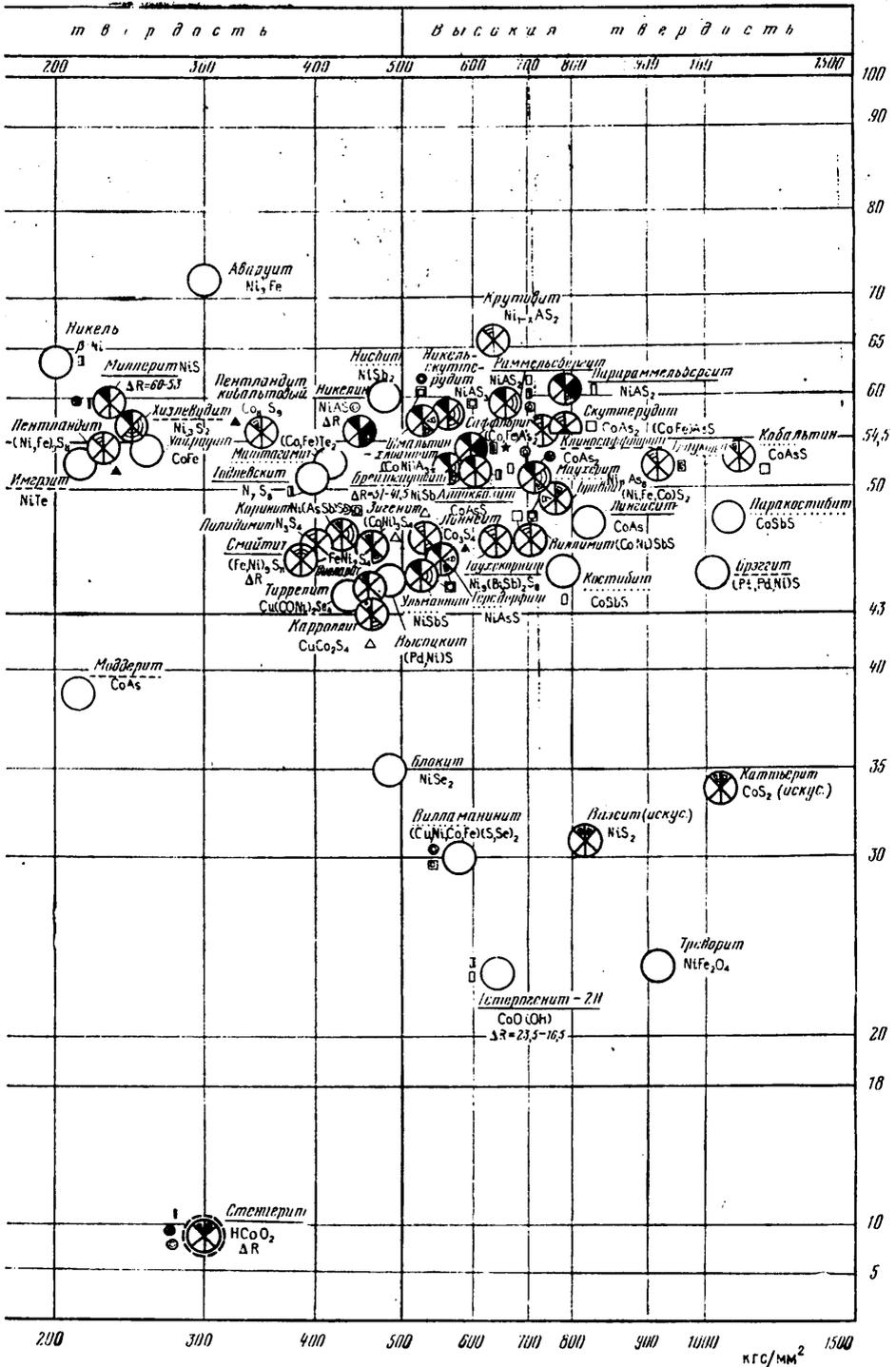


таблица VII



Определительная

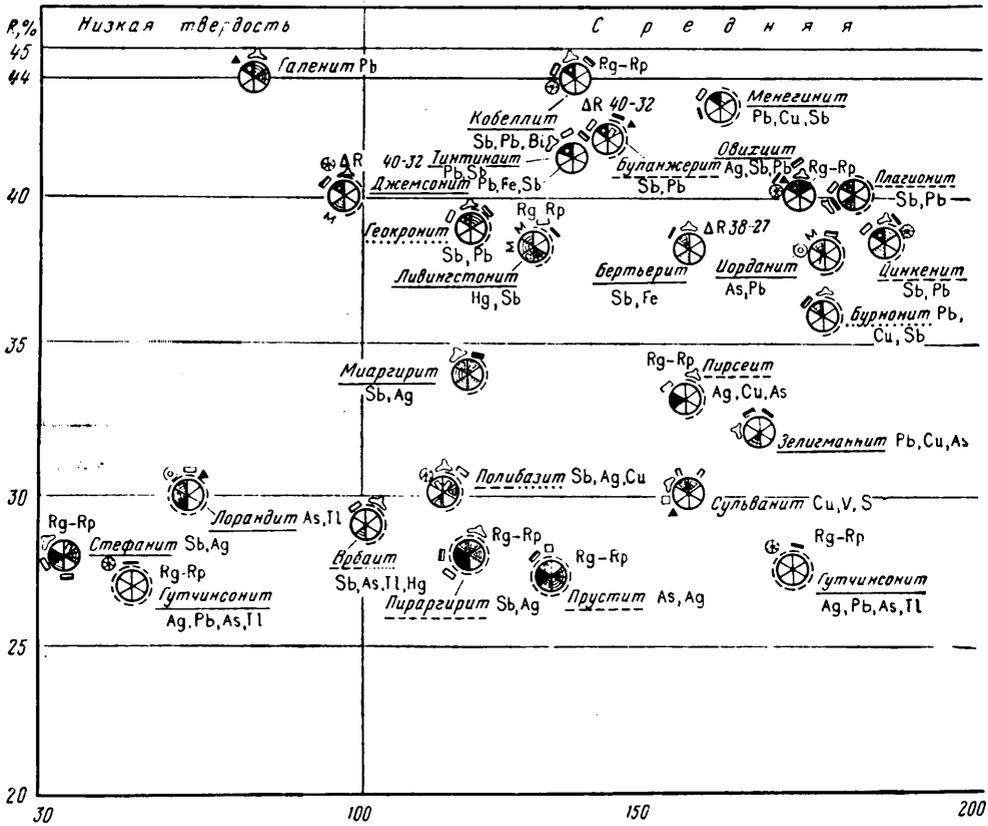
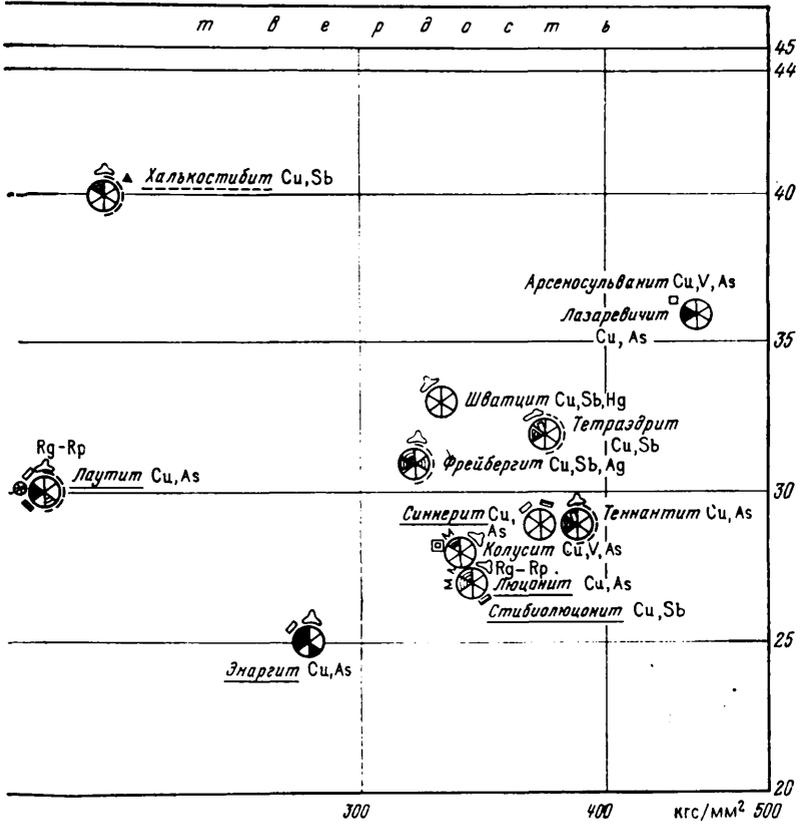
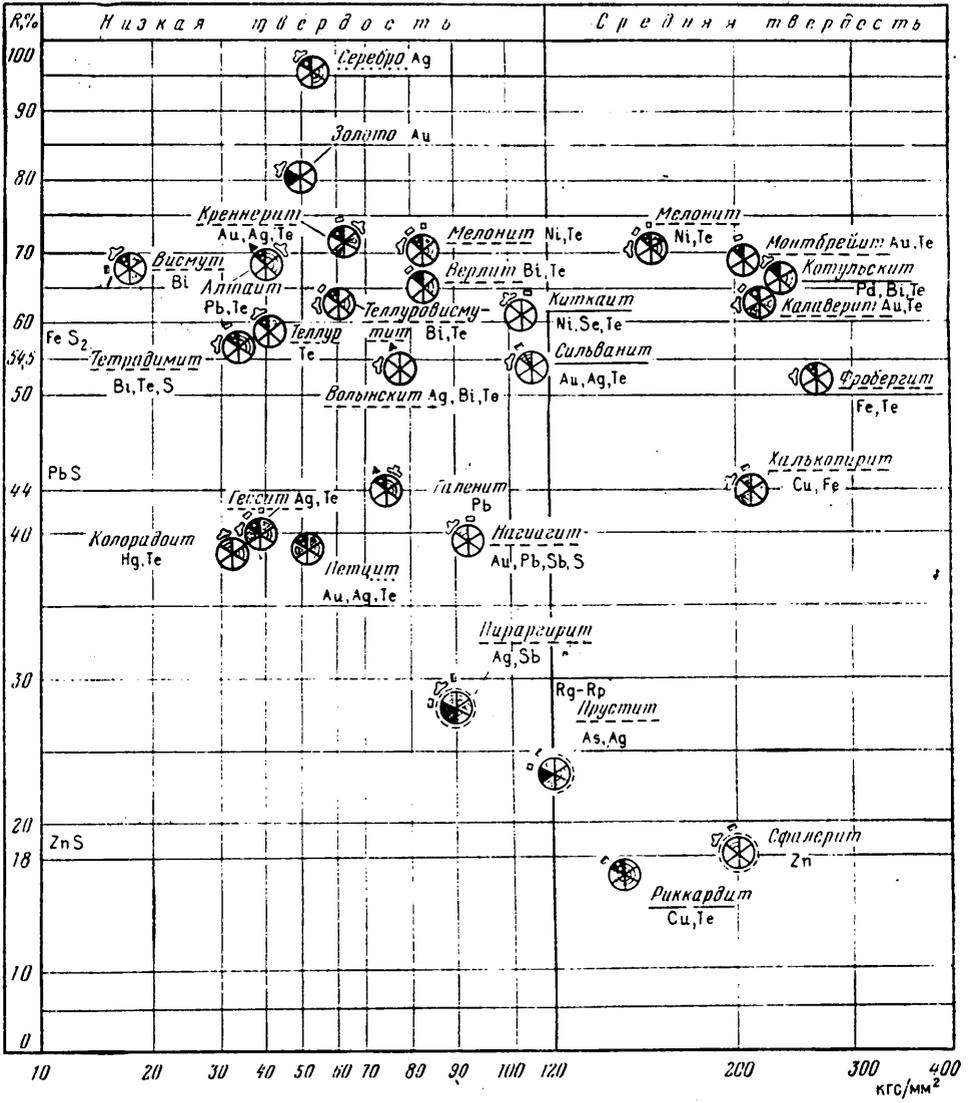


таблица VIII

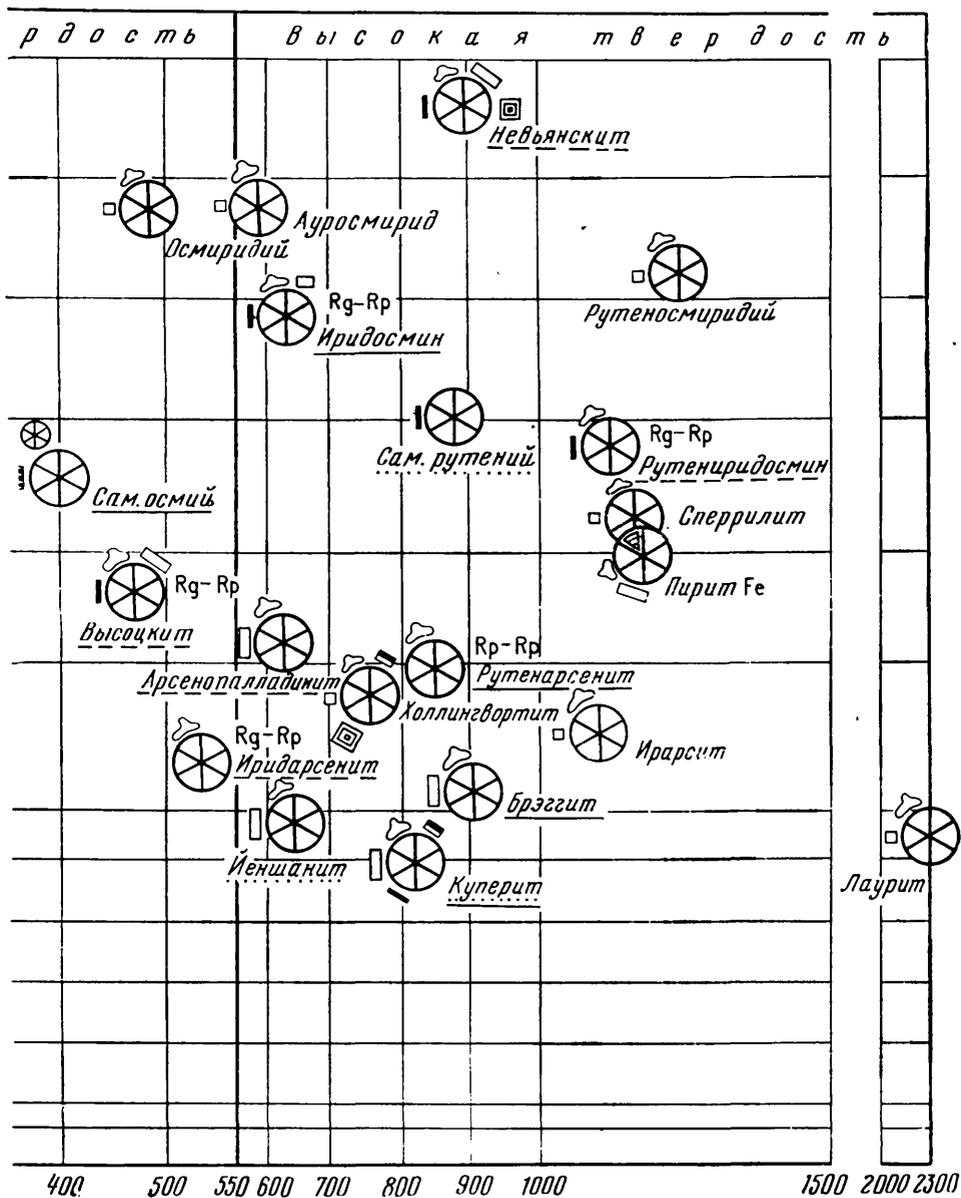


Определительная таблица IX



	R, %	Средняя тв	
Большее пирита	75		
	70		
	60		
	54,5	FeS ₂	
Меньше пирита больше галенита	50		
	44	PbS	
Меньше галенита больше сфалерита	40		
	30		
	20		
	18		Сфалерит Zn
	180	200	300

таблица XI



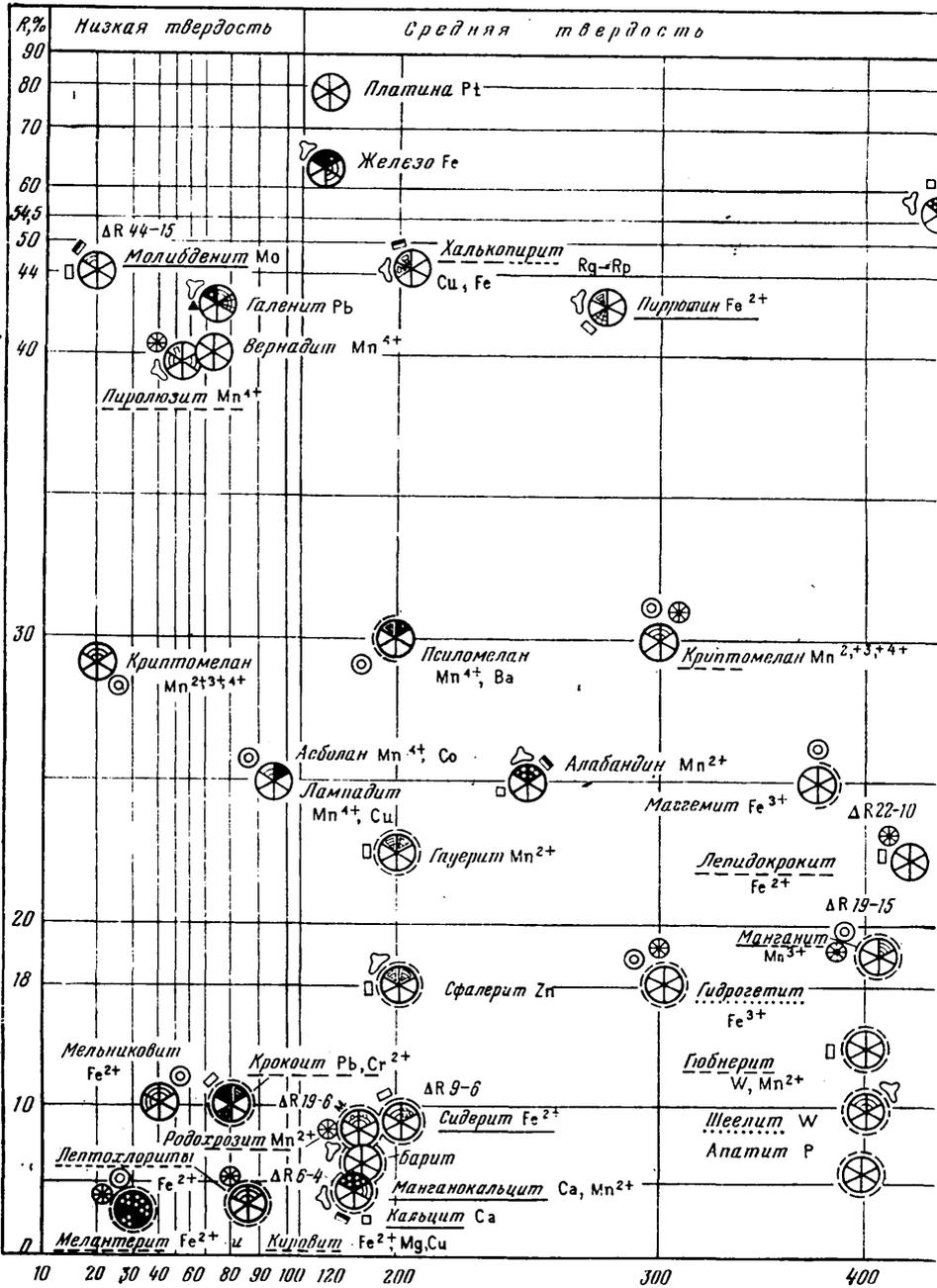
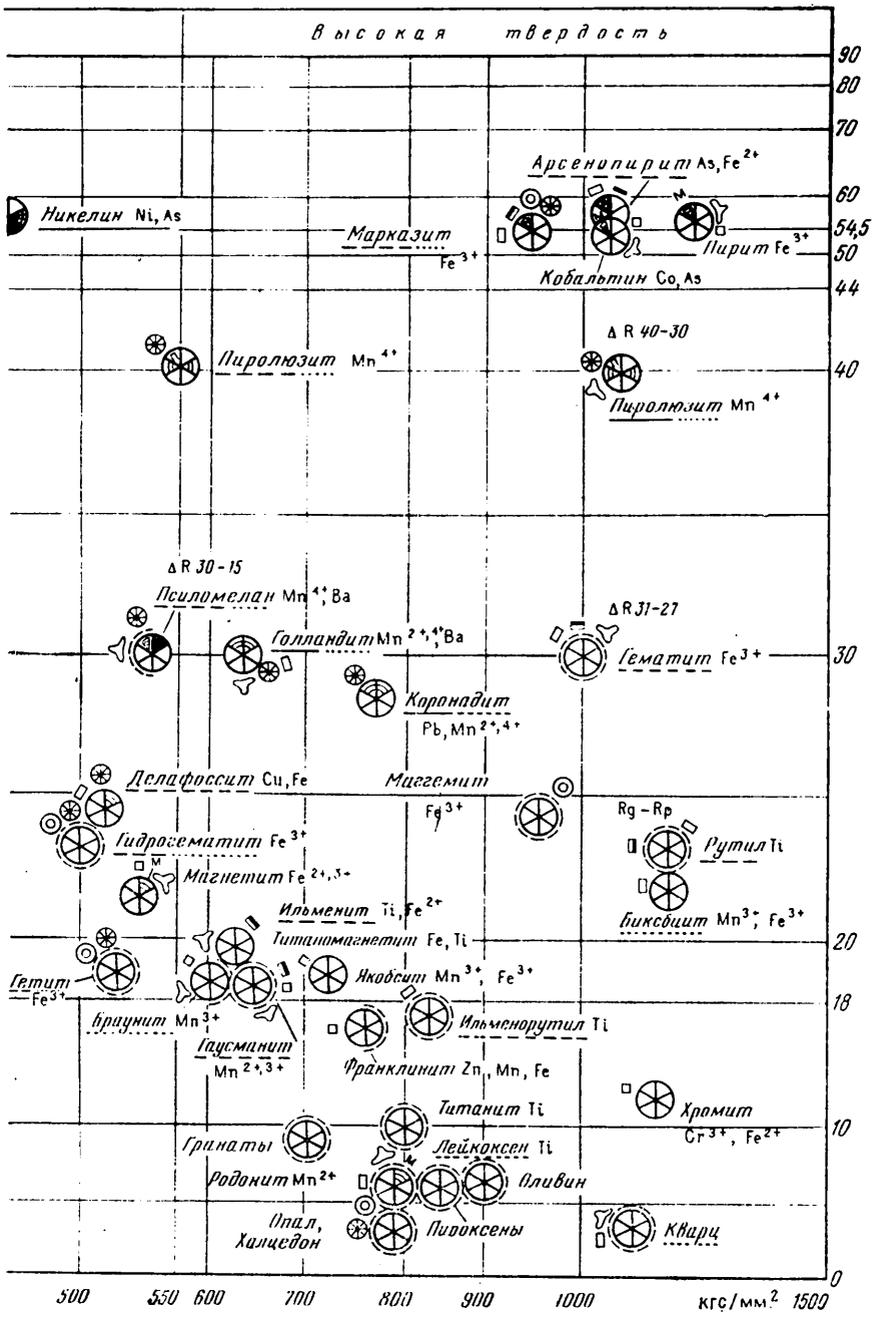


таблица XII



Определительная

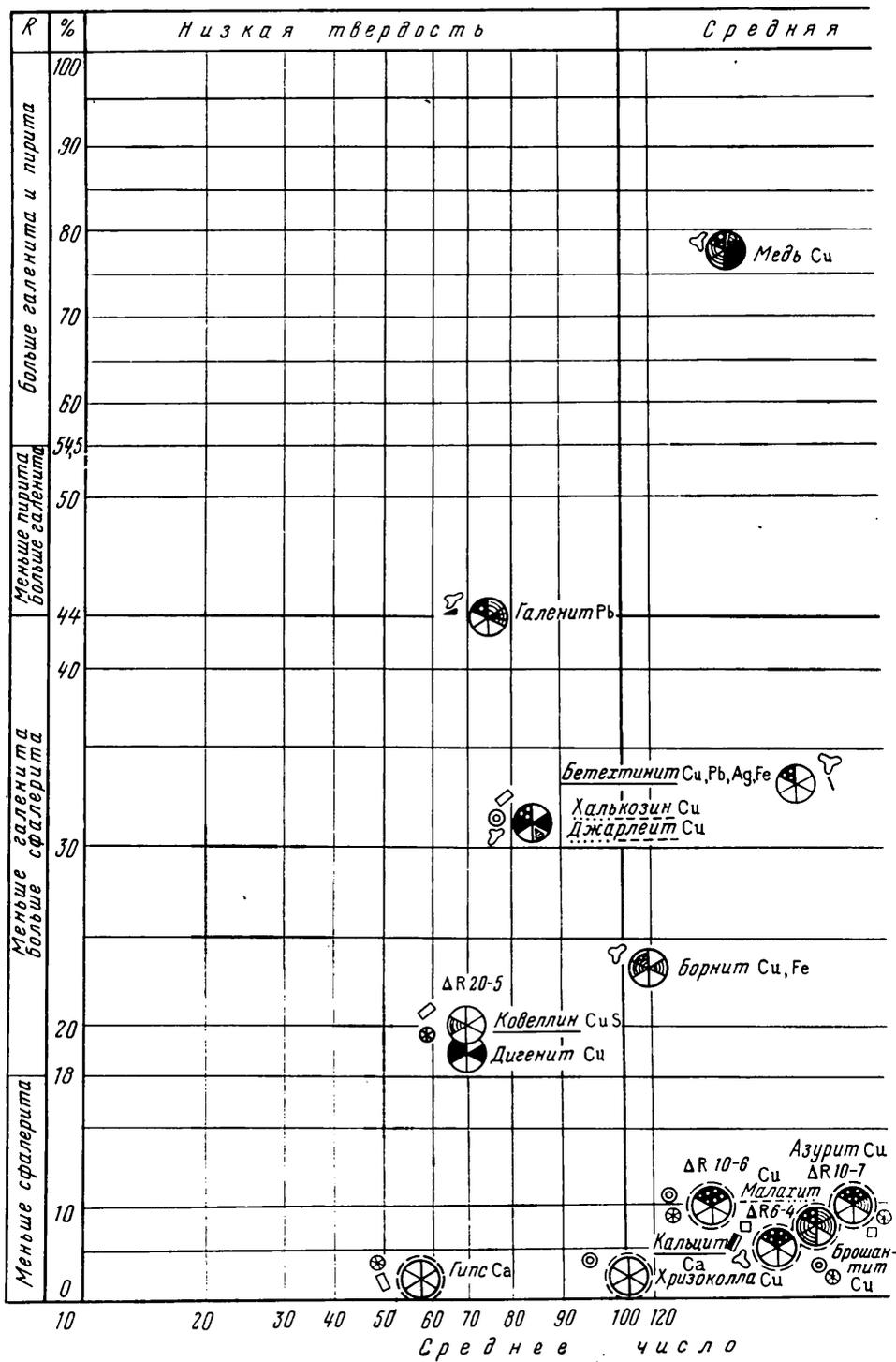
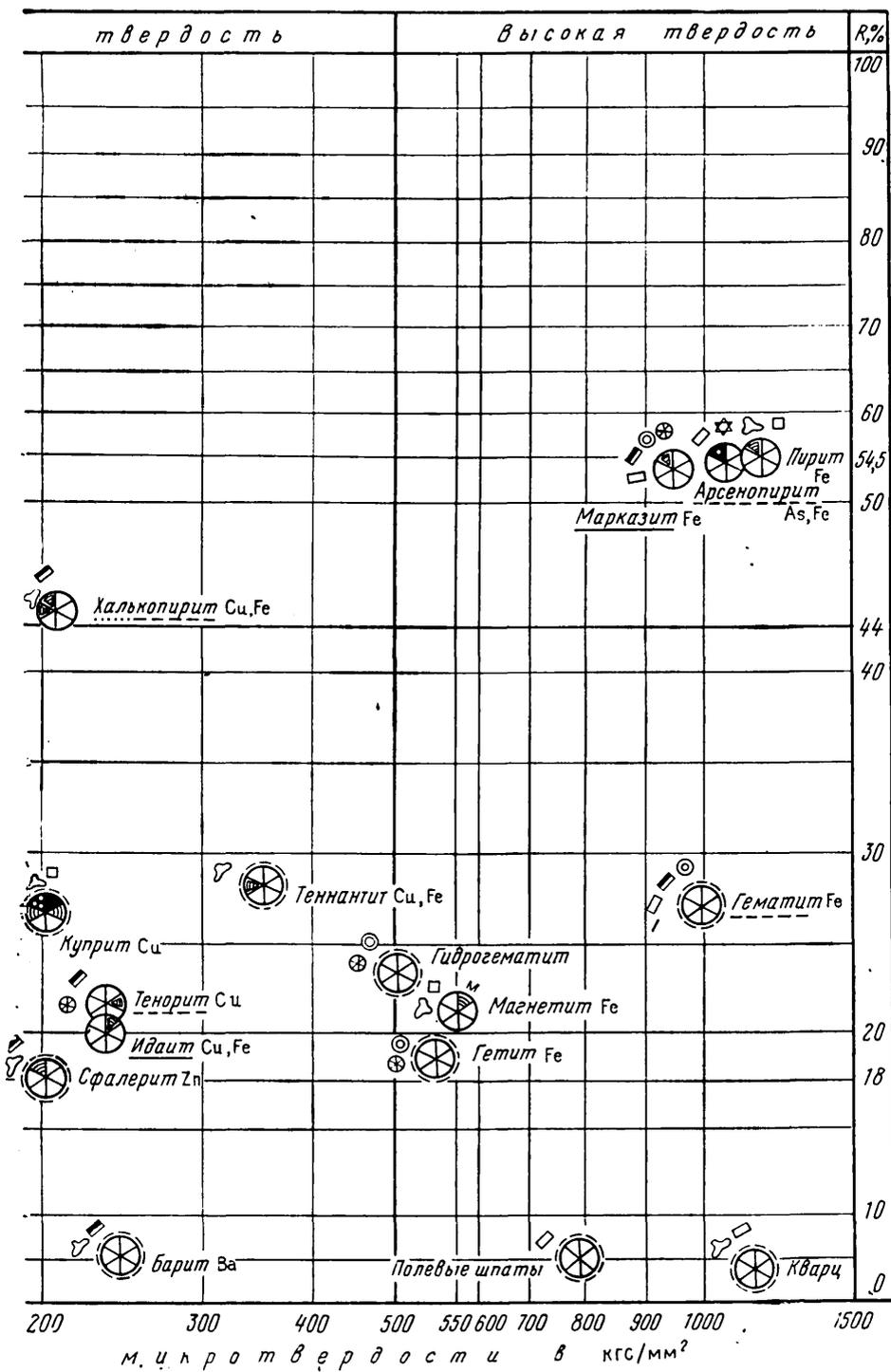


таблица XIII



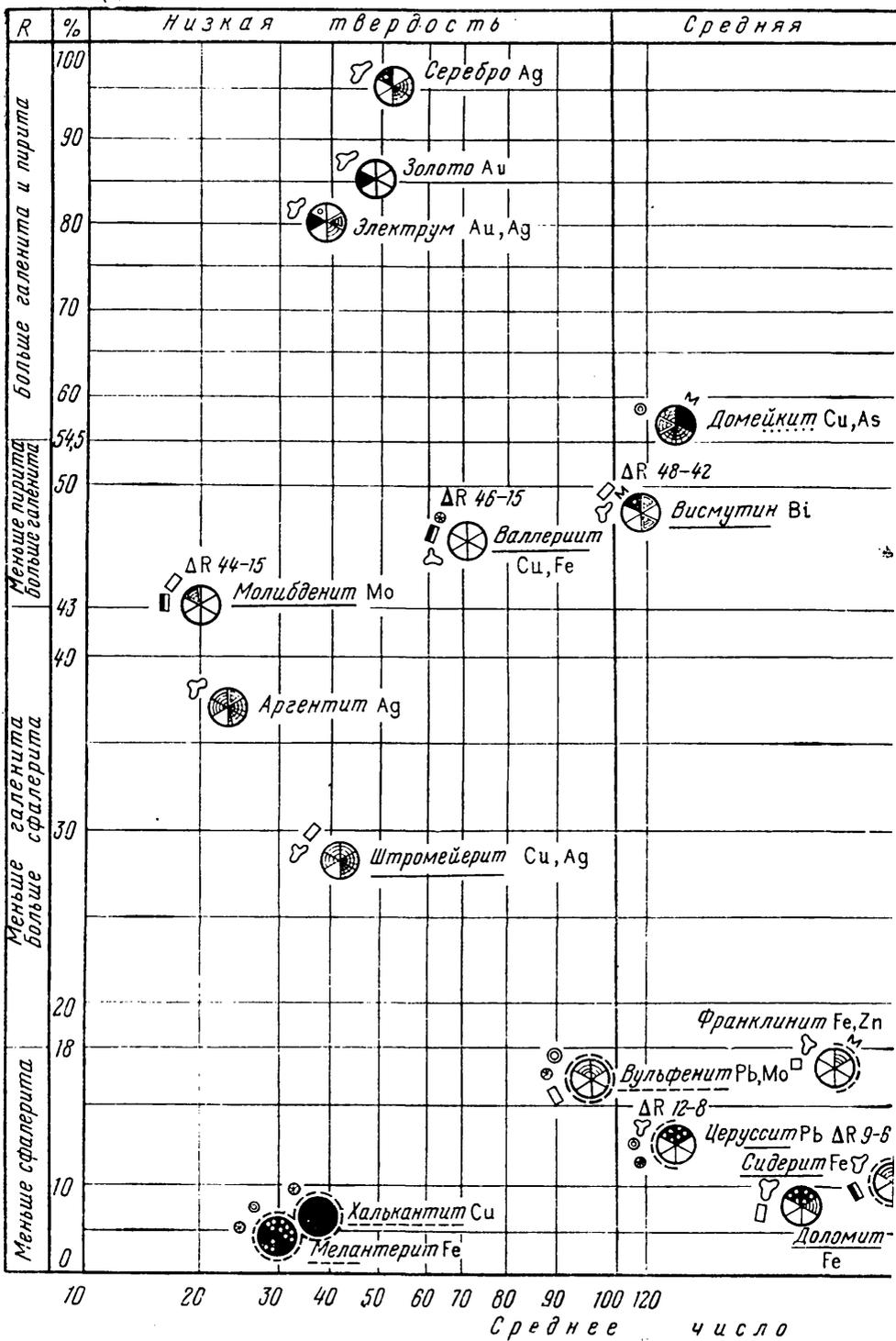
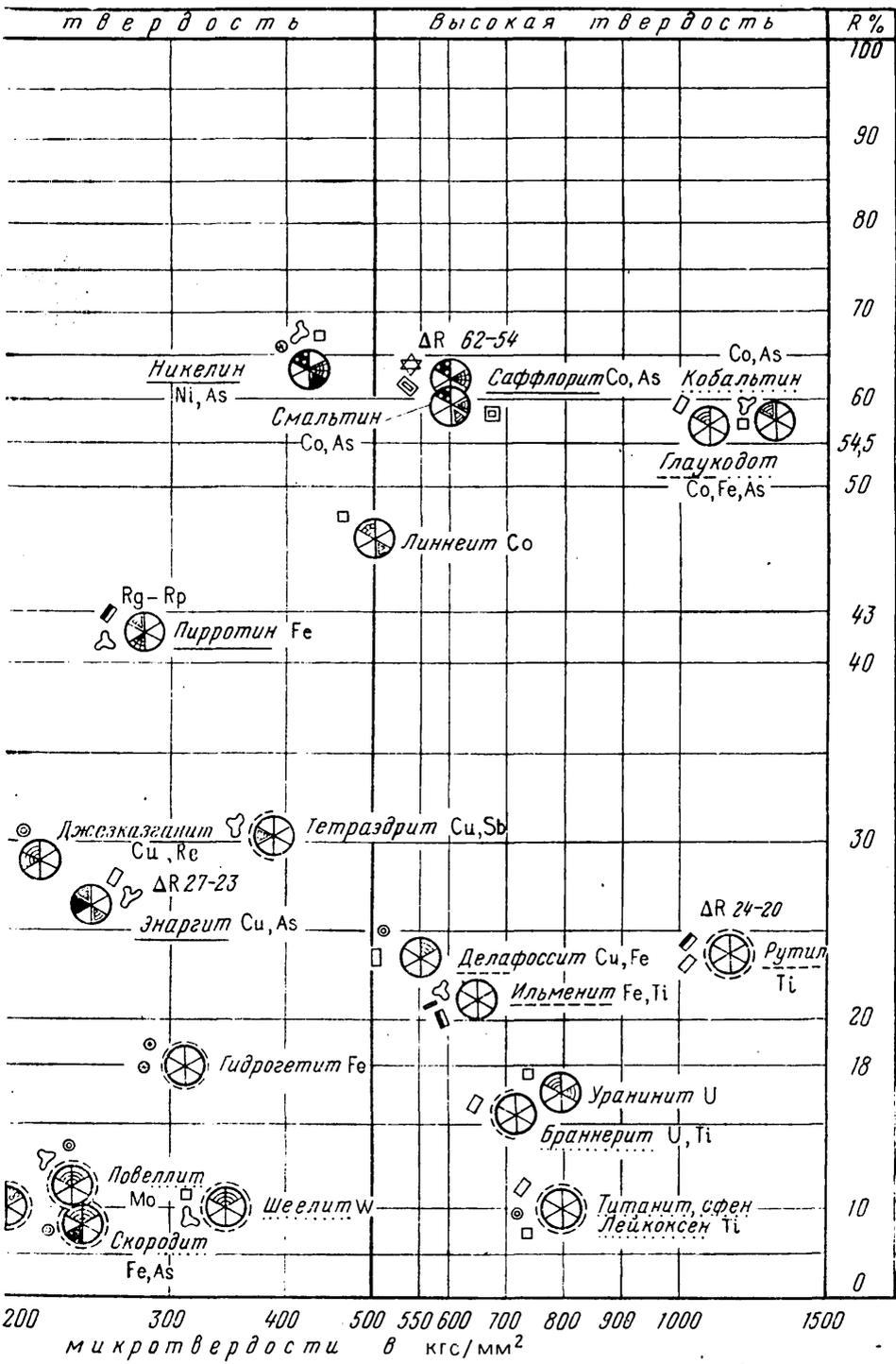


таблица XIV



**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ,
ПРИНЯТЫЕ В ОПИСАТЕЛЬНЫХ ТАБЛИЦАХ**

R — показатель отражения (в %). Данные по величине желтого света приведены по И. С. Волынскому (Вл), С. А. Вахромееву (В), Вяльсову (Вс); для белого и зеленого света — по С. Х. У. Бауи (Б), Р. В. Гецевой и К. Т. Савельевой (Г, С), И. А. Пудовкиной и М. В. Соболевой (П, С), П. Рамдору (Р), И. Д. Синдеевой (С), О. Эльснеру (Э).

ΔR — двуотражение:

- а) сильное, заметное в воздухе;
- б) слабое, заметное в иммерсии.

H — микротвердость, кгс/мм². Данные по величине микротвердости приведены по С. Х. У. Бауи и К. Тейлору (Б, Т), С. И. Лебедевой (Л), Н. Д. Синдеевой (С); Р. В. Гецевой и К. Т. Савельевой (Г, С), И. А. Пудовкиной и М. В. Соболевой (П, С), Б. Б. Янгу и А. П. Милману (Я, М).

Внутренние рефлексы:

- а) сильные внутренние рефлексы бесцветные и окрашенные, заметные в воздухе (В) в скрещенных николях или в косом свете;
- б) слабые внутренние рефлексы бесцветные и окрашенные, заметные в порошке в скрещенных николях при увеличении в $\times 210$, $\times 400$, или в иммерсии (МИ).

**О П И С А Т Е Л Ь Н Ы Е
Т А Б Л И Ц Ы**

ОПИСАТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА 1.

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1), внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); пове- дение при полирова- нии; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
Подгруппа 1. Твердость низкая				
1 Самородное серебро Ag; кубич.	1) 95,5 (Вл); 95 (Э) 3) Ярко-белый с кре- мовым оттенком (на свету быстро туск- неет)	1) Изо- тропен	1) 2,5—3; 41—57; 50 (Л); 48—63; 53 (Б, Т); с., вып. 2) Хорошее. h>гале- нита и всех серебря- ных минералов, ~халь- копириту, <блеклой руды, <сфалерита	Реакция на Ag на шли- фе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Остаток реак- тива снять фильтр бу- магой. Проявитель: K ₂ CrO ₄ . Осадок oran- жево-красного цвета
2 Самородное золото Au; кубич.	1) 84 (Вл); 74 (Б); 83 (Э) 3) Ярко-желтый	То же	1) 2,5—3; 50—59; 54 (Л); 45—100; (Л); 50—52; 51 (Б, Т); с., вып. 2) Хорошее. h~халь- копириту, <блеклой руды и сфалерита, >галенита	Реакция на Au на предметном стекле. Растворитель: царская водка. Эксп. 3 мин. Проявитель: SnCl ₂ . Осадок металлическо- го золота
3 Электрум Au, Ag; Ag 30—45; кубич.	1) 84 (Вл) 3) Блестящий светло- желтый	>	1) 2—3; 68—82; 72 (Л); 80—100 (Л); 34—44; 40 (Б, Т); с., вогн. 2) Хорошее. h~халь- копириту, <блеклой руды и сфалерита, >галенита	См. золото и серебро
4 Алтант PbTe; Pb 61, 91; Te 38, 09; кубич.	1) 65 (Э); 73 (Вл); 61 (P) 3) Белый с зеленова- тым оттенком	1) Изо- тропен	1) 2—3; 46—60; 53 (Л) 48—57; 51 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h немного >теллуросмундита, печтата, тиманнита; <галенита	Реакция на Pd. Ра- створитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 3 мин. Фильтр. бумага + и. р. Проявитель: 1) амми- ак, 2) KI (5%). Пят- но желтого цвета
Подгруппа 2. Твердость низкая				
5 Самородная сурьма Sb; Sb 86—98,00; тригон.; элементы- примеси Ag, Fe, As и др.	1) 74,5 (Вл); 72,3 (Б) 2) Слабое 3) Ярко-белый	1) Отчет- ливо ани- зотропен	1) 3—3,5; 88—135; 97 (Л) 83—99; 89 (Б, Т); с. 2) Очень хорошее. h>висмута, антимони- та, <мышьяка, сти- барсена и дискразита	Реакция на Sb на ан- шлифе. Минерал + HNO ₃ конц. (ра- створитель). Эксп. 2 мин. Остаток кисло- ты снять фильтр. бу- магой. Растворитель HCl (1:1) положить на травленое место. Проявитель KI+CsCl (порошки). Осадок красного цвета (смот- реть в косом свете)
6 Самородный висмут Bi ~100; тригон.	1) 68 (Вл. P); 68 (Э) 2) Слабое 3) Белый с розовато- кремовым оттенком или светлый розовато- желтоватый. На воз- духе темнеет	То же	1) 2—2,5; 16—26; 21—23 (Л) 16—19; 18 (Б, Т); с., вып. 2) Хорошее, плохое. h<висмута и всех спутников	Отпечаток на Bi жел- того цвета. Раствори- тель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Прояви- тель: тиомочевина
7 Теллуросмундит Bi ₂ Te ₃ ; Bi 52,09; Te 47,91; примеси: Sb (до 3%), иногда S, Se; тригон.	1) 62,5—60,5 (Б); 56,9 (С); 69 (Вл) 2) Слабое 3) Белый с розова- тым оттенком	1) Слабо, отчетливо анизотропен (цветовой эффект голубова- тый, жел- тый)	1) 1,5—2; 32—93; 60 (Л) 20—21; 21 (Б, Т); сл. трещ., вып. 2) Хорошее. h>тетра- динита, ~висмутина и галенита	См. самородный тел- лур и висмут

МИНЕРАЛЫ НИЗКОЙ ТВЕРДОСТИ

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаэграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
<i>R</i> > пирита, изотропные			
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты, дендриты, скелетные зерна. Пластинчатые двойники и зональное строение выявляются раствором CrO_3 в HNO_3 конц. в течение 1—3 с	Галенит, пираргирит, прустит, дискразит, блеклая руда, тетраэдрит замещает аргентит	2,37 (9) 1,232 (6) 2,05 (5)	Кремовый оттенок; изотропен; травление; темнеет на воздухе и на свету
Мелкие аллоотриоморфнозернистые агрегаты. Пластинки, прожилки, призмки, дендриты, вкрапленность. Стр. травление: раствор CrO_3 в царской водке	Пирит, кварц, арсенопирит, галенит, халькопирит, блеклая руда, антимонит, лимонит. Часто замещает теллуриды золота	2,35 (10) 2,03 (9) 1,226 (9)	Цвет; высокое отражение; изотропен; почернение от KCN. В мелких включениях, в отличие от пирита и халькопирита, не травится AgNO_3
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты, прожилки, дендриты	Золото, кварц, серебро, пираргирит, прустит, висмут, аргентит, штомеферит, галенит и др.	—	Сходен с золотом и серебром; отличается химическим анализом
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты, скелетные зерна. Совершенная спайность по (100). Треугольники выкрашивания. Стр. травление: HNO_3 конц. в течение 1 мин	Креннерит, галенит, золото, теллур, петцит, гессит. Замещается данхехитом, церусситом	3,22 (10) 2,28 (8) 1,439 (5)	От галенита отличается высоким отражением и реакцией на Te; от теллура — изотропностью
<i>R</i> > пирита, анизотропные			
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты, реже натечные корки, почки, сталактиты с радиально-лучистым строением. Спайность по (001) совершенная. Полисинтетические двойники. Треугольники выкрашивания	Антимонит, бертьерит, смальтин, висмут, серебро, дискразит, кермезит и др. Замещает антимонит	2,49 (10) 2,151 (10) 1,366 (10)	От дискразита отличается травлением и отрицательной реакцией на Ag; от As, Bi, Ag реакцией на Sb и травлением KOH
Дендриты, скелетные зерна. Аллоотриоморфнозернистые агрегаты. Полисинтетические двойники	Висмутин, сафлорит, пирротин, галенит, золото, смальтин, тетрадимит. Продукт разложения сульфоселей висмута в зоне окисления	3,31 (10) 1,435 (9) 2,245 (9)	Низкая твердость; отчетливо анизотропны; спайность; двойниковое строение; реакция на Bi
Таблитчатая или призматическая форма зерен. Листоватые чешуйчатые агрегаты. Спайность по (0001). Двойники отсутствуют	Тетрадимит, алтант, висмутин, золото, галенит, мелонит, гессит, теннантит, халькопирит. Замещается бисмутином	3,21 (10) 2,37 (8) 2,19 (5)	По сравнению с тетрадимитом — более слабо анизотропный, светлее. Несходимы химический анализ и дебаэграмма

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
8 Тетрадимит Bi ₂ Te ₂ S; Bi 59,27, S 4,55, Te 36,18; примеси: Cu, Au, иногда Se (до 2%); тригон.	1) 56,9 (С); 55 (Вл) 2) Слабое 3) Белый с розовато-желтоватым оттенком	1) Отчетливо анизотропен	1) 1,5—2; 25—76; 36 (Л) 2) Хорошее. h < теллуrowисмутита, верлита; < висмутина, галенита, халькопирита	Отпечаток на Вl желтого цвета. Растворитель: HCl конц. Эксп. 2—3 мин. Проявитель: тиомочевина. Реакцию на теллур см. самородный теллур
9 Самородный теллур Te; тригон.	1) 63,0 (Вл, P); 56,5 (С) 2) Слабое (на границах зерен) 3) Белый с кремовым оттенком	1) Отчетливо анизотропен	1) 2—2,5; 29—87; 38 (Л) 2) Хорошее. h низкий, < монтбрейита, калаверита, креннерита, > силъванита, теллуrowисмутита, алтанта	Отпечаток на Te черного цвета. Растворитель: HCl конц. Эксп. 2—3 мин. Проявитель (свежеприготовленный): CsCl (10%) + K1 (5%) + гипосульфит
10 Креннерит (Au, Ag)Te ₂ ; Au 32,99, Te 59,69, Ag 7,22; ромбич.	1) 75,0 (Вл); 60,9 (С); 55 (Э) 2) отчетливое 3) Белый с кремовым оттенком	То же	1) 2—2,5; 36—88; 62 (Л); 39—79 (С) 2) Хорошее. h немного > пеццита и пираргирита, > силъванита и калаверита	См. самородный теллур и самородное золото
11 Мелонит NiTe ₂ ; Ni 18,70, Te 81,30; тригон.	1) 71 (Вл); 60 (С) 2) Слабое 3) Светло-розовый (розовато-белый)	1) Отчетливо анизотропен (цветовой эффект), прямое угасание	1) 1—1,5; 141—220; 161 (Л); 63—166; 85 (Л) 2) Посредственное, плохое. h > халькопирита, > золота; и креннерита, иногда < золота и < монтбрейита и ~ теллуrowисмутиту, < фробергита	Реакция на Ni. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: аммиак + рубеновая кислота. Пятно фиолетового цвета
12 Самородный мышьяк As ~100; тригон.	1) 58 (Вл); 50,5 (Б) 62 (Э, P) 2) Слабое 3) Белый (серо-бурый в старых шлифах)	1) Отчетливо анизотропен	1) 3,5; 93—137; 123 (Л); 57—69; 63 (Б, Т); с. 2) Отличное. h > висмута, > серебра, сурьмы, немного > дискранта	Прямой отпечаток на As желтого цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. с небольшим количеством (NH ₄) ₂ MoO ₄ . Эксп. 2 мин

Подгруппа 3. Твердость низкая, R >

13 Клаусталит PbSe; Pb 72,34, Se 26,66; кубич.	1) 50,4 (С, P); 49 (Э) 3) Белый	1) Изо-тропен	1) 2—3; 49—63; 55 (Л) 2) Хорошее. h < галенита, немного > титманнита	Отпечаток на Se красного цвета. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: тиомочевина
--	------------------------------------	---------------	---	--

Подгруппа 4. Твердость низкая, R >

14 Силъванит AgAuTe ₂ ; Au 24,19, Ag 13,22, Te 62,59; монокл.	1) 54 (Б); 59—49 (Вл); 56 (Э) 2) Сильное (кремово-белый до кремово-коричневого) 3) Белый со слабым желтоватым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект)	1) 2; 91—149; 137 (Л); 60—98; 110 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h > гессита, аргентита, > алтанта, теллуrowидов висмута, немного > нагигита, < пираргирита, < сфалерита	Отпечаток на Te черного цвета. Растворитель: HCl конц. Эксп. 2—3 мин. Проявитель (свежеприготовленный): раствор CsCl (10%) + K1 (5%) + гипосульфит
--	--	---	---	--

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Аллотриоморфнозернистые агрегаты и пластинчатые кристаллы	Золото, пирит, халькопирит, галенит, гессит, самородный висмут, висмутин, бончевит. Замещается бисмутидом	3,20 (10) 5,06 (6) 2,16 (8)	Более слабая анизотропия, чем у креннерита и теллура. Реакция на VI. От теллуровисмутита и висмута отличается химическим анализом и дебаграммой
Мелкозернистые или игольчатые агрегаты. Призматические кристаллы	Теллуриды золота и серебра, пирит, халькопирит, золото, галенит. Замещает теллуриды	3,220 (10) 2,330 (8) 2,220 (7)	Похож на тетрадимит и мышьяк, отличается по микротвердости и по реакциям
Агрегаты аллотриоморфных и короткопризматических зерен. Спайность по (011) совершенная. Стр. травление: HNO_3 (1:1) в течение 4 с	Золото, сильванит, пирротин, пираргирит, фрейбергит, пирит, галенит, сфалерит, кварц. Замещается золотом	3,03 (10) 2,11 (8) 2,94 (7)	От калаверита отличается наличием спайности и микротвердостью, от сильванита — отсутствием двойников
Мелкопластинчатые и овальные зерна	Петцит, гессит, золото, пирит, галенит, алтаит, халькопирит, теллуровисмутит, калаверит и др. Замещается риккардитом, теллуром	2,81 (10) 1,544 (6) 2,05 (5)	Цвет: высокое отражение; слабое двуотражение; реакция на Ni и Te; парагенезис
Агрегаты аллотриоморфнозернистые и концентрически-скорлуповатые. Пластинчатые двойники в зернах и зональное строение. Стр. травление H_2O_2	Дискразит, сурьма, домейкит, висмут, прустит, лёлингит, галенит, геохронит, блеклые руды, пираргирит. Замещает геохронит	2,74 (10) 1,867 (10) 1,53 (10)	В полированных шлифах быстро чернеет на воздухе. Травится H_2O_2 . Реакция на As

галенита, $R <$ пирита, изотропные

Тонкозернистый агрегат аллотриоморфных зерен. Совершенная спайность по (001). Треугольники выкрашивания	Галенит, алтаит. В рудах «пятиэлементной» формации полиметаллических и колчеданных	3,05 (10) 2,16 (9) 1,840 (5)	Очень похож на галенит и алтаит, отличается от них отражением, реакцией на Se
---	--	------------------------------------	---

галенита, $R <$ пирита, анизотропные

Скелетные кристаллы. Дендритообразные агрегаты. Полисинтетические двойники в зернах	Золото, калаверит, теллуровисмутит, висмутин и др. В золото-серебряных рудах. Замещается золотом	3,04 (10) 2,14 (5) 2,25 (3)	Сильное двуотражение; сильная анизотропия; микротвердость и полисинтетическое двойникование
---	--	-----------------------------------	---

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поедение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
15 Мелонит NiTe ₂ ; Ni 18,70, Te 81,30; тригон.	1) 71 (Вл); 60 (С) 2) Слабое 3) Светло-розовый (розовато-белый)*	1) Отчетливо анизотропен (цветовой эффект), прямое угасание	1) 1—1,5; 63—220; 161 (Л) 2) Посредственное, плохое. h > халькопирита, > золота и креннерита, иногда < < золота и < монтебрейта, ~ теллуровисмутиту, < фробергита	Реакция на Ni. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: аммиак + рубановая кислота. Пятно фиолетового цвета
16 Висмутин Bi ₂ S ₃ ; Bi 81,30, S 18,70; примеси: Sb (до 8,12%), Se (до 9%) Pb, Fe, Cu; ромбич.	1) 48—42 (Вл); 48 (Э) 2) Слабое, заметное на границах зерен 3) Белый с желтоватым оттенком	1) Сильно анизотропен, прямое угасание	1) 2 73—188; 153 (Л); 119; 107 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h < халькопирита, > висмута, > галениту	Отпечаток на Bi желтого цвета. Растворитель: HCl (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: тиомочевина
17 Павонит Ag ₂ S ₃ Bi ₂ S ₃ ; Ag 21,52, Bi 62,50, S 15,38; монокл.	1) 43—45 2) Слабое, заметное на границах зерен 3) Белый	1) Отчетливо анизотропен	1) 2—3 2) Отличное. h < сфалерита, немного < халькопирита	Отпечаток на Bi желтого цвета. Растворитель: HCl (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: тиомочевина
18 Валлерит Cu ₂ Fe ₂ S ₇ ; Cu 29,87, Fe 34,98, S 35,15; примесь Ni (до 3,8%); ромбич.	1) 21—12 2) Сильное (буровато-желтый до серого) 3) Буровато-желтый до серого (как сфалерит)	1) Сильно анизотропен	1) 1—2,5; 50—93; 82 (Л) 2) Хорошее. h < халькопирита, ~ кубаниту, ~ пирротину	Отпечаток на Cu серозеленого цвета, на железе синего цвета. Растворитель: HCl конц. + HNO ₃ конц. + H ₂ O (1:1:1). Эксп. 3—5 мин. Проявитель на медь аммиак + рубановая кислота. Проявитель на железо: K ₄ Fe(CN) ₆

Подгруппа 5. Твердость низкая

19 Галенит PbS; Pb 86,60, S 13,40; примеси: Ag до 0,1, реже 1%, Te, Se и др. кубич.	1) 44 (Э); 41,7 (Б); 44,0 (Вл) 3) Белый, эталон	1) Изотропен	1) 2,5; 64—110; 77 (Л); 56—116 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h аргентита, алтанта, ковеллина, немного ~ буланжерита, джемсонита, < халькопирита, бледной руды, ~ висмутину, халькозину	Реакция на Pb. Растворитель: HNO ₃ конц. на шпифе. Эксп. 1 мин. Избыток кислоты снять фильтр. бумагой. Проявитель: KI (5%) на травленое место шпифа. Пленка желтого цвета
20 Петцит Ag ₂ AuTe ₂ ; Ag 41,71, Au 25,42, Te 32,87; примеси: Hg (до 7%), Cu, Mo; кубич. (ромбич. модификация)	1) 40 (С); 38 (Вл); 45 (Э) 2) Нет (очень слабое) 3) Серо-белый с сириновым или коричневым оттенком	1) Изотропен, слабо анизотропен	1) 2,5—3; 46—54; 49 (Л) 2) Хорошее. h < сильванита, колорадоита, гессита, алтанта, калаверита	Отпечаток на Te черного цвета. Растворитель: HCl конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: CsCl (10%) + KI (5%-ный) (свежеприготовленный раствор). Реакция на Ag, см. аргентит
21 Акантит — аргентит Ag ₂ S; α-аргентит (<179°C); Ag 87,06, S 12,94; примеси: Cu (до 1,5%), Se (до 14%); монокл., скрытокрист.	1) 35 (Вл) 2) Очень слабое на границах зерен 3) Серо-белый со слабым голубовато-зеленым оттенком	1) Слабо анизотропен, изотропен	2) Плохое. h акантита аналогично аргентиту	Прямой отпечаток на Ag фиолетово-красного цвета. Растворитель: 1 ч. 5% KCN + 1 ч. насыщенного раствора Р-диметиламино-бензилиденрамина в ацетоне. Эксп. 3—5 мин. Промыть в воде, подкисленной HNO ₃

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Мелкопластинчатые и овальные зерна	Петцит, гессит, золото, пирит, галенит, алтант, халькопирит, теллуросмугит, калаверит и др. Замещается риккардитом, теллуром	2,81 (10) 1,544 (6) 2,05 (5)	Цвет; высокое отражение; слабое двуотражение; реакция на Ni и Te; парагенезис
Призматические и игольчатые кристаллы. Лучистые и аллотриоморфнозернистые агрегаты. Спайность по (010) совершенная	Галенит, висмут, сфалерит, арсениопирит, молибденит, халькопирит и др. Замещается висмутом, бисмутитом, халькозинном	3,50 (10) 3,08 (9) 2,79 (8)	Желтоватый оттенок цвета; спайность по (010); реакция на Bi. Отрицательная реакция травления с KOH отличает от антимонита
Аллотриоморфнозернистые агрегаты. Редко кристаллы	Халькопирит, висмутин	3,60 (6) 3,33 (6) 2,96 (6) 2,84 (10) 2,01 (7) (по Рамдору)	Реакция на Bi и Ag. Без дебаграммы уверенно определить нельзя
Аллотриоморфнозернистые агрегаты. Почки с концентрически-зональным строением зерен. Решетчатые и пластинчатые структуры распада с халькопиритом	Халькопирит, кубанит, пирротин, пентландит. Замещает пирротин	11,56 (10) 5,739 (10) 3,270 (10)	Резко изменяющийся цвет; очень сильное двуотражение и анизотропия. Реакция на Cu
$R <$ галенита, $R >$ сфалерита, изотропные			
Аллотриоморфнозернистые агрегаты. Весьма совершенная спайность по (100). Треугольники выкрашивания. Образует структуры распада с минералами серебра. Содержит включения минералов — носителей серебра	Сфалерит, пирит, халькопирит, бурнонит, блестящая руда, козалин, галеновисмутит. Замещается церусситом, англезитом, ковеллином, халькозинном	2,965 (10) 2,093 (10) 1,324 (10)	Треугольники выкрашивания; диагностическое травление. Реакция на Pb
Тонкозернистые агрегаты. Пластинчатые двойники у анизотропных разностей	Гессит, калаверит, сильванит, теллур, халькопирит, сфалерит, пирит	2,77 (10) 2,11 (5) 2,02 (4)	Коричневый оттенок — отличие от галенита. От гессита отличается слабым эффектом анизотропии. Необходимы химический анализ и дебаграмма
Аллотриоморфнозернистые агрегаты. Структуры распада твердого раствора в галените. В рудах распространены псевдоморфозы акантита по аргентиту. Пластинчатые двойники в зернах, скрытокристаллические скопления	Галенит, халькопирит, тетраэдрит, сульфосоли серебра, теллуриды серебра, арсениды никеля и кобальта, серебро, прустит, пирраргирит, ковеллин, халькозин. Превращается в серебро, сульфосоли серебра	2,58 (10) 2,44 (10) 2,37 (9)	Голубовато-зеленоватый оттенок; очень низкая микротвердость; световое травление; реакция на Ag; парагенезис

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм²; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
22 β-аргентит (>179° C); кубич.	1) 37 (P) 35 (Вл) 3) Серо-белый со слабым голубовато-зеленоватым оттенком	1) Изотропен	1) 2—2,5; 20—30 (Л); 20—30; 24 (Б, Т); с. вогн. 2) Плохое. h очень низкий, ~ ялпаиту, <галенита, штромейерита, халькозина, полибазита, стефанита	
23 Науманнит Ag ₂ Se; Ag 73,15, Se 26,85; кубич.	1) 33 (С) 3) Серовато-белый с зеленовато-синеватым оттенком	1) Изотропен	1) 2—2,5; 27—56 (Л); с. вогн. 2) Посредственное. h <клаусталита	
24 Агвиларит, α-агвиларит Ag ₄ SeS (t < 133° C); Ag 79,50, Se 5,91, S 14,59; ромбич. β-агвиларит (t > 133° C); кубич.	1) 36 (P); 30 (С) 3) Белый с синезеленоватым оттенком	1) Изотропен, очень слабо анизотропен (α-агвиларит) 3) Нет	1) 2—2,5; 26—32 (Л) 2) Хорошее. h очень низкий, >аргентита, <клаусталита	Отпечаток на Se красного цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: тиомочевина. Реакция на Ag, см. аргентит
25 Колорадонит HgTe; Hg 61,14, Te 38,86; примеси: Cu (до 12%), Pb; кубич.	1) 37,7 (С) 3) Белый с розовато-коричневым оттенком	1) Изотропен	1) 2; 27—35 (Л) 2) Хорошее. h <калаверита и сильванита, >петцита, редко <петцита	Отпечаток на Те черного цвета и на Hg оранжевого цвета. Растворитель: HCl конц. Эксп. 2 мин. Проявитель (свежеприготовленный) на теллур: CsCl (10%-ный) + KJ (5%) + гипосульфит. Проявитель на ртуть; KI (5%-ный)
26 Метациннабарит HgS; Hg 86,21, S 13,79; примеси: Zn (до 5%), Fe (до 6%), Se; кубич.	1) 28 (P); 27 (Вл) 2) Слабое на границах зерен 3) Серо-белый	1) Изотропен, слабо анизотропен 2) Нет, порошок черный	1) 3; 74—86; 79 (Л) 2) Хорошее. h <киновари	Реакция на Hg. Раскаленный перл соды и буры приводит в контакт с минералом. Эксп. 1—2 мин. Пленка металлической ртути (смотреть в косом свете)
27 Тиманнит HgSe; Hg 71,70; Se 28,30; кубич.	1) 25,5 (С); 30 (Э, P); 24 (Вл) 3) Серо-белый с коричневатым оттенком	1) Изотропен	1) 2,5; 32—39; 37 (Л) 38 (С) 2) Хорошее. h немного <клаусталита, <галенита	Реакция на Se. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: тиомочевина. Окрашивание красного цвета
28 Халькозин α-Cu ₂ S; Cu 79,86; S 20,14 (<103° C); ромбич. β-Cu ₂ S (>103° C); гексагон., кубич.	1) 32 (Вл); 25 (Э) 3) Серо-белый с голубоватым оттенком, редко с розоватым	1) Изотропен отчетливо, слабо анизотропен. Прямое угасание (α-халькозин)	1) 2,5—3; 70—98; 84 (Л); 68—98; 84 (Б, Т); с. вогн., вып. 2) Очень хорошее. h >аргентита, ~дигениту, галениту, >базальных сечений ковеллина, <призматических сечений ковеллина, <борнита, таннантита	Реакция на Cu. 1. Растворитель: NH ₄ OH. Эксп. 1 мин. Проявитель: рубановая кислота. Пятно темно-зеленого цвета. 2. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель: K ₄ FeX ₆ (CN) ₆ . Пятно розовато-коричневого цвета
28а Джарлент Cu _{1,96} S; ромбич.		Пожоже на халькозин		

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты. Полисинтетические двойники и трещины спайности по (100). Мирмекитовые срастания с клаусталитом	Очень редкий минерал. Клаусталит и другие селениды	βAg ₂ Se 2,66 (10) 2,56 (10) 2,23 (6)	Сходен с аргентитом. Реакция на Se; спайность по (100); полисинтетические двойники
Скелетные и игольчатые кристаллы, нитеобразные и крупные выделения	Аргентит, самородное серебро, стефанит, клаусталит, тиманнит, умангит, карбонаты. Замещается серебром, стефанитом	2) 4,09 (5) 2,42 (10) 2,19 (6)	Зеленоватый оттенок; реакция на Ag и Se. Парагенезис. От аргентита отличается химическим анализом и дебаграммой
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты	Калаверит, петцит, сивьянит	3,73 (10) 2,28 (9) 1,943 (7)	От сходного петцита отличается изотропностью и реакцией на Hg
Изометричные зерна и мономинеральные агрегаты. Сажистые налеты, корки. Двойники пластинчатые (заметные при скрещенных николях)	Киноварь, антимонит, марказит, ртуть самородная, реальгар, вюртцит, кальцит, барит, халцедон, шватцит	3,358 (10) 2,041 (10) 1,746 (8)	Парагенезис: низкая твердость; двойниковые пластинки, как у сфалерита
Мелкозернистые агрегаты, реже кристаллы	Барит, кальцит, умангит, клаусталит	3,50 (10) 2,14 (8) 1,829 (8)	От сходных халькозина и сфалерита отличается травлением, микрохимическими реакциями и дебаграммами
Гексагональный халькозин — пластинчатые кристаллы с трещинками спайности. Супергенный халькозин — каемки, прожилки, петельки скрытокристаллического строения. Пластинчатые и ланцетовидные двойники. Образуется распад твердого раствора с дигенитом	Гипогенный халькозин: блеклые руды, сфалерит, пирит, галенит, дигенит, борнит. Гипергенный халькозин: ковеллин, борнит, гётит. Замещает пирит, халькопирит, сфалерит и др.	α-Халькозин 1,966 (10) 2,780 (4) 3,210 (3)	Голубоватый оттенок; изотропность; низкий рельеф; травление; реакция на Cu; трещинки спайности и пластинчатое строение. Парагенезис. Халькозин и джарлеит различаются дебаграммами
	Ассоциирует с дигенитом, борнитом		

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двукратное ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
29 Берцелианит Cu_2-xSe ; Cu 61,62, Se 38,38; примеси: Ag (до 8,5%); кубич.	1) 25 (Вл); 29 (Э, С) 3) Серо-голубовато-белый; потускневший индиго-синий	1) Изотропен, редко слабо анизотропен	1) 2,5—3; 79—99; 92 (Л) 2) Хорошее. $h \sim$ клаусталиту и умангиту	Отпечаток на Cu серо-зеленого цвета, на Se красного цвета. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель на медь: 1) аммиак; 2) рубеновая кислота; на селен — тиомочевина
30 Дигенит Cu_2S_3 ; Cu 79,8; S 20,2; примесь Ag , Se ; кубич.	1) 19 (Б); 20 (Вл) 3) Голубой до темно-голубого	1) Изотропен, иногда аномально анизотропен	1) 2,5—3; 30—74 (Я., М); с., вогн. 2) Очень хорошее. $h \sim$ халькозину, галениту, > базальных сечений ковеллина, < призматических сечений ковеллина, < борнита	Капельная реакция на Cu . Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель: аммиак + рубеновая кислота. Пятно зеленого цвета
31 Борнит Cu_5FeS_4 ; Cu 63,33; Fe 11,12; S 25,55; примеси: Ag , Bi , In , Ga , Sb , Pb (до 7%), As , Ge и др.; 228° С; тетраг., кубич.	1) 23 (Р); 24 (Вл); 18,5 (Э) 3) Розовый в свежей полировке; коричнево-фиолетовый в старых шлифах	1) Изотропен, слабо анизотропен только в свежем шлифе	1) 3; 100—124; 122 (Л); 97—105; 103 (Б, Т); с., вогн. 2) Отличное. $h >$ галенита, халькозина, немного < халькопирита	Отпечаток на Cu серо-зеленого цвета, на железе темно-красного цвета. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель: аммиак + рубеновая кислота; на железе KCN
32 Гринокит $\beta-CdS$; Cd 77,81; S 22,19; примеси: Zn , In ; гексагон. Хоулит $\alpha=CdS$; кубич.	1) 18,5 (Р); 19. (Вл) 3) Серый с голубоватым оттенком, в иммерсии с зеленоватым	1) Изотропен 2) Сильные бесцветные, лимонно-желтые, красно-коричневые (В, МII)	1) 3—3,5; 52—91 (Л) 2) Хорошее. $h <$ сфалерита	Реакция на Cd . Растворитель: HNO_3 конц. на шлифе. Эксп. 2 мин. Фильтр. бумага + и. р. + дифенилкарбазид + NH_4OH . Пятно сине-фиолетового цвета

Подгруппа 6а. Твердость низкая

33 Антимонит Sb_2S_3 ; Sb 71,38; S 28,62; ромбич	1) 44—30 (Э); 45—30 (Вл) 2) Сильное 3) Белый, светло-серый	1) Сильно анизотропен (изменяет окраску от буроватых до серо-синих тонов); прямое угасание	1) 2—2,5; 65—153; 72 (Л); 42—129; 77 (Б, Т); с. 2) Хорошее. $h >$ аурипигмента, реальгара, < бертьерита, буринита, галенита, < халькопирита	Реакция на Sb на шлифе. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 2—3 мин. Избыток кислоты снять фильтр. бумагой. Растворитель: HCl (1:1) на травленое место шлифа. Проявитель: $KI + CsCl$ (порошки). Осадок красного цвета
34 Джемсонит $4PbS \cdot FeS \cdot 3Sb_2S_3$; Pb 40,16; Fe 2,71; Sb 35,39; S 21,74; примеси: Ag , Cu , Zn , Bi , монокл.	1) 40—32 (Вл); 39 (Э) 2) Сильное, белое до серо-зеленого 3) Белый с зеленоватым оттенком	1) Сильно анизотропен 2) Красные (MII) с содержанием Bi	1) 2,5—3; 96—121; 99 (Б, Т); 52—147 (Л); зернист. призмат. сечения, с., вогн. 2) Отличное. $h <$ галенита	Реакция на Fe . Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 1 мин. Проявитель: $K_4Fe(CN)_6$. Пятно синего цвета. Реакция на Pb , см. галенит, на Sb , см. антимонит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии; дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Дендриты, прожилки, корочки на других селенидах. Содержит иногда включения клокманита	Халькозин, клаусталит, умангит, тиманнит, кальцит, селениды меди, настуран, сульфосоли серебра, золото, линнеит	2,02 (10) 3,32 (9) 1,726 (8)	Синий цвет; изотропность; реакция на Se. Парагенезис. Похож на халькозин
Аллотриоморфные зерна с трещинками спайности по октаэдру. Содержит продукты распада халькозина, ковеллина, халькопирита	В гидротермальных месторождениях и в зоне цементации с халькозином, борнитом, ковеллином	1,950 (4) 2,78 (2) 3,25 (1)	От изотропного халькозина отличается более низким отражением и синим оттенком; химическим анализом
Аллотриоморфные выделения, каемки и тонкие прожилки, часто спайность и двойники. Образует структуры распада с халькопиритом, халькозином, тетраэдритом. Стр. травление KCN и раствор I в KI	Гипогенный борнит в гидротермальных среднетемпературных месторождениях ассоциирует с халькопиритом, халькозином, блеклой рудой. Гипергенный борнит в зоне цементации с халькозином, ковеллином, халькопиритом	1,924 (10) 3,304 (8) 3,165 (8)	Розовый цвет; низкая непрозрачность; травление KCN
Корки, пленки, почки, землястые выделения с коллоидным строением. Структура выявляется в парах царской водки	В зоне цементации замещает сфалерит, пирит, франкеит, канфильдит. Ассоциирует с вюрцитом	3,167 (10) 0,9528 (10) 1,157 (9)	Реакция на Cd; парагенезис. Гриножит и хоулит отличаются по дебаграмме
<i>R</i> < галенита, <i>R</i> > сфалерита, сильно анизотропные			
Агрегаты призматических, игольчатых кристаллов и аллотриоморфнозернистые. В зернах полисинтетические двойники и фигуры смятия	Кварц, сульфосоли Pb, Sb, Ag, киноварь, рсальгар, флюорит, пирит, кальцит, барит, арсенопирит, иногда бертьерит. Замещается вторичными минералами сурьмы — сенармонитом, валентинитом, кермеситом	1,933 (10) 1,687 (10) 3,566 (9)	Сильное двуотражение и анизотропия; травление с KOH (желтый осадок); пластинчатые двойники; реакция на Sb; парагенезис
Игольчатые кристаллы. Радиально-лучистые и аллотриоморфнозернистые агрегаты. Пластинчатые двойники удлинению по (100). Спайность ⊥ удлинению в отличие от буланжерита. Стр. травление: KOH и HNO ₃	Антимонит, буланжерит, бурнонит, сфалерит, галенит, пирит, тетраэдрит, пираргрит, сульфосоли Sn. Замещается биндгеймитом	3,42 (10) 2,72 (9) 2,05 (9)	Зеленоватый оттенок; сильное двуотражение; сильно анизотропен; травление KOH; реакция на Sb и Fe; пластинчатые двойники удлинению; парагенезис. Необходимы химический анализ и дебаграмма

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
35 Штернбергит AgFe ₂ S ₃ ; Ag 34,17; Fe 35,37; S 30,46; ромбич.	1) 44—34 (P); 36 (Вл); 35 (Э) 2) Сильное 3) Коричнево-розовый (пирротинный)	1) Сильно анизотропен, эффект цветовой — яркий голубой, красный, лиловый	1) 1—2; 40—70 (Я. М.) 2) Хорошее. h > висмута, ~пираргириту, пруститу, немного < аргиропирита, < галенита, серебра	Прямой отпечаток на Ag фиолетового, красного цвета. Растворитель: 1 ч. 5%-ного KCN + 1 ч. насыщенного раствора Р-диметиламинобензилиденродами на в ацетоне. Эксп. 3—5 мин. Промыть в воде, подкисленной HNO ₃
36 Молибденит MoS ₂ ; Mo 59,94; S 40,06; примеси: Se (до 25%), Re (до 2%); гексагон. Джордизит (рентгено-аморфный молибденит)	1) 44—15 (Вл); 43—15 (Э) 2) Очень сильное 3) Белый, серо-белый, серый	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект в розовых, желтых и синеватых тонах)	1) 1—1,5; 16—19; 17 (Б, Т); ⊥ спайности; 21—28; 23 (Б, Т) спайности ⊥ спайности; с. 2) Хорошее. h < галенита и халькопирита, > графита	Реакция на Mo. Растворитель: HNO ₃ (1:1) на шлифе. Эксп. 5 мин. И. р. + фильтр. бумага. Проявитель: ксантогенат калия (свежеприготовленный). Пятно фиолетового цвета, со временем обесцвечивается
37 Эвкайрит α AgCuSe; Cu 25,36; Ag 43,04; Se 31,60; ромбич., псевдотетрагон.	1) 32 (С); 33 (P); 27 (Вл) 2) Очень слабое 3) Светло-желтый (как пирит и марказит)	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект в синих, зеленых и красноватых тонах)	1) 2—2,5; 23—42 (Л); 32 (С); 70—90 (Я. М.) 2) Хорошее. h немного > клокамнитта, ~ клаусталиту	Реакция на Cu, см. клокамнитт, на Se, см. умангит, на Ag, см. стефанит
38 Клокамнитт CuSe; Cu 43,58; Se 56,42; гексагон.	1) 30—18 (Вл); 25—10 (Э); 31—18 (С) 2) Очень сильное (от оливково-серого до серо-голубого 3) Серо-голубоватый иногда с зеленоватым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект — кремово-белый до оранжевого)	1) 2—3; 57—86; 64 (Л); 69—82 (С) 2) Отличное. h ~ умангиту, < эвкайрита	Отпечаток на Cu серо-зеленого цвета, на Se красного цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Проявитель на медь: 1) аммиак; 2) рубановая кислота; на селен — тиомочевина
39 Штрюмейрит CuAgS; Ag 53,05; Cu 31,19; S 15,76; 94° С; ромбич., кубич.	1) 27,5 (Э) 2) Слабое 3) Серо-белый с сиреневым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект — желтые, оранжевые, фиолетовые тона)	1) 2,5—3; 38—44; 41 (Б, Т); с 2) Хорошее. h < галенита, халькозина	Отпечаток на Cu (серо-зеленого цвета) и на Se (красного цвета). Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель на медь: аммиак + рубановая кислота; на селен — тиомочевина. Отпечаток на Ag, см. стефанит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Тонкотаблитчатые кристаллы. Двойники полисинтетические. Прекрасная спайность (001)	Пирит, пираргирит, стефанит, кобальтин, прустит, аргентит. Образует включения в галените и швартците. Замещается марказитом. Разлагается на пирит, аргентит, пирротин	4,25 (10) 3,25 (8) 2,79 (8)	От пирротина и кубанита отличается сильным двуотражением, формой кристаллов. Реакция на Ag; парагенезис
Таблитчатые изогнутые кристаллы, розетки. Редко скрытокристаллические агрегаты в виде почк. В зернах фигуры смятия и полисинтетические двойники. Spайность (001). Характерно замещение по спайности	Шеелит, висмутин, золото, кварц, вольфрамит, пирит, халькопирит, арсенопирит, настуран. В зоне окисления замещается повеллитом, ферримолибдитом	2,045 (10) 1,826 (10) 1,534 (10)	Очень сильные двуотражение и анизотропия; отрицательное травление; реакция на Mo. Слабый проводник электричества (по сравнению с графитом). Парагенезис. Джорджит образует почки; под микроскопом похож на угли
Аллотриоморфозернистые мелкие агрегаты. Игольчатые кристаллы в умангите	Селениды и теллуриды свинца, ртути, серебра и меди, эвкайрит образует миркемитовые прорастания с умангитом, клокамнитом	α-эвкайрит 3,07 (10) 2,17 (10) 1,768 (8) β-эвкайрит 2,12 (10) 2,61 (7) 2,88 (5)	Цвет; травление; цветовой эффект анизотропии; реакция на Cu, Ag, Se; парагенезис
Аллотриоморфозернистые мелкие агрегаты, таблички. Обычно базальная спайность	Умангит, клаусталит, эвкайрит, урановые минералы, берцелианит, халькопирит, гематит	2,87 (10) 1,963 (8) 1,815 (6) 3,17 (9)	Голубоватый цвет; сильное двуотражение; сильные цветовые эффекты анизотропии; парагенезис
Призматическая форма кристаллов, перистые двойники («листья олеандра»). Миркемитовые сростания с галенитом, халькозином	Аргентит, халькозин, фрейбергит, тетраэдрит, халькопирит, борнит, галенит и др. Замещается серебром, ковеллином	3,10 (10) 2,92 (10) 2,59 (10) 2,96 (10) 2,79 (10) 2,47 (7)	Цвет; цветовой эффект анизотропии; реакция на Ag; структура олеандровых листьев. Запрещенный парагенезис с аргентитом. Сходен с ялпаитом и маккинстритом

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3),	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
40 Умангит Cu ₂ Se ₂ ; Cu 54, 70; Se 45, 30; ромбич.	1) 14 (С); 17—14 (Э) 2) Очень сильное (от сиреневого до голубовато-серого) 3) Сиреневый до голубовато-серого	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект—красный, оранжевый)	1) 3; 77—108; 82 (Л); 77—128 (С) 2) Хорошее. h~к-локманниту, немного>герсдорфита, <пирита	
41 Ковеллин CuS; Cu 66,4; S 33,6; гексагон.	1) 20—5 (Вл); 26—19 (Э); 22—7 (Р, Б) 2) Очень сильное (от светло-серого до синего) 3) Синий, до слабо фиолетового, до сине-белого—эталон	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект от синего до красного)	1) 1,5—2; 77—90; 86 (Л); 69—78, 72 (Б, Т); сл. трещ. вогн., вып. 2) Отличное. h>аргентита, немного>халькозина на базальных сечениях; немного<халькозина на призматических сечениях, <галенита, халькопирита	Реакция на Си. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: NH ₄ OH+рубеновая кислота. Пятно серо-зеленого цвета
42 Стефанит Ag ₂ SbS ₄ ; Ag 68,33; Sb 15, 42; S 16, 25; ромбич.	1) 28 (Вл); 29 (Э) 2) Слабое, заметно на границах зерен 3) Серо-белый с розоватым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект—темно-фиолетовый, зеленый)	1) 2—2.5; 26—47; 36 (Л); 50—124 (Я М) 2) Отличное. h>аргентита, >полибайта, прустита—пираргирита, <тетраэдрита	Отпечаток на Ag фиолетово-красного цвета. Растворитель: 1 ч. 5% KCN+1 ч. насыщенного раствора Р-диметиламинобензилдиен-родамина в ацетоне. Эксп. 3—5 мин. Отпечаток промыть в воде, подкисленной HNO ₃
43 Графит С; гексагон.	1) 23—5 (Вл); 22—5 (Э) 2) Очень сильное 3) Серо-белый с коричневатым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект) очень редко изотропен (аморфный)	1) 1—2; 12 (Б, Т); 7—12 (Л); с. 2) Плохое, пишет на бумаге, h<халькопирита, молибденита	
43а Чаонт С;	1) 40 2) Светло-серый	То же	h близок к графиту	

Подгруппа 6б. Твердость низкая, R<галенита.

44 Нагиагит Pb ₂ Au(Te, Sb) ₂ S ₈ —8; Au 7,61; Pb 56,81; Te 17,72; Sb 7,79; S 10,75; примеси: Ag, Se; тетрагон. ромбич.	1) 43 (Р, Э); 39,2 (С) 2) Очень слабое 3) Белый до желтовато-белого	1) Отчетливо анизотропен (цветовой эффект—голубовато-серый, темно-коричневый, зеленовато-серый)	1) 1,5—3; 56—129 (Л); 62—95 (С) 2) Посредственное. h немного<сильванита	Реакция на Pb, см. цилиндрит, на Sb, см. буланжерит, на Te, см. гессит
45 Гессит Ag ₂ Te; Ag 62,86; Te 37,14; 155 °С; примеси: Au; монокл., ↗ кубич.	1) 40 (С); 38 (Вл); 43 (Э) 2) Слабое 3) Серо-белый с розовато-коричневым оттенком 1) 28,1—30,9 (Б); 41 (Р) 2) Слабое, отчетливое 3) Белый, светло-серый	1) Сильно, отчетливо, слабо анизотропен. (цветовой эффект—оранжевый, коричневый до синего). Пятнистое угасание	1) 2—3; 28—44; (Л); с., вогн. 2) Плохое. h очень низкий, >аргентита, <алтанта, <золота, галенита	Отпечаток на Te черного цвета. Растворитель: HCl конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: KI+C ₂ Cl. Растворитель и проявитель на Ag, см. аргентит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаэграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Аллотриоморфные зерна с пластничатыми двойниками, иголки	Клаусталит, тиманнит, барцелианит, халькопирит, кобальтин, кальцит, гематит	3,57 (10) 1,819 (9) 1,776 (8)	Сиреневый цвет; сильное двуотражение и сильный цветовой эффект анизотропии; реакция на Си; парагенезис с селендами
Призматические мелкие кристаллы. Радиально-лучистые сростки, сажистые массы. Тонкие прожилки, каемки и колломорфные выделения. Базальная спайность	Зоны окисления и цементации медных месторождений. Часто сростается с халькозином, дигенитом, борнитом и гетитом. Гипогенный встречается редко	2,81 (10) 1,890 (10) 3,04 (8)	Синий цвет; сильное двуотражение и сильный эффект анизотропии; парагенезис
Столбчатые кристаллы или агрегаты аллотриоморфных зерен. Ср. травление: КОН. Тонкое сложное двойникование. Реакционные каемки между серебром и пираргиритом	Аргентит, сульфосоли серебра, тетраэдрит, сфалерит, галенит, арсеницит, леллинит. Замещает другие минералы серебра	3,03 (10) 2,55 (9) 2,86 (7)	Розоватый оттенок; пластничатые двойники; хороший проводник электричества; парагенезис. В отличие от прустита и пираргирита рефлексы отсутствуют
Агрегаты таблитчатых чешуйчатых зерен. Фигуры смятия и спайность в зернах. Почки скрытокристаллического и сферолиты радиально-лучистого строения	В пегматитах. В скарнах, кварцевых жилах, в метаморфизованных породах и углях	3,352 (10) 1,230 (9) 1,154 (9)	Коричневатый оттенок; сильное двуотражение; сильная анизотропия; низкое отражение; парагенезис
Базальная спайность. Замещается по удлинению графитом Пластинки 0,00л мм в графите			

R > сфалерита, отчетливо и слабо анизотропные

Обычно образует таблитчатые короткопризматические кристаллы, чешуйки. Мозаичные полисинтетические двойники. Превосходная спайность $\parallel (010)$	Золото, электрум, алтаит, сильванит, галенит, сульфосоли Pb, Cu	3,02 (10) 2,82 (9) 2,08 (6)	Белый цвет; слабое двуотражение в отличие от молибденита; таблитчатые кристаллы, как у молибденита; спайность по (010)
Аллотриоморфнозернистые мелкие агрегаты. Редко кристаллы. Полисинтетические двойники в анизотропном гессите	Золото, серебро, аргентит, алтаит, пирит, сильванит, петцит, галенит, халькопирит, тетраэдрит, сфалерит, гематит. Прорастания с сильванитом и петцитом	2,30 (10) 2,86 (8) 2,24 (7)	От аргентита отличается коричневатым оттенком цвета и цветовым эффектом анизотропии; от петцита эффектом анизотропии. Необходима проверка по дебаэграмме

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпе- чатка (1); поведение при полировании, от- носительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
46 Цилиндрит $Pb_3Sn_4Sb_2S_{14}$; Pb 30,59; Sn 23,36; S 22,09; Sb 23,96; примеси: Fe, Cu, Au, Ge; ромбич.	1) 28,1—30,9 Б 2) Слабое, отчетли- вое 3) Белый светло-се- рый	1) Слабо, отчетливо анизотро- пен (цвето- вой эф- фект)	1) 2—2,5; 66—77; 70 (Л) 2) Плохое. h немно- го > франкента, f < стан- нина, < сфалерита, халькопирита	Реакция на Pb на шли- фе. Растворитель: HNO_3 конц. на шлифе. Эксп. 1 мин. Избыток кислоты снять фильтр- бумагой. Проявитель: KI (5%-ный). Осадок желтого цвета
47 Айкинит $PbCuBiS_3$ Cu 11,03; Pb 35,98; Bi 36,29; S 16,70; примеси: As, Zn; ромбич.	1) 48 (Вл); 44 (Э, Р) 2) Отчетливое 3) Белый со слабо- желтоватым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен	1) 2—2,5; 165—227 (Я. М.) 2) Плохое. h > галени- та, > висмутину, < буронита	Отпечаток на Bi жел- того цвета. Раствори- тель: HNO_3 (1:1). Эксп. 2 мин. Прояви- тель: тиомочевина. Реакцию на Pb, см. цилиндрит, на Cu, см. ялпант
48 Тиллит $Pb_5Sn_4Sb_2S_{14}$; Pb 53,05; Sn 30,51; S 16,44; примеси: Zn, Ag; ромбич.	1) 40,1—45,8 (Б); 38,5 (Р) 2) Слабое, заметное на границах зерен 3) Белый с кремовым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен (цветовой эффект от синева- то-серого до темно-ко- ричнево- фиолето- вого)	1) 2; 31—83 (Mill- man, 1964); 66—125 (М) 2) Хорошее. h > фран- кента, < сфалерита	Реакция на Sn на шли- фе. Растворитель: HCl (1:1). Эксп. 5 мин. И. р. переносят на фильтр. бумагу. Проя- витель: $AuCl_3$ + $+NH_4OH$. Пятно крас- ного цвета. Реакция на Pb, см. цилиндрит
49 Франкент $Pb_4Sn_4Sb_2S_{14}$; Pb 49,78; Sn 17,10; Sb 11,65; S 21,47; монокл.	1) 29,9—33,8 (Б); 37,5 (Р) 2) Очень слабое 3) Серовато-белый	1) Слабо, отчетливо анизотро- пен	1) 1—2; 23—52 (Л); 13—108 (Millman, 1964) 2) Плохое. h немного > галенита, < тилли- та, < сфалерита	Реакция на Pb, см. цилиндрит, на Sb, см. буланжерит
50 Ялпант Ag_3CuS_2 ; Ag 71,73; Cu 14,06; S 14,21; тетрагон.	1) 32 (Вл) 2) Слабое 3) Серо-белый	1) Слабо анизотро- пен, изо- тропен	1) 2,5—3; 23—55 (Я, М) 2) Очень хорошее. h < аргентиту, < гале- нита	Отпечаток на Cu серо- зеленого цвета. Раств- воритель: HNO_3 конц. Эксп. 1—2 мин. Проя- витель: 1) аммиак, 2) рубеновая кислота. Реакция на Ag, см. пираргрит
51 Пираргрит Ag_3SbS_3 ; Ag 59,76; Sb 22,48; S 17,76; примеси: As (до 2,6%); тригон.	1) 32,5 (Э, Р); 30 (Вл) 2) Отчетливое, силь- ное 3) Серо-белый с го- лубоватым оттенком	1) Сильно, отчетливо анизотро- пен (меша- ют красные внутр. рефлексы) 2) Сильные красные (В); сла- бое, чем у прусита	1) 2—2,5; 72—109; 87 (Л); I } спайн., сл. трещ. II } вогн. 2) Очень хорошее. h > аргентита, > поли- базита, < стефанита, миаргирита; галенита и большинства спутни- ков	Реакция на Ag. Кру- пнику минерала на предметном стекле по- крывают насыщенным раствором $K_2Cr_2O_7$ в HNO_3 конц. Эксп. 2 мин. Появляются оранжево-красные кристаллы $Ag_2Cr_2O_7$. Реакция на Sb, см. буланжерит
52 Киноварь HgS ; Hg 86,21; S 13,79; примеси: Se, Te; тригон.	1) 30 (Э); 28 (Вл) 2) Слабое 3) Серо-белый с го- лубоватым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен (меша- ют внутр. рефлексы) 2) Сильные красные (В), поро- шок крас- ный	1) 2—2,5; 51—98; 78 (Л) 2) Хорошее. h немного > сурьмы, антимонита, метациннабарта, < швартцита, куприта	Реакция на Hg. Рас- каленный перл соды или буры проводится в контакт с полирован- ной поверхностью ми- нерала. Эксп. 1—2 мин. Пленка ме- таллической ртути (смотреть в косом свете)

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Форма кристаллов цилиндрическая. Концентрически-скорлуповатые и радиально-лучистые сростания с франкеитом	Геокронит, касситерит, буланжерит, галенит, марказит, станнин, пирит, франкеит, джемсонит. Замещается касситеритом, це-русситом	2,89 (4) 2,01 (1) 1,81 (1)	Светло-серый; отчетливо анизотропный; травление HNO ₃ ; форма выделений
Призматические и тонкоигольчатые кристаллы. Совершенная спайность (010)	Пирит, тетраэдрит, кварц, халькопирит, галенит, сфалерит, золото, эмлектит, висмутин, виттихенит, тетрадимит. Замещается коваллином, висмутом, бисмутитом	3,67 (10) 3,18 (9) 2,87 (8)	От сходных сульфидов отличается травлением, двуотражением и реакцией на Cu
Пластинчатая форма зерен. Двойниковое строение. Радиальные агрегаты	Франкеит, пирит, сфалерит, висртцит, станнин, галенит, цилиндрит, арсениопирит, марказит, касситерит. Замещается касситеритом, галенитом, англезитом, ярозитом	$a_0=4,05$ $b_0=4,29$ $c_0=11,35$	Цветовой эффект анизотропии: слабое двуотражение; двойники; парагенезис. Сходен с франкеитом
Пластинчатые и таблитчатые кристаллы в агрегатах, волокна, сферические выделения. Спайность (010). Клиновидные двойники	Тиллит, пирит, буланжерит, джемсонит, геокронит, галенит, касситерит, станнин, цилиндрит	2,88 (5) 3,43 (3) 2,06 (2)	От тиллита отличается слабой анизотропией, низким рельефом, травлением, реакцией на Sb
Аллотриоморфные зерна. Пластинчатые двойники. Спайность по призме	Аргентит, штроейерит, золото, серебро, пирсент. Замещается штроейеритом, аргентитом, серебром		Серо-белый цвет; парагенезис; реакция на Cu и Ag. Под микроскопом сходен с штроейеритом. Акантит и ялпаит отличаются по рентгенограмме
Столбчатые и пластинчатые кристаллы в агрегатах. Зональное и двойниковое строение зерен	Серебро, галенит, аргентит, сульфосолеватые и сульфиды свинца, серебра, меди и др. Переходит в аргентит, серебро	2,79 (10) 2,55 (10) 3,20 (9)	Голубоватый оттенок; коричнево-красные внутренние рефлексы; травление; реакция на Sb и Ag; парагенезис. Похож на прустит
Кристаллы, аллотриоморфнозернистые агрегаты. Строение зерен однородное, редко двойники. В зернах включения антимонита	Антимонит, реальгар, аурипигмент, пирит, марказит, арсениопирит, кварц, флюорит, кальцит. Замещается метациннабаритом и ливингстонитом	3,372 (10) 2,869 (10) 2,074 (8)	Сильные красные рефлексы; не травится реактивами; реакция на Hg; парагенезис

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу, микротвердость H_v , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
53 Кермезит Sb_2S_2O ; Sb_2S_3 70,0; Sb_2O_3 30,0; трикл.	1) 27 (Вл) 21 2) Отчетливое 3) Серо-белый с голубоватым оттенком	1) Сильно анизотропен в кристаллич. разностях (цветовой эффект от фиолетового до синне-зеленого); слабо анизотропен в землистых агрег. 2) Сильные внешне-красные с фиолетовым оттенком (В)	1) 1—1,5; 36—90 (Я, М) 2) Хорошее	Спектральный анализ на Sb
54 Аурипигмент As_2S_3 ; As 60,91; S 39,09; примеси: Sb (до 2,7%); Se (0,04%); Hg, Ce и др.; монокл.	1) 26—20 (Вл); 32—26 (Р) 2) Очень сильное 3) Серо-белый	1) Сильно анизотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Сильные лимонно-желтые (В)	1) 1,5—2; 26—33; 38 (Л); 23—52; 29 (Б, Т); сл. трещ., вогн. 2) h немного > реальгара	Реакция на As. Минерал + HNO_3 конц. на шлифе. Эксп. 5 мин. + $(NH_4)_2MoO_4$, порошок в избытке. Окрасивание лимонного цвета
55 Лорандит $TlAs_2S_3$; Tl 59,46; As 21,87; S 18,67; монокл.	1) 23 (Р); 24 (Вл); 30,8 (ВС) 2) Слабое, сильное 3) Серо-белый с голубоватым оттенком	1) Отчетливо анизотропен 2) Красные (более редкие чем у реальгара) (В)	1) 2—2,5; 40—57; 47 (Л) 2) Хорошее. h > реальгара, метациннабарита, < киновари	Отпечаток на Tl темно-коричневого цвета. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 3 мин. Проявитель: $AuCl_3$ (5%). Реакция на As, см. аурипигмент
56 Реальгар AsS_3 ; As 70,08; S 29,92; монокл.	1) 26,5—20,5 (Р); 21—19 (Вл) 2) Слабое 3) Серо-белый	1) Отчетливо анизотропен (мешают внутренние рефлексы) 3) Желто-красновато-оранжевые (В)	1) 1,5—2; 50—57; 54 (Л); 53—60 (Б, Т); с 2) Плохое. h < аурипигмента, < антимонита	Отпечаток на As шоколадно-коричневого цвета. Растворитель: 10 ч. NH_4OH конц. + 1 ч. H_2O_2 (30%-ной). Эксп. 30—60 с. Проявитель: $AgNO_3$

Подгруппа 7. Твердость низкая.

57 Кераргрит (хлораргрит) $AgCl$; Ag 75,3; Cl 24,7; примеси: I (до 10,4%); Hg (до 1,8%), Br; кубич.	1) 12 (Вл) 3) Серый	1) Изотропен 2) Бесцветные, желтые (В)	1) 1—2 2) Плохое. h ~ аргентиту	Реакция на Ag на шлифе. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 5 мин. Проявитель: K_2CrO_4 . Осадок коричнево-красного цвета
58 Урановая чернь (остаточная) UO_2 ; U 7,7—34; аморфная	1) 11—14 ниже карбонатов и выше кварца 3) Серый до темно-серого с буроватым оттенком	1) Изотропен 2) Буровато-желтые, зеленовато-бурые (МИ)	1) 1—4; 98 2) Плохое. h варьирует	Отпечаток на U коричневого цвета. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель: $K_4Fe(CN)_6$

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Налеты, корочки аморфного строения по трещинкам в антимоните. Радиально-лучистые сростки. Псевдоморфозы по антимониту	Антимонит, сульфосоли сурьмы, валентинит, стибиконит, сенармонтит, самородная сурьма	3,14 (10) 2,92 (9) 2,70 (8)	Вишнево-красные внутренние рефлексы; сильная анизотропия; травление, волокнистая форма видов; парагенезис. Продукт окисления антимонита
Призматические зерна в агрегатах и радиально-лучистые выделения. Землистые массы аморфного и скрытокристаллического строения. Замещает реальгар	Мышьяк, сурьма, ртуть, реальгар, антимонит, киноварь, марказит, золото	4,77 (10) 2,83 (8) 2,71 (8)	Сильные лимонно-желтые внутренние рефлексы; реакция на As; парагенезис
Агрегаты мелких таблитчатых и призматических кристаллов или аморфные массы. Спайность	Реальгар, антимонит, аурипигмент, марказит, пирит, барит, флюорит, киноварь, сульфосоли мышьяка	3,65 (10) 3,50 (10) 2,85 (8)	От реальгара отличается слабыми рефлексами, хорошей полировкой и реакцией с KOH. От пираргирита резко отличается по микротвердости
Пластинчатые и призматические зерна, аморфные массы	Аурипигмент, киноварь, антимонит, лорандит, золото, сидерит. Переходит в аурипигмент	3,166 (10) 2,931 (7) 2,717 (7) 2,122 (7)	Красновато-оранжевые внутренние рефлексы; плохая полировка; реакция на As

$K < c$ фалерита, $L >$ шеселита, изотропные

Агрегаты аморфного строения. Стр. травление: NH_4OH	Серебро, аргентит, церуссит, англезит и др. Замещает минералы серебра	2,80 (10) 1,97 (10) 1,245 (8)	Реакция на Ag; парагенезис
Корки, землистые массы, прожилки аморфного строения	Настуран, сульфиды, битумы	5,438—5,41 (Гецева и др., 1956)	Натечные выделения черного цвета; реакция на U

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1); внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма от- печатка (1); поведе- ние при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
---	---	--	---	----------------------------

Подгруппа 8. Твердость низкая,

59 Ванадинит $Pb_3[Cl(VO_4)_2]$; V_2O_5 19,4; PbO 78,7; Cl 2,5; примеси: Ca (до 3,3%); As (до 13,5%); P (до 2,9%); гекса- гон.	1) 16—17 Меньше сфалерита 2) Слабое 3) Серый	Слабо ани- зотропен (мешают внутренние рефлексы) Голубовато- желтые, буро-жел- тые до красных (В)	1) 2,5—3 2) Хорошее	Отпечаток на V синего цвета. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: уксуснокислый бензи- дин. Реакция на Pb, см. англезит
60 Вульфенит $PbMoO_4$; PbO 61,4; MoO_3 38,6; примеси: Ca (до 6,9%); TR (до 2,2%); V (до 1,3); U (11,6%); W; тетрагон.	1) 16—17 2) Слабое 3) Серый с голубовато- тым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Жел- тые, oran- жевые, бесцветные (В)	1) 2,5—3; 211—333 (Л) 2) Хорошее. $h < \text{де-}$ клуазита	Отпечаток на Mo го- ричного цвета. Ра- створитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 30 с. Проявитель: $K_4Fe(CN)_6$. Реакция на Pb, см. англезит
61 Валентинит Sb_2O_3 ; Sb 83,3; O 16,7; ромбич.	1) 16—14 (Вл, В) 2) Слабое 3) Серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен 2) Бесцвет- ные, жел- тые (В)	1) 2,5—3 2) Хорошее	Спектральный анализ на Sb
62 Самородная сера; примеси: As, Se, Te, Ti; $\alpha=S$ (<95,6 °C); ромбич.; $\beta=S$ (>95,6 °C); монокл.	1) 15—10 (Вл) 2) Сильное 3) Серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен (мешают внутрен- ние реф- лексы) 2) Желтые, белые (В)	1) 1—2; 21—35 (Л) 2) Хорошее, плохое h очень низкий, < гип- са	Прямой отпечаток на S оранжевого цвета. Ра- створитель: $Sb_2O_3 +$ $+HCl$ конц. $+H_2O$. Эксп. 1—5 мин

Подгруппа 9. Твердость низкая,

63 Сенармонтит Sb_2O_3 ; Sb 83,3, O 16,7 кубич.	1) 12,4 (Вл) 3) Серый	1) Изотро- пен 2) Бес- цветные (В)	1) 2—2,5 2) Хорошее	Спектр анализ на Sb
64 Англезит $PbSO_4$; PbO 73,6; Pb 68,3; SO_3 26,4; примеси: Ba; ромбич.	1) 8—9 (Вл) 3) Серый	1) Изотро- пен, слабо анизотропен 2) Силь- ные, бес- цветные, иногда слабо ок- рашенные в бурый цвет (В)	1) 2,5—3 2) Хорошее. $h \sim \text{церус-}$ ситу	Реакция на Pb на шли- фе. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 1—2 мин. Прояви- тель: KI (5%-ный). Осадок желтого цвета
65 Мельничокит FeS_2 ; Fe 46,6; S 53,4; кубич., скрытокрист.	1) 10; 8 3) Светло-желтый до коричневого	1) Изотро- пен	1) 2—3 2) Плохое. h варьиру- ет, иногда ~ галениту	Реакция на Fe. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 1 мин. Прояви- тель: $K_4Fe(CN)_6$. Пятно на фильтре. бум- аге синего цвета

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
<i>R</i> <сфалерита <i>R</i> > шеелита, анизотропные			
Пластинчатые или шестоватые кристаллы. Радиально-лучистые сростки	Пироморфит, церуссит, вульфенит, галенит и сфалерит в виде реликтов	2,958 (10) 3,37 (8) 3,04 (8)	Травление; реакция на Pb и V; парагенезис
Таблитчатые, шестоватые зерна, радиально-лучистые сростки, метакристаллы	Церуссит, англезит, смитсонит, гидроокислы железа и марганца. Замещает церуссит	3,17 (10) 2,00 (8) 1,77 (8)	Реакция на Pb и Mo; парагенезис
Агрегаты аморфного, призматического и радиально-лучистого строения. Пseudоморфозы по антимониту, тетраэдриту и другим сурьмяным минералам	Антимонит, тетраэдрит и др. сурьмяные минералы; стибиконит, сервантит	3,08 (10) 10,85 (8) 1,792 (9)	Отрицательное травление; pseudоморфозы по антимониту; реакция на Sb; парагенезис; дебаграмма
Крупно-тонкозернистые агрегаты	Осадочные месторождения: гипс, кальцит, арагонит. Зона окисления сульфидных месторождений: лимонит и реликты сульфидов. Замещает сульфиды	3,74 (10) 3,15 (9) 3,94 (7)	Растворяется в сероуглероде; парагенезис
<i>R</i> <шеелита, изотропные			
Корки аморфного строения, pseudоморфозы по антимониту	Зона окисления месторождений с сурьмяными минералами. Валентинит, кермесит, сурьмяные охры	1,673 (10) 3,212 (9) 1,962 (9)	Парагенезис; pseudоморфозы по антимониту; дебаграмма
Агрегаты аморфного и призматического строения, каемки вокруг галенита	Церуссит, галенит. Замещается церусситом	3,00 (10) 2,06 (10) 3,21 (8)	Изотропен; травление; реакция на Pb; парагенезис. В отличие от церуссита травится K1 (5%-ный), в течение 1 мин образуется голубая иризирующая пленка
Колломорфные агрегаты с концентрически-зональным строением. Трещинки усыхания	Низкотемпературные гидротермальные и осадочные месторождения	—	Коллоидные выделения; реакция на Fe

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
66 Ферримолибдит Fe ₂ O ₃ ·3MoO ₃ ·8H ₂ O; Mo 61,6; Fe ₂ O ₃ 21,0; H ₂ O 17,4	1) 11,9 (Вл); 7,9 3) Серый	1) Изотропен, слабо анизотропен 2) Желтые, бурые (В)	1) 1—2 2) Плохое	Реакция на Mo. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: ксантогенат калия (свежеприготовленный). Пятно фиолетово-красного цвета на фильтр. бумаге Окраска неустойчива
67 Гарниерит Ni ₃ [SiO ₁₀][OH] ₃ × ×4H ₂ O; SiO ₂ 35,45—51,94; NiO 2,32—45,15; MgO 2,47—37,38; R ₂ O ₃ 0,11—3,00; H ₂ O 5,27—23,17; аморфная, монокл.	1) 5—6 3) Темно-серый	1) Изотропен 2) Бесцветные, зеленые (В)	1) 1—3 2) Хорошее	Реакция на Ni. Растворитель: царская водка. Эксп. 1—5 мин. Проявитель: 1) аммиак-(2) диметилглиоксим. Пятно розового или малинового цвета на фильтр. бумаге
68 Хризоколл CuSiO ₃ ·nH ₂ O; CuO 45,2; SiO ₂ 34,3; H ₂ O 20,5; криптокристаллическая	1) 4—5 3) Темно-серый	1) Изотропен 2) Светло-зеленые, голубые (В)	1) 2—4; 93—100 2) Хорошее	Реакция на Cu. Растворитель: HCl (1:1) на шлифе. Эксп. 5 мин. Проявитель: аммиак+рубеновая кислота. Пятно на фильтр. бумаге серо-зеленого цвета
69 Лептохлориты железа (тюрингит, шамозит) n·H ₂ O·mAl ₂ O ₃ × ×pSiO ₂ ·hH ₂ O; FeO 19,8—42,3; монокл.	1) 5—6 3) Темно-серый	1) Изотропен, слабо анизотропен 2) Коричневые, зеленые, бесцветные (В)	1) 2—2,5 2) Плохое	Отпечаток на Fe синего цвета. Растворитель: HCl (1:1) Эксп. 5 мин. Проявитель: K ₃ Fe(CN) ₆
70 Гипс CaSO ₄ ·2H ₂ O; монокл.	1) 3—4 3) Темно-серый	1) Изотропен 2) Бесцветные (В)	1) 2; 41—75; 58 (Л) 2) Плохое	Спектр, анализ на Ca
Подгруппа 10. Твердость низкая.				
71 Крокоит Pb[CrO ₄]; Pb 68,9; CrO ₃ 31,1; монокл.	1) 10; 20,5 (Вл); 15,7 2) Слабое 3) Серый	1) Отчетливо анизотропен (мешают внутр. рефлексы) 3) Красно-вато-оранжевые (В)	1) 2,5—3 2) Хорошее	Реакция на Pb. Растворитель HNO ₃ конц. Эксп. 1—2 мин. Проявитель: 1) NH ₄ OH; 2) KI. Осадок желтого цвета. Спектральный анализ на хром
72 Аннабергит Ni ₃ [AsO ₄] ₂ ·8H ₂ O; NiO 37,5; As ₂ O ₃ 38,5; H ₂ O 24,0; примеси: Mg, монокл.	1) 6,5—7,5 2) Слабое 3) Темно-серый	1) Отчетливо анизотропен 2) Зеленые, бесцветные (В)	1) 2,5—3 2) Хорошее	Отпечаток на Ni малинового цвета. Растворитель: аммиак. Эксп. 1—2 мин. Проявитель: диметилглиоксим. Реакция на As, см. эритрин
73 Халькантит Cu[SO ₄]·5H ₂ O; CuO 34,8; SO ₃ 32,1; трикл.	1) 4—6 2) Слабое 3) Темно-серый	1) Отчетливо анизотропен 2) Голубые, зеленые, бесцветные (В)	1) 2,5 2) Хорошее	Отпечаток на Cu серо-зеленого цвета. Растворитель: вода+NH ₄ OH (несколько капель). Эксп. 5 мин. Проявитель: рубеновая кислота

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Агрегаты волоконистого и радиально-лучистого строения. Под бинокляром	Зона окисления сульфидных месторождений с молибденитом. Замещается гётитом	9,56 (10) 8,16 (10) (Исаенко, 1966)	Парагенезис, реакция на Мо
Корки, прожилки аморфного и скрытокристаллического строения. Под бинокляром	Нонтронит, опал магнезит	9,8 (10) 1,552 (8) 2,40 (6) 2,65 (6)	Зеленые внутренние рефлексы; реакция на Ni. Необходимы хим. анализ и дебаграмма
Корки, землистые выделения, прожилки аморфного и скрытокристаллического строения. Под бинокляром	Малахит, азурит, опал, лимонит. Замещает минералы меди	3,35 (10) 1,810 (8) 1,373 (8)	Голубоватые внутренние рефлексы; реакция на Cu, парагенезис
Оолиты, землистые массы аморфного концентрически-зонального и радиально-лучистого строения, чешуйчатые агрегаты. Под бинокляром	Сидерит, гётит, гидрогётит, гидрогематит	Тюрингит 6,8 (10) 3,48 (10) 1,552 (10) Шамозит 6,93 (10) 3,59 (9) 4,63 (7)	Реакция на Fe, дебаграмма. Необходимо детальное изучение под микроскопом в проходящем свете
Тонкозернистый, волоконистый, пластинчатый. Прожилки, гнезда, пласты	Малахит, кальцит, ангидрит	4,29 (10) 2,87 (7) 3,06 (6)	Необходимо изучение в прозрачных шлифах

R < шеелита, анизотропные

Призматические кристаллы, аллотриоморфнозернистые агрегаты. Под бинокляром	Зона окисления полиметаллических месторождений, расположенных близ ультраосновных пород. Замещает минералы свинца	3,258 (10) 1,965 (9) 1,846 (9)	Красновато-оранжевые внутренние рефлексы; травление; реакция на Pb, Cr; парагенезис
Агрегаты аморфного и волоконистого строения. Замещает никелин, хлонтант. Под бинокляром	Зона окисления в месторождениях с арсенидами никеля	3,19 (10) 2,998 (9) 1,557 (9)	Зеленые внутренние рефлексы; травление; реакция на Ni и As; парагенезис
Корки, сталактиты аморфного, волоконистого и радиально-лучистого строения. Под бинокляром	Мелантерит, брошантит, гипс и др.	5,40 (10) 4,67 (10) 3,96 (10) 3,69 (10)	Голубые внутренние рефлексы; травление; реакция на Cu; парагенезис

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпе- чатка (1); поведение при полировании, относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
74 Аурихальцит (ZnCu) ₂ [(OH) ₂ ·CO ₃] ₂ ; CO ₂ 16,1; ZnO 53,2; CuO 28,8; H ₂ O 9,9; ромбич.	1) 6—7 (Вл) 2) Очень слабое 3) Темно-серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен 2) Бесцвет- ные, голу- бые (В)	1) 2—3,5 2) Плохое	Отпечаток на Zn и Cu. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 5 мин. Проявитель: HgCl ₂ + +KCNs (раствор). Пятно фиолетово-си- него цвета
75 Гидроцинкит Zn ₈ [(OH) ₂ CO ₃] ₂ ; ZnO 74,12; CO ₂ 16,03; H ₂ O 9,85; монокл., скрытокристаллическая	1) 5—7 (Вл) 2) Слабое 3) Темно-серый	1) Слабо анизотро- пен, изо- тропен 2) Бесцвет- ные, буро- ватые (В)	1) 2—2,5 2) Хорошее	Реакция на Zn. Растворитель: HNO ₃ (1:1)+Cu(NO ₃) ₂ . Эксп. 1 мин. Проявитель: HgCl ₂ +KCNs (раствор). Пятно фиолетово-синего цвета
76 Мелантерит FeSO ₄ ·7H ₂ O; FeO 25,9; SO ₃ 28,8; примеси: Cu (до 18,8%); Zn (до 8,9%); Mg (до 7,45%); Mn (до 1,9%); монокл.	1) 4 2) Нет 3) Темно-серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен 2) Бесцвет- ные, свет- ло-зеленые (В)	1) 2—3,5 2) Хорошее	Реакция на Fe. Растворитель: вода. Эксп. 5 мин. Проявитель: K ₃ Fe(CN) ₆ . На фильтр. бумаге пятно синего цвета
77 Пизанит (Fe, Cu) ₂ SO ₄ ; SO ₂ 29,9; FeO 10,98; CuO 15,56; H ₂ O 43,56; монокл.	1) 4 2) Слабое 3) Темно-серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен 2) Свет- ло-зеленые (В)	1) 2	Реакция на Cu серо-зеленого цвета. Растворитель: аммиак. Эксп. 1 мин. Проявитель: рубановая кислота. Пятно серо-зеленого цвета. Отпечаток на Fe, см. кировит
78 Кировит (Fe, Mg) ₂ SO ₄ ·7H ₂ O; монокл.	1) 4 2) Слабое 3) Темно-серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен 2) Блед- но-голубые (В)	1) 2	Отпечаток на Fe синего цвета. Растворитель: вода. Эксп. 5 мин. Проявитель: K ₃ Fe(CN) ₆
79 Моренозит NiSO ₄ ·7H ₂ O; NiO 26,6; SO ₃ 28,5; H ₂ O 44,9; примеси: Mg (7,65%); ромбич.	1) 4 2) Нет 3) Темно-серый	1) Слабо анизотро- пен, изо- тропен 2) Бесцвет- ные, зеле- новатые (В)	1) 2—2,5	Отпечаток на Ni малинового цвета. Растворитель: аммиак. Эксп. 1 мин. Проявитель: диметилглиоксим
80 Эритрин Co ₃ [AsO ₄] ₂ ·8H ₂ O; As ₂ O ₃ 38,4; CoO 37,5; H ₂ O 24,1; примеси: Ca (до 9,3%); Zn (до 8,5%); Mg (до 6,2%); Fe (до 4%); монокл.	1) 6—10 2) Слабое 3) Темно-серый	1) Изотро- пен, слабо анизотро- пен 2) Розовые (В)	1) 1,5—2,5 2) Хорошее. h < ко- бальтина	Прямой отпечаток на Со розового цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1—2 мин. Реакция на As на шлифе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин. Проявитель: (NH ₄) ₂ MoO ₄ , порошок в избытке. Осадок лимонного цвета
81 Биберит CoSO ₄ ·7H ₂ O; CoO 26,6; SO ₃ 28,5; H ₂ O 44,9; примеси: Mg (до 3,9%); скрытокристаллическая	1) 4 3) Темно-серый	1) Слабо анизотро- пен, изо- тропен 2) Розово- красные, розовые, розова- то-белые (В)	1) 2	

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Корки, сталактиты аморфного, волокнистого и радиально-лучистого строения. Под бинокляром	Малахит, азурит, куприт, смитсонит, гидроцинкит, гётит	—	Травление; реакция на Cu и Zn
Корки, землистые массы, редко сталактиты скрытокристаллического и волокнистого строения. Стр. травление: HNO ₃ (1:40) в течение 15—30 с. Под бинокляром	Смитсонит, кальцит, церуссит, аурихальцит	a ₀ =13,48 b ₀ =6,32 c ₀ =5,37	Травление; реакция на Zn
Корки, почки, сталактиты аморфного и волокнистого строения. Под бинокляром	Халькантит, гипс, реликты марказита, пирита и других сульфидов	4,90 (10) 3,78 (7) 3,23 (4)	Светло-зеленые внутренние рефлексы; травление; реакция на Fe; парагенезис. Необходим химический анализ и дебаграмма
	Мелантерит, халькантит, гипс, реликты марказита, пирита и других сульфидов	4,90 (10) 3,78 (7) 3,23 (4)	Светло-зеленые внутренние рефлексы, травление, отпечаток на Fe и Cu; парагенезис. Необходим химический анализ
		4,90 (10) 3,78 (7) 3,23 (4)	Бледно-голубые внутренние рефлексы; травление; отпечаток на железо; реакция на Mg; парагенезис. Необходим химический анализ
Корки, сталактиты волокнистого и радиально-лучистого строения. Под бинокляром	Зона окисления сульфидов никеля	4,90 (10) 5,3 (6) 2,85 (4)	Зеленоватые внутренние рефлексы; отпечаток на никель; парагенезис
Агрегаты аморфного волокнистого и радиально-лучистого строения. Под бинокляром	Зона окисления в месторождениях с кобальтином и смальтином	3,010 (10) 3,23 (9) 2,729 (8)	Розовые внутренние рефлексы; парагенезис
Корки, сталактиты, землистые массы аморфного и радиально-лучистого строения. Под бинокляром	Зона окисления сульфидов кобальта	a ₀ =14,13 b ₀ =6,55 c ₀ =11,00	Розово-красные внутренние рефлексы; травление; отпечаток на кобальт; парагенезис

ОПИС АТЕЛЕНАЯ ТАБЛИЦА II

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); Цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1) Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Говедение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
--	---	---	---	-------------------------

Подгруппа 11. Твердость средняя,

82 Самородная медь Cu 97,20—98,3; примеси: Fe, As, Ag, Au, Pb и др.; кубич.	1) 83 (Вл, Р); 81,2 (Э); 93 (Б) 3) Яркий розовый	1) Изо-тропен	1) 3; 111—143; 126 (Л); 48—143 (Б, Т); с., вып. 2) Хорошее. h > халькопирита и {халькопирита, < куприта и большинства окислов железа	Реакция на Cu. I. Растворитель: NH ₄ OH. Эксп. 2 мин. Проявитель: рубеоановая кислота. Пятно серо-зеленого цвета. II. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно розово-коричневого цвета
83 Домейкит Cu ₂ As; Cu 71,79; As 28,21; примеси; Sb (до 3%); α-домейкит; кубич., β-домейкит; тригон.	1) 56 (Вл); 55,7 (Мозес) 3) α — светло-белый с желтым оттенком (кремово-белый); β — светло-белый с голубоватым оттенком	α-домейкит изотропен; β-домейкит отчетливо анизотропен	1) 3—3,5; 206—250 (Б, Т) 2) Хорошее, царапины. h > халькопирита, < брейтгаунгита	Реакция на As. Минерал + HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин + (NH ₄) ₂ MoO ₄ , порошок, избытке. Осадок лимонно-желтого цвета. Реакция на Cu, см. самородная медь
84 Платина Pt; примесь Pd 3—21; кубич. Поликсен (Pt, Fe); кубич.	1) 71 (Вл); 73 (Р) 3) Яркий белый — эталон	1) Изо-тропен	1) 4—4,5, 114—146; 130 (Л); 125—127; 126 (Б, Т); с., вогн. 2) Хорошее. h > сфалерита < пирротина, < хромита	Химический анализ на Pt
85 Самородное железо Fe 99,0; примеси: Ni, C, Co, Si и др.: кубич.	1) 63 (Вл) 3) Белый с кремовым оттенком	1) Изо-тропен	1) 4; 132—141 (Л) 2) Хорошее. h < магнетита, когенита	Реакция на Fe. Растворитель на шлифе: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета
86 Хлоантит (Ni, Co) As ₃₋₄ ; Ni 28,13; As 71; 87 примеси: Co, Fe, Cu, Ag, Pb; кубич.	1) 62 (Вл); 60 (Э); 57,5 (Р) 3) Белый с желтоватым, голубоватым оттенком	То же	1) 5—5,5; 268—402 (Л) 2) Отличное. h немного < днарсендов группы сафлорита > никелину	Реакция на Ni и Co. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1—2 мин. Проявитель на Ni: рубеоановая кислота + NH ₄ OH; окрашивание фиолетового цвета. Проявитель на Co: α-нитрозо-β-нафтол + NH ₄ OH. Окрашивание коричнево-розового цвета

Подгруппа 12. Твердость средняя,

88 Никелин Ni As; Ni 43,9; As 56,1 примеси: Sb (до 6%); гексагон	1) 69—53 (Вл); 48 (Э, Р) 2) Сильное 3) Кремово-розовый (желтовато-розовый)	1) Сильно анизотропен (с цветовым эффектом от розовато-желтого до зеленоватого); прямое угасание	1) 5—5,5; 412—489; 450 (Л); 328—455; 336 (Б, Т). Аниз., изотр. сечения. 2) Отличное. h > серебра, дискразита, > халькопирита ~ брейтгаунгиту, < маурхериту, < смальтина, сафлорита, < леллингита, арсенопирита и пирита	Отпечаток на Ni с диметилглиоксимом розово-красного цвета, с рубеоановой кислотой — фиолетового цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1 мин. Проявитель: диметилглиоксим + NH ₄ OH. Проявитель: рубеоановая кислота + NH ₄ OH. Реакция на As, см. сафлорит
---	--	--	--	--

МИНЕРАЛЫ СРЕДНЕЙ ТВЕРДОСТИ

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаег-раммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
<i>R</i> > пирита, изотропные			
Агрегаты аллотриоморфных зерен; часто зерна в виде скелетных форм. Полисинтетические двойники по (111). Зональное строение. Стр. травление: $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$ (30%-ная) Эксп. 30 с	В гидротермальных м-ниях: цеолиты, пренит, хлорит. В зоне окисления: гипс, халькозин, борнит, куприт, малахит, азурит, гётит и др. Замещает халькозин и куприт	1,276 (10) 2,085 (9) 1,806 (8)	Высокое отражение; цвет; травление; реакция на Си; парагенезис
Почковидные или гроздьевидные агрегаты скрытокристаллического или граубластического строения	С альгодонитом и витненитом образует графические структуры; арсениды никеля и кобальта, медь, серебро, цеолиты. Замещается витненитом, халькозинитом	β -2,050 (10) 2,002 (10) 1,174 (10) α -2,046 (10) 1,219 (10) 3,035 (8)	Парагенезис. Необходима дебаеграмма
Аллотриоморфнозернистые агрегаты, реже радиально-лучистые. Иногда мелкие кристаллы кубического облика. Двойники, зональное строение	Хромшпинелиды, магнетит, ильменит, пирротин, пентландит, халькопирит и др. Содержит продукты распада иридия и осмия	1,180 (10) 2,27 (10) 1,956 (9)	От серебра отличается твердостью и травлением, от железа — травлением. Поликсен магнетит
Каплевидные, проволокообразные выделения и вкрапленность мелких зерен. Пластинчатые двойники в зернах	Графит, пирротин, магнетит, хромит, когенит, троилит	α -Железо 1,168 (4) 2,02 (9) 1,430 (7)	От серебра, висмута и сурьмы, домейкита и дискразита отличается магнитностью и реакцией на Fe, от полликсена — травлением. Сильно магнитен
Изометричные зерна, часто зонального строения, реже агрегаты аллотриоморфных зерен	Смальтин, скуттерудит, раммельсбергит, сафлорит, никелин и др. Замещается аннабергитом, эритрином	2,61 (10) 1,845 (10) 1,616 (10) (Бадалов, Приходько, 1956)	Зональное строение зерен; реакция на Ni. В отраженном свете не отличим от смальтина. Необходим химический анализ
<i>R</i> > пирита, анизотропные			
Почковидные, концентрически-зональные, радиально-лучистые агрегаты, часто зерна с зональным строением. Решетчатые двойники	Хлоантит, раммельсбергит, иногда висмут, серебро, брейтгауптит, маухерит, сафлорит, золото. Замещается маухеритом, аннабергитом. Замещает маухерит	2,627 (10) 1,937 (9) 1,788 (8)	Розовый цвет; сильное двуотражение; сильная анизотропия; травление; реакция на Ni и As

№ п/п Минерал, химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
89 Мелонит NiTe ₂ ; Ni 18,70; Te 81,30; тригон.	1) 60 (С): 71 (Вл) 2) Слабое 3) Светло-розовый (розово-белый)	1) Отчетливо анизотропен (цветовой эффект); прямое угасание	1) 1—1,5—4; 141—220; 161 (Л) 2) Посредственное, хрупкий. $h >$ халькопириту, \approx золота, $<$ монтбрейнта, \sim теллурувисмутиту, $<$ фробергита	Реакция на Те. Растворитель: H ₂ SO ₄ конц. с подогреванием. Эксп. 3—5 мин. Раствор окрашивается в фиолетовый цвет. Реакция на Ni, см. никелин
90 Дискразит Ag ₂ Sb; Ag 72,66; Sb 27,34; ромбич., псевдотекс., кубич.	1) 66 (Вл, Э, Р) 2) Слабое 3) Белый (желтовато-белый), появляется побелость через несколько дней	1) Слабо анизотропен	1) 3,5—4; 152—178 (Я, М) 2) Хороший; хрупкий; царапн. $h >$ галенита, немного $>$ сурьмы, серебра, немного $<$ мышьяка, халькопирита	Реакция на Ag на шлифе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Остаток реактива снять фильтр. бумажой. Проявитель: K ₂ CrO ₄ . Осадок оранжево-красного цвета. Реакция на Sb, см. тетраэдрит
91 Калаверит AuTe ₂ ; Au 43,59; Te 56,41; примеси: Ag, Fe, Sb, монокл., псевдоромбич.	1) 63 (Вл); 56 (Э, Р) 2) Слабое 3) Светло-белый с желтоватым оттенком	1) Отчетливо анизотропен	1) 2,5—3; 213—237; 223 (Л) 2) Хорошее. h немного $>$ пиритрита, сильнее анита, \sim галениту, $<$ халькопирита, блеклой руды	Реакция на Те, см. мелонит
92 Саффорит (Co, Fe.) As ₂ ; Co 28,23; As 71,77; примеси: Ni, S, Bi, Cu, Fe до 18% ромбич.	1) 62—54 (Вл); 58 (Р) 2) Слабое 3) Белый с голубоватым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект)	1) 4,5—5; 430—751 (Л) 2) Отличное. $h >$ куттерудитасмалти; $h >$ никелину, $<$ дбл.-чиггита, $<$ арсенипирита, кобальтина, глаукодо-та	Отпечаток на Со. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: α -нитро-ро-в-нафтол + NH ₄ OH. Окрашивание коричнево-розового цвета. Проявитель: K ₂ Fe(CN) ₆ . Окрашивание коричнево-бу-рого цвета
93 Самородный мышьяк As; As 81—98; Sb 1,7—9,2; примеси: Fe (до 2%), Ni (до 4,64%), следы Ag, Bi и др. тригон.	1) 58 (Вл); 50,5 (Б); 62 (Э, Р) 2) Слабое 3) Белый (серо-бу-рый в старых шли-фах)	1) Отчетливо анизотропен	1) 3,5; 93—137; 123 (Л); 57—69; 63 (Б, Т); с. 2) Отличное. $h >$ вис-мута, $>$ серебра и сурьмы, немного $<$ дискразита.	Прямой отпечаток на As желтого цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. с небольшим количеством (NH ₄) ₂ MoO ₄ . Эксп. 2 мин

Подгруппа 13. Твердость средняя,

94 Пентландит (Fe, Ni) ₉ S ₈ ; Fe 32,55; Ni 34,22, S 33,23; примеси: Со (до 15%), Se, Te, Ag; кубич.	1) 53 (Вл); 51 (Э, Р) 3) Светло-желтый	1) Изо-тропен	1) 3,5—4; 195—223; 209 (Л) 202—230; 215 (Б, Т) с., вогн. 2) Отличное: $h >$ халькопирита, немно-го $<$ пирротина	Реакция на Ni. Растворитель HNO ₃ конц. Эксп. 3 мин. Проявитель: (NH ₄)OH + рубеновая кисло-та. Окрашивание фио-летового цвета
--	---	---------------	---	---

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Пластинчатые и аллотриоморфные мелкие зерна	Петцит, гессит, пирит, галенит, алтаит и другие теллуриды	2,81 (10) 1,544 (6) 2,05 (5)	Цвет; высокое отражение; слабое двуотражение; реакция на Ni и Te; парагенезис
Аллотриоморфнозернистые мелкие агрегаты, веретенообразные пластинки в серебряно-сурьмяных минералах. Образует твердые растворы с сурьмой и серебром	Сурьма, самородное селенит и его сульфосоли, антимонит и др.	2,28 (10) 2,585 (6) 2,40 (6)	От серебра отличается анизотропностью; от висмута — большей твердостью и однородным строением зерен; от сурьмы — побежалостью
Сплошные агрегаты аллотриоморфных и мелких призматических кристаллов. Стр. травление: HNO_3 (1:1), выявляет очень тонкую спайность	Сильванит и другие теллуриды золота, серебра и висмута; гессит, алтаит, золото. Замещается золотом	3,01 (10) 2,09 (8) 2,19 (4)	От сильванита отличается более высокой твердостью и более слабой анизотропией, от креннерита — твердостью. Необходимы химический анализ и дебаеграмма
Идиоморфные кристаллы с двойниковым и зональным строением. Радиально-лучистые и скрытокристаллические агрегаты, корки	Хлоантит, раммельсбергит, смальтин, никелин, а также серебро, висмут и др. Замещает смальтин. Превращается в эритрин, пирит, арсенилит, затем гетерогенит, асболан	2,578 (10) 1,859 (10) 1,639 (10)	От сходных бесцветных сульфурарсенидов и сульфопиритов отличается более низкой твердостью и реакцией на Co, Fe. Характерны звездочки-тройники
Аллотриоморфнозернистые концентрически-скорлуповатые агрегаты, пластинчатые двойники в зернах и зональное строение. Стр. травление: H_2O_2	Сульфиды никеля, кобальта и висмута. Часто замещает геокронит	2,74 (8) 1,867 (6) 1,53 (5)	В полированных шлифах быстро тускнеет, чернеет на воздухе; травится H_2O_2 ; реакция на As

$R >$ галенита, $R <$ пирита, изотропные

Аллотриоморфные, идиоморфные зерна. Продукт распада в пирротине в виде пластинок и пламенивидных выделений. Спайность по (111) совершенная. Треугольники выкрашивания	Пирротин, халькопирит, кубанит, паллеринит, пирит, магнетит и др. Замещается виоларитом, бравоитом, марказитом, линценитом	1,778 (10) 3,03 (9) 1,95 (9)	Парагенезис. От пирротина отличается более высоким отражением, цветом, изотропностью, спайностью, треугольниками выкрашивания
---	--	------------------------------------	---

№ п/п Минерал, химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² , форма отпечатка (1). Поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
95 Полидимит Ni_2S_4 ; Ni 57,86; S 42,14; примеси: Fe, Co; кубич.	1,46 (Вл) 3) Розовато-коричнево-желтый	То же	1) 4,5—5,5 362—449; 408 (Л) 2) Хорошее. $h >$ халькопирита, сфалерита, $>$ пирротину, $<$ арсенопирита, \sim минералам группы линнеита	
96 Карролит Co_2CuS_4 ; Co 38,00; Cu 20,52; S 41,48; примеси: Ni (до 6%), Fe; кубич.	1) 46 (Вл) 3) Кремво-белый до розоватого	1) Изотропен	1) 5,5; 351—566; 463 (Б, Т); 2) Хорошее. $h \sim$ минералам группы линнеита	Реакция на Co и Cu. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 2—5 мин. Проявитель на Co: α -нитрозо- β -нафтол + NH_4OH . Окрашивание красновато-коричневого цвета. Проявитель на Cu: рубановая кислота + NH_4OH . Окрашивание серо-зеленого цвета

Подгруппа 14. Твердость средняя.

97 Миллерит NiS ; Ni 64,67; S 35,33; примеси: Co, Fe, Cu; тригон.	1) 54 (Вл); 53 (Э, Р) 2) Очень слабое 3) Светло-желтый	1) Отчетливо анизотропен	1) 3—3,5; 225—280 (Б, Т) } удлинению, с. L } 2) Хорошее, выкрашивается. $h <$ сфалерита, линнеита $>$ халькопирита	Реакция на Ni. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 3 мин. Проявитель: NH_4OH + рубановая кислота. Окрашивание от фиолетового до снежного цвета
98 Сильванит (Au, Ag) Te; Au 24,19; Ag 13,22; Te 62,59; монокл.	1) 54 (Б); 59—49 (Бл); 56— (Э) 2) Сильное (кремво-белое до кремво-коричневого) 3) Белый со слабым желтым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект)	1) 2; 91—149; 137 (Л); 102—125; 110 (Б, Т); с. 2) Хорошее. $h >$ гессита, аргентита, алтанта, теллуридов, висмута, немного $>$ наггита, $<$ пираргирита, $<$ сфалерита	Реакция на Te на стеклянной пластинке. Растворитель: крупинки минерала в H_2SO_4 с подогреванием. Эксп. 3—5 мин. Раствор окрашивается в фиолетовый цвет
99 Висмутин Bi_2S_3 ; Bi 81,3; S 18,7; примеси: Sb (до 8,12%); Se (до 9%); ромбич.	1) 48—42 (Вл); 48 (Э) 2) Ясное на границах зерен 3) Белый с желтоватым оттенком	1) Сильно анизотропен, прямое угасание	1) 2; 118—172; 153 (Л); 92—119; 107 (Б, Т); с. 2) Хорошее. $h >$ халькопирита, $>$ самородного висмута $>$ галениту	Реакция на Bi. Растворитель: HCl (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: тиомочевина. Отпечаток желтого цвета

Подгруппа 15. Твердость средняя.

100 Виоларит $FeNi_2S_4$; Fe 18,52; Ni 39,94; S 42,54; кубич.	1) 38 (Р); равна и выше пирротина 42,1 (Кэмерон) 3) Серовато-белый с фиолетовым оттенком (лучше наблюдается в ниммерсии)	1) Изотропен, иногда слабо анизотропен	1) 4—5; 458 (Л) 2) Хорошее. $h >$ халькопирита, сфалерита, $>$ пирротина, немного $<$ бравоита, пирротина, $<$ арсенопирита	Реакция на Ni. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 3 мин. Проявитель: NH_4OH + диметилглиоксим. Пятно малинового цвета
---	--	--	---	--

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Аллотриоморфные зерна, реже встречается в виде октаэдрических кристаллов и натечных образований. Стр. травление HNO_3 выявляет спайность	Линнеит, миллерит, вюларит, халькопирит, пирротин и др.	1,673 (9) 2,85 (8) 2,365 (8)	Розовый оттенок. Замещает миллерит и пентландит. От зигенита отличается более низкой микротвердостью
Мелкозернистые агрегаты изометрических зерен. Образуется структуры распада с миллеритом и халькопиритом	Линнеит, зигенит, сидерит, пирит, халькопирит. Замещается эритрином, птитцитом	1,676 (10) 2,875 (9) 1,827 (9)	Очень похож на линнеит, зигенит. Реакция на Cu и Co ; парагенезис. Необходим химический анализ и дебаграмма

 $R >$ галенита, $R <$ пирита, анизотропные

Агрегаты радиально-лучистых и игольчатых кристаллов. Часто в виде пластинок в линнеите. Спайность по (1011) и (0112) — совершенная. Часто двойники	Пентландит, маухерит, хлоантит, сафлорит, смальтин, раммельсбергит и др. Часто минерал зоны окисления	1,876 (10) 1,117 (10) 2,792 (10)	Цвет; игольчатое строение; анизотропность; реакция на Ni
Скелетные кристаллы, дендритообразные агрегаты, полисинтетические двойники в зернах	Золото, калаверит, теллуросмугит, висмутин и др. в золото-серебряных рудах. Замещается золотом	3,04 (10) 2,14 (5) 2,25 (5)	От других теллуридов золота отличается сильной анизотропией, двуотражением, микротвердостью, полисинтетическим двойникованием
Удлиненные листоватые кристаллы, аллотриоморфные выделения. Трещинки спайности по (010)	Касситерит, вольфрамит, арсенопирит, пирротин, молибденит, халькопирит и др. Замещается висмутом, бисмутитом, халькозинном	3,50 (10) 3,08 (9) 2,79 (8)	Кремевый оттенок цвета; спайность по (010); положительная реакция на Bi . Отрицательной реакцией с KOH отличается от антимонита

 $R >$ сфалерита, $R <$ галенита, изотропные

Тонкие прожилки и каемки, псевдоморфозы по пентландиту, миллериту. В сростаниях с бравонтом образует сажистые массы. Спайность совершенная	Пентландит, миллерит, бравонт, халькопирит. Замещает пентландит	2,86 (10) 1,678 (10) 2,37 (8)	От пирротина и бравонта отличается фиолетовым оттенком цвета и микротвердостью
--	---	-------------------------------------	--

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-при- меси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1). Внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма от- печатка (1); поведе- ние при полировании относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
101 Шпатцит (Cu, Hg), SbS ₂ ; Hg-содержащий тет- раэдрит; кубич.	1) 30 (Вл); 28 (Э) 3) Серо-белый с кремовым оттенком	1) Изо- тропен	1) 3—4 2) Хорошее. $h >$ гал- ленита, антимонита, сульфосея серебра; немного $>$ бурнонита и халькопирита, $<$ сфа- лерита и пирротина	Спектральный или хи- мический анализ на Hg. Реакция на Cu, см. теннантит
102 Тетраэдрит Cu ₂ SbS ₄ ; Cu 45,77; Sb 29,22; S 25,01; примеси: As, Ag, Zn, Fe, Hg, Bi, Sn; кубич.	1) 30 (Вл); 28 (Э); 29,4 (Б) 3) Серо-белый с оливково-коричнева- тым оттенком	1) Изо- тропен 2) Иногда коричне- во-крас- ные реф- лексы (МИ)	1) 3—4; 328—367; 351 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее, хруп- кий, выкрашивается. $h >$ галенита, \sim халь- копириту, $<$ сфалери- та	Реакция на Sb на шлифе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин. Избыток кис- лоты снять. Раство- ритель: HCl (1:1) на травленое место. Проявитель: KI+ +CsCl (порошок). Осадок красного цве- та. Реакция на Cu, см. теннантит
103 Фрейбергит (Cu, Ag), SbS ₂ ; Cu 45,77; Ag до 17; Sb 29,22; S 26,01; кубич.	1) 30 (Вл), немного светлее тетраэдрита 3) Серо-белый с зе- леновато-желто-ко- ричневым оттенком	То же	1) 3—4; 317—375; 345 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее, хрупкий, выкрашивается. h варьирует \approx гален- нита, $>$ сульфосея серебра, $<$ сфалерита	Реакция на Ag, про- веряется спектраль- ным анализом
104 Теннантит Cu ₂ AsS ₄ ; Cu 51,57; As 20,26 S 28,17; примеси: Sb, Ag, Zn, Fe, Hg, Bi, Sn; кубич.	1) 28 (Вл, Э) 3) Серовато-белый с голубовато-зеленова- тым оттенком	1) Изо- тропен 2) Ко- ричне- во-крас- ные (МИ)	1) 3,5—4,5; 308—397; 339 (Л); 320—361; 338 (Б, Т); с. 2) Хорошее, хруп- кий, выкрашивается. $h >$ галенита, \sim халь- копириту, $<$ сфалери- та	Отпечаток на Cu се- ро-зеленого цвета. Растворитель: пары царской водки до по- тускнения. Эксп. 3—5 мин. Раствори- тель на фотобумаге: NH ₄ OH. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: ру- беановая кислота. Ре- акция на As с (NH ₄) ₂ MoO ₄ на шлифе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин. Осадок лимон- ного цвета
105 Сульванит Cu ₂ VS ₄ ; Cu 51,5; V 13,8; S 34,7; примеси: As, Zn (до 2%), Sn, Fe; кубич.	1) 35 (Вл); 28 (Р) 3) Серо-белый с ро- зовато-желтоватым оттенком, желтова- то-белый	1) Изо- тропен	1) 3,5; 157—161; 159 (Л) 2) Отличное. $h >$ халь- копирита	Отпечаток на Cu се- ро-зеленого цвета, на V — синего цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Проявитель на Cu: рубановая кислота + NH ₄ OH; на V — уксусноокислый бен- зидин
106 Лазаревичит 106а Арсеносульванит Cu ₂ AsS ₄ ; Cu \sim 50; Fe \sim 0,5; As \sim 11; S \sim 36 примеси: Sb, V, Ge, Sn, P; кубич	1) 36 (Вс) 2) Нет 3) Желтовато-серый со слабым коричне- ватым оттенком	То же	1) 3,5; 412—488 2) Хорошее. $h \sim$ \sim энаргиту	См. сульванит, энар- гит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Аллотриоморфнозернистые агрегаты	Галенит, киноварь, сидерит, доломит. Замещается киноварью	2,96 (10) 1,813 (10) 1,547 (8)	Похож на тетраэдрит, отличается примесью ртути
Агрегаты аллотриоморфных, редко изометричных зерен. Зональное строение после травления	Халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, теннантит и др. Замещается халькозином, ковеллином, малахитом, биндгеймитом и др.	3,00 (10) 1,839 (10) 1,568 (8)	Изотропен; коричневатый оттенок цвета; очень слабые внутренние рефлексы; реакция на Sb
Аллотриоморфные или изометричные зерна	Образует мелкие включения в галените, борните и полибазите. Ассоциирует с теннантитом, тетраэдритом, аргентитом, серебром; замещается аргентитом, серебром, халькозином и др.	3,00 (10) 1,839 (10) 1,568 (8)	От тетраэдрита отличается травлением и примесью серебра. Необходим химический и спектральный анализы
Агрегаты аллотриоморфнозернистой структуры; реже изометричные кристаллы. Зональное строение выявляется после травления	Халькопирит, энаргит, другие блеклые руды, сфалерит, борнит, галенит. Легко окисляется с образованием ковеллина, малахита, азурита, скородита и др. Замещает энаргит	2,94 (10) 1,803 (10) 1,537 (8)	От станина и бурнонита отличается изотропностью; от тетраэдрита — голубовато-зеленоватым оттенком, более яркими рефлексами красного цвета. Часто замещает энаргит
Кубические, реже игольчатые кристаллы, сплошные агрегаты. Спайность по (110) совершенная. Характерны треугольники выкрашивания, как у галенита	Пирит, гематит, халькопирит, борнит, галенит, тетраэдрит, ишелит, пирротин, висмутин и др. Замещается халькозином, ковеллином, малахитом и др.	1,910 (10) 3,39 (8) 3,11 (8)	Треугольники выкрашивания и спайность по трем направлениям; реакция на Cu и V
Изометричные треугольные, реже призматические зерна. Спайность отсутствует	Энаргит, люцит, теннантит, борнит, пирит, сфалерит	3,04 (10) 1,867 (10) 1,593 (5) 1,075 (3) по Афанасьевой 3,03 (9) 1,859 (10) 1,584 (9) 1,074 (9)	Цвет; парагенезис. От сульванита и арсеносульванита отличается отсутствием ванадия и спайности

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-при- меси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2) цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1). Внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма от- печатка (1); поведе- ние при полировании, относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
107 Борнит Cu ₅ FeS ₄ ; Cu 63,3; Fe 11,2; S 25,5; примеси: Ag, Bi, In, Ga, Pb (до 7%), Ge, Sb, As; 228° C; тетрагон, кубич.	1) 23 (P); 24 (Вл); 18,5 (Э) 3) Розовый, в све- жей полировке; ко- ричневато-фиолето- вый в старых шли- фах	1) Изо- тропен, слабо анизо- тропен в свежем шлифе	1) 3); 100—124; 112 (Л); 97—105; 103 (Б, Т) с., вогн. 2) Хорошее. h > га- ленита, халькозина, немного < халькопи- рита	Отпечаток на Cu се- ро-зеленого цвета Растворитель: NH ₄ OH (25%). Эксп. 1 мин. Проявитель: рубеиновая кислота. Реакция на Fe. Рас- творитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: K ₃ Fe (CN) ₆ . Пятно си- него цвета.
108 Германит Cu ₃ (FeGe)S ₄ ; Fe 4,56—8,39; Ge 8,70—10,96; Cu 39,44—45,40; S 31,27—31,44 примеси: Zn (до 4%), As (до 5%), Ga (до 1,99%); кубич.	1) 22 (P) 3) Розовый, серо- розовый с фиоле- товым оттенком, кремово-розовый	1) Изо- тропен	1) 3—4; 412—458; 427 (Л) 2) Очень хорошее. h > галенита, немно- го < теннантита, < сфа- лерита	Отпечаток на Cu и Fe, см. борнит. Гер- манит определяется спектральным анали- зом
109 Алабадин MnS; Mn 63,2, S 36,8; примеси: Fe, Mg (2—3%); кубич.	1) 24 (Вл); 26 (Э) 3) Серовато-белый	1) Изо- тропен 2) Тем- но-зеле- ные, жел- товатые (МИ)	1) 3,5—4; 240—266, 251 (Б, Т); с., вогн. 2) Хорошее. h < сфа- лерита	Реакция на Mn. Рас- творитель: HNO ₃ . Эксп. 2 мин. И.р. + + фильтр. бумага. Проявитель: K ₃ Fe (CN) ₆ . Пятно грязно-коричневого цвета. Промыть в во- де
110 Гауерит MnS ₂ ; Mn 46,2; S 53,8; примеси: Fe (до 1,3%); кубич.	1) 23 (Вл) 3) Серо-белый со слабо коричневым оттенком	1) Изо- тропен 2) Густо- красно- красные (МИ)	1) 4 2) Хорошее. h нет данных	Прямой отпечаток на S на бромосеребряной бумаге темно-корич- нево-бурого цвета. Растворитель: HCl (1:1) + эл. ток. Эксп. 20 с. Реакция на Mn, см. алабадин
111 Маггемит Fe ₂ O ₃ ; Fe 69,94; O 30,06; кубич.	1) 25 (Б); 18 (P); 22 (Вл) 3) Серо-белый с го- лубоватым оттенком	1) Изо- тропен, слабо ани- зотропен 2) Изред- ка темно- коричне- вато-крас- ные (МИ)	1) 5; 357—387; 378 (Л); 894—988; 946 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h > маг- нетиту, < гематита	Реакция на Fe. Рас- творитель: HCl конц. Эксп. 5 мин. И.р. + + фильтр. бумага. Проявитель: K ₃ Fe (CN) ₆ . Пятно синего цвета
112 Гринokit β-CdS; Cd 77,81; S 22,18; примеси: Zn, In; гексагон. 112a Хоулит α-CdS; кубич.	1) 18,5 (P); 19 (Вл) 3) Серовато-белый с голубоватым оттен- ком. В иммерсии с зеленоватым оттен- ком	1) Изо- тропен, слабо ани- зотропен 2) Бес- цветные, лимонно- желтые (красно- коричне- вые) (В)	1) 3,5; 52—91 (Л) 2) Хорошее. h < сфа- лерита	Реакция на Cd. Рас- творитель: HNO ₃ конц. Эксп. 3 мин. Снять избыток кислоты. Растворитель: уксу- сная кислота. Фильтр. бумага + и.р. Про- явитель: дифенилкарба- зид. Пятно сине-фио- летового цвета

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Сплошные агрегаты, прожилки, каемки. Форма зерен аллотриоморфная. Часто спайность и двойники. Пластинчатые, решетчатые структуры распада с халькопиритом, халькозном тетраэдритом	Гипогенные: борнит, халькопирит, халькозин, реньерит, блеклая руда, энаргит; гипергенные: халькозин, ковеллин, гётит	1,924 (10) 3,304 (8) 3,165 (8)	Розовый цвет; низкая микротвердость; травление; реакции на Cu и Fe
Мелкие зерна образуют тесные сростания с теннантитом, энаргитом, борнитом. Образует распад твердого раствора с реньеритом. Стр. травление HNO ₃ (1:2) с небольшим количеством K ₂ CrO ₇ и HCl конц.	Теннантит, реньерит, борнит; халькопирит, энаргит, люционит, галенит, сфалерит и др.	1,081 (10) 1,861 (9) 3,028 (7)	Более светло-розовый и твердый по сравнению с борнитом. Изотропен по сравнению с люционитом. Реньерит более оранжевый
Изометрические и аллотриоморфные зерна. Спайность совершенная по (100). Пластинчатые двойники, как у сфалерита	Родохрозит, галснит, сфалерит тетраэдрит, халькопирит. Замещается пирролизитом	2,603 (10) 1,843 (10) 1,165 (7)	Желтые, иногда темно-зеленые рефлексы; травление в кислотах со вскипанием; реакция на Mn
Отдельные изометричные зерна, редко сплошные агрегаты. Совершенная спайность по (100), треугольные фигуры выкрашивания. Легко травится царской водкой	Марказит, барит, пирит, гипс, кальцит. Замещается гидроокислами марганца	3,035 (10) 2,715 (7) 2,49 (7)	Редкий минерал. Реакция на S; парагенезис. В месторождениях сульфидных руд отсутствует
Оолиты, корки, каемки, тонкие прожилки. Замещает магнетит	Магнетит, лепидокрокит, гётит и гематит. Продукт гипо- и гипергенного окисления гематитовых и магнетитовых руд	2,51 (10) 1,605 (9) 1,480 (9)	Точно диагностируется только по дебаеграмме. От магнетита отличается голубоватым оттенком и внутренними рефлексами. Магнитный. Гематит — светлее, анизотропен, немагнитен
Зернистые агрегаты. Порошковатые налеты, корочки, пленки скрытокристаллического и радиально-лучистого строения	В сульфидных и полуокисленных рудах сростается со сфалеритом и вурцитом. Замещает пирит, сфалерит, франкент, канфильдит	3,167 (10) 0,9528 (10) 1,157 (9) 2,071 (8) 1,900 (8) 1,764 (8) 3,36 (10) 2,058 (8) 1,753 (6) по Трейлу, Бойлу	Отличается от сфалерита голубоватым оттенком цвета, по рельефу и микротвердостью. Реакция на Cd; парагенезис. Гринokit и хоулитен отличаются по дебаеграмме

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-при- меси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1). Внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма от- печатка (1); пове- дение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
---	---	--	---	----------------------------

Подгруппа 16а. Твердость средняя,

113 Пирротин $Fe_{1-x}S$; S 36,4, Fe 63,6; примеси: Co, Ni, Cu, изредка Mn, Zn; 136°С монокл. \rightarrow гексагон.	1) 37 (Э, Вл); 45,2—38,0 (Б) 2) Отчетливое, сла- бое 3) Кремневый с розо- вато-коричневым от- тенком (желтовато- коричневый с розо- зовым оттенком)	1) Силь- но анизо- тропен (цвето- вой эф- фект пир- ротино- вый жел- товато-се- рый до серого с красно- вато-кори- чевым от- тенком)	1) 4; 214—343; 250 (Л); 230—318; 303 (Б, Т); анизотропен } сечения; изотропен } с. 2) Хорошее. $h >$ халь- копирита, ~ никелину, пент- ландиту, < арсенипи- рита, пирита	Реакция на Fe. Рас- творитель: HNO_3 конц. Эксп. 1 мин. Проявитель: $K_2Fe(CN)_6$. Пятно синего цвета. Моно- клинный пирротин травится сильнее, чем гексагональный, в на- сыщенном растворе Cr_2O_3 в воде и в рас- творе KOH (20%-ный)
114 Троилит FeS ; Fe 63,53, S 36,47; гексагон.	1) 42 (Б) 2) Отчетливое 3) Кремневый; жел- товато-коричневый с розовым оттенком. Быстро тускнеет на воздухе	1) Сильно анизо- тропен	1) 4—4,5; 192—277; 256 (Л) 2) Хорошее. $h \sim$ пир- ротину	
115 Пирролизит MnO_2 ; Mn 63,2; O 36,8; примеси: Fe, Ba, Na, K; тетрагон.	1) 40—30 (Вл); 35 (Э); 50—55 (Р); 41,5—30,0 (Б) 2) Отчетливое 3) Белый, серо-бе- лый с коричневатом- кремовым оттенком (в кристаллических разностях), темно-се- рый в аморфных раз- ностях	1) Сильно анизо- тропные кристал- лические агрегаты (цветовые эффекты желтова- то-голу- бовато-се- рые), аморфные разности слабо ани- зотропны 2) Нет, бурые рефлексы от приме- сей гети- та (МИ)	1) 1—6,5; 161—321 (Л); 76—252 (Б, Т) ┌ } к волокнам ├ } └ } изотропного } сл. трещ. } сечения } вогн. изотропного } 2) Посредственное. h варьирует, ~ браун- иту, касситериту, > кварца	Реакция на Mn^{+4} . Прямой отпечаток си- него цвета с уксусно- кислым бензидином. Эксп. 2 мин. Травле- ние: H_2SO_4 (1:1) + + H_2O_2 (30%-ная) 1—2 капли; побуре- ние $FeCl_2$ — темно-серое пятно
116 Галеновисмутит $PbS \cdot Bi_2S_3$; Pb 27,50; Bi 55,48; S 17,02; примеси: Sb, Se (до 14%); ромбич.	1) 43 (Р) 2) Сильное с цвето- вым эффектом 3) Белый с желто- ватым оттенком	1) Сильно анизо- тропен	1) 2,5—3,5; 88—113 2) Хорошее. $h <$ халь- копирита	Реакция на Bi. Рас- творитель: HCl (1:1). Эксп. 2 мин. Проя- витель: тиомочевина. Пятно желтого цвета. Реакция на Pb, см. жемсонит
117 Бертьерит $FeS \cdot Sb_2S_3$; Fe 13,06; Sb 56,95; S 29,99; ромбич.	1) 38—27 (Вл); 35—26 (Э); 40,0—30,0 (Б) 2) Сильное с цвето- вым эффектом 3) Белый с розо- вато-коричневым отен- ком	1) Сильно анизо- тропен с цвето- вым эф- фектом	1) 2—3; 155—185; 171 (Б, Т); 168—204 (Л); сл. трещ. 2) Хорошее. $h >$ ан- тимониту, < сфалерита	Реакция на Sb. Рас- творитель: HNO_3 конц. Эксп. 3 мин. Снять избыток кисло- ты. Растворитель: HCl (1:1) на трав- ленное место. Проя- витель: $CsCl + KI$ (по- рошок). Осадок кир- пично-красного цвета. Реакция на Fe, см. пирротин

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
$R >$ сфалерита, $R <$ галенита, сильно анизотропные			
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты; часто полисинтетические двойники. Образуется распад с пентландитом, иногда эмульсионную вкрапленность в сфалерите. Встречаются прорастания гексагонального и моноклинного пирротина, а также гексагонального пирротина и троилита	Касситерит, халькопирит, пентландит, сфалерит, пирит, магнетит, арсенипирит и др. Замещается марказитом, пиритом, гётитом	2,062 (10) 2,63 (8) 1,045 (8)	Розовато-коричневый цвет; сильная анизотропия; магнитный; парагенезис. Моноклинный пирротин более сильно магнитен
Округлые каплевидные выделения и тонкие пластинки в метеоритном железе	Ассоциирует с минералами метеоритов, в основном с самородным железом	2,085 (10) 1,720 (9) 1,328	Парагенезис
Сплошные кристаллические или скрытокристаллические, часто сажистые массы; псевдоморфозы по псидомелену. Корки, оолиты, конкреции. Кристаллы имеют игольчатый или шестоватый облик. Спайность по (110) совершенная	Гаусманит, манганит, браунит, псидомелан и др., нередко образует по ним псевдоморфозы. Очень часто замещает браунит, манганит	3,118 (10) 1,622 (10) 2,404 (10)	От других минералов марганца отличается более высоким отражением; коричневато-кременным оттенком, совершенной спайностью
Игольчатые и тонкопластинчатые кристаллы или тонкозернистые и волокнистые агрегаты. Видна спайность	Галенит, висмутин, висмут	3,47 (10) 3,03 (7) 2,47 (7)	Реакция на РЬ и ВІ. Трудно отличим от висмутина, бончевита, айкинита. Необходимы дебаеграмма или химический анализ
Волокнистые выделения, реже зернистые агрегаты, а также включения в антимоните	Антимонит, сульфосоли серебра, джемсонит. Замещается марказитом, пиритом, антимонитом	2,60 (10) 3,62 (9) 3,15 (9)	Розовато-коричневый оттенок; травление с КОН; реакция на Fe

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
118 Энергит Cu_3AsS_4 ; Cu 48,42; As 19,02; S 32,56; примеси: Sn (до 10%), Sb (до 6%), Fe (до 3%); ромбич.	1) 23 (Э); 27—23 (Вл); 28,1—25,0 (Б) 2) Слабое, видно на границах зерен 3) Светло-розовый до серо-розового и фиолетового (светло-розово-коричневый); светло-серый с розовым оттенком	1) Сильно, отчетливо анизотропен (цветовой эффект фиолетово-красный до светло-зеленого); прямое угасание	1) 3—3,5; 212—329; 223 (Л); 245—346; 272 (Б, Т); \perp } спайн., \parallel } сл. трещ. 2) Хорошее. $h >$ галенита, борнита, халькопирита, $>$ блеклой руде и люцититу, $<$ сфалерита	Отпечаток на Cu серо-зеленого цвета. Предварительно минерал травится в парах царской водки. Эксп. 5 мин. Растворитель: NH_4OH на фотобумаге. Эксп. 5 мин. Проявитель: рубеоновая кислота. Реакция на As с $(NH_4)_2MoO_4$ (порошок). Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 5 мин. Осадок лимонного цвета
119 Люцитит Cu_3AsS_4 ; Cu 48,42; As 19,02; S 34,56; примеси: Sb, Sn (до 2,5%), Bi (до 2%); тетрагон.	1) 28 (Мозес); 27—22 (Вл) 2) Сильное (от светло-оранжевого до розового) 3) Коричнево-желтый с розовым оттенком, желтовато-серый	1) Сильно анизотропен; косое угасание (цветовой эффект в оранжево-красных и серовато-фиолетовых тонах)	1) 3—4; 257—412; 388 (Л); 2) Хорошее. $h >$ борнита, халькопирита, немного $<$ тетраэдрита, $<$ энаргиту, $<$ сфалерита	Реакция на Sb. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 2 мин. Избыток кислоты снять. Растворитель: HCl (1:1) на травяном месте. Проявитель: $KI + CsCl$ (порошок). Осадок красного цвета. Реакция на Cu , см. энергит
120 Стибиолуцитит (фаматинит) Cu_3SbS_4 ; Cu 43,27; Sb 27,63; S 29,10; примеси: As, Sn, Bi; тетрагон.	1) 29—26 (Вл); 27 (Э) 2) Сильное, слабое 3) Светло-оранжевый до светло-фиолетового; розовый с фиолетовым оттенком, желтовато-серый	1) Сильно анизотропен; косое угасание	1) 3—4; 315—329 (Л); 333—397 (Б, Т) 2) Хорошее. $h \sim$ люцититу, энаргиту	
121 Идант Cu_2FeS_4 ; Cu 56,16; Fe 9,86; S 33,98; гексагон.	1) 20 (P) 2) Очень сильное 3) Красновато-оранжевый (без борнитовой побежалости)	1) Сильно анизотропен (желто-зеленый цветовой эффект)	1) 2,5; 216—260; 240 (Л) 2) Хорошее. $h >$ вельлина	Реакция на Fe, см. пирротин. Реакция на Cu , см. энергит
122 Умангит Cu_3Se_4 ; Cu 54,70; Se 45,30; примеси Ag; ромбо-тетраэдрический	1) 20—17 (С); 17—14 (Э) 2) Очень сильное 3) Сиреневый до голубовато-серого	1) Сильно анизотропен (красный, сиреневый, кремовый цветовой эффект)	1) 3; 77—108; 82 (Л); 77—128 (С) 2) Хорошее. $h \sim$ клеманниту, немного $>$ герсдорфита, $<$ пирита	Отпечаток на Cu (серо-зеленого цвета) и на Se (красного цвета). Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель на медь: $NH_4(OH) +$ рубеоновая кислота; на селен — тиомочевина

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Агрегаты столбчатых таблитчато-призматических кристаллов, сплошные аллотриоморфнозернистые массы и вкрапленники	Теннантит, фаматинит, люцит, халькопирит, галенит, пирит, сфалерит, барит и др. Часто замещается теннантитом, халькозином, ковеллином	3,21 (3) 3,08 (6) 2,85 (8)	От станина отличается светло-розовым цветом, сильной анизотропией, травлением KCN, реакцией на As; от люцонита, фаматинита — однородным внутренним строением индивидов и меньшей твердостью
Включения в энаргите, в борните или агрегаты мелких зерен. Двойники	Энаргит, фаматинит, борнит, халькопирит, пирит, сфалерит, халькозин, тетраэдрит, теннантит, кварц, энаргит. Замещается энаргитом, халькозином	3,01—3,08 (10) 1,861—1,886 (10) 1,591—1,606 (9) (по Рамдору)	Отличается от энаргита пластинчатым двойникованием, оранжевым оттенком
Мелкие зерна в энаргите, борните, теннантите, мелкие аллотриоморфнозернистые агрегаты. Двойники	Люцит, борнит, энаргит, теннантит, германит. Замещается халькозином	$a_0=5,38$ $c_0=10,76$ $a_0:c_0=1:2,00$ $z=2$ (Минералы, т. 1, 1960)	От борнита и германита отличается анизотропностью, от люцонита, энаргита, реьерита — реакцией на Sb
Мельчайшие таблички — продукт распада борнита	Борнит и халькопирит. Замещается ковеллином	$a_0=3,90$ $c_0=16,95$ $a_0:c_0=1:4,346$ $z=1$ (Минералы, т. 1 1960)	Тончайшие пластинки в борните по трещинам спайности в ассоциации с веретенцами халькопирита, с новообразованиями гётита, ковеллина. Отличается от борнита сильной анизотропией
Зернистые агрегаты. Пластинчатые двойники в зернах наблюдаются в отраженном поляризованном свете	Эвкайрит, тиманит, борнит, кальцит, халькопирит, берцелланит, кобальтин, пирит. Замещается малахитом, халькоменитом	* 3,57 (10) 1,819 (9) 1,776 (8)	Сиреневый цвет; сильное двуотражение и сильный цветовой эффект анизотропии; реакция на Cu и Se

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1). Внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма от- печатка (1); поведе- ние при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
---	--	--	--	----------------------------

Подгруппа 166. Твердость средняя, R > сфалерита,

<p align="center">123</p> <p>Халькопирит CuFeS₂; Cu 34,57; Fe 30,53; S 34,9; тетрагон, редко кубич.</p>	<p>1) 44 (Б); 47 (Вл); 42 (Э) 2) Очень слабое 3) Желтый</p>	<p>1) Слабо анизотро- пен, иногда отчетливо анизотро- пен, изотропен (кубич. модифи- кация)</p>	<p>1) 3,5—4; 184—223; 202 (Л); 186—219; 194 (Б, Т); 270 (куб. модифика- ция); с. 2) Хорошее. h > гал- енита, < сфалерита, пирротина, пентландита</p>	<p>Отпечаток на Cu се- ро-зеленого цвета. Растворитель: тра- вится в парах царс- кой водки на шлифе до потускнения. Эксп. 3—5 мин. Раствори- тель на фотобумаге; NH₄OH. Эксп. 3— 5 мин. Проявитель; рубеновая кислота</p>
<p align="center">124</p> <p>Кубанит CuFe₂S₃; Cu 22,24—23,4; Fe 40,42—41,2; S 34,35—35,4; примеси: Ni, Zn; ромбич.</p>	<p>1) 40 (Вл); 41 (Э) 2) Слабое 3) Розово-желтый</p>	<p>1) Отчет- ливо ани- зотропен, сильно ани- зотропен</p>	<p>1) 3,5; 199—228; 213 (Б, Т); 2) Хорошее. h немно- го > халькопирита, < сфалерита, < пир- ротина</p>	<p>Реакция на Cu, см. халькопирит, на Fe, см. пирротин</p>
<p align="center">125</p> <p>Пирролюзит MnO₂ Mn 63,2; O 36,8; примеси: Fe, Ba, Na, K; тетрагон.</p>	<p>1) 40—30 (Вл); 35 (Э); 50—55 (P) 2) Отчетливое 3) Белый, серо-бе- лый с коричневато- кремовым оттенком (в кристаллических разностях), темно- серый в аморфных разностях</p>	<p>Слабо анизотро- пы аморфные разности 2) Нет, бурые рефлексы от приме- сей гети- та (MI)</p>	<p>1) 1—6,5; 161—321 (Л) 2) Посредственное. h варьирует</p>	<p>Реакция на Mn⁴⁺. Прямой отпечаток си- него цвета с уксусно- кислым бензидином. Эксп. 2 мин. Травле- ние: H₂SO₄ (1:1) + H₂O₂ (30%); 1—2 капли; побурение. FeCl₃ — темно-серое пятно</p>
<p align="center">126</p> <p>Геокронит 5PbS·(As, Sb)₂S₂; Pb 69,62; Sb 8,07; As 5,05; S 17,26; примеси: Cu (до 1%), Ag, Te, Sn; монокл.</p>	<p>1) 40,5 (Вл); 40,9 (Б) 2) Слабое 3) Белый со слабым кремово-зеленоватым оттенком</p>	<p>1) Отчет- ливо ани- зотропен</p>	<p>1) 2,5; 95—140 (Л) 2) Хорошее, h немно- го < галенита, > бу- ланжерита ~ франкен- ту</p>	<p>Реакция окрашивания на Pb. Растворитель HNO₃ конц. на шли- фе. Эксп. 1 мин. Снять остаток кисло- ты. Проявитель KI (5%). Пленка лимон- но-желтого цвета</p>
<p align="center">127</p> <p>Айкинит PbCuBiS₃; Cu 11,03; Pb 35,98; Bi 36,29; S 16,70; ромбич.</p>	<p>1) 48 (Вл); 44 (Э, P) 2) Ясно выраженное 3) Белый со слабо- желтоватым оттенком</p>	<p>1) Отчет- ливо ани- зотропен</p>	<p>1) 2—2,5; 165—204 (Л) 2) Плохое. h > гал- енита, > висмутину, < бурнонита</p>	<p>Отпечаток на Bi жел- того цвета. Раствори- тель: HNO₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проя- витель: тиомочевина. Реакция на Cu, см. халькопирит, на Pb, см. геокронит</p>

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
R < галенита, слабо и отчетливо анизотропные			
Агрегаты аллотриоморфных зерен, редко кристаллы. Полисинтетические двойники в зернах. Эмульсия распада халькопирита в сфалерите	Пентландит, кубанит, пирротин, борнит, пирит, сфалерит, галенит, энаргит, блеклые руды. Замещается халькозином, ковеллином, малахитом, гетитом и др.	3,03 (10) 1,855 (10) 1,565 (10)	Желтый цвет; травление в парах царской водки; полисинтетические двойники; реакция на Си
Преимущественно в халькопирите в виде параллельных пластинок	Халькопирит, пирротин, пентландит. Иногда замещается валлернитом	3,23 (10) 1,875 (9) 1,75 (8)	Пластинчатые зерна в халькопирите; иногда магнитен; парагенезис. От халькопирита отличается более сильной анизотропией и розовым оттенком
Сплошные кристаллические или скрытокристаллические сажистые массы, псевдоморфозы по псидомелану. Корки, оолиты, конкреции. Кристаллы имеют игольчатый или шестоватый облик	Гаусманит, манганит, браунит, псидомелан и др., нередко образует по ним псевдоморфозы. Часто замещает манганит и браунит	3,118 (10) 1,622 (10) 2,404 (9)	От других минералов марганца отличается более высоким отражением и коричнево-красноватым оттенком, совершенной спайностью
Таблитчатые кристаллы, агрегаты аллотриоморфных зерен. Часто наблюдаются пластинчатые двойники	Галенит, сульфоантимониды свинца, пирит, тетраэдрит, барит, кварц, флюорит и карбонаты. Замещается галенитом, буланжеритом, бурнонитом, джемсонитом	2,23 (10) 1,830 (9) 2,115 (8)	Более слабое двуотражение и анизотропность по сравнению с буланжеритом и джемсонитом. Характерны двойники в зернах. Необходим химический анализ
Вкрапленники и агрегаты призматических и тонко-игольчатых кристаллов	Пирит, тетраэдрит, кварц, халькопирит, галенит, сфалерит, золото, эмплектит, висмутин. Замещается висмутом, ковеллином, бисмутином	3,67 (10) 3,18 (9) 2,87 (8)	От сходных сульфидов отличается травлением, двуотражением и реакцией на Си

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1); поведение при полировании, относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
128 Буланжерит Pb ₅ Sb ₂ S ₁₁ ; Pb 55,4; Sb 25,7; S 18,9; примеси: Hg, Ag; монокл.	1) 40—32 (Вл); 38 (P); 44,1—37,0 (Б) 2) Слабое 3) Белый с голубовато-зеленоватым оттенком	1) Отчетливо или сильно анизотропен 2) Красные	1) 2,5—3; 157—183; 166 (Б, Т); с. 2) Отличное. h немного < галенита, < бурнонита	Реакция на Sb. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Избыток кислоты снять фильтром бумагой. Растворитель: HCl (1:1) на травяное место шлифа. Проявитель: KI + CsCl (порошок), Осадок красного цвета. Реакция окрашивания на Pb. Растворитель: HNO ₃ на шлифе. Эксп. 1 мин. Остаток кислоты снять фильтр бумагой. Проявитель: KI (5%-ный). Пленка лимонно-желтого цвета
129 Цинкениит PbS·Sb ₂ S ₃ Pb 35,79; Sb 42,06; S 22,15; гексагон.	1) 37,5 (P); 34 (Вл); 32,3 (Б) 2) Очень слабое 3) Белый	1) Слабо или отчетливо анизотропен; прямое угасание 2) Темно-красные (иногда заметные в масле)	1) 3; 162—207; 178 (Б, Т); 159—208 (Л) сл. трещ. 2) Хорошее. h нет данных	Реакция на Cu. Минерал травится в парах царской водки до потускнения, Эксп. 3—5 мин. Растворитель: NH ₄ OH. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: рубановая кислота. Отпечаток серо-зеленого цвета. Реакция на Pb, см. цинкениит
130 Бурнонит Pb Cu SbS ₃ ; Cu 13,04, Pb 42,54, Sb 24,65, S 19,77; примеси: As, Zn; ромбич.	1) 35 (Вл); 33 (Э); 38,2—36,0 (Б) 2) Слабое 3) Белый до голубовато-зеленого	1) Слабо анизотропен 2) Красные (иногда заметные в масле)	1) 2,5—3; 166—187; 178 (Л); 185—199; 192 (Б, Т); сл. трещ. 2) Отличное. h > буланжерита, джемсонита, антимонита, немного > галенита, < блеклой руды, халькопирита, сфалерита	Реакция на Cu. Минерал травится в парах царской водки до потускнения, Эксп. 3—5 мин. Растворитель: NH ₄ OH. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: рубановая кислота. Отпечаток серо-зеленого цвета. Реакция на Pb, см. цинкениит
131 Халькостибит Cu ₂ S·Sb ₂ S ₃ ; Cu 25,64; Sb 48,45; S 25,91; примеси: Zn, Ag, Sn; ромбич.	1) 36 (Вл); 42 (P); 43,0—37,1 (Б) 2) Слабое 3) Белый со слабым розовым оттенком	1) Отчетливо анизотропен (цветовые эффекты)	1) 3—4; сл. трещ. 2) Хорошее. h > сербру, немного < халькопирита, сфалерита	
132 Эмплектит Cu ₂ BiS ₂ ; Cu 18,88; Bi 62,08; S 19,04; ромбич.	1) 37,5 (P); 38 (Вл); 41,0—36,0 (Б) 2) Слабое на границе зерен 3) Белый с желтоватым оттенком	1) Отчетливо, сильно анизотропен	1) 2; 158—238; 180 (Л); 168—213; 191 (Б, Т); удлиненному, с., вогни. 2) Хорошее, h > висмута, < халькопирита, тетраэдрита	Реакция на Cu, см. бурнонит. Реакция на Bi. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1 мин. Проявитель: тимолевина. Пятно, желтого цвета
133 Виттихенит Cu ₂ BiS ₂ ; Cu 38,46; Bi 42,15; S 19,39; ромбич.	1) 35 (P); 34 (Вл); 30 (Э) 2) Неясное, очень слабое 3) Серо-белый с коричневым оттенком	1) Отчетливо, слабо анизотропен	1) 2—3; 170—206 (Я, М); 156—206 (Л) 2) Хорошее. h > висмута, > эмлектита, < борнита блеклой руды, халькопирита	
134 Реньерит Cu ₂ (Fe, Ge) S ₄ ; Cu ~ 41,63—43,81; Fe ~ 12,08—13,78; Ge 6,00—7,75; S ~ 31,28—31,69; примеси: Zn (до 4%), As (до 5%), Ga (до 1,99%); псевдокубич.	1) 30 (Вл); 32,5 (P) 2) Слабое от оранжевого до коричневого 3) Оранжево-коричнево-розовый	1) Отчетливо анизотропен (от желто-коричневого до коричневого)	1) 4,5; 318—367; 340 (Л) 2) Отличное. h > борнита, > халькопириту, < теннантита, сфалерита	Спектральный анализ на Ge. Реакция на Cu, см. халькопирит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Призматические, игольчатые, стобельчатые, листоватые зерна, часто волокнистые агрегаты. Спайность слабая, двойников нет	Сульфосоли свинца, антимонит, галенит, сфалерит и др. Замещается галенитом, биндгеймитом	3,71 (10) 2,815 (8) 1,861 (7)	От антимонита отличается анизотропией, травлением KOH; от джемсонита — слабым эффектом двутравления, анизотропией
Таблитчатые и радиально-лучистые агрегаты	Антимонит, джемсонит, буланжерит, бурнонит и другие сульфосоли, сфалерит, галенит, пирит. Замещается биндгеймитом	3,445 (10) 1,975 (10) 1,825 (10)	От других сульфосолой свинца отличается по данным дебаграммы и химического анализа. Характерно травление KOH; после 20—40 мин появляется структура «пальмовых паучков»
Агрегаты зерен. Характерны полисинтетические двойники по (100), развивающиеся в двух направлениях	Галенит, тетраэдрит, сфалерит, буланжерит и др. Замещается халькозинном, ковеллином, биндгеймитом	2,73 (10) 3,86 (8) 2,96 (8)	Слабо анизотропен; полисинтетические двойники; отрицательное травление с HNO ₃ ; реакция на Cu и Pb
Агрегаты кристаллов и отдельные таблитчатые кристаллы. Спайность по (010) совершенная, иногда видны треугольники выкращения	Борнит, халькопирит, бурнонит, джемсонит, блеклая руда. Замещается легко халькозинном, ковеллином, малахитом	3,10 (10) 2,98 (10) 1,751 (10)	От бурнонита отличается оттенком цвета, наличием спайности и реакцией на Fb; парагенезис
Идиоморфные удлиненные зерна с пластинчатыми двойниками, параллельными удлинению. Спайность по (001) совершенная	Висмутовые блеклые руды, халькопирит, виттихенит, висмутин, висмут. Замещается ковеллином, бисмутитом	3,20 (10) 3,02 (10) 2,34 (9)	Идиоморфные удлиненные кристаллы с двойниками. По сравнению с виттихенитом и блеклой рудой — светлее. Парагенезис. Дебаграмма отличается от виттихенита
Агрегаты изометричных зерен	Висмут, сульфосоли висмута, эмплектит, халькопирит. Замещается бисмутитом, малахитом	3,12 (10) 1,78 (7) 2,32 (6)	Изометричные зерна; темнее висмутин и эмплектита. По сравнению с блеклой рудой анизотропен. Парагенезис
Мелкие округлые зерна и ламельки. Наблюдаются полисинтетические двойники. От HNO ₃ (1:2) + KClO ₄ + HCl конц. выявляется структура	Борнит, энаргит, теннантит, халькопирит, сфалерит, галенит, люционит	3,06 (10) 2,65 (3) 1,87 (8) Минералы, т. 1, 1960)	От германита и борнита отличается анизотропией, наличием двойников; от люционита и стибиллюционита — реакцией на Ge. Магнитен. Парагенезис

№ п/п Минерал, химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1), поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
135 Станнин Cu Fe SnS ₄ ; Cu 29,58; Fe 12,99; Sn 27,61; S 29,82; примесь Zn (до 4,2%); тетрагон.	1) 28 (Вл, Б); 23 (Э, Р) 2) Слабое 3) Серо-белый с коричневато-зеленоватым оттенком (буrowато-зеленоvато-белый)	1) Отчетливо анизотропен, слабо анизотропен (цветовые эффекты), изотропен	1) 3,5—4; 206—307; 257 (Л); 197—221; 210 (Б, Т); сл. трещ. 2) Посредственное и хорошее. h > халькопирита, ~ тетраэдриту, < сфалерита	Реакция на Fe. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 3 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета
136 Куприт Cu ₂ O; Cu 88,8; O 11,2; примесь Mo; кубич.	1) 29 (Вл) 27,1 (Б) 2) Серо-белый с голубоватым оттенком	1) Изотропен, слабо анизотропен (по границам зерен) 2) Красные (В)	1) 3—4; 205—207; 206 (Л); 192—218; 199 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h > самородной меди, тенорита, халькопирита, < гётита	Реакция на Cu. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1—2 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно розовато-коричневого цвета
137 Тенорит Cu ₂ O; Cu 79,9; O 20,1; примесь Mo; монокл.	1) 22 (Р); 24,2—20 (Вл); 26,9—20,0 (Б) 2) Отчетливое (от белого до серовато-белого) 3) Серо-белый с желтовато-коричневым оттенком (рядом с купритом коричневый)	1) Отчетливо анизотропен (цветовые эффекты синие и белые); коcое угасание	1) 3,5; 209—254; 236 (Б, Т); с.. вогн. 2) Посредственное. h > халькозина, < куприта, гётита	Реакция на Cu серозеленого цвета. Растворитель: NH ₄ OH (25%). Эксп. 2 мин. Проявитель: рубеновая кислота
138 Делафосит CuFeO ₂ ; Cu 41,99; Fe 36,88; O 21,13; примесь Mo; тригон.	1) 23 (Вл); 22,2 (Б) 2) Слабое, по границам зерен; иногда сильное 3) Серо-белый с розовато-коричневым оттенком	1) Отчетливо, сильно анизотропен (светлосиневато-серые цветные эффекты); прямое угасание 2) Нет	1) 5,5 2) Очень хорошее. h < гётита, куприта, немного > кальцита	Реакция на Fe. Растворитель: HCl конц. Эксп. 1 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета. Реакция на Cu, см. тенорит
139 Манганит MnO·OH; O 27,3; Mn 62,4; H ₂ O 10,3; монокл.	1) 19—15 (Вл); 17 (Э); 31,4—19,0 (Б) 2) Слабое 3) Серый (светло-серый с коричневатым оттенком)	1) Отчетливо анизотропен; прямое угасание 2) Желтовато-красновато-коричневые (В, МИ)	1) 4; 367—459; 410 (Б, Т); с. 2) Хорошее, посредственное. h < гаусманита, браунита, якобсита, < пиролюзита	Прямой отпечаток на Мп синего цвета. Растворитель: уксуснокислый бензидин. Эксп. 1 мин.
140 Мнаргирит AgSbS ₂ ; Ag 36,72; Sb 41,45; S 21,83; примеси: As, Cu, Pb; монокл., призматич.	1) 34 (Б); 33 (Р); 30 (Вл) 2) Заметное 3) Серо-белый с голубоватым оттенком	1) Отчетливо, сильно анизотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Вишнево-красные (В, МИ)	1) 2,5; 104—127 (Л); 104—123; 110 (Б, Т) 2) Хорошее. h немного > пираргирита, < галенита, стефанита, < фрейбергита	Реакция на Sb. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Каплю кислоты снять фильтр. бумагой. Растворитель: HCl (1:1) на травленое место шлифа. Проявитель: кристаллики KI и CsCl. Осадок красного цвета. Реакция на Ag, см. науманнит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Мелкие аллотропно-зернистые агрегаты и включения в других минералах. Образует эмульсионные или пластинчатые выделения в сфалерите и халькопирите. Пластинчатые и полисинтетические двойники в зернах. Спайность, зональное строение, треугольники выкрашивания	Касситерит, халькопирит, сфалерит, арсенопирит, вольфрамит, галенит, пирротин, блеклые руды. Замещается касситеритом, ковеллином, борнитом, марказитом	3,12 (10) 1,911 (10) 1,634 (10)	От энгрита и люзонита отличается зеленым оттенком; от блеклых руд — анизотропией и микротвердостью. Реакция на Sn и Fe; парагенезис
Сплошные зернистые и скрытокристаллические выделения, идиоморфные кристаллы, петельчатые и кольчатые текстуры замещения. Стр. травление HNO ₃ (1:1)	Халькозин, гётит, малахит, медь, азурит и хризоколла, тенорит. Замещает халькозин; замещается теноритом, малахитом	2,46 (10) 1,280 (10) 1,505 (9)	Красные внутренние рефлексы; реакция на Cu; травление; парагенезис
Почки, прожилки, землестые массы, скрытокристаллического и радиально-лучистого строения. Полисинтетические двойники в зернах	Куприт, малахит, гётит, хризоколла, делафоссит, лампадит. Замещает куприт	3,513 (10) 2,307 (9) 1,852 (7)	Сильно анизотропен; реакция на Cu; коллоидные агрегаты с радиально-лучистой структурой; парагенезис
Гроздьевидные корочки. Друзы таблитчатых кристаллов	Куприт, тенорит, медь, магнетит, гематит, малахит, лимонит. Замещает гипергенный ковеллин	2,51 (10) 2,85 (8) 2,230 (8)	От тенорита отличается прямым угасанием и реакцией на Fe
Натечные скрытокристаллические и радиально-лучистые агрегаты	Барит, кальцит, сидерит, гаусманит, пиролюзит, гётит, псиломелан. Замещается пиролюзитом, псиломеланом	2,70 (10) 1,66 (8) 1,419 (7)	Реакция на Mn; радиально-лучистое, споровидное строение агрегатов; парагенезис
Шестоватые, таблитчатые зерна, характерна спайность в двух направлениях	Галенит, сфалерит, стефанит, полибазит. Замещается аргентитом, серебром	3,42 (9) 2,88 (10) 2,74 (8)	Голубоватый оттенок цвета; сильно анизотропен, красные внутренние рефлексы; травление; парагенезис

№ п/п Минерал: химический состав, %; характерные элементы-примеси: сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1), поведение при полировании; относительный рельеф (2)	Микрохимические реакции
141 α-науманнит Ag ₂ Se (t < 133° C); ромбич. β-науманнит (t > 133°C); Ag 73,15; Se 26,85; примеси: Pb, S; кубич.	1) 36 (C); 28 (Э); 32 (Вл) 2) Очень слабое 3) Серовато-белый с зеленовато-синеватым оттенком	1) Отчетливо анизотропен, изотропен	1) 2—2,5; 115—185; 148 (Б, Т); 27—56 (Л); с., вогн. 2) Посредственное. h < клаусталита	Отпечаток на Ag фиолетово-красного цвета. Растворитель: 1 ч. KCN (5%-ного) + 1 ч. Р-диметиламинобензилдиенродамина в ацетоне. Эксп. 3—5 мин. Отпечаток промыть в воде, подкисленной HNO ₃
142 Полибазит (Ag, Cu) ₁₆ Sb ₂ S ₁₁ ; Ag 69,47; Cu 4,10; Sb 10,82; S 15,61; примеси: Se, As, Cu; монокл.	1) 29,5 (P); 32 (Э); 32 (Вл) 2) Слабое по границам зерен 3) Серо-белый с зеленоватым оттенком	1) Слабо анизотропен 2) Темно-красные (MI), наблюдаются не всегда	1) 2—3; 108—114; 112 (Л) 2) Плохое. h > аргента, ~ пираргириту, < стефанита, < теннантита	Реакция на Sb. Растворитель: 1 ч. HCl конц. + 1 ч. HNO ₃ конц. + 2 ч. H ₂ O. Эксп. 2 мин. Проявитель: метилтриоксифлюорин. Цвет пятна розово-коричневый. Реакция на Cu, см халькопирит
143 Прустит Ag ₂ As ₂ S ₃ ; Ag 65,42; As 15,14; S 19,44; примесь Sb (до 3,74%); тригон.	1) 28 (Э, P); 27,7—25,0 (Б) 2) Ясное 3) Серо-белый с голубоватым оттенком	1) Отчетливо анизотропен (мешают внутр. рефлексы) 2) Кирпично-красные с оранжевым оттенком (B)	1) 2—2,5; 109—135; 123 (Б, Т); 101—137 (Л); с. 2) Хорошее. h ~ пираргириту	Реакция на As. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин. Проявитель: (NH ₄) ₂ MoO ₄ . Осадок лимонно-желтого цвета. Реакция на Ag, см. науманнит

Подгруппа 17. Твердость средняя.

144 Сфалерит ZnS; Zn 67,1; S*32,9; примеси: Fe (до 26%); Mn (до 5,81%); Cd (до 4%); Te (до 1%); Hg (до 1%); Ge, In (до 0,01%) и др.; кубич.	1) 17—18 (Вл); 19 (Э) 3) Серый, иногда со слабым голубоватым, фиолетовым, зеленоватым оттенком	1) Изотропен 2) Бесцветные, желтые, реже бурые, красноватые (B, MI)	1) 3,5—4; 153—270 (Л); 186—209; 198 (Б, Т) (изменяется в зависимости от содержания Fe); с., вогн. 2) Хорошее. h > халькопирита, станнина, блеклой руды, энаргита, < пирротина, магнетита, ильменита и почти всех дисульфидов	Реакция на Zn. Растворитель: 5 ч. HNO ₃ (1:1) + 1 ч. Cu(NO ₃) ₂ (1%-ный). Эксп. 3—5 мин. Проявитель: HgCl ₂ + KCNS. Пятно фиолетового цвета, промыть в воде
145 Урановая чернь (осчаточная) UO ₂ U 7,7—34; аморфный	1) 11—16 3) Серый до темно-серого с буроватым оттенком	1) Изотропен 2) Буровато-желтые, зеленовато-бурые (MI)	1) 1—4; 400 2) Плохое. h варьирует	Отпечаток на U коричневого цвета. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆

Подгруппа 18. Твердость средняя, R <

146 Гидрогётит FeO.OH.H ₂ O; Fe ₂ O ₃ ; 88—86; H ₂ O 12—14; ромбич.	1) 17 (P); 12 (Вл) 3) Серый с голубоватым оттенком	1) Слабо анизотропен, изотропен 2) Желтовато-бурые (B, MI)	1) 1—4—5; 300—340 2) Посредственное	Реакция на Fe. Растворитель: HCl конц. Эксп. 5 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета. Проявитель: KCNS. Пятно красного цвета
---	---	---	--	---

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Аллоотриоморфнозернистые агрегаты. Полисинтетические двойники и трещины спайности (по 100). Характерны мirmekитовые сростания с клаусталитом	Очень редкий минерал. Клаусталит и другие селениды	β -Ag ₂ Se 2,66 (10) 2,56 (10) 2,23 (6)	Сходен с аргентитом, отличается реакцией на Se, спайностью по (100) и полисинтетическими двойниками
Таблитчатые и призматические зерна	Сульфосоли серебра, сульфосоли свинца, а также сульфиды и арсениды никеля и кобальта. Замещается аргентитом, серебром	2,99 (10) 3,18 (9) 2,87 (8)	От пираргирита и стефанита отличается зеленоватым оттенком и микротвердостью; от аргентита и пирсента — по данным химического анализа и дебаграмме
Агрегаты таблитчатых зерен. Отдельные зерна с зональным или пластинчато-двойниковым строением	Галенит, серебро, а также сульфоарсениды, сульфоантимониды свинца, серебра и меди. Замещается аргентитом, серебром, реже кераргиритом, аурипигментом	3,20 (10) 2,53 (9) 2,75 (7)	От пираргирита отличается реакцией на As; от киновари, куприта — травлением. Парагенезис — отличается от кермезита, куприта

$R < \text{сфалерита}$, $R > \text{шеелита}$, изотропные

Зернистые агрегаты. Иногда скорлуповатые и почковидные, скрытокристаллические выделения. Двойниковое и зональное строение зерен выявляется при травлении в парах царской водки в течение 30 с	Халькопирит, галенит, пирротин, блеклые руды, борнит, пирит, станнин, вюрцит. Замещается ковеллином, халькозином, гринокитом, смитсонитом. Наблюдаются в нем эмульсии распада халькопирита, кубанита, пирротина, станнина, тетраэдрита	3,116 (10) 1,908 (9) 1,630 (8)	Сильные внутренние рефлексы; травление в парах царской водки; полисинтетические двойники; реакция на Zn
Корки, почки, землистые массы аморфного и концентрически-зонального строения	Настуран, сульфиды, битумы	5,438—5,44 (Гецева и др.)	Парагенезис; натечные выделения черного цвета; отпечаток на U

сфалерита , $R > \text{шеелита}$, анизотропные

Корки, каемки, псевдоморфозы по пириту, халькопириту, ярозиту, повеллиту и др. Агрегаты скрытокристаллические и радиально-лучистые	Распространен в железной шляпе. Замещает пирит, халькопирит, сидерит	4,178 (10) 2,450 (10) 2,690 (8)	Желтовато-бурые внутренние рефлексы; колломорфные и радиально-лучистые агрегаты; парагенезис
--	--	---------------------------------------	--

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1), поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
147 Вольфрамит (Fe, Mn) WO ₄ ; Mn 5,9—17,6; Fe 18,9—7,4; WO ₃ 75,0; примеси: Ta (до 2%); Mg (до 0,2%) и Sc (до 0,2%); монокл.	1) 18 (Вл); 17 (P) 2) Слабое (по границам зерен) 3) Серый	1) Отчетливо анизотропен; косое угасание 2) Слабые коричневатокрасные (В, МИ)	1) 5—5,5; 398—593 (Л); 357—394; 373 (Б, Т); 232—626 (изменяется в зависимости от содержания Fe и Mn); с., вогн. 2) Хорошее. h > магнетита, шеселита, < пирита, арсенопирита	Реакция на W. В тигле порошок минерала кипятят в HCl с металлическим оловом. Пленка голубого цвета
148 Ферберит FeWO ₄ ; FeO 25; WO ₃ 75; примесь Mn; монокл.	1) 17 (Вл); 17—14 (P) 2) Слабое (по границам зерен) 3) Серый	1) Отчетливо анизотропен 2) Нет, иногда коричневатокрасные (МИ)	1) 5—5,5; 322—412; 379 (Л) 2) Хорошее. h ≈ вольфрамиту	Реакция на W, см. вольфрамит. Реакция на Fe с KCNS, см. гидрогётит
149 Гюбнерит MnWO ₄ ; MnO 25 (Mn 23,4); WO ₃ 75; примесь Fe; монокл.	1) 16 (Вл); 14 (P) 2) Слабое (по границам зерен) 3) Серый	1) Отчетливо анизотропен 2) Сильные, коричневатокрасные (В, МИ)	1) 5—5,5 1) Хорошее. h ≈ вольфрамиту	Реакция на Mn. Порошок минерала сплавляют с бурой, фосфорной солью или щелочами. Перл растворяют в HCl + фильтр. бумага. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно кирпично-красного цвета
150 Вюрцит ZnS; Zn 67,1; S 32,9; примеси: Mn (до 13,6%), Fe (до 6%), Cd (до 3,7%); гексагон.	1) 17 (Вл); 18,3 (Мозес) 19 (Э) 3) Серый	1) Слабо анизотропен (изотропен аморфный) 2) Желтые до темно-коричневого (В)	1) 3,5—4; 159—274 (Я, М) 2) Хорошее. h ≈ сфалериту	Реакция на Zn. Растворитель: 5 ч. HNO ₃ (1:1) + 1 ч. Cu(NO ₃) ₂ (1%). Эксп. 3—5 мин. Проявитель: HgCl ₂ + KCNS. Пятно фиолетового цвета. Промыть в воде
151 Цинкит ZnO; Zn 80,3; O 19,7; примеси: Fe, Mn; гексагон.	1) 12 (Вл); 11 (P) 2) Слабое (мешают внутренние рефлексы) 3) Серый с желтоватым оттенком (светлорозовато-коричневый)	1) Слабо анизотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Желтые, красные, кармино-красные (В)	1) 4—4,5; 150—318 (Б, Т); ⊥ } спайн. с., вогн. ■ } 2) Хорошее. h < франклинита	Отпечаток на Zn синеватого цвета. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: Cu(NO ₃) ₂ + ртутнородановая соль
152 Повеллит CaMoO ₄ ; CaO 28; MoO ₃ 72; примеси: Si, W; тетрагон. дигпирамидальный	1) 11 (Вл) 2) Очень слабое 3) Серый	1) Слабо анизотропен (мешают внутренние рефлексы); изотропен в скрытокристаллических агрегатах 2) Бесцветные, желтые (В)	1) 3—4; 200—300 2) Хорошее	Отпечаток на Mo коричневого цвета с K ₄ Fe(CN) ₆ и фиолетово-красного цвета с ксантогенатом калия. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ (мешают Fe и Si). Проявитель: ксантогенат калия, свежеприготовленный

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
		2,917 (4) 2,46 (2) 2,18 (2)	Призматические кристаллы; красно-бурые внутренние рефлексы; реакция на W. По парагенезису отличается от манганита
Вкрапленность, гнезда и прожилки призматических кристаллов, метакристаллов и метазерен. Спайность по (010) совершенная. Крупнозернистый	Касситерит, молибденит, шеелит, висмут, пирит, берилл и др. Замещаются шеелитом и наоборот	2,93 (10) 1,711 (10) 2,188 (8)	От вольфрамита и гюбнерита отличается отсутствием внутренних рефлексов. Необходимы химический анализ и дебаграмма
		2,989 (9) 1,783 (8) 2,497 (7)	Сильные коричнево-красные внутренние рефлексы; призматические кристаллы; реакция на W и Mп. Необходим хим. анализ
Колломорфные, концентрически-зональные выделения с волокнистым и радиально-лучистым строением. Двойников нет	Сфалерит, марказит, галенит, карбонаты; в конкрециях с сидеритом, марказитом, пиритом. Переходит в сфалерит, замещается халькозинном	3,107 (10) 1,902 (10) 1,625 (9)	Сильные внутренние рефлексы от желтого до коричневого цвета; реакция на Zn; колломорфные агрегаты с радиально-лучистым строением. Двойников нет
Корки, вкрапленность зернистого строения, редко кристаллы	Сфалерит, франклинит, виллемит. Замещается смитсонитом	2,459 (10) 1,623 (10) 1,491 (10)	Сильные карминно-красные внутренние рефлексы; реакция на Zn; парагенезис
Прожилки, каемки, псевдоморфозы по молибдениту. Скрытокристаллический, зернистый. Зональное строение зерен выявляется при травлении в HNO ₃ конц. в течение 5 мин.	Замещает молибденит и сам замещается гётитом	1,249 (10) 3,11 (9) 1,922 (8)	Сильные желтоватые внутренние рефлексы; реакция на Mo; люминесцирует желтым или зеленовато-желтым; парагенезис; рефлексы молибденита в псевдоморфозах повеллита

№ п/п Минерал; химический состав, %; характерные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1). Внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1), поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
153 Ванадинит $Pb_5[Cl(VO_4)_3]$; PbO 78,3; V_2O_5 19,3; Cl 2,4; примеси: P^{5+} (до 2,5%), As^{5+} (до 15,5%), Sa (до 3,3%); гексагон.	1) 16—17 (Вл) 2) Слабое 3) Серый	1) Слабо анизотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Буро-желтые, голубовато-желтые до красных (В)	1) 3 2) Хорошее	Отпечаток на V синего цвета. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: уксуснокислый бензидин. Реакция на Pb , см. церуссит
154 Церуссит $PbCO_3$; PbO 83,5 (Pb 77,5); CO_2 16,5; примеси: Sr (до 3,2%), Zn (до 3,4%), Sa (до 0,5%); ромбич.	1) 12—8 (Вл) 2) Сильное 3) Серый	1) Отчетливо анизотропен (мешают внутренние рефлексы), изотропен в скрыто-кристаллич. разностях 2) Бесцветные, желтовато-бурые, зеленоватые (В)	1) 3—3,5 200 2) Хорошее. h немного > галенита, < кальцита	Реакция окрашивания на Pb . Растворитель: HNO_3 конц. на шпигеле. Снять избыток кислоты фильтр. бумагой. Эксп. 1 мин. Проявитель: KI (5%-ный). Пленка яркого желтого цвета

Подгруппа 19. Твердость средняя,

155 Коффинит $U[SiO_4]_1-x(OH)_{4x}$; U до 61; примеси: Th Al , Fe^{3+} , As , V , P ; тетрагон.	1) 9,9 (Б) 3) Серый с коричневым оттенком	1) Изотропен 2) Иногда коричневые (МИ)	1) 5—6; 236—333 (Б, Т) 2) Хорошее. h < урановой черни	Реакция на U коричневого цвета. Растворитель: HNO_3 конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: $K_4Fe(CN)_6$
156 Барит $BaSO_4$; BaO 65,7; SO_3 34,3; примеси: Sr , Sa (до 1,9%), Pb до (17,8%); ромбич.	1) 6 (Вл) 3) Темно-серый	1) Изотропен 2) Бесцветны (В)	1) 3—3,5; 127—232 (Л) 2) Хорошее. h > кальцита, < сидерита	Спектральный анализ на Ba
157 Хризоколла $CuSiO_3 \cdot nH_2O$; CuO 45,2; SiO_2 34,3; H_2O 20,5; кристоллическая	1) 4 (Вл) 3) Темно-серый	1) Изотропен 2) Светло-зеленые, голубые (В)	1) 2—4; 82—119; 95 (Л) 2) Хорошее	Отпечаток на Cu серо-зеленого цвета. Растворитель: HCl (1:1). Эксп. 5 мин. Проявитель: рубсановая кислота
158 Флюорит CaF_2 ; Sa 51,2; F , 48,8; примесь Ce ; кубич.	1) 3 (Вл) 2) Темно-серый	1) Изотропен 2) Бесцветные, фиолетовые, буро-фиолетовые, зеленые (В, МИ)	1) 4; 170—200; 194 (Л) 2) Хорошее. h ~ халькопириту	Спектральный анализ на Sa и F

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Вкрапленность, параллельные и радиально-лучистые сростки призматических кристаллов	Пироморфит, миметезит, деклуазит, вульфенит, цезурсит и англезит	2,958 (10) 3,37 (8) 3,04 (8)	Травление; реакция на Рb и V; парагенезис
Корки, сталактиты, плотные и землистые выделения. Каемки скрытокристаллического и зернистого строения, по галениту кристаллы таблитчатого и призматического облика. Полисинтетические двойники	Малахит, смитсонит, пироморфит, фосгенит, кальцит, англезит. Замещает галенит, сульфосоли свинца	3,574 (10) 3,480 (9) 2,487 (9)	Двуотражение; травление со вскипанием в кислотах; реакция окрашивания на Рb; иногда люминесцирует желтым. Замещает галенит

R < шеелита, изотропные

Тонкозернистый или аморфный цемент в раздробленном кварце. Редко мельчайшие призматические или бочонковидные кристаллы	Уранинит, черные ванадиевые минералы, органическое вещество, настуран, мельниконит, опал	4,66 (10) 3,47 (10) 2,64 (5) 1,801 (5) рентгено-аморфный	Радиоактивность; реакция на U. Минерал изучен слабо
Аллоотриоморфнозернистые и скрытокристаллические агрегаты, часто таблитчатые и призматические кристаллы. Спайность по (001) совершенная. Характерны треугольники выкрашивания	Кварц, галенит, сфалерит, кальцит, антимонит, киноварь и др.	1,106 (10) 3,058 (7) 3,456 (6)	Не травится реактивами; характерна спайность. Люминесцирует белым или розовым
Корки, землистые выделения, прожилки аморфного и скрытокристаллического строения. Под бинокляром	Зона окисления медных сульфидных месторождений. Замещает сульфиды меди	Рентгено-аморфный	Голубоватые внутренние рефлексы; отпечаток на Cu
Зернистые и колломорфные агрегаты изометричные, идиоморфные кристаллы	Кварц, антимонит, касситерит, шеелит, вольфрамит и др.	1,93 (10) 1,117 (10) 1,65 (9)	Самый темный минерал в полированном шлифе. Спайность по (111). Люминесцирует голубовато-фиолетовым и голубым

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-примеси; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1). Внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² форма отпе- чатка (1), поведение при полировании, отно- сительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
---	---	--	--	----------------------------

Подгруппа 20. Твердость средняя,

159 Шеелит CaWO_4 ; Ca 19,4; WO_3 80,6; примеси: Mo, Cu, TR; тетра- гон.	1) 10 (Вл, Р) 2) Нет 3) Темно-серый	1) Отчет- ливо, слабо анизотро- пен (меша- ют внут- ренние ре- флексы) 2) Бес- цветные, желтова- тые (В)	1) 4,5—5; 392—412 (Л); 285—420; 348 (Б, Т); трещ. 2) Хорошее. h < воль- фрамита, < касситери- та	Реакция окрашивания на W. Минерал + HCl конц. Эксп. 5—10 мин. Проявитель: SnCl_2 . Пленка синего цвета
160 Смитсонит ZnCO_3 ; Zn 64,8 (Zn 52); CO_2 35,2; при- меси: Fe (до 33%), Ca (до 12,7%), Co (до 10,3%), Mn (до 9,3%), Mg (до 7,2%), Cu (до 6,1%), Cd (до 2,3%), Pb (до 1%); тригон.	1) 9—6 (Вл) 2) Отчетливое на гра- ницах зерен 3) Серый, темно-се- рый	1) Отчет- ливо ани- зотропен (мешают внутренние рефлек- сы); косое угасание 2) Бесцвет- ные, буро- ватые, зе- леноватые (В)	1) 4,5—5,5; 409—420 (Л) 2) Хорошее. h высо- кий	Реакция на Zn. Рас- творитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ + ртутно-родановая соль. Пятно фиолето- вого цвета
161 Малахит $\text{Cu}_2[(\text{OH})_2\text{CO}_3]$; CuO 71,9 (Cu 57,4); CO_2 19,9, H_2O 8,2; примесь Zn (до 12%); монокл.	1) 10—6 (Вл); 9 (Э) 2) Сильное 3) Серый с розоватым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Зеленые (В)	1) 3,5—4; 124—156 (Л) 2) Хорошее. h > каль- цита, < доломита, ~ азуриту	Отпечаток на Cu серо- зеленого цвета. Рас- творитель: NH_4OH (10—25%-ный). Эксп. 1 мин. Проявитель: рубеновая кислота
162 Азурит $\text{Cu}_3[(\text{OH})\text{CO}_3]_2$; CuO 69,2 (Cu 55,3); CO_2 25,6, H_2O 5,2; монокл.	1) 9 (Э); 10—7 (Р, Вл) 2) Слабое 3) Серый с розова- тым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен (мешают внутренние рефлексы) 2) Синие (В)	1) 3,5—4; 185 2) Хорошее. h > каль- цита, < доломита, ~ малахиту	Отпечаток на Cu серо- зеленого цвета. Рас- творитель: NH_4OH (10—25%-ный). Эксп. 1 мин. Проявитель: рубеновая кислота
163 Брошантит $\text{Cu}_4[\text{SO}_4 \cdot (\text{OH})_6]$; CuO 69,04—70,36; SO_3 17,07—18,32; H_2O 11,03—13,81; монокл.	1) 8 (Вл) 3) Темно-серый	1) Слабо анизотро- пен (меша- ют внут- ренние рефлексы) 2) Изум- рудно-зе- леные (В)	1) 3,5—4 2) Хорошее	Реакция на Cu. Мине- рал + HNO_3 (1:20) + + $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$. Пленка розово-коричневого цвета

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
<i>R</i> < шеелита, анизотропные			
Вкрапленники, прожилки. Октаэдрические таблитчатые кристаллы. Спайность по (111)	Гранаты, пироксены молибденит, вольфрамит, касситерит, кварц. Замещает вольфрамит, иногда наоборот	3,15 (10) 1,925 (9) 1,590 (9)	Реакция окрашивания на W; сильно люминесцирует голубым в ультрафиолетовых лучах
Корки, почки, сталактиты, землистые массы аморфного, скрытокристаллического и зернистого строения. Внутреннее строение индивидуальных зональное. Выявляется травлением в кислотах (HNO ₃ или HCl)	Церуссит, малахит, азурит, англезит, пироморфит, миннетезит, аурихальцит, гидроцинкит, гидротит, каламин, кальцит, гипс и др. Замещает сфалерит, англезит	2,748 (10) 1,707 (10) 1,076 (9)	Сильные внутренние рефлексы; травление в кислотах; реакция на Zn; парагенезис
Корки, почки, сталактиты скрытокристаллического, радиально-лучистого строения. Спайность совершенная (001)	Азурит, куприт, тенорит, гётит, лампадит, хризоколла и др. Образует псевдоморфозы по азуриту, куприту	2,82 (10) 1,509 (9) 3,63 (8)	Зеленые внутренние рефлексы; травление, сильное двуотражение; реакция на Cu; натечные агрегаты; парагенезис
Корки, почки, землистые массы скрытокристаллического и радиально-лучистого строения. Агрегаты таблитчатых зерен	Малахит, гётит, лампадит, куприт, тенорит, кальцит, халькозин, хризоколла и др. Замещает сульфиды меди	5,20 (10) 3,67 (10) 3,53 (10)	Синие внутренние рефлексы; травление в кислотах; реакция на Cu; парагенезис
Корки с волокнистым и радиально-лучистым строением. Призматические кристаллы. Под бинокулярном	Малахит, азурит, тенорит, куприт, церуссит, атакамит, гётит. Образует псевдоморфозы по азуриту, малахиту. Замещается хризоколлой	2,49 (10) 3,83 (9) 6,20 (7)	Изумрудно-зеленые внутренние рефлексы; травление; реакция на Cu. От малахита отличается химическим анализом и дебаграммой

№ п/п Минерал; химический состав, %; характер- ные элементы-приме- си; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1). Внутрен- ние реф- лексы (2)	Твердость по Моосу; микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпе- чатка (1). поведение при полировании: от- носительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
164 Аурихальцит (Zn-Cu) ₈ [(OH) ₂ CO ₃] ₂ CuO 19,92—28,40; O 45,67—53,12; CO ₂ 12,55—16,48; H ₂ O 8,50—11,14; ромбич.	1) 6—7 (Вл) 2) Очень слабое 3) Темно-серый	1) Отчет- ливо ани- зотропен 2) Бесцвет- ные, голу- бые (В)	1) 2—3,5 2) Плохое	Реакция на Zn и Cu. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 1 мин. Проявитель: ртутно- родановая соль. Пятно фиолетового цвета
165 Сидерит FeCO ₃ ; FeO 62,1; Fe 48,3; CO ₂ 37,9; примеси: Mg, Mn; тригон.	1) 10—6 (Вл); 10 (Э) 2) Сильное (мешают внутренние рефлексы) 3) Серый	1) Сильно анизотро- пен (меша- ют внут- ренние ре- флексы) 2) Бесцвет- ные, буро- желтые (В)	1) 3,5—4; 397 2) Хорошее. $h \sim$ сфа- лериту	Реакция на Fe. Рас- творитель: HCl (1:10). Эксп. 10—12 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Темно-си- няя пленка
166 Ярозит KFe ₃ [(OH) ₆ (SO ₄) ₂]; K ₂ O 9,4; Fe ₂ O ₃ 47,9 SO ₃ 31,9; H ₂ O 10,8; примеси: Al (до 18,9), K—Ca (до 6%), Na (до 1,7%); тригон.	1) 8 (Вл) 2) Темно-серый	1) Слабо анизотро- пен: аморф- ные разнос- ти изотроп- ны 2) Жел- тые, бу- рые, бес- цветные (В)	1) 2,5—4,5; 110—210 2) Хорошее	Реакция на Fe. Рас- творитель: HCl (1:1). Эксп. 2 мин. Прояв- тель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пленка синего цвета
167 Скородит Fe[AsO ₄] ₂ ·2H ₂ O; Fe ₂ O ₃ 34,6; As ₂ O ₃ 49,8; H ₂ O 15,6; примеси: Al (до 5,8%), P (до 16%); ромбич.	1) 8 (Вл) 3) Темно-серый	1) Слабо анизотро- пен (меша- ют внут- ренние ре- флексы) 2) Зелено- ватые, бу- роватые, бесцвет- ные (В)	1) 3,5—4; 247—322 2) Хорошее	Реакция на As на шли- фе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2—5 мин. Проявитель: (NH ₄) ₂ MoO ₄ (порош- ок). Лимонно-жел- тый цвет осадка. Ре- акция на Fe, см. яро- зит
168 Кальцит CaCO ₃ ; CaO 56; CO ₂ 44; примеси: Mn (до 16%), Fe (до 13,1%), Mg (до 7,3%), Pb (до 6%), Zn (до 4%), Sr и Ba (до 3,4%), Co (до 2%), TR (Ce, V) (1—2%); тригон.	1) 7—4 (Вл); 10—5 (Э) 2) Сильное 3) Серый	1) Сильно анизотро- пен (меша- ют внут- ренние ре- флексы) 2) Бесцвет- ные (В)	1) 3; 120—202 (Б, Т) 2) Хорошее. $h \sim$ халь- копириту	Реакция окрашивания. Реактив HCl (1:20) + химические чернила. Эксп. 1 мин. Пленка фиолетового цвета

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Корки, сталактиты, прожилки аморфного, игольчатого и радиально-лучистого строения	Малахит, азурит, куприт, смитсонит, гидроцинкит, гётит и др.	$a_o = 27,84$ (?) $b_o = 6,41$ (?) $c_o = 5,25$	Травление; реакция на Cu и Zn
Полоски, оолиты, плотные и землистые массы. Идиоморфный, скрытокристаллический. Полисинтетические двойники. Спайность (011) совершенная	Распространенный минерал в послемагматических, осадочных месторождениях. Замещает карбонаты, гематит	2,791 (10) 1,733 (9) 2,135 (7)	Сильное двуотражение и внутренние рефлексы; медленное травление в кислотах; реакция на Fe; парагенезис
Плотные и землистые массы скрытокристаллического и зернистого строения, редко друзы мелких кристаллов. Под бинокляром	Распространен в железной шляпе. Замещается гётитом, гидротётитом, гидрогематитом	3,06 (10) 2,27 (8) 1,96 (8)	Сильные внутренние рефлексы; реакция на Fe; парагенезис
Корки, землистые массы и плотные выделения аморфного и тонкозернистого строения. Мелкие призматические кристаллы	Гётит, бедантит, вивианит, фармакосидерит. Замещает арсениpirit и другие арсениды	5,56 (10) 4,44 (10) 3,16 (10)	Сильные внутренние рефлексы; травление с KOH (бурый осадок); реакция на Fe и As; парагенезис
Аллотриоморфнозернистые агрегаты, редко кристаллы. Характерны тонкопластинчатые двойники в зернах и спайно	Широко распространенный минерал в месторождениях различного генезиса	3,029 (10) 1,0444 (10) 1,869 (9)	Сильное двуотражение; сильные внутренние рефлексы; бурное травление в кислотах; реакция окрашивания; полисинтетические двойники

ОПИСАТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА III.

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы- примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1), внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при поли- ровании; относитель- ный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
Подгруппа 21. Твердость высокая,				
169 Осмирид (IrOs); Ir 68—100; Os 0—32; примеси: Ru (до 18%); Pt (до 13%), Rh (до 12%), Pd, Au; кубич.	1) 68 (Вл) 3) Белый	1) Изо- тропен, слабо анизотропен	1) 6—7 2) Хорошее. h<иридистого осмия	Химический анализ на Os и Ir
170 Сперридит PtAs ₂ ; Pt 56,58, As 43,42; примеси: Ir (до 5%), Rh (до 1,66%), иногда Sn, Cu, Fe, Sb; кубич.	1) 55 (Вл); 56,5 (P) 3) Белый	1) Изо- тропен	1) 6—7; 645—783; 719 (Разиц, 1966); с. 2) Хорошее. h>платины, >бреггита, >пириту, <лаурита, иридистого осмия	Химический анализ на Pt и As
171 Смальтин (Co, Ni) As ₃₋₄ Co 28,23, Ni от следов до 28, As от 71 до 87; примеси: Cu (до 0,5%), Ag (до 3—4%), Fe (до 16); кубич.	1) 62 (Вл); 60 (P) 3) Белый с кремовым оттенком	То же	1) 5,5—6; 616—729 (Л); 748—920 (Тубо) с. 2) Отличное. h>маухерита, >никелину, линниту, ~раммельсбергиту, сафлориту, <леллингита, герсдорфита, <арсенопирита, пирита, кобальтина	
172 Скуттерудит CoAs ₂ ; Co 20,77; As 79,23; примеси: Fe (до 12%), Bi (до 20%), Ni, S, Cu, Sb, Te; кубич.	1) 60 (Вл) 3) Белый со слабым кремовым оттенком	1) Изо- тропен	1) 5,5—6 589—724; 653 (Б, Т), с. 2. Отличное. h>маухерита, >никелину, линниту, ~раммельсбергиту, сафлориту, <леллингита, герсдорфита, <арсенопирита, пирита, кобальтина	Отпечаток на Co красновато-коричневого цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1—3 мин. Проявитель: α-нитрозо-β-нафтол + NH ₄ OH. Реакция на As. Минерал + HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин. Затем добавляют (NH ₄) ₂ MoO ₄ порошок в избытке. Осадок лимонного цвета
173 Сафлорит (Co, Fe) As ₂ ; Co 28—23; As 71—77; примеси: Fe (до 18%), Co, Ni, S, Bi, Cu, Sb; ромбич.	1) 65—54 (Вл) 58 (P) 2) Слабое 3) Белый с голубоватым оттенком	1) Слабо анизотро- пен, изо- тропен	1) 4,5—5 430—751 (Л) 2) Отличное. h>скуттерудита, >никелину, <леллингита, <арсенопирита, кобальтина, глаукодота	

Подгруппа 22. Твердость высокая,

174 Осмистый иридий (невьянскит) (IrOs) Твердый раствор Os, Ir примеси: Cu, Fe, Au, Ru, Rh, Pt; гексагон.	1) 68 (Вл) 80 (Levy, Picot, 1961) 3) Белый	1) Слабо анизотропен (цветовой эффект от светло- голубого до серого)	1) 6—7 542—616; 566 (Л) 2) Хорошее. h>платины и иридия, >шпинели	Химический анализ на Ir и Os
--	--	--	--	------------------------------

МИНЕРАЛЫ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
<i>R</i> > пирита, изотропные			
Мелкие зерна кубического облика, спайность	Очень редкий минерал в гипербазитах, в россыпях уральской платины	2,124 (10) 1,217 (10) 0,844 (9)	От самородной платины и поликсена отличается высокой твердостью
Мелкие кристаллы кубического облика	Пирротин, халькопирит, пентландит, кубанит, куперит, бреггит, стибнопалладинит, лаурит, палладистая платина и др.	1,788 (10) 1,144 (10) 0,835 (10)	Парагенезис. Необходимы химический анализ и дебаграмма
Аллотриоморфные зерна, редко изометричные кристаллы с зональным строением. Внутреннее строение зерен выявляется при травлении в HNO ₃ конц. в течение 1 мин	Хлоантит, сафлорит, никелин, сидерит, халькопирит. Превращается в эритрин, питтитит, арсенолит, затем гетерогенит, асболан	2,593 (10) 1,837 (8) 1,609 (8)	Травление HNO ₃ ; зональное строение зерен; реакция на Со. От хлоантита отличается более высокой микротвердостью
Кристаллы кубического облика, иногда с зональным строением (при травлении в HNO ₃ конц.)	Глаукоdot, кобальтин, арсенопирит, сафлорит, раммельсбергит, серебро, висмут, аргентит, маухерит, никелин. Вторичные изменения, как у смальтина	2,585 (10) 1,607 (10) 1,078 (10)	От смальтина и хлоантита отличается травлением, более высокой твердостью, формой и внутренним строением зерен. Необходима дебаграмма
Скрытокристаллические агрегаты — корки	Хлоантит, раммельсбергит, смальтин, никелин, серебро и др. Вторичные изменения, как у смальтина	2,578 (10) 1,859 (10) 1,639 (10)	От сходных бесцветных сульфидов и сульфогангтимонидов отличается более низкой твердостью, реакцией на Со и Fe

R > пирита, анизотропные

Пластинчатые и шестигральные зерна. Спайность	Встречается в коренных и россыпных месторождениях самородной платины	2,15 (4) 2,07 (10) 1,23 (6) (Юшко-Захарова, 1975)	Не травится в царской водке. От самородной платины отличается высокой твердостью, анизотропией
---	--	--	--

№ п/п Минерал. Химический состав характерные элементы- примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1), внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при поли- ровании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
175 Сафлорит (Co, Fe) As ₂ ; Co 28,23; As 71,77; примеси: Fe (до 18), Ni, S, Bi, Cu, Sb; ромбич.	1) 62—54 (Вл); 58 (Р) 2) Слабое 3) Белый	1) Сильно, отчетливо анизотропен (цветовой эффект желтый, голубой)	1) 4,5—5; 430—751 (Л) 2) Отличное. h>скут- терудита, >никелину, <леллингита, <арсе- нопирита, кобальтина, глаукодота	Отпечаток на кобальт с α-нитрозо-β-нафто- лом коричневатого-розо- вого цвета и с K ₂ FeX X(CN) ₆ коричневатого- бурого цвета. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: NH ₄ OH+ α-нитрозо-β-нафтол. Проявитель: K ₂ Fe(CN) ₆ .
176 Глаукодот (Co, Fe) AsS; Fe 22,72; Co 11,99; As 45,72; S 19,57; примесь Bi; ромбич.	1) 57 (Вл); >арсенопирита (Э); 52,5 (Б) 3) Белый	1) Отчет- ливо, слабо анизотропен (цветовой эффект желтый, голубой)	1) 5,5—6; 841—978; 911 (Л); 1071—1166; 1124 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее. h>халь- копирита, сфалерита, немного<арсенопирита, <кобальтина	Реакция на Fe. Рас- творитель: HNO ₃ конц. Эксп. 3 мин. Прояв- тель: K ₂ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета
177 Раммельсбергит NiAs ₂ ; Ni 28,15; As 71,85; примеси: Co, Fe, S, Sb; ромбич.	1) 60 (Р); 55 (Э, Вл); 58,0—60,0 (Б) 2) Слабое 3) Белый с голубо- ватым оттенком	1) Отчет- ливо анизо- тропен (цветовой эффект от светло- серого до лиловато- бурого), иногда слабо анизотропен	1) 5,5—6; 556—629; 606 (Л); 687—778; 712 (Б, Т); сл. трещ. 2) Отличное. h<саф- флориту, ~скуттеру- диту, никелину	Реакция на Ni. Рас- творитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: NH ₄ OH+ диметилглиоксим. Пятно малинового цвета. Реакция на As, см. парараммельсбер- гит
178 Парараммельсбергит NiAs ₂ ; Ni 28,15; As 71,85; ромбич.	1) 60 (Э) 2) Слабое, заметное на границах зерен 3) Белый	1) Отчет- ливо анизо- тропен (цветовой эффект синий до розовато- оранже- вого)	1) 5,5—6; 762—803; 772 (Б, Т); сл. трещ. 2) Отличное. h>ник- елина, <Ni—скут- терудита, <леллин- гита	Реакция на As. Рас- творитель: HNO ₃ конц. на шлифе. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: (NH ₄) ₂ MoO ₄ , порош- ком в избытке. Осадок лимонно-желтого цвета
179 Маухерит Ni ₁₂ As ₈ ; Ni 54,85; As 48,15; примеси: Co (до 1,7%), Fe (до 0,8%), Cu (до 0,7%), S (до 1%); тетрагон.	1) 59 (Вл) 51,4 (БС) 60 (Р) 3) Светло-розово- желтый	1) Слабо анизотропен	1) 5—5,5; 685—724; 704 (Б, Т); сл. 2) Отличное. h>халь- копирита, сфалерита, <никелина, немного≅ ≅смальтина, <саф- флорита, раммельсбер- гита, леллингита и др.	Реакция на Ni. Минер- ал + HNO ₃ конц. Эксп. 5 мин. 1) +NH ₄ OH; 2) + рубеоановая кис- лота. Пятно фиолето- вого до синего цвета
180 Гудmundит FeSbS; Fe 26,6; Sb 58,1, S 15,3; моноклин.	1) 57,1 (Р) 59 (Э) 2) Сильное 2) Белый с розоватым оттенком	1) Отчет- ливо ани- зотропен (цветовой эффект красный, оранжевый)	1) 5—5,5; 588—683; 644 (Л) 2) Хорошее. h немно- го>сфалерита, пирро- тина, <брейтгауптита, <арсенопирита	Реакция на Sb на шли- фе. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 2 мин. Снять избыток реактива. Раствори- тель: HCl (1:1). Проявитель: CsCl+KI (порошок). Осадок кирпично-крас- ного цвета. Реакция на Fe с K ₂ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михеену, 1957	Отличительные диагностические признаки
Идиоморфные кристаллы с двойниковым и зональным строением. Радиально-лучистые и зональные агрегаты, звездчатые тройники	Хлоантит, раммельсбергит, смальтин, никелин, серебро и др. Замещает смальтин. Вторичные изменения, как у смальтина	2,578 (10) 1,859 (10) 1,639 (10)	От сходных бесцветных сульфоарсенидов и сульфоантимонидов отличается более низкой твердостью и реакцией на Со и Fe (характерны звездочки-тройники и цветовой эффект анизотропии)
Идиоморфные удлиненные кристаллы, иногда с зональным строением	Кобальтин, арсенопирит, халькопирит. Замещается эритрином	2,45 (10) 2,72 (9) 1,82 (9)	От арсенопирита отличается голубоватым оттенком, слабым травлением HNO_3 и слабыми эффектами анизотропии
Гипидиоморфнозернистые и радиально-лучистые агрегаты; полисинтетические двойники	Смальтин, хлоантит, сафлорит, никелин, серебро, висмут и др. Замещается аннабергитом	2,53 (10) 2,46 (10) 2,81 (8)	От парараммельсбергита отличается наличием двойников и характером дебаграммы; от сафлорита — реакцией на Ni и формой сростков, слабее анизотропен
Агрегаты таблитчатых зерен	Смальтин-хлоантит, раммельсбергит, никелин, серебро, леллингит. Замещается аннабергитом	2,55 (10) 2,86 (8) 2,37 (7)	От раммельсбергита отличается отсутствием двойников, ярким цветовым эффектом анизотропии, характером дебаграммы
Агрегаты волокнистого и радиально-лучистого строения. Полисинтетические двойники. Стр. травление: в HNO_3 конц.	Никелин, герсдорфит, сафлорит, смальтин, хлоантит, пентландит, пирротин, халькопирит и др. Замещает никелин и наоборот	2,70 (10) 2,02 (10) 1,717 (10)	От никелина и брейтгауптита отличается бедностью розовой окраски и слабой анизотропностью; от раммельсбергита — розовым оттенком. Характерны радиально-лучистые сростки
Призматические зерна, как у арсенопирита, и звездчатые сростки. Изредка зональное и двойниковое строение зерен	Блеклые руды, арсенопирит, сульфиды Sb, Pb и др.	$a_0 = 10,06$ $b_0 = 5,94$ $c_0 = 6,69$	От арсенопирита отличается реакцией на Sb, более сильным двуотражением и более низкой твердостью

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы- примеси, %; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1), внут- ренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при поли- ровании; относитель- ный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
--	---	--	---	----------------------------

Подгруппа 23. Твердость высокая

181 Пирит FeS_2 ; Fe 46,6; S 53,4; примеси: Co (до 1,4%), Ni (до 20%), As, Sb, Cu, Au, Ag и др.; кубич.	1) 54,5 (Б) 53 (Э) 57 (Вл) 3) Светло-желтый- эталон	1) Изо- тропен, иногда аномально анизотропен	1) 6—6,5; 1144—1374; 1295 (Л); 1027—1240; 1165 (Б, Т); трещ. 2) Посредственное (шагреневая поверх- ность), хорошее. h очень высокий, >ар- сенопирита, кобальти- на, ~марказиту, гема- титу, <сперилита, лаурита, касситерита	Реакция на Fe. Рас- творитель: HNO_3 (1:1) Эксп. 2 мин. Прояви- тель $K_4Fe(CN)_6$. Пятно синего цвета
182 Кобальтин $CoAsS$; Co 35,4; As 45,26; S 19,33; примеси: Fe (до 6%), Ni (до 13%), Sb, Bi; кубич.	1) 52 (Э, Р); 56 (Вл) 3) Розовато-белый	1) Изо- тропен, слабо анизотро- пен	1) 5,5; 943—1079; 1020 (Л); 1176—1226; 1200 (Б, Т); сл. трещ. 2) Плохое, реже хо- рошее. h очень высо- кий, >смаьтина, скуттерудита, лёллинг- гита, >арсенопирита, <пирита	Реакция на Co. Рас- творитель: HNO_3 конц. Эксп. 3 мин. Проявитель: 1) α -нитро- розо- β -нафтол + + NH_4OH . Пятно кир- пично-красного цвета; 2) $K_4Fe(CN)_6$, пятно бурого цвета. Реакцию на As, см. герсдорфит
183 Линнеит Co_2S_4 ; Co 57,96; S 42,04; примеси: Ni (до 14%), Fe (до 4%), Cu; кубич.	1) 46,5 (Р); 40 (Вл); 47 (Э) 3) Кремво-белый до розоватого	1) Изо- тропен	1) 5—5,5; 508—554 2) Хорошее. h >халь- копирита, >сфалерита, пирротина, ~скуттер- удиту, <герсдорфи- та, <пирита, арсено- пирита	
184 Зигенит (Co, Ni) ₃ S ₄ ; Co 29,02; Ni 28,89; S 48,09; примеси: Fe; кубич.	1) 46,5; 40 (Вл) 3) Кремво-белый до розоватого	То же	1) 5,5; 503—533; 524 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее. h ~лин- ненту,	Реакция на Ni. Рас- творитель: HNO_3 конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: NH_4OH + + диметилглиоксим. Цвет пятна малиновый. Реакция на Co, см. кобальтин
185 Карролит $CuCo_2S_4$; Co 38,00; Cu 20,52; S 41,48; примеси: Ni (до 7%), Fe; кубич.	1) 46 (Вл) 3) Кремво-белый до розоватого	1) Изо- тропен	1) 5,5; 351—566; 463 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h ~лин- ниту	Реакция на Cu. Рас- творитель HNO_3 конц. Эксп. 2 мин. Прояви- тель NH_4OH + рube- ановая кислота. Окра- шивание серо-зеленое. Реакция на Co, см. линнеит
186 Бравонит или никель- пирит (Ni, Fe, Co)S ₂ ; Ni до 30; Co до 10, Fe 38; S 54; примесь Cu; кубич.	1) 50 (Вл) 41 (Э); 45,5 (Кэмерон) 3) Светло-желтый с фиолетоным, розова- тым и коричневатым оттенком (изменчив)	1) Изо- тропен	1) 3,5—6; 668—861; 740 (Л); 1003—1288 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее. h >сфа- лериту, >пириту, не- много>пентландита	Реакция на Fe. Рас- творитель: HNO_3 конц. Эксп. 2 мин. Проявитель: $KCNS$. Пятно красно- го цвета. Реакция на Ni, см. зигенит, на Co, см. кобальтин

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
<i>R</i> > галенита, <i>R</i> < пирита, изотропные			
Зернистые агрегаты, кристаллы различного облика (кубы, пентагондодекаэдр, реже октаэдр). Зональное строение выявляется HNO ₃ конц. + CaF ₂ в течение 5 мин.	Марказит, халькопирит, сфалерит и др. сульфиды, золото. Замещается ярозитом, гётитом, халькозинном	1,629 (10) 1,040 (9) 2,696 (8)	Светло-желтый цвет; кубический облик кристаллов; высокий рельеф; высокое отражение; изотропен; реакция на Fe
Агрегаты и вкрапленность изометричных и скелетных кристаллов в виде кубов, октаэдров и пентагондодекаэдров. Зональное строение выявляется KMnO ₄ + H ₂ SO ₄	Магнетит, арсениопирит-глаукодит и другие кобальтовые, никелевые сульфиды и арсениды. Замещается эритрином	2,495 (10) 2,278 (10) 1,074 (10)	Розово-белый цвет; высокая микротвердость; зональное строение индивидуальных. От линнента отличается аномальной анизотропностью и очень высокой твердостью
Идиоморфнозернистые агрегаты, вкрапленность кристаллов октаэдрического облика. Спайность. Часто трещиноватый. Встречаются коломорфные агрегаты. Образует структуры распада с миллеритом и халькопиритом	Кобальтин, халькопирит, пирит, минералы никеля, кобальта, меди и железа. Переходит в миллерит и бравоит, а затем в эритрин и питтитит	1,68 (10) 2,82 (9) 1,82 (8)	От кобальтина отличается более низкой микротвердостью, лучшей полировкой и полной изотропностью; от полидимита, пирротина — реакцией на Со. Необходима дебаграмма; очень сходен с карролитом, зигенитом
Кристаллы октаэдрического облика. Образует структуры распада с миллеритом и халькопиритом	Пирит, линнент, халькопирит, миллерит и др. Замещается бравоитом, эритрином, питтититом, аннабергитом	2,85 (10) 1,67 (10) 2,36 (7)	От сходного линнента карролита отличается химическим составом; от полидимита — более высокой микротвердостью
Мелкозернистые агрегаты изометричных зерен. Образует структуры распада с миллеритом и халькопиритом	Линнент, зигенит, сидерит, пирит, халькопирит. Замещается эритрином, питтититом	1,676 (10) 2,875 (9) 1,827 (9)	Реакция на Си и Со; парагенезис. Необходимы химический анализ и дебаграмма. Очень похож на линнент, зигенит
Первичный — идиоморфные кристаллы с зональным строением. Вторичный — псевдоморфозы по пентландиту. Структура выявляется HNO ₃ конц.	Гипогенный бравоит ассоциирует с галенитом, пирротинном, сфалеритом, халькопиритом, баритом; гипергенный — образуется за счет пентландита и ассоциирует с марказитом, мельниквинтом, пиритом и вторичными сульфидами меди. Замещает пентландит. Замещается халькозинном, гётитом, аннабергитом	Дебаграмма аналогична пириту $a_0 = 5,50$ $-5,58 \text{ \AA}$	Зональное строение зерен; реакция на Ni; парагенезис. Все свойства сильно изменяются в зависимости от состава

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы- примеси, %; сингония	Отражение R , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1), внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при поли- ровании; относитель- ный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
187 Герсдорфит NiAsS; Ni 35,4; As 45,3; S 19,3; примеси: Fe (до 15%), Co (до 8,8%), Sb (до 1,4%); кубич.	1) 49,5 (В, Вл, P, Э) 3) Белый	1) Изо- тропн	1) 5—5,5; 520—588; 554 (Л); 665—743; 698 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее, посред- ственное. h ~смальти- ну и ульманниту, не- много >линнита, >сфалерита, <пирит- та, арсенипирита	Реакция на As. Рас- творитель: HNO ₃ конц. на шлифе. Эксп. 2 мин. Проявитель: (NH ₄) ₂ MoO ₄ в порош- ке. Окрашивание лим- онно-желтое. Реак- ция на Ni, см. зиген- нит
188 Ульманит NiSbS; Ni 27,62; Sb 57,30; S 15,08; примеси: Co (до 1,13%), Fe (до 3,2%), As (до 10%), Bi (до 12%); кубич.	1) 47,5 (Б, P); 49—47 (Вл) 3) Белый с очень слабым кремовым от- тенком	То же	1) 5—5,5; 498—542; 525 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее. h немно- >герсдорфита, <пи- рита	Реакция на Sb. Растворитель: HNO ₃ конц. на шли- фе. Эксп. 2 мин. Снять избыток кисло- ты. Растворитель: HCl (1:1). Прояви- тель: KI + CsCl (по- рошок). Осадок крас- ного цвета. Реакция на Ni, см. герсдорфит

Подгруппа 24. Твердость высокая,

189 Марказит FeS ₂ ; Fe 46,6; S 53,4; примеси: As, Ni, Co, Bi, Sb, Cu; ромбич. скрытокристаллич.	1) 52 (Э); 53 (Вл) 2) Сильное с цвето- вым эффектом 3) Светло-желтый с зеленоватым оттен- ком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект изменчи- вый), скрыто- кристал- лический изотропен	1) 6—6,5; 824—1119; 930 (Л); 941—1288; 1113 (Б, Т); трещ. 2) Хорошее, плохое. h >пирротина, <пирит- та, но >мельниковита	Реакция на Fe. Растворитель: HNO ₃ конц. Эксп. 1 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Пятно синего цвета
190 Арсенипирит FeAsS; Fe 34,3; As 46,0; S 19,7; примеси: Co (до 8%), Bi (до 4%), Au, Ni; монокл.	1) 54 (Вл); 50 (Э) 2) Слабое 3) Белый (со слабым желтовато-розоватым оттенком)	1) Сильно, отчетливо анизотропен (цветовой эффект в розова- тых, голубова- тых тонах)	1) 5,5—6; 898—1127; 1035 (Л); 1048—1127; 1094 (Б, Т); сл. трещ. 2) Хорошее. h >смаль- тина, леллингита, пир- ротина, магнетита, не- много >глаукодота, <кобальтина и пирита	Реакция на As. Рас- творитель: HNO ₃ конц. на шлифе. Эксп. 5 мин. Проявитель: (NH ₄) ₂ MoO ₄ (порош- ок). Осадок лимон- ного цвета. Реакция на Fe, см. марказит
191 Леллингит FeAs ₂ ; Fe 27,2; As 72,8; примеси: Co, Ni, S, Sb, ромбич.	1) 54 (Э); 54—57 (Вл) 2) Слабое 3) Белый	1) Сильно, отчетливо анизотропен (сильный цветовой эффект в желто- голубых тонах)	1) 5—5,5; 635—741; 688 (Л); 428—920 (Б, Т); ⊥ удлинению, С. 2) Хорошее. h >халь- копирита, сфалерита, немного >пирротина, сафлорита, >герс- дорфиту, <арсенипи- рита, пирита	Реакция на As, см. арсенипирит, на Fe, марказит
192 Брейтгаулит NiSb; Ni 32,52; Sb 67,48; гексагон.	1) 45,3—54,6 (Б); 50,2 (P); 50—40 (Вл); 45 (Э) 2) Сильное (плеохро- изм желтовато-крас- ный; крас- новато-фиолетовый) 3) Светлый фиолето- во-розовый	1) Сильно анизотропен (цветовые эффекты: светло-зе- леный, жел- топато-зе- леный, си- непато-зе- леный, фио- летовый)	1) 5—5,5; 412—449; 430 (Л); 542—584; 563 (Б, Т); с. 2) Отличное. h немно- >никелина, <саф- лорита, смальтина, скуттерудита, <ко- бальтина, арсенипирита	Реакция на Ni. Рас- творитель: HNO ₃ конц. на шлифе. Эксп. 1 мин. Прояви- тель: NH ₄ OH + диметил- тиллаксим. Пятно малинового цвета. Ре- акция на Sb, см. уль- манит

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Агрегаты кристаллов октаэдрического и кубического облика. Тонкие трещинки спайности по (100), треугольники выкрашивания, как у галенита. Часто зональное строение зерен	Никелин, ульманит, хлорантит, карбонаты и др.	2,557 (8) 1,725 (8) 1,582 (8)	Сходен с бравонтом, скуттерудитом и хлорантитом; отличается зональным строением зерен, спайностью и треугольниками выкрашивания, травлением
Агрегаты изометричных кристаллов с зональным строением. Спайность совершенная по (100). Треугольники выкрашивания	Никелин, брейтгауптит, герсдорфит, халькопирит, галенит и карбонаты. Замещается брейтгауптитом и наоборот	2,64 (10) 2,41 (8) 1,78 (8)	Редкий минерал. От герсдорфита отличается реакцией на Sb и по дебаеграмме. Реакция на Ni и S отличается от других сульфосарсенидов кобальта

R > галенита, *R* < пирита, анизотропные

Кристаллы удлиненной призматической и таблитчатой формы, пластинчатые двойники, коллоидные агрегаты с концентрически-зональной и радиально-лучистой структурами, иногда сажистый	Пирит, халькопирит, пирротин, вюрцит, сфалерит, галенит и др. Замещает пирротин и пирит, реже станнин. Замещается пиритом, гетитом	2,690 (10) 1,754 (10) 2,412 (8)	Неустойчивый минерал. Цветная анизотропия; форма выделений. Рядом с пиритом отличается зеленоватым оттенком
Кристаллы ромбической и призматической формы, звездчатые сростки, шестоватые и зернистые агрегаты. Зональное строение зерен выявляется травлением HNO ₃ (1:1) в течение 1 мин	Касситерит, пирит, кварц, золото, халькопирит, теннантит и другие сульфиды. Замещается гетитом, скородитом	2,662 (10) 1,817 (10) 2,443 (9)	От сходного дэлингита отличается более высокой микротвердостью, рельефом, травлением, более слабым эффектом анизотропии
Идиоморфные длинные кристаллы. Встречаются двойники ошк. Зональное строение	Арсенопирит, сульфиды Fe, Sn, арсениды Co, Ni, касситерит, золото, минералы серебра. Превращается в скородит, реже фармакоксидерит	2,589 (10) 1,846 (10) 1,628 (10)	От арсенопирита и глаукодота отличается микротвердостью, более сильным цветовым эффектом анизотропии; от сафлорита, раммельсбергита — химическим составом и дебаеграммой
Аллотриоморфные зернистые агрегаты; идиоморфные, таблитчатые кристаллы	Пирротин, никелин, кобальтин, серебро, ульманит и др. Замещается минералами серебра	2,810 (10) 2,052 (9) 1,939 (9)	Розовый цвет; сильное двуотражение и анизотропия; реакция на Ni и Sb. От никелина отличается фиолетовым эффектом анизотропии

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы- примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1), внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при поли- ровании. Относитель- ный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
--	--	--	--	----------------------------

Подгруппа 25. Твердость высокая,

<p>193 Псиломелан (Ba, Mn²⁺...) × × (O, OH)₈Mn₈⁴⁺O₁₆; Mn 35—60; примеси: Al (до 1,5%); Fe³⁺ (до 3,3%); W⁶⁺ (до 4,9%); V⁵⁺ (до 1%); Mg (до 1,6%); Co (до 1%); Sr (до 1,4%); Ca (1,9%); Cu (до 0,5%); Na (до 1,4%); U (до 1,5%); Pb, Ni, K; скрытокристалл.; монокл.</p>	<p>1) 35, 30 (Вл); 24 (Э) 2) Заметное 3) Серовато-белый до серовато-синего</p>	<p>1) Изо- тропен (скрыто- кристалл.), отчетливо анизотропен (кристалл.) 2) Бурые (МИ) от примесей гетита</p>	<p>1) 1—6; 503—627; 572 (Б, Т); с., вогн. 2) Плохое (пористый). h изменчив, < крупно- зернистых минералов марганца</p>	<p>Прямой отпечаток на Mn. Растворитель и проявитель: уксусно- кислый бензидин. Эксп. 2 мин. Окра- шивание синего цвета</p>
<p>194 Якобит MnFe₂O₄; MnO 13,94—30,76; Fe₂O₃ 73,96—69,24; примеси: Zn (до 16%), Mg (до 9,5%). Fe²⁺ (до 26%). Mn³⁺; кубич.</p>	<p>1) 19,5 (P) 3) Серый с зелено- ватым оттенком</p>	<p>1) Изо- тропен 2) Темно- красные (иногда видны в иммер- сии)</p>	<p>1) 6; 724—745; 734 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h ≈ маг- нетиту, немного < бра- унита</p>	
<p>195 Франклинит (Zn, Fe, Mn) O·Fe₂O₃; ZnO 17,25; MnO 15,04; Fe₂O₃ 67,71; примеси: Mn³⁺ (до 14,8%), Mn²⁺ (до 10,5%); кубич.</p>	<p>1) 16,5 (P) 3) Серый с бурова- тым оттенком</p>	<p>1) Изо- тропен (иногда слабая аномальная анизотропия от розо- вато-серого до серова- то-черного) 2) Темно- красные (МИ)</p>	<p>1) 5,5—6,5; 753—794 (Л); 720—752; 760—824 (Я, М) 2) Хорошее. h > цин- кита</p>	<p>Реакция на Zn. Рас- творитель: HCl конц. Эксп. 5 мин. Прояви- тель: Cu(NO₃)₂ + + ртутно-родановая соль. Промывать в воде. Пятно синне-фиолето- вого цвета. Реакция на Mn, см. псиломе- лан, на Fe, см. маг- нетит</p>
<p>196 Магнетит Fe₃O₄; Fe 69,94; O 30,06; примеси: Ti, Mn, Ca, Mg; кубич.</p>	<p>1) 25 (Б); 18 (P); 22 (Вл) 3) Серый с голубо- ватым оттенком</p>	<p>1) Изо- тропен, слабо анизотропен 2) Темно- коричне- вато- красные (МИ)</p>	<p>1) 5; 357—387; 378 (Л); 894—988; 946 (Б, Т); с. 2) Хорошее, часто трещины. h > магнети- та, < гематита</p>	<p>Реакция на Fe. Рас- творитель: HCl конц. Эксп. 5 мин. Прояви- тель: K₄Fe(CN)₆. Окрашивание синего цвета</p>
<p>197 Гидрогематит β-FeO [OH]; Fe 70; O 30; тонкодисперсный</p>	<p>1) 24—20 (Ю) 3) Серовато-белый с голубоватым оттен- ком</p>	<p>1) Изо- тропен, слабо анизотропен 2) Красные (Б, МИ)</p>	<p>1) 4—5 2) Посредственное</p>	

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
$R >$ сфалерита, $R <$ галенита, изотропные			
Сферические, колломорфные и землистые агрегаты скрытокристаллического и радиально-лучистого строения	Пирролизит, гаусманит, браунит, родонит, родохрит, гидроокислы железа и марганца. Продукт окисления других минералов марганца	2,191 (10) 3,462 (6) 2,877 (6)	Форма выделений; парагенезис; реакция на Mn^{4+} . Необходимы химический анализ и дебаграмма
Изометричные кристаллы кубического облика (кубы, октаэдры); реже мелкозернистые агрегаты	Гаусманит, браунит, пирролизит, псиломелан и др.	1,507 (10) 1,109 (9) 2,57 (8)	Магнитный; рефлексы; форма выделений; реакция на Mn и Fe ; парагенезис
Изометричные кристаллы октаэдрического габитуса	Цинкит, виллемит, кальцит, магнетит, якобит. Иногда образует псевдоморфозы по сфалериту. Замещается смесью гётита и пирролизита	2,510 (10) 1,610 (10) 1,480 (10)	От магнетита отличается внутренними рефлексами, микротвердостью, травлением и реакциями на Zn и Mn . Слабмагнитен
Аллотриоморфные зерна, оолиты, корки, каемки, тонкие прожилки; замещает магнетит, а сам переходит в гематит	Магнетит, лепидокрокит, гётит и гематит. Продукт гипо- и гипергенного окисления магнетитовых руд	2,51 (10) 1,605 (9) 1,480 (9)	Точно диагностируется только по дебаграмме. От магнетита отличается голубоватым оттенком и внутренними рефлексами, магнитен. Гематит — светлее, анизотропен, немагнитен
Натечные агрегаты (почки, корки концентрически-зонального и радиально-лучистого строения). Трешины гидратации	В месторождениях выветривания и осадочных. Замещает сидерит, пирит, магнетит, ярозит и др.	3,305 (10) 2,537 (10) 1,634 (10)	Красные внутренние рефлексы; натечные выделения; парагенезис

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы-примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотропии (1), внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при полировании. Относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
198 Магнетит Мушкетовит 198a Fe ₃ O ₄ ; Кулсонит 1986 (Fe, V) ₂ O ₄ ; FeO 31; Fe ₂ O ₃ 69; Fe 72,4; примеси: Al (до 15,2%), Ti (до 7,6%), V (до 5%), Mg (до 6,7%), Mn (до 3,4%), Ni (до 1,8%), Cr (до 1,4%); кубич.	1) 17,5; 21,7 (Э) 3) Серый с коричнево-розовым оттенком (буроватым оттенком). Кулсонит голубовато-серый	1) Изотропен	1) 5—6,5; 490—670; 530—599; 560 (Б, Т); 535—695; 610 (Л); с. 2) Хорошее. h > пирротина и сфалерита, < гематита, немного < ильменита, = гётиту	Реакция на Fe, см. магнетит, Медленно травится HCl конц. в течение 3—5 мин

Подгруппа 26. Твердость высокая.

199 Пирролизит MnO ₂ ; Mn 63,2; O 36,8; примеси: Fe, Ba, Na, K; тетрагон.	1) 40—30 (Вл) 35 (Э) 50—55 (Р) 2) Отчетливо 3) Серо-белый, белый с коричнево-вато-кремовым оттенком (в кристаллических разностях белый, в аморфных — темно-серый)	1) Сильно анизотропен (цветовые эффекты желтовато-голубовато-серые), аморфные разности изотропны 2) Нет, бурые рефлексы от примесей гётита (МИ)	1) 1—6,5; 76—1500 (БТ, ЯМ); с. трещ. вогн. 2) Хорошее, посредственное, плохое; h изменчив, зависит от ориентировки иногда высокий как у браунита	Прямой отпечаток на Mn ⁴⁺ . Растворитель и проявитель: уксуснокислый бензидин. Эксп. 2 мин. Окрашивание синего цвета
---	--	--	---	---

200 Псилломелан (Ba, Mn ²⁺ . . .) ₃ X X(O, OH) ₄ (Mn ⁴⁺ O ₁₆ ; Mn 35—60; примеси: Al (до 1,5%), Fe ³⁺ (до 3,3%), W ⁶⁺ (до 4,9%), Mg (до 1,6%), Co (до 1%) и др.; скрытокристал.; монокл.	1) 35; 30 (Вл); 25 (Э) 2) Заметное 3) Серовато-белый до синеватого	1) Отчетливо анизотропен (кристаллические разности), изотропен (скрытокристаллические) 2) Бурые (МИ) от примесей гётита	1) 1—6; 503—627; 572 (Б, Т); с. вогн. вын. 2) Плохое (пористый). h изменчив, < крупнозернистых минералов марганца	Прямой отпечаток на Mn ⁴⁺ . Растворитель и проявитель: уксуснокислый бензидин. Эксп. 2 мин. Окрашивание синего цвета
---	--	--	--	---

201 Биксбит (Mn, Fe) ₂ O ₃ ; Mn ₂ O ₃ 49,71; Fe ₂ O ₃ 50,29; примесь Ti; кубич.	1) 22 (Р, Вл) 3) Серовато-белый с желтоватым оттенком	1) Слабо анизотропен, изотропен	1) 6—6,5; 1003—1033; 1018 (Б, Т); с. 2) Хорошее h > гаусманита, > браунита, > голландита	Реакция на Fe. Растворитель: HCl конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: K ₂ Fe(CN) ₆ . Окрашивание синее. Реакция на Mn, см. гаусманит
---	--	---------------------------------	---	--

202 Гаусманит Mn ₂ O ₃ ; MnO 62,0; MnO ₂ 31; Mn 69; примеси: Zn (до 8,6%), Fe ³⁺ (до 4,3%), Ba, Ca; тригон.	1) 20 (Р, Э); 19—16 (Вл) 2) Сильное 3) Серовато-белый с голубоватым оттенком	1) Сильно анизотропен; эффект оливково-желтый 2) Красные, бурые (МИ)	1) 5—5,5; 541—613; 587 (Б, Т), сл. трещ. вогн., вын. 2) Хорошее. h > марганита, пирролизита, крипомелана, < якобсита, < биксбита	Реакция на Mn. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: K ₂ Fe(CN) ₆ . Отпечаток красного цвета
--	--	---	---	---

203 Браунит 3 Mn ₂ O ₃ · (Mn, Mg, Ca) SiO ₃ ; MnO 44,8; MnO ₂ 55,2; Mn 57,05; SiO ₂ до 10; примеси: Fe ³⁺ (до 17,9%), BaO (до 7%), Ca (до 4,3%), Fe ²⁺ (до 3,8%), MgO (до 4,86%); тетрагон.	1) 19 (Вл) 18,5 (Р, Э) 2) Слабое по границам зерен 3) Серый с коричневатым оттенком	1) Слабо анизотропен 2) Редко темно-бурые (МИ)	1) 6—6,5; 584—605 595 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h немного < биксбита, < голландита	Реакция на Mn. Растворитель: HNO ₃ (1:1). Эксп. 2 мин. Проявитель: K ₂ Fe(CN) ₆ . Отпечаток красно-бурого цвета
---	---	---	--	--

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Агрегаты изометричных, октаэдрических и кубических кристаллов. Образует структуры распада с ильменитом: ульвошпинель + ильменит + шпинель; магномагнетит + магнезоферрит. Мушкетовит — псевдоморфоза магнетита по пластинкам гематита	Ильменит, гематит, апатит, сульфиды Fe, Cu. Замещается маггемитом и гематитом	2,541 (10) 1,612 (9) 1,479 (9)	Коричневатый оттенок; сильно магнитный; реакция на Fe Кулсонит отличается от магнетита и мушкетовита высоким содержанием V (1—5%)
<i>R > с фалерита, R < галенита, анизотропные</i>			
Сплошные кристаллические или скрытокристаллические, часто порошковатые массы; псевдоморфозы по почковидным агрегатам псиломелана. Корки оолиты, конкреции. Кристаллы имеют игольчатый или листоватый облик. Спайность по (110) совершенная	Гаусманит, манганит, браунит, псиломелан и др. Очень часто замещает манганит, браунит	3,118 (10) 1,622 (10) 2,404 (9)	От других минералов марганца отличается более высоким отражением, коричнево-кремовым оттенком, совершенной спайностью. Хорошо раскристаллизованные разновидности называют полианитом
Сферические, коллоидные и землистые агрегаты гелевого, скрытокристаллического и радиально-лучистого строения	Пирролюзит, гаусманит, браунит, родонит, родохрозит, гидроокислы Mn, Fe. Продукт окисления других минералов марганца	2,191 (10) 3,462 (6) 2,877 (6)	Форма выделений; парагенезис; реакция на Mn^{4+} . Необходимы химический анализ и дебаграмма
Агрегаты изометричных зерен: полисинтетические двойники и зональное строение	Гематит, браунит. Замещается пирролюзитом, псиломеланом	2,705 (10) 1,655 (10) 1,409 (7)	Высокая микротвердость и отпечаток на железе отличаются от браунита; отсутствие внутренних рефлексов и зеленоватый оттенок от якобита
Агрегаты призматических зерен с полисинтетическими двойниками	Браунит, магнетит, гематит, псиломелан, пирролюзит, родонит. Замещается пирролюзитом, псиломеланом	2,73 (10) 2,45 (10) 1,53 (9)	От магнетита отличается внутренними рефлексами, анизотропией; от браунита — более сильной анизотропией и наличием полисинтетических двойников. Парагенезис.
Агрегаты изометричных и пирамидальных зерен; редко двойниковое и зональное строение	Псиломелан, манганит, пирролюзит, гаусманит, якобит и др. Замещается псиломеланом и пирролюзитом	2,75 (10) 1,66 (10) 1,415 (8)	От гаусманита отличается слабой анизотропией, от магнетита — реакцией на Mn. Парагенезис

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы-примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двуотра- жение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1), внутрен- ние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпечатка (1). Поведение при поли- ровании. Относитель- ный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
204 Гематит Fe ₂ O ₃ ; Fe 70,0; O 30,0; примеси: Al (до 14%), Ti (до 11%), Fe ²⁺ (до 5,8%), Mn (до 17%), Ca, Mg; тригон.	1) 25—30 (Б) 26 (Э) 27—24 (Вл) 2) Слабое, отчет- ливое 3) Серовато-белый с голубоватым от- тенком	1) Отчетливо ани- зотропен (пестрые цветовые эффекты в блеклых тонах) 2) Густые темно- красные (В, МИ); красный порошок	1) 6; 920—1062; 1009 (Б, Т); 739— 822; микрокристал. } сл. грубокристал. } трещ. 2) Плохое. h очень вы- сокий, изменчивый, > магнетита, > гётита, > лепидокрокита, > ильменита, > хро- мита, ~пириту, <кас- ситерита, < рутила	Реакция на Fe. Растворитель: HCl конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Отпе- чаток синего цвета
205 Лепидокрокит γFeO·OH; Fe ₂ O ₃ 89,9; H ₂ O 10,1; примеси: Mg, Al, Ca, Mn (до 1,5%), Pb (1,5%), ромбич.	1) 15,8—25,0(Б) 20—10 (Э) 19— 10 (Вл) 2) Сильное 3) Серовато-бе- лый	1) Сильно анизо- тропен 2) Желтоватые; коричневато-крас- ные, бурые (МИ)	1) 4—5; 690—803; 724 (Б, Т); 147—782 2) Хорошее. h < гётита	
206 Гётит α-FeO·OH; Fe ₂ O ₃ 89,9; H ₂ O 10,1; примеси: Mn (до 5%), Al, Mg, Ca; ромбич.	1) 16,1—18,5 (Э, Вл, Р) 2) Слабое, силь- ное 3) Серый с голу- боватым оттенком	1) Отчетливо ани- зотропен (мешают внутр. рефлексы), изотропен — скры- токристаллические разности 2) Желтовато-бу- рые, буровато- красные (В)	1) 5—5,5; микрокри- стал.; 525—620; 554 (Б, Т); крупнокри- стал.; 772—824; 703 (Б, Т); микрогрубо- кристал., сл. трещ. 2) Посредственное, хорошее. h (для кри- сталлических разно- стей) > лепидокроки- ту, < магнетита, маг- нетита, ильменита, ге- матита	Реакция на Fe. Растворитель: HCl конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: K ₄ Fe(CN) ₆ . Отпе- чаток синего цвета
207 Рутил TiO ₂ ; Ti 60; O 40; примеси: Nb (до 3,2%), Ta (до 3,8%), Fe ³⁺ до 12%), Fe ²⁺ (до 15%), Sn (до 2%), Cr (до 4%), V; тетрагон.	1) 25—21 (Р) 24—20 (Вл) 2) Слабое, замет- ное по границам зерен и двойни- ков, отчетливое 3) Серовато-бе- лый	1) Отчетливо ани- зотропен (мешают внутр. рефлексы) 2) Сильные, бес- цветные, желтые, редко коричне- вые, красно-бу- рые, зеленоватые (В)	1) 6—6,5; 1074— 1210; 1139 (Б, Т); с. 2) Посредственное. h > ильменита, < ге- матита, касситерита	Спектральный ана- лиз на Ti
208 Ильменит FeTiO ₃ ; Fe 36,8; Ti 31,6, O 31,6; примеси: Mn ²⁺ (до 14%), Fe ³⁺ (до 12%), Pb (до 12%), Sr, Zn, Sn, Ba, Mg, V, Cr, Co, Ni; тригон.	1) 21—17 (Вл) 18 (Э, Р) 2) Слабое, отчет- ливое 3) Серый с ко- ричневым оттен- ком	1) Отчетливо ани- зотропен 2) Темно-бурые, довольно редкие (МИ)	1) 5—6; 593—734; 640 (Л); 519—553; 536 (Б, Т); сл. трещ., колеба- ния в } вогн., вып. } связи с составом	Реакция на Ti. Растворитель: 5 ч. H ₂ SO ₄ конц. + 1 ч. H ₃ PO ₄ сироп + 1 ч. H ₂ O ₂ (30%-ная) + + 3 ч. H ₂ O + эл. ток 16 В. Эксп. 0,5—3 мин. Отпе- чаток желтого цве- та
209 Ильменорутит Ti[(Nb, Ta) Fe ²⁺] ₂ O ₇ ; TiO ₂ 87,28; Nb ₂ O ₅ 7,49; FeO 5,02. Ta ₂ O ₅ не обнаружен (Мине- ралогия, редких эле- ментов, т. 2, 1964); тетрагон.	1) 20—16 (Вл) 2) Слабое 3) Серый с розо- ватым, буроватым оттенком	1) Сильно, слабо анизотропен 2) Темные, бурые (МИ)	1) 6—7; 800—1100 (Л) 2) Хорошее. h ~ ру- тилу	Химический анализ

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаеграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Пластинчатые или игольчатые кристаллы, аллотриоморфнозернистые агрегаты, корки, оолиты, конкреции. Характерны пластинчатые двойники в зернах	Магнетит, ильменит, лепидокрокит. Замещает магнетит (мартит) и замещается магнетитом (мушкетовит). Переходит в гётит, сидерит	2,696 (10) 2,518 (10) 1,834 (10)	По сравнению с магнетитом и ильменитом значительно светлее, внутренние рефлексы темно-красные
Таблитчатые кристаллы, радиально-лучистые агрегаты	Продукт перекристаллизации гётита. Замещает пирит и арсенопирит	3,292 (10) 2,471 (10) 1,973 (10)	От гётита отличается формой выделений, двуотражением, анизотропией. По сравнению с гематитом рефлексы слабее, а двуотражение сильнее
Кремки, петельчатые агрегаты, псевдоморфозы, почки, корки гелевого, скрытокристаллического, волокнистого и радиально-лучистого строения. Трещинки усыхания в коллоидных агрегатах	Образуется в зоне окисления при замещении пирита, халькопирита, сидерита, магнетита и др. В осадочных месторождениях ассоциирует с гематитом, лепидокрокитом, пиролюзитом, псиломеланом, манганитом, кальцитом, кварцем	4,18 (10) 2,45 (9) 2,69 (8)	Сильные желтовато-бурые внутренние рефлексы; коллоидные выделения: радиально-лучистые агрегаты. Замещает пирит, халькопирит, сидерит
Призматические кристаллы, пучки волосовидных кристаллов. Простые колеччатые двойники в зернах	Магнетит, ильменит, циркон, брукит, анатаз, пирит и др. Замещается лейкоксеном	1,689 (10) 3,242 (9) 2,488 (8)	Сильные внутренние рефлексы: высокая твердость; спектр. анализ на Ti. Не травится реактивами
Агрегаты изометричных таблитчатых зерен. Решетчатые, пластинчатые структуры распада ильменита в магнетите. В зернах пластинчатые двойники	Магнетит, рутил, гематит, шпинель, корунд, халькопирит, борнит. Переходит в лейкоксен, анатаз, рутил, брукит	2,74 (10) 2,53 (9) 1,720 (8)	От рутила отличается более слабыми внутренними рефлексами, от магнетита — эффектом анизотропии, двойниковым строением
Призматические кристаллы с двойниками. Решетчатые, графические структуры распада твердого раствора ильменорутил + колумбит	Ильменит, сфен, рутил, колумбит, гематит	1,695 (10) 3,269 (8) 2,497 (6)	Парагенезис; сростания колумбита и рутила или тапюлита и рутила. Необходимы химический анализ и дебаеграмма

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы-примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двуотра- жение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1), внутрен- ние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кгс/мм ² ; форма отпе- чатка (1). Поведение при полировании. Относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
---	---	---	--	----------------------------

Подгруппа 27. Твердость высокая,

210 Давидит $FeTiO_3 \cdot (UO_2, Cr_2O_3)$; TiO_2 59,54; UO_2 9%; примеси: V, Th, Sr, Ca, U, Cr; тригон.	1) 17,2 (Б) 3) Серый	1) Изотропен 2) Темно-корич- невые (МИ)	1) 774—841; 805 (Л); 707—803; 745 (Б, Т); с. 2) Хорошее. h < иль- менита, < гематита, рутила	Химический анализ. Спектральный ана- лиз на Fe, Ti, U
211 Уранинит (U, Th) O_2 ; UO_2 86,86; ThO_2 6— 15; U 50—65; примеси: Pb (до 20%), V и его TR (до 15%), Ce и его TR (до 3,3%); Zn (до 7,6%), Fe^{3+} (до 4%); кубич.	1) 17 (Вл) 12,5—17,5 (Г, С) 13—21 (П, С) 14 (Э) 2) Серый, иногда с буроватым оттен- ком	1) Изотропен	1) 6—7; 602 (Г, С); 600—1000 (П, С); 782—839; 808 (Л); 782—839 (Б, Т); трещ. 2) Посредственное. h очень высокий, > магнетита, < пириту	Реакция на U. Раст- воритель: HNO_3 конц. Эксп. 3— 5 мин. Проявитель: $K_4Fe(CN)_6$. Отпечаток шоко- ладно-коричневого цвета. Мешают Cu, Fe, Mo
212 Бесториевый уранинит UO_2 U 86,86; примеси: Pb (до 20%), V и его TR (до 15%), Ce и его TR (до 3,3%), Zr (до 7,6%), Fe^{3+} (до 4%); кубич.	1) 17 (Вл); 14 (Э); 12,5— 14,4 (Г, С) 2) Серый, иногда с буроватым от- тенком	1) Изотропен	1) 6—7; 410—594 (Г, С); 800 2) Посредственное. h очень высокий, > магнетита, < пириту	То же
213 Настуран, или урано- вая смола $UO_2 + UO_3$; U 86,86; примеси: Pb, Ca, V, Ti, Zr; кубич. (скрытокри- сталлич.)	1) 11,6—16,8 (П, С) 3) Серый, иногда с буроватым от- тенком	1) Изотропен 2) Нет; иногда по трещинам бурые, зеленые (МИ)	1) 4—6; 471—724 (Г, С); 464—727 (П, С); 673—803 (Б, Т); трещ. 2) Посредственное. h варьирует	Отпечаток на U. Растворитель: HNO_3 (1:1). Эксп. 3 мин. Проявитель: $K_4Fe(CN)_6$. Отпечаток шоко- ладно-коричневого цвета
214 Торнит, ураноторни- нит (Th, U) O_2 ; Th 87,88; UO_2 4,73; примеси: PbO (до 12%), U (до 15%), Ce^{3+} (до 8%), Ge и Ga (до 7%), Pb (до 5,2%), Fe^{3+} (до 3,5%), Sc (до 0,5%); кубич.	1) 16 (Б) 3) Серый	1) Изотропен 2) Коричнево- красные, корич- нево-желтые (МИ)	1) 6,5—7,5; 988— 1115 (Б, Т); трещ. 2) Хорошее. h > ура- нинита	Спектральный ана- лиз на Th, U
215 Лопарит (Ce, Na, Ca) ₂ (Nb, Ti) ₂ O_6 ; (Nb, Ta, Ti) O_3 ; примеси: Nb (до 26,3%), Th (до 13%), Ca (до 11%), Fe^{3+} (до 6%), Sr (до 3,5%), Na, Pr, V, K; монокл.	1) 15 (Э) 3) Серый	1) Изотропен, слабо анизотропен 2) Красноато- бурые (В)	1) 5,5—6; 733—893; 811 (Л) 2) Отличное. h ~ маг- нетиту	Химический анализ на редкие земли

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии, дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
R <сфалерита, R > шеелита, изотропные			
Округлые или толстые пластинки крупных размеров. Метамиктный распад	Ильменит, рутил, магнетит, гематит	3,45 (10) 2,87 (10) 2,47 (9) 2,25 (7) 1,81 (8) 1,60 (8)	Диагностика в отраженном свете трудная, необходим химический анализ и дебаграммы. Слабо радиоактивен
Вкрапленность кристаллов кубического облика	Касситерит, кварц, турмалин, циркон, слюда, полевой шпат, пирит, халькопирит, арсенопирит, галенит, карбонаты, кобальтовые, никелевые, висмутовые и мышьяковые минералы	3,14 (10) 2,71 (8) 1,64 (8) (Г, С) 1,917 (8) 1,634 (8) 3,112 (6)	От настурана отличается кубической формой кристаллов (кубы, октаэдр). Реакция на U; сильно радиоактивен
То же	То же	То же	То же
Корковые, почковидные, колломорфные агрегаты с радиальными и концентрическими трещинами усыхания	Пирит, халькопирит, галенит, карбонаты, барит, флюорит, висмут, серебро, аргентит, прустит, пираргирит, смальтин, хлоантит, никелин, молибденит и др.	1,903 (10) 1,629 (10) 3,121 (9) бывает рентгеноаморфный	Натечная форма; реакция на U; сильно радиоактивен
Мелкие кристаллики кубического облика	Циркон, ильменит, торит и др.	3,216 (10) 1,964 (10) 1,675 (10)	Сильная радиоактивность. Необходим химический анализ и дебаграмма
Кристаллы кубического облика и аллотриоморфнозернистые агрегаты. Двойниковое строение зерен	Меланократовые сиениты и их пегматиты	2,749 (10) 1,583 (10) 1,226 (10)	От ториянита отличается слабой радиоактивностью; от перовскита и пиррохлора — двойниковым строением

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы-примеси, %; сингония	Отражение R, % (1); двутраже- ние ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1), внутрен- ние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H, кг/мм ² , форма отпе- чатка (1). Поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
216 Перовскит CaTiO ₃ ; CaO 41,22, TiO ₂ 58,88, примеси: Nb (до 26%), Zr (до 22%), Ce (до 11,3%), Al (до 10%), Fe ³⁺ (до 9%), Fe ³⁺ (до 5,7), Na (до 4,4%); монокл., псевдокубич. до кубич.	1) 15 (P) 3) Серый до си- него в иммерсии	1) Изотропен 2) Бесцветные, редко коричневые, бурые, желтые (B)	1) 5,5; 925—1050; 988 (Л) 2) Отличное. h~маг- нетиту	Спектральный ана- лиз на Ti
217 Пирохлор (Na, Ca) ₂ (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₇ (OH, F); примеси: U (до 17%), Ce (до 13%), V (до 13%), Zr (до 6%), Ta (до 33%), Ti (до 11%), Fe (до 6%), Th, V, K, Mg, Mn, Sr, Ba, Pb; кубич.	1) 13 (B) 3) Серый	1) Изотропен 2) Бесцветные, оранжевые, жел- тые, редко корич- невые (B)	1) 5—5,5; 514— 764 (Л); 655 (B, T); сл. трещ. 2) Отличное. h<ко- лумбита	Химический и спектральный ана- лиз
218 Хромит (Mg, Fe)O·(Cr, Al, Fe) ₂ O ₃ ; примеси: Fe ³⁺ (до 25,6%), Al (до 24,6%), Zr (до 5,8%), Mg, V, Ni, Co, Ti, Zr; кубич.	1) 12; 14 (Вл, Э, Б) 3) Серый	1) Изотропен, слабо анизотропен 2) Темно-красно- коричневые (МИ) для магнохромита	1) 6—7,5; 1036— 1566; 1375 (Л); 1195—1210; 1206 (B, T); с 2) Плохое. h>магне- тита, <гематита	Реакция на Fe. Растворитель: HCl конц. Эксп. 3—5 мин. Проявитель: K ₂ Fe(CN) ₆ . Отпе- чаток синего цвета. Реакция на Cr. И. р. + AgNO ₃ . Пятно коричнево- красного цвета

Подгруппа 28. Твердость высокая,

219 Браннерит (U, Ca, Th, V) [(Ti, Fe) ₂ O ₇]; ThO ₂ 4,1; UO ₂ 10,3; UO ₃ 33,5; примеси: Th (до 13%), Ce (до 7,4%), V (до 6,5%). Fe ²⁺ (до 5,4%), Ca (до 3,5%), Pb (до 3,5%), Sc, Nb, Ta, Mg, Mn, Sn, Hf, Sr, Ba; ромбич. или монокл.	1) 15—16 (П, С) равна вольфраму 3) Серый, как у вольфрамита	1) Слабо анизо- тропен 2) Бесцветные, редко буровато- красные (МИ)	1) 4,5—6,5; 710— 730; 720 (B, T); с. 2) Хорошее	Спектральный ана- лиз на Ti и U
220 Танталит (Fe, Mn) (Ta, Nb) ₂ O ₆ Ta>Nb; примеси: Th (до 13%), Ce (до 7,4%), V (до 6,5%), Fe ²⁺ (до 5,4%), Ca (до 3,5%), Pb (до 3,5%), Sc, Nb, Ta, Mg, Mn, Sn, Hf, Sr, Ba; ромбич.	1) 17 (P); 18 (Вл) 2) Слабое, замет- ное на границах зерен 3) Серый с корич- неватым оттенком	1) Слабо анизо- тропен; прямое угасание 2) Красноовато- коричневые (МИ)	1) 6—6,5; 724—882; 803 (B, T); 700—1070 (Л); с. 2) Хорошее. h очень высокий, ~ тапиолиту, полевоому шпату	Химический анализ

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии дебаэграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Единичные мелкие кристаллы (кубы, октаэдры) и идиоморфнозернистые агрегаты. Замещается лейкоксеном, рутилом, анатазом	В щелочных пироксенитах спутники—перовскит, апатит, нефелин, хромит, магнетит. В щелочных пегматитах — титаномагнетит. В контактово-метасоматических месторождениях — магнетит	2,69 (10) 1,903 (9) 1,552 (8)	От магнетита отличается более синеватым оттенком цвета и внутренним рефлексом; от хромита — более светлыми рефлексимами. Немагнитен
Идиоморфные кристаллы кубического облика и идиоморфнозернистые агрегаты. Зональное строение	Апатит, магнетит, ильменит, сфен, циркон, кальцит	1,830 (10) 1,558 (10) 0,874 (10) 3,030 (8)	Минераграфическое определение очень трудное; парагенезис. Необходимы химический анализ и дебаэграмма
Идиоморфные, изометричные, округлые зерна и идиоморфнозернистые агрегаты. Наблюдается зональное строение, часто трехгранное	Оливин, платина и платиноиды, ильменит, магнетит, серпентин. Наблюдаются тельца распада гематита, ильменита, рутила, ульвошпинели. Замещается хромшпинелидами, магнетитом	2,42 (10) 1,42 (10) 2,84 (9)	От магнетита отличается высокой микротвердостью, низким отражением, внутренними рефлексимами, травлением. Немагнитен
$R <$ сфалерита, $R >$ шеелита, анизотропные			
Вкрапленники призматических кристаллов	Кварц, вольфрамит, берилл, шеелит, молибденит	3,44 (10) 1,765 (10) 2,278 (8) (по Гецевой и др., 1956)	Вкрапленники призматических кристаллов; реакция на Ti; радиоактивен. Для точной диагностики необходим химический анализ
Таблитчатые кристаллы при скрещенных николях. Часто выявляется мозаичная структура	Касситерит, уранинит и редкоземельные минералы	2,97 (10) 1,72 (9) 1,458(9)	От магнетита и уранинита отличается анизотропностью, отрицательным травлением и микрохимией; от касситерита и вольфрамита — слабой анизотропией и слабыми внутренними рефлексимами

№ п/п Минерал. Химический состав, характерные элементы-примеси, %; сингония	Отражение R , % (1); двуотраже- ние ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект анизотро- пии (1), внутрен- ние рефлексы (2)	Твердость по Моосу. Микротвердость H , кгс/мм ² ; форма отпе- чатка (1). Поведение при полировании; относительный рельеф h (2)	Микрохимические реакции
221 Колумбит (Fe, Mn) (Ta, Nb) ₂ O ₆ Nb > Ta; примеси: U (до 0,5%), W (до 0,5%), Ti (до 12,8%), Sn (до 2,5%), TR (до 2%), Al (1,5%), Ca (до 1%), Sc, Mg; ромбич.	1) 17 (P); 18 (Вл) 2) Слабое, замет- но на границах 3) Серый с корич- неватым оттенком	1) Слабо анизо- тропен; прямое угасание 2) Редкие светло- красные и желто- коричневые (МИ)	1) 6—6,5; 240—640 (Л); 420—900 (Л); 727—882; 809 (Б, Т), с. 2) Хорошее. h очень высокий, ~ тапшолиту, полевоому шпату	Химический анализ
222 Касситерит SnO ₂ ; Sn 78,8; O 21,2; примеси: Fe ³⁺ (до 8%), Ta (до 5%) (до 2,5%), Sc (до 0,2%), Pb (до 0,2%), W, Mn; тетрагон.	1) 12,5 (Вл); 11 (P) 2) Слабое 3) Серый	1) Отчетливо анизо- тропен (мешают внутр. рефлексы) 2) Бесцветные, желтые, бурые, красноватые (В)	1) 6,5—7; 1008— 1228; 1106 (Л); 731—1520 (Макси- мум); 1027—1075; 1053 (Б, Т); с. 2) Отличное. h > гра- фита, > сфалерита, ~ магнетиту, гемати- ту, < пирита	Реакция на касси- терит. Раствори- тель: HCl (1:1) на шлифе. Эксп. I мин. В каплю вво- дится порошок ме- таллического цин- ка. Пленка метал- лического олова
223 Ильвант CaFe ₃ [Si ₂ O ₇]O(OH); примеси: Mn ²⁺ (до 13%), Mg (до 7%); ромбич.	1) 14—10 (Вл) 2) Сильное, плео- хромизм 3) Серый с розо- ватым оттенком	1) Сильно анизо- тропен, цветовой эффект 2) Красновато- коричневые (МИ)	1) 5,5—6; 614—1050; 820 (Л) 2) Отличное. h > гра- фита, > сфалерита, ~ магнетиту, гемати- ту, < пирита	Спектральный ана- лиз на Fe, Ca

Подгруппа 29. Твердость высокая,

224 Людвигит (Mg, Fe) ₂ Fe[VO ₃]O ₂ ; примесь Al (до 11%); ромбич.	1) 10 (P) 2) Сильное 3) Серый с розо- ватым и синеватым оттенком на раз- ных сечениях	1) Сильно анизо- тропен (темно- красные и темно- синевато-красные цветовые эффекты) 2) Красноватые (МИ)	1) 5; 537—558; 567 (Л) 2) Посредственное. h > лепидокрокита, ~ магнетиту	Спектральный ана- лиз на Mg, Fe, V
225 Сфен, титанит CaTiO [SiO ₄]; CaO 28,6; TiO ₂ 40,8; SiO ₂ 30,6; 22 Лейкоксен TiO ₂ ·nH ₂ O; примеси: TR (U > Ce) (до 12%), Sn (до 10%), Al (до 6,2%), Fe ³⁺ (до 5,9%), Nb (до 1%), Cr (до 0,8%); монокл.	1) 10 (Э); 12—9 (Вл) 2) Слабое 3) Серый	1) Слабо анизо- тропен (мешают внутр. рефлексы) 2) Белые, бурые, ре- же зеленоватые, ре- же золотистые, желтые (В)	1) 5—5,5; 752—853 (Я, М) 2) Хорошее	Спектральный ана- лиз на Ti
226 Кварц SiO ₂ ; тригон.	1) 4,5 (Вл, Э) 3) Темно-серый	1) Слабо анизо- тропен (мешают внутр. рефлексы) 2) Бесцветные, радужные (В)	1) 7; 1023—1236; 1135 (Л); 1097— 1168; 1135 (Б, Т) 2) Хорошее. h ~ пирит- у, касситериту, поли- руется лучше пирита и касситерита	Химический анализ на Si

Форма и внутреннее строение агрегатов и зерен; методы их выявления	Ассоциации и парагенезисы	Диагностические линии; дебаграммы по Михееву, 1957	Отличительные диагностические признаки
Таблитчатые кристаллы. Продукт распада твердого раствора в касситерите; полисинтетические двойники	Встречается в гранитных пегматитах, высокотемпературных гидротермальных жилах	2,909 (10) 1,685 (9) 1,433 (9)	От вольфрамита отличается слабым эффектом анизотропии и двуотражения; от танталита — меньшей микротвердостью
Изометричные кристаллы дипирамидального и призматического облика; зернистые агрегаты, скрытокристаллические и метакolloидные почковидные выделения. Двойниковое и зональное строение зерен	Типы ассоциаций: 1. Кварц, танталит, колумбит. 2. Кварц, вольфрамит, молибденит, арсенопирит, турмалин, топаз 3. Кварц, сульфиды Cu, Pb, Fe, Bi. 4. Деревянистое олово в зоне окисления. Замещает станный	1,758 (8) 1,079 (7) 1,213 (6)	Сильные внутренние рефлексы; низкое отражение; высокая твердость; реакция на Sn. Плохо полируется. От рутила отличается зональным строением зерен
Столбчатые кристаллы, лучистые агрегаты, изометричные зерна со спайностью. Замещается по краям и по спайности лимонитом; иногда двойникование и зональное строение	Редкий минерал контактово-метасоматических железорудных месторождений и метаморфических пород	$a_0 = 8,84$ $b_0 = 5,87$ $c_0 = 13,10$	От людовигита отличается формой выделения, сильным двуотражением и сильной анизотропией
R < шеедита, анизотропные			
Радиально-лучистые, сноповидные и пучкообразные агрегаты игольчатых зерен. Замещается гётитом	Магнетит, доломит	2) 5,146 (9) 2,569 (10) 2,175 (3)	От ильванита отличается игольчатыми агрегатами
Для сфена характерны идиоморфные клиновидные, призматические, таблитчатые, ромбовидные и конвертообразные кристаллы, для лейкоксена — псевдоморфозы по ильмениту, брукиту, перовскиту, сфену и неправильные мелкие скопления скрытокристаллического строения	Сфен — в нефелин-апатитовых рудах в сиенитах; в метаморфизованных основных породах. Лейкоксен — продукт преобразования ильменита	Сфен 3,20 (10) 2,59 (10) 2,98 (9)	Сфен; сильное двуотражение, внутренние рефлексы, клиновидные кристаллы, похож на шеедит. Псевдоморфозы лейкоксена по ильмениту
Аллотриоморфозернистые агрегаты, идиоморфные кристаллы призматического габитуса, шестигранные в сечениях	В кислых горных породах и рудах гидротермальных месторождений	α -кварц 3,34 (10) 1,813 (9) 1,539 (9)	Сильные рефлексы, высокая твердость. Очень низкое отражение. Шестигранные сечения идиоморфных кристаллов

ОПИСАТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА IV. МИНЕРАЛЫ

№ п/п Минерал, его формула, химический состав и характерные примеси, %, сингония	Отражение R 460, R 540, R 580, R 700, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, 	Эффект поляризации (1); внутрен- ние рефлексы (2)	Твердость по Моосу (М. М. Хрущову) (1); микротвер- дость H , кгс/мм ² (2); форма отпе- чатка (3); отно- сительный релье- ф h (4); полируе- мость (5)	Микрохимические реакции (1); растворитель, время экспозиции (2); проявитель (3); окрашивание или осадок (4)
227 Самородное серебро Ag; Ag 96,5—99, Fe, Zn, Hg—0—1,5, Pt, Pd, Ni, Cu, Sb— —O—O, п; кубич.	1) 83,2; 87,1; 89,0; 97,7 2) Нет 3) Ярко-белый с кремовым оттен- ком, на свету туск- неет	1) Изотропно 2) Нет	1) 2,7—3,2 (2,9) 2) H_{20} =67—103 (80) 3) Квадратная 4) Низкий 5) Хорошая, но с трудом	1) Капельная на Ag (на шлифе) 2) HNO ₃ (1:1), эксп. 3 мин 3) K ₂ Cr ₂ O ₄ 4) Оранжево-красное
228 Электрум Ag ₂ Au, Ag ₁ Au ₁ ; Au 48—63, Ag 28,5—51, Cu 0—5,5 Pd 0—4,5, Rh 0—4, Pt 0—2,5, Ru ₁ Fe 0—1,0; кубич.	1) 57,6; 75,1; 79,6; 86,9 2) Нет 3) Светло-желтый	1) Изотропен 2) Нет	1) 2,5—3,2 (2,9) 2) H_{20} =63—119 (87) 3) Квадратная 4) Низкий 5) Хорошая, но с трудом	1) Капельная на Ag (на шлифе) и на Au (на предметном стекле) 2) Царская водка, эксп. 30 с—1 мин 3) На Ag—K ₂ CrO ₄ , на Au—SnCl ₂ 4) На Ag—оранжево- красное окрашивание, на Au—осадок метал- лического золота
229 Самородное золото Au _{1,5} Ag ₁ —Au; Au 68,5—99, Ag 0—24, Pd 0—3,0, Bi 0—1,5, Cu 0—1,0; кубич.	1) 53,4; 76,7; 79,1; 86,3 2) Нет 3) Ярко-желтый, у высокопробно- го — с красноват- ым оттенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 2,5—3,1 (2,8) 2) H_{20} =47—99 (75) 3) Квадратная 4) Низкий 5) Хорошая, но с трудом	1) Капельная на Au (на предметном стекле) 2) Царская водка, эксп. 3 мин 3) SnCl ₂ 4) Осадок металличе- ского золота
230 Кюстелит Ag _{13,8} Au ₁ — Ag _{2,5} Au ₁ ; Ag 58—90, Au 10—44, Pd 0—5,5, Bi 0—4,0, Rh 0—2,0; кубич.	1) 57,3; 72,0; 76,5; 86,2 2) Нет 3) Ярко-белый с желтоватым оттен- ком, подвержен световому травле- нию, становится желтовато-бурым	1) Изотропен 2) Нет	1) 2,7—3,2 (2,9) 2) H_{20} =68—104 (84) 3) Квад атная 4) Низкий 5) Хорошая, но с трудом	1) Капельная на Ag и Au 2) HNO ₃ конц., эксп. 1—2 мин 3—4) См. электрум

ПРИРОДНЫХ СПЛАВОВ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА

<p>Диагностическое травление: HNO₃ конц. (1), HCl конц. (2), FeCl₃ (3), HgCl₂ (4), KOH (5), KCN (6),</p>	<p>Форма и внутреннее строение выделений, методы их выявления</p>	<p>Ассоциации, парагенезисы (ПГ)</p>	<p>Диагностические линии дебаграммы</p>	<p>Отличительные диагностические признаки</p>
<p>1) Интенсивно травится с вскипанием 2 и 3) Буреет 4) Слегка буреет 5) и 6) Отрицательно. Травится интенсивно в капле царской водки и H₂S</p>	<p>Аллотриоморфнозернистые агрегаты, прожилковидные, каплевидные и каемчатые выделения, дендриты, скелетные зерна, кубические кристаллы и их сростки; внутреннее строение выделений в основном гомогенное; структурное травление в капле (CrO₃+HNO₃ конц.) эксп. 1—3 с, выявляет особенности при зональном строении и пластинчатом двойниковании выделений</p>	<p>Халькозин, борнит, валлернит, халькопирит, кубанит, талнахит, пирротин, магнетит, миллерит, голдескит, галенит, арсениды Co и Ni, кюстелит (ПГ), пираргирит, прустит, дискразит, тетраэдрит, аргентит, стефанит, джемсонит, сам. висмут, лимонит, блеклые руды, минералы палладия и платины</p>	<p>2,35 (10) 2,036 (7) 1,443 (8) 1,231 (9) 1,177 (6)</p>	<p>Кремовый оттенок, быстрое потускнение на воздухе и свету, изотропизм, диагностическое травление</p>
<p>2) и 5) Отрицательно 3) Иногда травится 1) и 4) Слегка буреет 6) Интенсивно, а также интенсивно травится в капле царской водки</p>	<p>Аллотриоморфнозернистые агрегаты, прожилки, дендритовидные, каплевидные и каемчатые выделения, метакристаллические зерна, примазки, эмульсионная вкрапленность, субграфические сростания с платиновыми минералами; внутреннее строение выделений гомогенное</p>	<p>Галенит, сфалерит, халькопирит, талнахит, кубанит, магнетит, пирротин, валлерит, пентландит, хизлеудит, халькозин, антимонит, пираргирит, прустит, сам. висмут, аргентит, кюстелит (ПГ), минералы палладия и платины, порпечит, аурукупроит, сам. золото (ПГ), сам. серебро, рожковит, кварц, хлориты, пироксены, плагиоклазы, амфиболы, биотит, серпентины</p>	<p>2,35 (10) 2,036 (6) 1,442 (5) 1,228 (5) 1,176 (3)</p>	<p>При сходстве с самородным золотом и иногда кюстелитом отличается травлением в капле HNO₃ конц. и по хим. составу</p>
<p>1—5) Отрицательно 6) Интенсивно, а также интенсивно травится в капле царской водки</p>	<p>Аллотриоморфнозернистые агрегаты, дендриты, прожилки, эмульсионная вкрапленность, обособленные зерна неправильной формы; структурное травление в капле (CrO₃+HCl) или (CrO₃+ц. в.) выявляет зернистость, двойники, дендритовое строение зерен</p>	<p>Пирит, арсениопирит, галенит, сфалерит; блеклые руды, пирротин, халькопирит, магнетит, пентландит, кубанит, антимонит, лимонит, минералы платины и палладия, рожковит, аурукупроит, кюстелит, электрум (ПГ), кварц, серпентины, биотит, диопсид</p>	<p>2,34 (10) 2,032 (7) 1,441 (7) 1,228 (8) 1,175 (5)</p>	<p>Цвет, высокое отражение, изотропность, интенсивное травление только в капле KCN и в капле царской водки</p>
<p>5) Отрицательно 3—4) Слегка буреет 1—2) Буреет 6) Интенсивно, а также интенсивно травится в капле царской водки</p>	<p>Аллотриоморфные, прожилковидные, каемчатые и мirmekитовые выделения, метакристаллические зерна; структурное травление, см. сам. серебро, эксп. 10 с</p>	<p>Борнит, валлернит, талнахит, халькопирит, пентландит, магнетит, халькозин, галенит, сфалерит, кубанит, джерфшерит, серпентины, биотит, диопсид, амфиболы, электрум (ПГ), сам. золото, сам. серебро (ПГ), пираргирит, аурустибит, алтант, аурукупроит, рожковит, минералы палладия и платины</p>	<p>2,36 (10) 2,041 (7) 1,445 (6) 1,232 (6) 1,180 (5)</p>	<p>Оттенок, отраженные, диагностическое травление, химический состав</p>

№ п/п Минерал, его формула, химический состав и характерные примеси, %; сингония	Отражение R_{460} , R_{540} , R_{580} , R_{700} , % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект поляризации (1); внутрен- ние рефлексы (2)	Твердость по Моосу (М. М. Хрущову) (1); микро- твердость H_v , кгс/мм ² (2); форма отпечатка (3); от- носительный рельеф h (4); полируе- мость (5)	Микрохимические реакции (1); раство- ритель, время экспози- ции (2); проявитель (3); окрашивание или осадок (4)
231 Медистое самородное золото $Au_{12}Cu_1-Au_1Cu_2$; Au 88-97,5, Cu 2,5-11,5, Ag 0-1,0; кубич.	1) 52,3; 74,8; 77,9; 85,7 2) Нет 3) Красно-розово- желтый с розова- тым оттенком	1) Изотропно 2) Нет	1) 2,7-2,9 (2,8) 2) $H_{50} = 67-82$ (74) 3) Квадратная 4) Низкий 5) Хорошая, но с трудом	1) Капельная на Au (см. самородное золо- то) и на Cu (на филь- ровальной бумаге) 2) Царская водка, эксп. 1-2 мин 3) Капля 25% NH_4OH +капля рubeа- новой кислоты 4) Серо-зеленое
232 Аргентскупроаурит $Au_2Cu Ag_{1-x}$; Au 66,5-68, Ag 12,5-19,5, Cu 9- -11,5, Pd, Rh 0- 4,5, Pb 0-2; кубич.	1) 50,2; 58,0; 64,3; 77,2 2) Нет 3) Светло-розовый с красноватым от- тенком, подвержен световому травле- нию, бурет	1) Изотропен 2) Нет	1) 4,0-4,1 (4,0) 2) $H_{50} = 211-217$ (214) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая, но с трудом	1-4) См. медистое са- мородное золото, эксп. 4-5 мин
233 Рожковит Cu_3Au_2 ; Au 60,5-66, Cu 23-23,5, Pd 0-9, Bi 0-5, Rh 0-3,5, Pt 0-1,5; ромбич.	1) 49,6-46,0; 57,1-53,0; 63,5-59,0; 76,4-72,4 2) Слабое 3) Светло-розовый с сиреневым оттен- ком (от светло- розового до розо- вато-серого), под- вержен световому травлению — буре- ет	1) Умеренно, иногда ясно анизотропен (цветовой эф- фект от желто- го до темно- серого) 2) Нет	1) 3,6-3,9 (3,8) 2) $H_{50} = 155-199$ (176) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая, но с трудом	1) Капельная на Au (на стекле) и Cu (на фильтровальной бума- ге) 2) Горячая царская водка, эксп. 1 мин 3) $Na^+ Au^- HCl (1:1) +$ +древянистое олово 4) Черный коллоидный осадок 3-4) На Cu — см. медистое самород- ное золото.
234 Аурокуприт $Cu_{1+x}Au_{1-x}$; Au 61,5-71,0, Cu 26,5-30,5, Pd 0-8,0, Pt 0-2,5, Ph 0-2,0, Ag 0-1,0; кубич.	1) 47,8; 56,8; 63,1; 74,6 2) Нет 3) Светло-розовый с оранжевым от- тенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 3,8-4,0 (3,9) 2) $H_{50} = 176-206$ (190) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая, но с трудом	1-4) Как и рожковит
235 Порпецит $Au_6+x Pd-Au_4 Pd$; Au 84-91, Pd 5,5- -12, Cu 0-2,0, Bi, Ag 0-1,5; кубич.	1) После светового травления — 43,7; 55,0; 62,1; 75,0 2) Нет 3) Красный, под- вержен световому травлению, бурет	1) Изотропен 2) Нет	1) 3,1-3,3 (3,2) 2) $H_{20} = 97-114$ (106) 3) Квадратная 4) Низкий 5) Хорошая	1) Капельная на Au (см. самородное золо- то) 1) Капельная на Pd (на фильтровальной бумаге) 2) Царская водка, эксп. 3 мин 3) NH_4OH 4) Оранжевое
236 Аргенто-пентландит (Fe, Ni) _{8+x} Ag _{1±y} S ₈ ; Fe 30-39, Ni 13,24; Ag 10-20, S 30- -35,5; кубич.	1) 28,6; 35,1; 36,6; 42,5 2) Нет 3) Коричневый с буrowатым или красноватым от- тенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 3,4-3,9 (3,7) 2) $H_{50} = 132-192$ (171) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	—

Диагностическое травление: HNO_3 конц. (1), HCl конц. (2), FeCl_3 (3), HgCl_2 (4), KOH (5), KCN (6),	Форма и внутреннее строение выделений, методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы (ПГ)	Диагностические линии дебаеграммы	Отличительные диагностические признаки
1—5) Отрицательно 6) Интенсивно, а также интенсивно травится в капле царской водки	Аллотриоморфнозернистые агрегаты и кристаллики кубического габитуса; структурное травление то же, что и для самородного золота, с теми же результатами	Халькопирит, халькозин, самородная медь, аргентит, пентландит, магнетит, кварц, серпентин, гранаты	См. самородное золото	Сочетание цвета с оттенком, микротвердостью, микрохимическими реакциями на Cu и Au , химическим составом
1—5) Отрицательно 6) Буреет и также травится в капле царской водки (буреет)	Аллотриоморфнозернистые агрегаты, метакристаллические зерна; внутреннее строение выделений однородное	Халькопирит, талнахит, кубанит, самородное золото, электрум, минералы палладия и платины	2,036 (8) 1,436 (8) 1,356 (8) 1,295 (8) 1,228 (8)	Сочетание цвета с оттенком, микротвердостью, микрохимическими реакциями на скрещенных никелях, диагностическим травлением и химическим составом
1—5) Отрицательно 6) Буреет, иногда травится в капле царской водки	Аллотриоморфнозернистые агрегаты, прожилковидные и миремитовые выделения, эмульсионная вкрапленность. Внутреннее строение выделений однородное, ясно анизотропные разновидности иногда зернистого строения с тонкой полисинтетической, двойникованностью, заметной при скрещенных никелях	Валлерит (ПГ), галенит, сфалерит, талнахит, халькопирит, магнетит, пентландит, кубанит, пирротин, хлориты (ПГ), кюстелит (ПГ), самородное золото (ПГ), электрум, аурупорит (ПГ), минералы палладия и платины	1,943 (7) 1,923 (7) 1,370 (7) 1,363 (7) 1,178 (7)	Цвет с оттенком, двуотражение, цветовой эффект при скрещенных никелях, дебаеграмма
Как и рожковит	Аллотриоморфнозернистые агрегаты, миремитовые, прожилковидные и каемчатые выделения, эмульсионная вкрапленность, метакристаллические зерна, удлинненные кристаллы. Внутреннее строение выделений однородное	Халькопирит, кубанит, талнахит, пентландит, кюстелит, электрум, рожковит (ПГ), самородное золото, минералы платины и палладия, хлориты, серпентин, биотит	2,23 (10) 1,934 (7) 1,365 (7) 1,163 (6) 1,115 (5)	Оттенок, изотропность, содержание меди, дебаеграмма
Как и самородное золото	Аллотриоморфнозернистые агрегаты, пластинчатые и коллоидные выделения, кристаллы кубического габитуса	Халькопирит, кубанит, халькозин, пирротин, тронлит, сам. висмут, киноварь, электрум (ПГ), аргентокупроарит, минералы палладия и платины	2,33 (10) 2,027 (8) 1,225 (5) 0,929 (5) 0,908 (6)	Цвет, микротвердость, микрохимические реакции на Pd и Au (последовательно), химический состав
1) и 3) Отрицательно	Аллотриоморфнозернистые агрегаты, кристаллические зерна, каемки неправильной формы	Пентландит (ПГ), галенит, сфалерит, халькопирит, кубанит, макинавит, пирротин, пирит	3,17 (10) 3,035 (5) 2,018 (4) 1,858 (10) 1,072 (3)	Цвет, отражение, микротвердость, химический состав

ОПИСАТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА V. МИНЕРАЛЫ ПРИРОД

№ п/п Минерал, его формула, сингония, химический состав, %; характерные примеси	Отражение R 460, R 540, R 580, R 700, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект поляризации (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу (М. М. Хрущову) (1); микротвердость H , кгс/мм ² (2); форма отпечатка (3); относительный рельеф h (4); полируемость (5)	Микро- химические реакции (1); растворитель, время экспозиции (2); проявитель (3); окрашивание или осадок (4)
237 Платинистый иридий $Ir_2Pt_1 - Ir_1Pt_1$; Ir 60—79,5, Pt 12,5—22,5, Rh 0—6,0, Os 0—5,5, Ru 0—4,5, Pd 0—1,0, Fe 1,5—3,5, Cu 0—1,8; кубич.	1) —, 70,8; 72,3; 79,8 2) Нет 3) Ярко-белый с розоватым оттенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 5,1—5,5 (5,3) 2) $H_{30} = 430—512$ (470) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	
238 Иридная платина $Pt_1Ir_1 - Pt_{1+x}Ir_1$; Pt 55—58,3, Ir 27,5—29, Rh 3,5—7,0, Pd 0—0,5, Fe 4—4,5, Cu 1—3,5; кубич.	1) 71,1; 72,5; 72,2; 78,7 2) Нет 3) Ярко-белый с желтоватым оттенком	1) Изотропна 2) Нет	1) 5,0 2) $H_{30} = 407—417$ (412) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	
239 Самородный иридий $Ir - Ir_2Pt_1$; Ir 90—100, Pt 0—10, Fe 0—2,0; кубич.	1) 66,0; 68,7; 68,0; 71,7 2) Нет 3) Ярко-белый со слабым желтоватым оттенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 5,5—5,9 (5,7) 2) $H_{30} = 527—668$ (591) 3) Квадратная 4) Высокий 5) Хорошая	
240 Самородная платина $Pt_4Fe_1 - Pt$; Pt 91—100, Pd , Ir 0—0,5, Fe 0—6,7, Cu 0—1,0; г. ц. кубич.	1) 57,2; 67,7; 66,0; 75,9 2) Нет 3) Ярко-белый	1) Изотропна 2) Нет	1) 3,7 2) $H_{30} = 165,5$ 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	
241 Купроферроплатина $Pt_4Fe_3Cu_2$; Pt 65,4—74,6, Ir 0—1,3, Fe 12—17,6, Cu 7,7—14,0, Ni 0—1,7; кубич.	1) —, —, 69,0; 73,1 2) Нет 3) Ярко-белый со слабым желтоватым оттенком	1) Изотропна 2) Нет	1) 3,4—3,9 (3,6) 2) $H_{30} = 122—187$ (154) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	1) Капельная на Cu (на фильтровальной бумаге) 2) Ц. в., эксп. 1 мин. 3) Капля 25% NH_4OH + капля рубеновой кислоты 4) Серо-зеленое
242 Палладистая тетраферроплатина $(Pt, Pd)_4Fe_{1+x}$ (при x до 0,2); Pt 54,5—62,5; Pd 7,5—12,5, Rh , Ru 0—0,5, Fe 2,5—2,7, Cu 0—3,0, Ni 0—1,5; тетр.	1) —, —, 68,0, — 2) Нет 3) Белый	1) Слабо анизотропна 2) Нет	1) 4,1—4,4 (4,3) 2) $H = 221—278$ (259)	1) Капельная реакция на Pd

ЫХ СПЛАВОВ ПЛАТИНЫ, ЖЕЛЕЗА И ИРИДИЯ

Диагностическое травление: КОН (1), HgCl ₂ (2), FeCl ₃ (3), HCl конц. (4), HNO ₃ конц. (5), KCN (6)	Форма и внутреннее строение выделений, методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы (ПГ)	Диагностические линии дебаграммы	Отличительные диагностические признаки
1—6) Отрицательно, в том числе не действуют капля (CrO ₃ + HCl) и ц. в.	Округло-изометричная, полигональная, удлиненнопластинчатая, аллотриоморфная, кристаллические зерна и кристаллы кубического габитуса	Самородный иридий, железистая платина, самородная платина, куперит, рутениридосмин, лаурит, хромшпинелиды	2,21 (10) 1,920 (8) 1,360 (5) 1,154 (6) 1,112 (5)	Высокая химическая стойкость, сочетание цвета с оттенком, изотропностью, высокой отражательной способностью и микротвердостью
То же	Аллотриоморфная, каемки, кристаллы кубического габитуса, прожилки	Железистая платина (ПГ), иридосмин, куперит, лаурит, хромшпинелиды, форстерит	2,258 (8) 1,946 (10) 1,371 (9) 1,169 (10) 0,890 (7)	Отличается от платинистого иридия оттенком, микротвердостью и химическим составом
Как и платинистый иридий и иридийская платина	Аллотриоморфная, каплевидная, кристаллы кубического габитуса	Платинистый иридий, железистая платина, самородная платина (ПГ)	2,231 (9) 1,922 (10) 1,350 (6) 1,155 (9) 0,879 (7)	Отличается повышенной микротвердостью и химическим составом
1—6) Отрицательно, интенсивно затравливается в капле царской водки	Точечная и пластинчатая вкрапленность в структурах распада твердого раствора, агрегат коллоидных выделений	Хромшпинелиды, железистая платина, самородный иридий (ПГ), платинистый иридий	2,228 (10) 1,931 (4) 1,922 (10) 1,367 (5) 1,170 (9) 1,120 (3)	Отражательная способность, микротвердость, дебаграмма, химический состав
1—4 и 6) Отрицательно 5) Иногда травится, а также травится в капле (CrO ₃ + HCl), эксп. 30 с — 2 мин и в капле ц. в., эксп. 30 с	Аллотриоморфнозернистые и коллоидные агрегаты	Железистая платина, платинистый иридий, иридосмин, хромшпинелиды, серпентины (ПГ)	2,174 (10) 1,948 (6) 1,370 (5) 1,164 (7) 1,097 (5)	При соответствующих оптических и твердотных характеристиках — микрохимическая реакция на Cu, диагностическое травление и дебаграмма
1—6) Отрицательно, затравливается в капле ц. в.	Аллотриоморфная, каемки, дендриты, метакристаллы, скелетные формы	Халькопирит, самородное золото, станиды палладия и платины (ПГ)	1,918 (7) 1,855 (5) 1,364 (8) 1,163 (10) 0,862 (8)	Капельная реакция на Pd, химический состав

№ п/п Минерал, его формула, сингония, химический состав, %; характерные примеси	Отражение R 460, R 540, R 580, R 700, % (1); двуотражение ΔR (2); цвет, оттенок (3)	Эффект поляризации (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу (М. М. Хрущову) (1); микротвердость H_{10} , кгс/мм ² (2); форма отпечатка (3); относительный рельеф h (4); полиру- емость (5)	Микро- химические реакции (1); растворитель, время экспозиции (2); проявитель (3); окрашивание или осадок (4)
243 Тетраферроплатина $Fe_{1+x}Pt_1$ (при x до 0,2); Pt 71,0—77,8, Au 0—5, Pd 0—1,0, Fe 13,0—28,1, Cu, Ni 0—9,0, Sb 0—0,6; тетраг.	1) 59,3 до 65,2; $\frac{3}{4}$. 60,0 до 66,8; 60,6 до 67,3; 65,9 до 74,8 2) 59,3—57,8 до 65,2—64,8; 60,0—59,3 до 66,8—65,4; 60,6—59,8 до 67,3—66,7; 65,9—63,7 до 74,8—74,6 3) Ярко-белый со светло-желтоватым оттенком	1) Слабо анизотропна (цветовой эффект в серых тонах при муаровом погасании)	1) 4,0—4,9 (4,6) 2) H_{10} =214—357 (303) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	
244 Железистая платина $Pt_4Fe_1-Pt_1Fe_4$; Pt 70,0—93,3, Ir 0, n —9,0, Rh 0—3,2, Os 0—1,0, Ru, Pd 0—0, n , Fe 6,7—22,2, Ni 0—5,2, Cu 0—4,2; кубич. (гранцентриро- ванная ячейка)	1) —, 66,0, 67,1 (64—73), 70,6 2) Нет 3) Белый со слабым розоватым, иногда желтоватым оттенком, усиливается розовый оттенок в иммерсии	1) Изотропна 2) Нет	1) 4,6—5,1 (4,8) 2) H_{10} =317—432 (373) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	
245 Туламинит (Fe, Cu) ₂ Pt ₂ ; Pt 70,5—78,5, Ir 0—6,5, Fe 6,5—16,0, Cu 5,5—14,0, Ni, Sb 0—5,0; тетраг.	1) 65,1; 66,4; 65,7; 65,4 2) 65,1—60,8; 66,4—59,9; 65,7—61,7; 65,4—61,6 3) Белый	1) Слабо анизотропный (на воздухе и в иммерсии) 2) Нет	1) 5,0—5,2 (5,1) 2) H_{10} =420—456 (442) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошие	
246 Изоферроплатина $Pt_{2+x}Fe_1-Pt_{5-x}Fe_1$; Pt 80—91,6, Rh 0—5,7, Ru 0—4,0, Ir 0—3,5, Os 0—2,1, Fe 5,7—11,5, Cu 0—2,2; кубич. (примитивная ячейка)	1) 61,2; 65,0; 65,6; 69,4 2) Нет 3) Белый	1) Изотропная 2) Нет	1) 4,1—4,8 (4,5) 2) H_{10} =217—357 (284) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	
247 Изоплатинид железа $Fe_2Pt_2-Fe_2Pt_1$; Pt 54—69,5, Fe 22,5—46,0, Ni 0—5,2, Cu 0—3,6; кубич.	1) 56,1; 58,4 59,6; 62,3 2) Нет 3) Белый	1) Изотропна 2) Нет	1) 4,2—4,7 (4,4) 2) H_{10} =241—329 (274) 3) Квадратная 4) Средний 5) Хорошая	

Диагностическое травление: KOH (1), HgCl ₂ (2), FeCl ₃ (3), HCl конц. (4), HNO ₃ конц. (5), KCN (6)	Форма и внутреннее строение выделений, методы их выявления	Ассоциации, парагенезисы (ПГ)	Диагностические линии дебаграммы	Отличительные диагностические признаки
1—6) Отрицательно, затравливается в капле ц. в.	Аллотриоморфная, прожилковидная, кристаллические зерна, каемки, футляровидные метакристаллы	Станниды, арсеностанниды и арсениды палладия и платины, сперрилит, кюстелит, аурупорит, рожковит, полярит, плюмбогальвадинит, куперит, халькопирит, пирротин, борнит, магнетит	2,186 (9) — 2,23 (7) — 1,932 (5) — 1,923 (10) — 1,870 (1) — 1,886 (9) — 1,369 (9) — 1,366 (7) — 1,328 (6) — 1,336 (5) —	Отражательная способность, химический состав
1—6) Отрицательно, иногда затравливается в капле ц. в., эксп. 15—20 мин	Аллотриоморфная, каемки, метакристаллики, кубического габитуса и кристаллические зерна	Платинистый иридий, купроферроплатина, иридная платина (ПГ), туламинит (ПГ), самородный иридий, самородная платина, куперит, брэггит, рутениродосмин, сперрилит, лаурит, станниды палладия и платины, кюстелит, аргентокупроаурит, пентландит, пирротин, халькопирит, кубанит, магнетит, хромшпинелиды, форстерит, серпентин	2,218 (10) — 2,202 (10) — 1,934 (9) — 1,908 (8) — 1,364 (10) — 1,340 (6) — 1,164 (9) — 1,150 (7) — 1,114 (6) — 1,100 (3) —	Химический состав
Не изучено	Аллотриоморфнозернистая	Железистая платина (ПГ), геверсит, ирарсид, халькопирит	2,179 (10) — 1,946 (7) — 1,163 (8) — 1,093 (8) — 1,016 (6) —	Оптические характеристики и рентгенограмма
1—6) Отрицательно, травится в капле ц. в., эксп. 15—20 мин	Аллотриоморфнозернистые агрегаты, кристаллические зерна, метакристаллы	Платинистый иридий, иридосмин, майченерит, хромшпинелиды, серпентин	2,228 (9) — 1,932 (7) — 1,289 (2) — 1,163 (10) — 1,032 (3) —	Химический состав и дебаграмма
1—6) Отрицательно, не травится в капле ц. в.	Аллотриоморфная	Станниды палладия и платины, кюстелит, пирротин, пентландит, халькопирит	2,196 (10) — 1,920 (4) — 1,346 (4) — 1,030 (2) — 1,015 (2) —	Отражательная способность, дебаграмма, химический состав

№ п/п Минерал, его формула, химический состав, %; характерные примеси, сингония	Отражательная способность R 460, R 540, R 580, R 700, % (1); двуотражение ΔR (2); оттенок, цвет (3)	Эффект поляризации (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу (М. М. Хрущову) (1); микротвердость H, кгс/мм² (2); форма отпечатка (3); относительный рельеф h (4); полируемость (5)	Микрохимические реакции (1); растворитель, время экспозиции (2); проявитель (3); окрашивание или осадок (4)
248 Невьянскит Ir ₃ Os ₂ ; Ir 51,9—58,3, Os 36,0—43,4, Ru 0,2—4,2, Pt 0,1—7,5, Rh 0,5—2,6; гекс.	1) 66,7; 71,9; 73,1, 73,8 2) Очень слабое 3) От белого до светло-серого с голубоватым оттенком	1) Отчетливо анизотропен (цветовой эффект от голубоватого до коричневого либо от серого до красновато-серого 2) Нет	1) 6,4—6,6 (6,5) 2) H ₃₀ =845—947 (891) 3) Квадратная, иногда деформирована в ромбовидную 4) Высокий 5) Хорошая	
249 Ауросмирид Ir ₂ Os ₂ Au ₂ ; Ir 51,7, Os 25,5, Au 19,3, Ru 3,5; кубич.	1) 69 2) Нет 3) Белый	1) Изотропен 2) Нет	1) 5,5—6,0 (5,7) 2) H ₃₀ =541—702 (587) 3) Квадратная 4) Высокий 5) Хорошая	
250 Осмиридий Ir ₄ Os ₁ —Ir ₂ Os ₁ ; Ir 54,9—80,0, Os 17,2—35,0, Ru 0—5,0, Rh 0—11,3, Pt 0—7,4, Fe 0—4,4; кубич.	1) 66,3; 69,3, 68,6; 72,1 2) Нет 3) Белый с желтоватым оттенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 4,7—5,7 (5,3) 2) H ₃₀ =343—593(485) 4) Средний; родистый осмиридий: 1) 7,0—7,5 (7,2) 2) H ₃₀ =1115—1371 (1215) 3) Квадратная 4) Очень высокий; во всех случаях 5) Хорошая	
251 Рутеносмиридий Ir ₄ Os ₁ Ru ₁ —Ir ₇ Ru ₄ Os ₃ ; Ir 42,2—80,0, Os 10,5—40,1, Ru 5,5—19,1, Pt 0—15,0, Rh 0—5,7, Au 0—1,5, Fe 0—3,5; кубич.	1) —, —, 66,0,— 2) Нет 3) Белый с розовато-кремовым оттенком	1) Изотропен 2) Нет	1) 6,9—7,5 (7,2) 2) H ₃₀ =1058—1360 (1237) 3) Квадратная 4) Очень высокий 5) Хорошая	

СПЛАВОВ ОСМИЯ, ИРИДИЯ И РУТЕНИЯ

<p>Диагностическое травление в капле: HNO₃ конц. (1), HCl конц. (2), FeCl₃ (3), HgCl₂ (4), KOH (5), KCN (6)</p>	<p>Форма и внутреннее строение выделений, методы их выявления</p>	<p>Ассоциации, парагенезисы (ПГ)</p>	<p>Диагностические линии дебаграммы</p>	<p>Отличительные диагностические признаки</p>
<p>1—6) Отрицательно, не действуют царская водка. (HCl+CrO₃) и длительное (>20 мин) электролитическое травление в капле ц. в.</p>	<p>Удлиненные пластинчатые кристаллики, их сростки, правильные шестиугольные и дитригональные таблитчатые монокристаллы, аллотриоморфозернистые выделения. Выделения в основном гомогенного внутреннего строения, иногда — зональные сростки с ирийдосмином</p>	<p>Ирийдосмин (ПГ)*, самородный осмий, платинистый иридий, железистая платина, ирарсит, сперриллит, куперит (ПГ)*, лаурит, купроферроплатина, никелистая платина, самородное золото, хромшпинелиды, форстерит</p>	<p>2,15 (8) 2,05 (5) 1,218 (5) 1,074 (6) 0,866 (5)</p>	<p>Химический состав, дисперсия отражательной способности, цветовой эффект при скрещенных николях, величина микротвердости, дебаграмма</p>
<p>То же</p>	<p>Аллотриоморфные зерна, кубические кристаллики. Внутреннее строение выделений гомогенное</p>	<p>Осмиридий (ПГ), ирийдосмин</p>	<p>2,206 (7) 1,903 (7) 1,349 (7) 1,149 (10) 1,102 (7)</p>	<p>Химический состав, сочетание цвета с изотропностью и величиной микротвердости, дебаграмма</p>
<p>1—6) Отрицательно, не действуют царская водка. (HCl+CrO₃) и длительное (>20 мин) электролитическое травление в капле ц. в.</p>	<p>Аллотриоморфозернистая, кристаллики кубического габитуса. Внутреннее строение выделений гомогенное</p>	<p>Платинистый иридий, сам. иридий, ирийдосмин, рутеносмиридий (ПГ), рутенирийдосмин, ирарсит, железистая платина, тетраферроплатина, туламинит, хромшпинелиды</p>	<p>2,207 (10) 1,914 (8) 1,353 (7) 1,153 (9) 1,106 (5)</p>	<p>Химический состав, дисперсия отражательной способности, цвет с оттенком, изотропность, величина микротвердости; дебаграмма</p>
<p>То же</p>	<p>Аллотриоморфозернистая, прожилковидная, кристаллики кубического габитуса. Внутреннее строение выделений гомогенное</p>	<p>Платинистый иридий, осмиридий (ПГ), железистая платина, куперит (ПГ), лаурит, купроферроплатина, сам. серебро, штернбергит, петцит, эвкайрит, хромшпинелиды, галенит</p>	<p>2,214 (5) 1,918 (4) 1,366 (7) 1,162 (4) 0,872 (6)</p>	<p>Химический состав, сочетание цвета с оттенком, изотропность, величины микротвердости; дебаграммы</p>

№ п/п Минерал, его формула, химический состав, %; характерные примеси, сингония	Отражательная способность R_{460} , R_{540} , R_{580} , R_{700} , % (1); двуотражение ΔR (2); оттенок, цвет (3)	Эффект поляризации (1); внутренние рефлексы (2)	Твердость по Моосу (М. М. Хрущову) (1); микротвердость H , кгс/мм ² (2); форма отпечатка (3); относительный рельеф h (4); полируемость (5)	Микрохимические реакции (1); растворитель, время экспозиции (2); проявитель (3); окрашивание или осадок (4)
252 Иридоосмин (сысертскит) $Os_4Ir_1-Os_3Ir_1$; Os 47,9—80,0, Ir 20,0—46,8, Ru 0—5,4, Rh 0—3,2, Pt 0—1,5; гекс.	1) 58,1—63,6; 61,1—65,2; 62,7—66,1; 63,7—65,5 2) Слабое 3) Белый с голубоватым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект от синего до оранжевого) 2) Нет	1) 5,4—6,1 (5,8) 2) $H_{20} = 512-753$ (631) 3) Квадратная 4) Высокий 5) Хорошая	
253 Рутениридоосмин $Os_4Ir_1Ru_1-Os_3Ir_1$; Os 31,5—84,0, Ir 0,5—46,4, Ru 5,5—68,0, Rh 0—4,5, Pt 0—2,4, Fe 0—4,6; гекс.	1) 54,5—59,2; 55,1—60,3; 57,2—60,7; 57,7—61,8 2) Слабое 3) Белый с голубовато-серым оттенком	1) Отчетливо анизотропен (цветовой эффект от темно-голубого до красновато-оранжевого) 2) Нет	1) 6,8—7,3 (7,0) 2) $H_{20} = 1021-1267$ (1115) 3) Квадратная, иногда слабо деформирована в ромб 4) Очень высокий 5) Хорошая	
254 Рутений самородный $Ru-Ru_2$ (Ir, Os) ₁ — $Ru_2Ir_1Rh_1$; Ru 64,4—100,0 30,8—31,4, 41,5, Os 0—30,0, 52,2—52,8, 10,6, Ir 0—15,0, 9,6—10,6, 33,0, Pt 0—9,2, 0,7—1,5, 4,8, Rh 0—7,1, —, — Pd 0—0,5, 0,4—1,0, 1,4, Fe 0—0,2, 3,2—3,3, 7,5; гекс.	1) —, —, 60,1, — 2) Нет 3) Белый со светлокремевым оттенком	1) Слабо анизотропен 2) Нет	1) 6,5 2) 893 3) — 4) Высокий 5) Хорошая	
255 Осмий самородный $Os-Os_4Ir_1-Os_3$, $Ru_2 \times$ $\times (Ir, Pt)_1$; Os 80,0—100,0, 53,2, Ir 0—20,0, 10,8, Ru 0,0, 2, 25, 2, Pt 0—2,0, 5,8, Fe 0—1,0, 3,8, гекс.	1) 60,9; 58,3; 57,5; 54,2 2) Нет 3) Светло-серый (почти белый) с голубоватым оттенком	1) Сильно анизотропен (цветовой эффект от серого до оранжевого) 2) Нет	1) 4,9—5,0 (5,0) 2) $H_{10} = 390-407$ (400) 3) Ромбовидная 4) Средний 5) Хорошая	

Примечание. В настоящей таблице невьянскит и рутеносмиридий охарактеризованы с помощью осмий — Разин, Юркина, 1971; кроме того, привлечены материалы О. Е. Звягинцева (1936) санях использованы сведения монографии О. Е. Звягинцева (1936) и обобщающей работы Д. Хар

<p>Диагностическое травление в капле: HNO₃ конц. (1), HCl конц. (2), FeCl₃ (3), HgCl₂ (4), KOH (5), KCN (6)</p>	<p>Форма и внутреннее строение выделений, методы их выявления</p>	<p>Ассоциации, паразитизисы (ПГ)</p>	<p>Диагностические линии дебаграммы</p>	<p>Отличительные диагностические признаки</p>
<p>То же</p>	<p>Удлиненные пластинчатые и гексагональные (шестиугольные) кристаллики, сноповидные сростки пластинчатых кристалликов, аллотриоморфнозернистые выделения. Кристаллы гомогенного внутреннего строения, зерна иногда в зональном сростании с невяньскитом</p>	<p>Невяньскит (ПГ), рутениридосмин (ПГ), осмиридий, самородный осмий, платинистый иридий, ирарсит, сперрилит, куперит, лаурит, железистая платина, купроферроплатина, самородное золото, хромшпиннелиды, серпентины</p>	<p>2,152 (10) 1,356 (8) 1,229 (10) 1,082 (9) 0,985 (10)</p>	<p>Химический состав, дисперсия отражательной способности в сочетании с величиной микротвердости; дебаграмма</p>
<p>1—6) Отрицательно, не действуют царская водка, (HCl+CrO₃) и длительное (>20 мин) электролитическое травление в капле ц. в.</p>	<p>Аллотриоморфнозернистая, удлиненные пластинчатые кристаллики и их агрегаты. Внутреннее строение выделений гомогенное</p>	<p>Иридосмин (ПГ), невяньскит (ПГ), осмиридий, самородный осмий, железистая платина, купроферроплатина, хромшпиннелиды</p>	<p>2,124 (8) 1,346 (5) 1,217 (8) 1,071 (6) 0,975 (5)</p>	<p>Химический состав, сочетание дисперсии отражательной способности, цвета с оттенком, величины микротвердости; дебаграмма</p>
<p>То же</p>	<p>Пластинчатые микрокристаллики гомогенного внутреннего строения</p>	<p>Железистая платина</p>	<p>—</p>	<p>Химический состав, цвет с оттенком, слабая анизотропия</p>
<p>1—6) Отрицательно, не действуют царская водка, (HCl+CrO₃) и длительное (>20 мин) электролитическое травление в капле ц. в.</p>	<p>Удлиненные тонкопластинчатые микрокристаллики и их спутанно-сноповидные агрегаты гомогенного внутреннего строения</p>	<p>Иридосмин, невяньскит, осмиридий, рутениридосмин, куперит (ПГ), железистая платина, титаномагнетит</p>	<p>2,054 (9) 1,221 (8) 0,873 (8) 0,849 (10) 0,812 (10)</p>	<p>Химический состав, дисперсия отражательной способности, величина микротвердости; дебаграмма</p>

зованием данных — Разин, 1966; осмиридий, иридосмин и рутениридосмин — Разин, 1975; самородоб ауросмириде и У. Юкитоси и др. (Yukitoshi et al., 1974) — о самородном рутении. Во всех описаниях и Л. Кабри (Harris, Cabri, 1973).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроскин Л. С., Папаян Г. В., Раутиан Л. П. Абсолютный регистрирующий микроспектрофотометр «Блеск». — «Геология рудных месторождений» 1972, № 3, с. 81—90 с ил.
- Афанасьева Е. Л. Теллуриды в медных рудах Кафанского месторождения. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1970, № 7, с. 40—45 с ил.
- Афанасьева Е. Л. Парагенетические минеральные ассоциации и зональность их пространственного размещения в Кафанском медном месторождении. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1971, № 5, с. 74—90 с ил.
- Афанасьева Е. Л., Вьяльсов Л. Н. Рецбаннит из медных руд Кафанского месторождения. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1971, № 4, с. 35—41 с ил.
- Афанасьева Е. Л., Вьяльсов Л. Н., Ильин Н. П. О первой находке лазаревичита в СССР. — «Докл. АН СССР», 1972, т. 202, № 1, с. 169—171 с ил.
- Афанасьева Е. Л., Исаенко М. П. Определитель гипергенных минералов окисленных сульфидных руд в отраженном свете. М., «Недра», 1974. 79 с. с ил.
- Бауи С. Х. У., Тейлор К. Определитель рудных минералов. — В кн.: Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Т. 8, вып. 2, М., Атомиздат, 1959, с. 161—183 с ил.
- Безсмертная М. С., Логинова Л. А., Соболева Л. Н. Определение теллуридов под микроскопом. М., «Наука», 1969. 175 с. с ил.
- Боришанская С. С. О применении таблицы диагностических признаков минералов в полированных шлифах. — «Тр. Минер. музея АН СССР», 1959, вып. 9, с. 146—147. с ил.
- Боришанская С. С., Крутов Г. А., Махмудов Э. И. — Аллоклазит в Южно-Дашкесанском железокобальтовом месторождении. — «Докл. АН СССР», 1965, т. 161, № 5, с. 1181—1183.
- Боришанская С. С., Разин Л. В., Рожков И. С. Редкая разновидность медистой платины — колломорфная купроплатина. Геология и геофизика Сибирск. отд. АН СССР, 1960, № 7, с. 50—59.
- Бородаев Ю. С., Мозгова Н. Н. Изучение микрострастаний сульфосолей с помощью электронного микронзонда. — В кн.: Вопросы однородности и неоднородности минералов. М., 1971, с. 118—127 с ил.
- Бородаев Ю. С., Мозгова Н. Н., Вьяльсов Л. Н. Изоморфный ряд висмутин — айкиннит. — «Вестник МГУ», 1970, № 1, с. 18—31 с ил.
- Бородаев Ю. С., Мозгова Н. Н., Сендерова В. М. О халькостибите из Терекса (Киргизская ССР). — «Докл. АН СССР», 1968, т. 178, № 3, с. 675—678 с ил.
- Бородаев Ю. С., Мозгова Н. Н., Свешникова О. Л. Группа сульфосолей состава Ag—Cu—Pb—Sb. — «Изв. АН СССР. Сер. геол.», 1971, № 4, с. 76—87 с ил.
- Бурз Г. Н., Клейнбок В. Е. Прибор для измерения отражательной способности микрообъектов. — «Геофизическая аппаратура», № 29. Л., «Недра», 1965, с. 93—98.
- Вахромеев С. А. Руководство по минераграфии. Иркутск, Иркутское книжное изд-во, 1956, 264 с. с ил.
- Вахромеев С. А. Отзыв на книгу М. П. Исаенко, С. С. Боришанской, Е. Л. Афанасьевой «Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете». — «Изв. вузов. Геол. и разведка», 1973, № 8, с. 170—171.
- Велчев В. Н. Руководство по минераграфии. София, 1959. 282 с. с ил.
- Винчелл А. Н. Оптическая минералогия. М., Изд-во иностр. лит., 1949. 657 с. с ил.
- Волынский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом. М., Госгеол-издат. Т. I, 1947. 267 с.; т. II, 1947. 100 с.; т. III, 1949. 338 с. с ил.
- Волынский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом. Методическое руководство, т. I. М., «Недра», 1966. 348 с. с ил.
- Вьяльсов Л. Н. Определение осности и оптического знака рудных минералов из измерений отражательной способности. — «Геология рудных месторождений», 1969, № 1, с. 77—85.
- Вьяльсов Л. Н. Спектры отражения рудных минералов (научно-методическое пособие). М., ИГЕМ, 1973. 67 с. с ил.
- Вьяльсов Л. Н. Опыт систематики рудных минералов на основе измерений коэффициентов отражения в видимой области спектра. — «Геология рудных месторождений», 1973, т. XV, № 1, с. 88—97 с ил.
- Вьяльсов Л. Н. Исследование оптических свойств анизотропных рудных минералов в отраженном свете. — «Геология рудных месторождений», 1975, т. XVII, № 1, с. 47—57.
- Вьяльсов Л. Н. Оптические методы диагностики рудных минералов. М., «Недра», 1976. 200 с. с ил.

- Галопен Р., Генри Н. Исследование непрозрачных минералов под микроскопом. М., «Мир», 1975. 363 с. с ил.
- Генкин А. Д., Муравьева И. В. Индит и джалиндит — новые минералы индия. — «Зап. Всесоюз. минерал. о-ва», 1963, ч. 92, вып. 4, с. 445—457 с ил.
- Генкин А. Д., Логинов В. П., Органова Н. И. О взаимоотношениях и особенностях размещения гексагональных и моноклинных пирротинов в рудах. — «Геология рудных месторождений», 1965, т. VII, № 3, с. 3—24 с ил.
- Геология олова — «Тр. ИГН АН СССР», 1947, вып. 82, № 8, (Серия «Рудные месторождения»). 519 с. с ил.
- Гецева Р. В., Савельева К. Т. Руководство по определению урановых минералов М., Госгеолтехиздат, 1956. 260 с. с ил.
- Гипергенные окислы железа. М., «Наука», 1975. 205 с. с ил.
- Грабовский М. А., Жерденко О. Н. Исследование рудных минералов методом магнитной порошковой диаграммы. — «Геология рудных месторождений», 1963, т. V, № 1, с. 99—104 с ил.
- Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов. Изд. Львовского ун-та, 1961. 264 с. с ил.
- Даминова А. М. Таблицы для определения под микроскопом породообразующих минералов, структур и магматических горных пород. М., «Высшая школа», 1963. 67 с. с ил.
- Диагностические свойства рудных минералов. М., «Недра», 1975. 284 с. с ил. Авт.: С. А. Юшко, О. Е. Юшко-Захарова, С. И. Лебедева, И. Е. Максимюк.
- Добровольская М. Г., Шадлун Т. Н. Минеральные ассоциации и условия формирования свинцово-цинковых руд. М., «Наука», 1974. 208 с. с ил.
- Дубинко Т. С., Ветошкин Н. Д. Техника изготовления магнитной суспензии. — «Геология рудных месторождений», 1965, т. V, № 6, с. 110—112 с ил.
- Ильинский Г. А. Определение микротвердости минералов методом вдавливания. Л., Изд-во ЛГУ, 1963. 82 с. с ил.
- Исаенко М. П. О книге П. Рамдора «Рудные минералы и их сростания». — «Советская геология», 1963, № 11, с. 162—166.
- Исаенко М. П. Определитель главнейших текстур и структур руд. М., «Недра», 1964, 155 с.; 1975. 228 с. с ил.
- Исаенко М. П. Минералы молибдена в рудах медно-молибденовых месторождений Малого Кавказа. — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1966, № 2, с. 38—52 с ил.
- Исаенко М. П., Керрик Кирстен. О книге Эльснера «Атлас важнейших минеральных парагенезисов в микрофотографиях». — «Изв. вузов. Геология и разведка», 1967, № 9, с. 156—157.
- Исаенко М. П., Боршанская С. С., Афанасьева Е. Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. М., «Недра», 1972. 142 с. с ил.
- Исаенко М. П., Афанасьева Е. Л., Боршанская С. С. История создания современных таблиц для диагностики рудных минералов в отраженном свете. Изв. вузов. отд. Геология и разведка. 1977. с. 3.
- Исаков Н. И. Качественный анализ руд и минералов методом растирания порошков. М., Госгеолтехиздат, 1955. 183 с. с ил.
- К диагностике сульфоантимонидов свинца. — «Геология рудных месторождений», 1968, т. X, № 2, с. 60—73 с ил. Авт.: Н. Н. Мозгова, Ю. С. Бородаев, А. Д. Ракчеев, С. С. Боршанская
- Клейнбок В. Е. О степени монохроматичности света при измерении отражательной способности минералов. — В кн.: Исследования в области рудной минералогии. М., «Наука», 1973, с. 177—180.
- Клейнбок В. Е., Шумская Н. И. Таблицы для определения показателей преломления и поглощения непрозрачных минералов по их отражательной способности. Л., «Недра», 1973. 158 с. с ил.
- Коренман И. М. Микрорентгенография. М., Госхимиздат, 1955. 250 с. с ил.
- Королев Н. В., Агроскин Л. С. Установка для определения отражательной способности минералов. — «Геология рудных месторождений», 1959, т. 1, № 4, с. 137—140 с ил.
- Костов Н. Минералогия. М., «Мир», 1971. 584 с. с ил.
- Кэмерон Ю. Н. Рудная микроскопия. М., «Мир», 1966. 308 с. с ил.
- Лабораторные методы исследования минералов руд и пород. М., Изд-во МГУ, 1975, с. 251 с ил. Авт.: Ю. С. Бородаев, Н. И. Еремин, Ю. П. Мельников, В. Н. Старостин.
- Ларсен Е., Берман Г. Определение прозрачных минералов под микроскопом. М., «Недра», 1965. 464 с. с ил.
- Лазаренко Е. К. Основы генетической минералогии. Львов. Изд. Львовск. гос. ун-та, 1963. 410 с. с ил.

- Лебедева С. И.* Микротвердость минералов. М., «Недра», 1977. 118 с. с ил.
- Максимюк И. Е.* Касситериты и вольфрамиты. М., «Недра», 1973. 135 с. с ил.
- Методика исследования минералов группы платины. Ч. I.*— В кн.: Платина Алданского шита. М., 1962, с. 7—33, с ил. Авт.: И. С. Рожков, В. И. Кицул, Л. В. Разин, С. С. Боришанская.
- Минералы.* Справочник. М., Изд-во АН СССР, 1960. 616 с. Т. II, вып. 2, М., «Наука», 1965. 341 с.; т. II, вып. 3, М., «Наука», 1967. с. с ил.
- Михеев В. И.* Рентгенометрический определитель минералов. М., Госгеолтехиздат, 1957. 868 с.
- Мовсесян С. А., Исаенко М. П.* Комплексные медно-молибденовые месторождения. М., «Недра», 1974. 343 с. с ил.
- Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости.* М., «Недра», 1973. 220 с. с ил. Авт.: М. С. Безсмертная, Т. П. Чвилева, Л. С. Агроскин, Л. И. Бочек, С. И. Лебедева, Л. А. Логинова.
- Парараммельсбергит* из Бериккульского месторождения.—«Зап. Всесоюз. минер. о-ва, 1974, вып. 1, с. 128—131 с ил. Авт.: Р. А. Виноградова, С. С. Боришанская, Н. Е. Еремин, Л. Н. Вяльсов.
- Поваренных А. С.* Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев, «Наукова думка», 1966. 547 с. с ил.
- Петровская Н. В.* О понятии «парагенетическая минеральная ассоциация».—«Геология рудных месторождений», 1967, т. IX, № 2, с. 69—78.
- Пудовкина И. А.* Точные методы определения отражательной способности и твердости рудных минералов.— В кн.: Современные методы исследования горных пород и минералов. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 139—183 с ил.
- Разин Л. В.* Минералы — природные сплавы золота и меди в рудах медно-никелевых месторождений норильского типа.—«Тр. Минер. музея им. А. Е. Ферсмана АН СССР», 1975, вып. 24, с. 93—106.
- Разин Л. В., Боришанская С. С.* Минеральные формы нахождения платиновых металлов и золота во вкрапленных рудах месторождения Норильск I.—«Тр. ЦНИГРИ, 1970», вып. 87, с. 209—237 с ил.
- Разин Л. В., Бегизов В. Д.* Золото-серебряная минерализация Талнахского и Октябрьского месторождения.—«Геология рудных месторождений», 1973, т. XV, № 6, с. 32—45 с ил.
- Разин Л. В., Бегизов В. Д., Мещанкина В. Д.* Материалы к минералогии платиновых металлов Талнахского месторождения.—«Тр. ЦНИГРИ», 1973, вып. 108, с. 96—151 с ил.
- Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания. М., Изд-во иностр. лит., 1962. 1132 с. с ил.
- Ритчи А.* Хроматография в геологии. М., «Мир», 1966. 158 с. с ил.
- Сахарова М. С.* Основные вопросы изоморфизма и генезиса блеклых руд. — «Геология рудных месторождений», 1966, т. VIII, № 1, с. 23—41 с ил.
- Синдеева Н. Д.* Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. М., Изд-во АН СССР, 1959. 254 с. с ил.
- Синяков Е. И.* Микротвердость магнетита из месторождений различного генезиса.—«Докл. АН СССР», 1966, т. 169, № 4, 5, 6, с. 929—932.
- Система минералогии.* М., Изд-во иностр. лит., т. I, полумом 1. 607 с., т. II, 419 с. с ил. Авт.: Дж. Дэна, Э. С. Дэна, Ч. Пелаг, Г. Берман, К. Франдель.
- Смирнов В. И.* Геология полезных ископаемых. М., «Недра», 1969. 687 с. с ил.
- Соболева М. В., Пудовкина И. А.* Минералы урана. М., Госгеолтехиздат, 1957. 407 с. с ил.
- Современные методы минералогического исследования.* М., «Недра», 1969. Ч. I, 279 с.; ч. II, 317 с. с ил.
- Станкеев Е. А.* Ассоциации минералов в эндогенных образованиях. М., МГРИ, 1966. 66 с. с ил.
- Строна П. А.* Таблицы для определения рудных минералов в отраженном свете. Изд. Ленинградского горного ин-та, 1969. 84 с. с ил.
- Танакаев Н. А.* Капельный метод. М., Госхимиздат, 1954. 222 с. с ил.
- Файгель Ф.* Капельный анализ. М., ОНТИ, 1937. 604 с. с ил.
- Харлас Э.* Рецензия на книгу М. П. Исаенко, С. С. Боришанской, Е. Л. Афанасьевой «Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете».—«Изв. вузов. Геол. и разведка», 1974, № 2, с. 193—194.
- Хрущов М. М., Беркович Е. С.* Микротвердость, определяемая методом вдавливания. М., Изд-во АН СССР, 1943. 85 с. с ил.
- Хрущов М. М., Беркович Е. С.* Приборы ПМТ-2 и ПМТ-3 для испытания на микротвердость. М., Изд-во АН СССР, 1950. 63 с. с ил.
- Хрущов М. М.* О выборе основного метода определения твердости материалов.—«Заводская лаборатория», 1947, № 9, с. 1121—1128.
- Шорт М. Н.* Микроскопическое определение рудных минералов. М.—Л. ОНТИ, 1934. 200 с. с ил.
- Штернберг Л. Е.* К диагностике карбонатных минералов методом окрашивания.—«Литология и полезные ископаемые», 1965, № 2, с. 185.

- Штрунц Х.* Минералогические таблицы. М., Госгортехиздат, 1962. 531 с. с ил.
- Шумская Н. И., Клейнбок В. Е., Александрова Н. П.* Изучение отражательной способности рудных минералов. Л., ВСЕГЕИ, 1971. 128 с. с ил.
- Юшкин Н. П.* Механические свойства минералов. Л., «Наука», 1971. 223 с. с ил.
- Юшко С. А.* Минералогия свинцово-цинковых стратиформных месторождений Южного Казахстана. М., «Недра», 1969. 151 с. с ил.
- Яковлев К. П.* Математическая обработка результатов измерений. М., Госгеолтехиздат, 1953. 383 с.
- Berek M.* Das Problem der quantitativen Mikroskopie der Erzminerale und seine Lösung, zugleich ein Beitrag zu den Erscheinungen der Reflexion des Lichtes an anisotropen absorbierender Kristallen. «Zs. Kristallogr. Min.» 1931, Bd. 76, s. 396—430; Bd. 77, s. 1—22.
- Berek M.* Optische Messmethoden im polarisierten Auflicht.—Fortschr. Min., 1937, 22, 1—104.
- Berry L. G., Thompson R. M.* X-ray Powder Data for ore minerals. The Peacock Atlas.—Mem. Geol. Soc. America, 1962, v. 85, 281 p.
- Bowie S. H. U.* Reflected Light Microscopy, ch. 3 of Physical Methods in Determinative Mineralogy, Acad. Press, London, ed. J. Zussman, 1967.
- Bowie S. H. U., Taylor K.* A system of ore mineral identification.—Mining Mag., London, 1958, v. 99, p. 265—277; 337—345.
- Cabri L. J.* The mineralogy of the platinum group elements.—Minerals Sci. Engng., 1972, v. 4, No 3, p. 3—29.
- Cabri L. J. and Rucklidge J. C.* Gold—silver tellurides: relation between composition and X-ray diffraction data.—Can. Mineralogist, 1968, v. 9, p. 547—551.
- Eales H. V.* The basis of a scheme for identification of ore minerals by optical methods.—Mineral Deposita, 1969, v. 4, p. 52—67.
- Freund H.* (Editor). Applied Ore Microscopy, Theory and Technique. The MacMillan Company, New York and London, 1966, 607 p.
- Geier B. H., Ottemann J.* New primary vanadium—germanium—, gallium—, and tin minerals from the Pb—Zn—Cu deposit Tsumeb, South West Africa.—Mineral depos., 1970, v. 5, No 1, p. 29—40.
- Grafenauer S., Gorens B., Marinkovit V., Strmole D.* Physical properties and the chemical composition of sphalerites from Yugoslavia.—Mineral Depos., 1969, v. 4, No 3, p. 275—282.
- Haylew J. E.* The Sudbury ores: their mineralogy and origin.—Can. Mineralogist, 1962, v. 7, p. 1—207.
- International tables for the microscopic determination of crystalline substances absorbing in visible light.* Barcelona, 1970, 33 p.
- Jambor J. L.* New lead sulfoantimonides from Madoc, Ontario. Part 1, 2, 3.—Can. Mineralogist, v. 9, pp. 7—24, 191—213, 505—521.
- Maucher A. and Rehwald G.* Card—Index of ore photomicrographs. Umschau—Verlag Frankfurt/Main, Germany, 1961.
- McLead C. R., Chamberlain J. A.* Reflectivity and Vickers Microhardness of Ore Minerals. Paper 68—64, Geol. Surv., Canada, 1968.
- Nichol J. and Phillips R.* Measurement of spectral reflectivity of manganese oxides.—Mineral. Mag., 1965, v. 35, p. 200—213.
- Oelsner O.* Atlas der Wichtigsten Mineral Paragenesen in Mikroskopischen Bild, Bergakademie, Freiberg, Fernstudium, 1961, 309 p.
- Oelsner O.* Atlas of the Most Important Ore Mineral Parageneses under the Microscope, Pergamon, Oxford, 1966.
- Orcel I.* Sur l'emploi de la pile photoélectrique pour la mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques. «C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci.» Paris, 1927, 185, p. 1141—1143.
- Orcel I.* La mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques a l'aide de la cellule photoélectrique et ses applications «Bull. Sos. Franc. Min.», 1930, 53, p. 301—349.
- Pärnamaa E.* On the use of Vickers microhardness (VH) in the microscopical identification of ore minerals, especially sulphides of Pb, Bi, Sb. Lund Univ. Årsskr., N. F., Avd. 2, v. 59, Nr. 3, 51 p.
- Piller H.* Influence of light reflection at the objective in the quantitative measurement of reflectivity with the microscope. «Miner. Mag.», 1967, 36, N 278, p. 242—259.
- Roy S.* Mineralogy of different genetic types of manganese deposits.—Econ. Geol., 1968, v. 63, p. 760—786.
- Roy S.* Syngenetic manganese formations of India, Jadavpur University Edition, 219 p.
- Singh D. Santokh.* Tables for the microscopic identification of tin minerals. International Tin Council, London, 1967, 20 p.
- Schouten C.* Determination Tables for ore microscopy. Elsevier, Amsterdam, 1962.
- Uytenbogaardt W., Burke E. A.* Tables for microscopic identification of ore minerals. Elsevier, Amsterdam, London, New York, 1971, 430 p.
- Young B. B., Millman A. P.* Microhardness and deformation characteristics of ore minerals.—Trans. Inst. Mining Met., 1963—1964, v. 73, No. 7, p. 437—466.

ИНСТРУКЦИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ ПО МИНЕРАГРАФИИ

ПЛАН РАБОТЫ

Введение. Кратко характеризуется использованный материал (образцы, шлифы, шлифовки) и применяемые автором методы исследования.

Глава I. Краткая геологическая характеристика месторождения (объем 2 с.). Составляется по литературным данным. Содержит краткие сведения о вмещающих горных породах и их гидротермальном изменении. Наиболее детально характеризуется морфология рудных тел, минеральный состав руд, текстуры и структуры, типы руд. Иллюстрации — фрагменты погоризонтных планов, разрезов по месторождению, с отражением морфологии рудных тел.

Глава II. Минеральный состав руд (объем 8 с.). Глава в основном отражает результаты личных исследований автора. Вначале приводится разделение рудообразующих минералов на группы по количеству их в руде. Последовательность перечисления минералов в соответствии с их распространением в руде дана в табл. I. Диагностические свойства минералов отражены в табл. II.

Таблица 1

Минеральный состав руд

		Главные > 10%	Второстепенные 10—1%	Редкие < 1%
Первичные	Рудные	Пирит 30% Халькопирит 20% Сфалерит 10%	Галенит 8% Теннантит 2%	Теллуриды: Алтант Гессит
	Жильные	Кварц 20%	Кальцит 5% Гипс 5%	
Вторичные	Рудные			Халькозин Борнит Ковеллин
	Жильные			

Далее приводится описание каждого минерала в порядке, соответствующем их ценности или количественному распределению. Сначала описываются все рудные минералы с подразделением по металлам: минералы железа, меди, цинка и т. д., затем жильные.

Описание всех рудообразующих минералов составляется по единому плану: название минерала и его формула: количество и форма проявления в руде или в отдельных типах руд (вкрапленность, пятна, прожилки, массивные скопления и т. д.), выделение генераций.

Далее следует описание каждой генерации: 1) приуроченность к определенной минеральной ассоциации и количественное содержание в данной ассоциации; 2) форма и размеры выделений минерала; 3) форма, размеры, внутреннее строение зерен; включения в зернах; признаки метаморфизма; генетический тип зерен; 4) парагенезис на основе ха-

рактора границ и взаимоотношений с другими минералами (учитываются наиболее часто встречающиеся, типичные взаимоотношения); 5) вторичные изменения минерала, если они есть; 6) отличительные особенности данной генерации. В конце приводятся отличительные диагностические свойства минерала.

Характеристика формы, размеров зерен и выделений минералов приведена в табл. 2.

Таблица 2

Форма и размеры выделений и зерен минералов

Минералы	Генерации и разновидности	Форма выделений	Размер выделений	Форма зерен	Размер зерен
<i>Первичный</i> Пирит	I II Метасоматический				
Халькопирит	I II III				
<i>Вторичные</i> Ковеллин Халькозин					

Глава III. Текстурно-структурные особенности руд. Характерные минеральные ассоциации (объем 7 с.). В начале главы дается определение основных терминов, используемых автором — текстура и структура, характерная минеральная ассоциация на основе отечественной литературы.

Дается характеристика текстуры руд по генетическим группам. Особенно важны текстуры, отражающие взаимоотношения минеральной ассоциации с другими, более ранними и поздними минеральными ассоциациями.

Описываются структуры руд по генетическим группам. Приводится сводная табл. 3 генетических групп текстур и структур и их морфологических видов в рудах, со ссылками на иллюстрации (зарисовки, фотографии, отпечатки).

Таблица 3

Генетические группы и морфологические виды текстур и структур

Генетические группы	Морфологические виды текстур	Морфологические виды структур
Заполнения пустот в породах и рудах	Прожилковая (рис. . . .)	Идиоморфнозернистая (рис. . . .)
Метасоматического замещения порода и руд	Каемочная (рис. . . .) Вкрапленная (рис. . . .)	Гелевая (рис. . . .) Идиоморфнометазернистая (рис. . . .)
Диагенезиса и метаморфизма	Метаколлоидная (рис. . . .) Гнейсовиднополосчатая (рис. . . .)	Радиально-лучистая (рис. . . .) Ориентированнозернистая (рис. . . .)

Описание текстур и структур производится по генетическим группам, перечисленным в табл. 3. В каждой группе сначала приводится описание текстур, затем структур по морфогенетическим видам.

В заключении делаются выводы о способе отложения руды и выделении характерных минеральных ассоциаций.

Глава IV. Последовательность минералообразования в рудах (объем 5 с.). В начале главы даются определения основных терминов:

характерная минеральная ассоциация, парагенезис минералов, генерация минерала, этапы и стадии минерализации, критерии выделения этапов и стадий минерализации. Описывается схема последовательности минералообразования, составляется таблица по общепринятой форме (Исаенко, 1975, с. 104, 117). Характеризуются этапы и стадии минерализации, интенсивность проявления стадий на месторождении, дается последовательность отложения характерных минеральных ассоциаций по стадиям минерализации, парагенезисов и минералов в каждой ассоциации.

Описание каждой характерной минеральной ассоциации составляется по следующему плану:

1) название ассоциации, минеральный состав (перечисляются минералы в последовательности их выделения); 2) количественное распределение в руде; 3) форма, размеры агрегатов ассоциации и распределение ее в пространстве; 4) текстуры и структуры; возрастные отношения с другими ассоциациями; 5) парагенезисы.

Глава V. Качественная характеристика руд (объем 3 с.). Составляется карточка промышленной характеристики руд и делается заключение об обогатимости руд (Исаенко, 1975, с. 128, 130).

Заключение. На основе проведенных исследований делается вывод о принадлежности месторождения или рудопроявления к определенному генетическому типу и рудной формации. Характеризуются физико-химические условия рудообразования, способ отложения руды.

Список литературы включает использованную автором литературу, на которую делаются ссылки в тексте. Список составляется по общим правилам.

Иллюстрации представлены зарисовками образцов и шлифов, микрофотографиями шлифов, отражающими характерные сростания в рудах или строение зерен, а также полученными при проведении микрохимических реакций отпечатками. Иллюстрации должны быть оформлены определенным образом: место взятия образца, шлифа, номер образца, шлифа, указания о скрещенности николей, должны содержать условные обозначения, масштаб или увеличение.

**СПИСОК ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРИИ ПО РУДНОЙ МИКРОСКОПИИ**

№ п/п	Название и фабричная марка	Назначение
1	Рудные микроскопы поляризационные МИН-6, МИН-8, МИН-9, МИН-10, Полам Р-312	Для изучения рудных минералов в отраженном свете
2	Сравнительный микроскоп МС-51, камера Иностранцева	Для сравнительного изучения <i>R</i> и цвета рудных минералов в отраженном свете
3	Микротвердомер, ПМТ-3	Для измерения микротвердости рудных минералов
4	Микрофотометры «Яшма-1», ФМЭ-1, 2, ПООС-1, «Пиор» и других систем	Для измерения <i>R</i> , ΔR , цвета, осности рудных минералов
5	Бинокляр МБС-1; МБС-2	Для изучения формы агрегатов, индивидов и внутренних рефлексов рудных минералов
6	Микрофотонасадка	Для микрофотографирования шлифов
7	Лабораторный шлифовальный станок	Для чистки полированных шлифов
8	Демонстрационные окуляры, АД-14	Для проведения консультаций по рудной микроскопии
9	Ручной пресс для отпечатков	Для проведения микрохимического анализа методом отпечатка
10	Прибор для производства электрографических отпечатков	Для проведения микрохимического анализа методом отпечатка с электрическим током
11	Шкаф № 1	Для хранения микроскопов, бинокляров и другого оборудования
12	Шкаф № 2	Для хранения коллекций полированных шлифов
13	Шкаф № 3	Для хранения графических материалов и фотографий формы и внутреннего строения индивидов
14	Стальные иглы в оправе	Для определения средней и высокой твердости минералов
15	Медные иглы в оправе	Для определения низкой твердости минералов
16	Пластинки	Для монтировки полированных шлифов
17	Стеклопластиковые или металлические пластинки	Для монтировки полированных шлифов
18	Светофильтры (синий, оранжевый, зеленый, желтый)	Для изучения рудных минералов в монохроматическом свете
19	Лоскуты замши, сукна, фетра, шелка	Для чистки аншлифов
20	Абразивы (окись хрома, окись железа, окись алюминия)	Для полирования аншлифов
21	Магнитные стрелки	Для определения магнитности рудных минералов
22	Электромагнитный порошок	Для определения магнитных свойств рудных минералов методом магнитной порошкографии
23	Флаконы с иммерсионным маслом	Для рудной микроскопии
24	Капельницы емкостью 10—20 см ³	Для микрохимического анализа
25	Часовые и предметные стекла	Для микрохимического анализа
26	Фильтровальная и фотобумага, целлофан	Для травления и микрохимического анализа. Глянцевую фотобумагу обрабатывают раствором гипосульфита (20%-ный водный раствор) в течение 20—40 мин, затем фотобумагу промывают водой и высушивают
27	Полевая лаборатория (ЛОР, Исакова, ЛРЭ и др.)	Для микрохимического анализа
28	Эталонная коллекция аншлифов с минералами: пирит, галенит, сфалерит, шеелит, халькопирит, кварц, кальцит	Эталоны для рудной микроскопии
29	Учебная ¹ коллекция аншлифов № 1 (антимонит, арсенопирит, блеклая руда, борнит, вольфрамит, галенит, золото, касситерит, кварц, киноварь, ковеллин, кобальтин, куприт, магнетит, малахит, медь, молибденит, пирит, пирротин, сфалерит, халькозин, халькопирит)	Для изучения в отраженном свете оптических и физических свойств рудных минералов
30	Учебная коллекция аншлифов № 2 (антимонит, арсенопирит, вольфрамит, галенит, гематит, кобальтин, людовигит, молибденит, магнетит, пентландит, пирит, пирротин, смальтин, сфалерит, халькозин, халькопирит)	Для изучения в отраженном свете кристалломорфных свойств рудных минералов
31	Учебная коллекция аншлифов № 3 (антимонит, арсенопирит, галенит, пирит, пиролюзит, сфалерит, халькопирит)	Для диагностического травления рудных минералов
32	Учебная ² коллекция аншлифов № 4. Минералы железа: мелантерит, карбонаты железа, пирит, пирротин, магнетит, гематит, гётит, шамозит, тюрингит. Минералы марганца: псиломелан, пиролюзит, алабандин, родохрозит, родонит. Минералы меди: халькантит, малахит, куприт, хризокolla, халькозин, борнит, халькопирит, блеклая руда.	Для фазового микрохимического анализа рудных минералов и руд

¹ Учебная коллекция готовится для каждого студента в отдельности.

² Для фазового анализа подбираются минералы по табл. 8

№ п/п	Название и фабричная марка	Назначение
	<p>Минералы цинка: госларит, смитсонит, сфалерит. Минералы свинца: англезит, церуссит, вульфенит, галенит. Минералы молибдена: повеллит, молибденит. Минералы никеля: аннабергит, никелин, ульманит, пентландит, миллерит, гарниерит. Минералы кобальта: эритрин, кобальтин, смальтин. Минералы урана: шрёкингерит, настуран, уранинит</p>	
33	<p>Учебная¹ коллекция шлифов № 5 (алабадин, алтаит, аргентит, аурипигмент, бертьерит, браунит, буланжерит, висмутин, висмут, гаусманит, графит, дигенит, ильменит, клаусталит, колумбит, танталит, тетраэдрит, умангит, хромит, шеелит, энаргит, церуссит, ярозит и др.)</p>	<p>Для самостоятельной работы студентов по диагностике рудных минералов</p>
34	<p>Учебная, справочная и периодическая литература (Безсмертная и др., Бетехтин и др., Вахромеев, Вольнский, Вяльсов, Исаенко, Рамдор, Юшко и др.)</p>	<p>Для лабораторных занятий студентов</p>
35	<p>Наковальня и минералогический молоточек</p>	<p>Для микрохимического анализа</p>
36	<p>Палочки, пипетки и капилляры стеклянные</p>	<p>То же</p>
37	<p>Агатовые или фарфоровые ступки</p>	<p>»</p>
38	<p>Платиновая проволочка</p>	<p>»</p>
39	<p>Песочные часы 1; 2; 3; 5 мин</p>	<p>Для микрохимического анализа</p>
40	<p>Электроплитка или спиртовка</p>	<p>То же</p>
41	<p>Деревянные стойки с гнездами или пластмассовые коробки 1) подставка на 6 капельниц для стандартных реактивов 2) подставка на 33 капельницы для реактивов микрохимического анализа 3) подставка на 10 баночек для сухих реактивов</p>	<p>»</p>

¹ Для каждого студента составляется набор шлифов, в котором должно быть ~ 16 различных рудных минералов.

**СПИСОК РЕАКТИВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ**

Реактив	Способ приготовления реактива	Назначение реактива
Азотная кислота HNO_3	Концентрированная, уд. вес 1,3; водные растворы 1:1; 1:20; 1:40. Хранить в склянках из желтого стекла	Растворитель ¹ , стандартный реактив
Азотнокислое серебро AgNO_3	Водные растворы 5, 20%-ные	Проявитель ² на мышьяк, хром
Азотнокислый кобальт $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$	Водный раствор 0,1%-ный, насыщенный, в сухом виде	Проявитель на цинк, ртуть; окрашивание арагонита
Азотнокислая медь $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	Водный раствор 0,1%, 20%-ный	Проявитель на цинк. Окрашивающие кальцита
Азотнокислый цинк $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Водный раствор 1, 5%-ный	Проявитель на кобальт
α -нитрозо- β -нафтол	Уксуснокислый раствор. 50 мл ³ α -нитрозо- β -нафтола растворяют в 100 мл ³ 50%-ной уксусной кислоты	Проявитель на кобальт
Аммиак NH_3 OH	Водный раствор 25, 10%-ный	Растворитель, проявитель
Бензидин уксуснокислый $\text{NH}_2\text{C}_6\text{H}_4$ — $\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$ органич. соединение	а) 0,5 г солянокислого бензидина растворяют в 10 мл 50%-ной уксусной кислоты и разбавляют до 100 мл б) 0,5 г солянокислого бензидина высыпают в 500 см ³ воды и взбалтывают. Ставят на 2—3 ч, затем отфильтровывают от избытка бензидина. Полученный раствор разбавляют двойной порцией воды. Перед окрашиванием готовят свежий реактив	а) Растворитель. Проявитель на Mn^{4+} , ванадий, хром б) Окрашивание монтмориллонита
Бензоинооксим	5%-ный раствор в спирте	Проявитель на медь
Барий хлористый BaCl_2	Водный раствор 5%-ный	Проявитель на серу
Гипосульфит $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	Водный раствор 5%-ный	В микрохимическом анализе
Диметилглиоксим $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$ органич. соединение	1 г порошка растворяют в 100 мл 95%-ного спирта	Проявитель на никель
Дифенилкарбазид	Приготовление реактива см. на стр. 92; 0,01%-ный спиртовой раствор	Окрашивание магнетита, проявитель на Cd
Иодистый калий KI	В сухом виде (порошок); 5%-ный водный раствор, свежеприготовленный	Проявитель на свинец, сурьму, висмут, теллур
Калий едкий KOH	Водный раствор 50, 20, 40%-ный, насыщенный	Стандартный реактив ⁴ . Окрашивание антимонита, скородита
Калий ферроцианид (желтая кровяная соль) $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	Водный раствор 5%-ный	Проявитель на Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mo^{6+} , U^{4+}
Калий феррицианид (красная кровяная соль) $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	Водный раствор 5%-ный	Проявитель на Fe^{2+} , Mn^{2+} , Co . Окрашивание карбонатов железа
Калий роданистый KCNS	Водный раствор 5%-ный; в сухом виде	Определение железа
Кристалл-фиолет, или фиолетовые чернила	0,001%-ный водный раствор	Окрашивание кальцита
Ксантагенат калия	Водный свежеприготовленный раствор, в сухом виде	Проявитель на Mo^{4+}
Метилен-блау (синие чернила)	Водный раствор 0,001%-ный (10 мг реактива на 1 л воды)	Окрашивание каолинита
Молибденовокислый аммоний $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	В сухом виде (порошок); насыщенный раствор в HNO_3 конц. и в воде	Проявитель на мышьяк, фосфор, олово
Р-диметиламино-бензелиденродамин	Спиртовой раствор: 1 г порошка растворяют в 100 мл спирта	Проявитель на серебро
Перекись водорода H_2O_2	Водные растворы 30, 10, 3%-ный	Растворитель, проявитель на ванадий и титан
Перекись натрия Na_2O_2	В сухом виде	Микрохимический анализ
Родамин-В	Спиртовой раствор 0,1%-ный	Окрашивание серицита
Рубеазовая кислота $\text{CN}\cdot\text{CS}_2\cdot\text{NH}_2$	Спиртовой раствор. 1 г порошка растворяют в 100 мг 95%-ного спирта	Проявитель на медь, никель, кобальт
Ртутно-родановая соль $\text{HgCl}_2 + \text{KCNS}$	Водный раствор. 8 г сулемы и 10 г роданистого аммония или ро-	Проявитель на цинк, кобальт

Реактив	Способ приготовления реактива	Назначение реактива
Роданистый аммоний + антипирин	данистого калия растворяют в 100 мл воды. Применяют реактив, спустя несколько дней после приготовления	Проявитель на цинк, кобальт
Серная кислота H_2SO_4	Водный раствор 0,4 г NH_4CNS + 1,6 г антипирина в 50 см ³ H_2O	Проявитель на железо
Соляная кислота HCl	Концентрированная, уд. вес 1,84; водные растворы 1:1, 1:4, 1:20	Растворитель, проявитель на теллур
Сулема $HgCl_2$	Концентрированная, уд. вес 1,19; водные растворы 1:1, 1:20	Растворитель, стандартный реактив
Тиомочевина	Водный раствор 5, 20%-ный	Диагностическое травление
Хлористый цезий $CsCl$	Водный раствор 10%-ный	Проявитель на висмут, селен
Хлорное железо $FeCl_3$	В сухом виде (порошок); водный раствор 10%-ный, свежеприготовленный	Проявитель на сурьму, висмут, теллур
Хлористый калий KCl	Водный раствор 20%-ный	Стандартный реактив
Хлористое олово $SnCl_4$	Насыщенный раствор в дистиллированной воде	Окрашивание каолинита
Хромотропная кислота	В HCl конц., уд. вес 1,19, растворяют металлическое олово до насыщения	Проявитель на вольфрам в шеелите
Хромовокислый калий K_2CrO_4	2%-ный водный раствор натровой соли	Проявитель на титан
Царская водка	Водный раствор 20%-ный	Проявитель на серебро и свинец
Цианистый калий KCN	1 ч. HNO_3 конц. + 2 ч. HCl конц.	Растворитель, структурное травление
Цинковая пыль или цинковая пластинка	Водный раствор 20%-ный	Стандартный реактив
	В сухом виде	Окрашивание касситерита

¹ Растворителем называется реактив, применяемый для растворения минерала.

² Проявителем называется реактив, применяемый для открытия химического элемента качественным микрохимическим анализом.

³ Стандартные реактивы применяются в диагностическом травлении.

БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

av	авгит	kl	каолинит	ag	серебро и минералы
ax	аксинит	car	карбонат		серебра
ak	актинолит	ks	касситерит	s	серицит
di	алмаз	q	кварц	se	серпентин
al	алунит	ky	кианит	sr	сидерит
ab	альбит	ki	киноварь	si	силлиманит
al	альмандин	clzo	клиноцонозит	sk	скаполит
am	амфиболит	cb	кобальтин	sc	скородит
a	ангидрит	cv	ковеллин	gm	слюда
ad	андалузит	kb	колумбит	spec	спекулярит
apk	анкерит	co	корднерит	sn	сплессартин
sb	антимонит (стибнит)	ko	корунд	sd	сподумен
ap	антофиллит	cup	куприт	st	ставролит
ar	апатит	le	лепидолит	sb	стибнит, антимонит
ar	арсенопирит	lc	лептохлорит	zn	сфалерит
as	асбест	lm	лимонит	ss	сферосидерит
ba	барит	mg	магнезит	tk	талък
be	берилл	mt	магнетит	tn, te	теннантит, тетраэдрит
b	биотит	mal	малахит	ti	титанит (сфен)
bo	боксит	ma	марказит	tm	титаномагнетит
bp	борнит	sm	медь самородная	to	топаз
vd	вад	mk	микроклин	tr	тремолит
va	ванадинит	mn	минералы марганца	t	турмалин
v	везувиан	mo	молибденит	ug	урановая слюдка
vs	висмутин	mz	монацит	us	урановая смолка
wo	воластонит	mont	монтмориллонит	u	урановые минералы
w	вольфрамит	m	мусковит	fm	фаматинит
gn	галенит	ne	нефелин	ph	флогопит
hm	гематит	oz	озокерит	fl	флюорит
hy	гиперстен	TiOx	окислы титана	cl	халцедон
g	гипс	ov	оливин	cc	халькозин
gk	глауконит	or	ортит	cu	халькопирит
gr	гранат	o	ортоклаз	ch	хиастолит
gf	графит	pw	перовскит	c	хлорит
hn	гюбнерит	py	пирит	cr	хромит
da	датолит	p	пироксен	z	цеолит
dl	диаллаг	pz	пирролюзит	zs	церуссит
dg	дигенит	po	пироп	zw	циннвальдит
dck	диккит	ps	пирохлор	zg	циркон
dp	диопсид	prp	пирофиллит	zo	цонзит
d	доломит	rp	пирротин	cm	шамозит
au	золото и минералы	pg	плагиоклаз	sh	шеелит
	золота	pt	платина	sp	шпинель
ill	иллит	po	повеллит	eg	эгирин
i	ильменит	i	полевые шпаты	en	энаргит
k	калийная соль	h	роговая обманка	e	эпидот
kl	калишпат	rd	родонит	j	янтарь
ca	кальцит	ro	родохрозит	ja	ярозит
n	каменная соль	r	рутил		
cc	канкринит	su	сера		

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ МИНЕРАЛОВ

Минерал	Номер определительной таблицы	Координаты минералов		Номера минералов в описательных таблицах
		R, %	H, кгс/мм ²	
Аварунт	VII	72	300	—
Агвиларит	II	36	26	24
Азурит	IV	10	190	162
Айкинит	II, IV	44; 44	18; 170	47; 127
Акантит	II	35	24	21
Алабандин	IV, XII	24	251	109
Аллоклазит	VII	51	600	—
Алтаит	I, IX	65; 68	53; 40	4
Англезит	II	9	90	64
Аннабергит	II, VII	7	93; 80	72
Антимонит	II	44	72	33
β-Аргентит	II	37	24	22
Аргентопентландит	VII, X	36	170	236
Аргентокупроурит	X	64	214	232
Арсенопирит	V, XII	54	1094	190
Арсенопалладинит	XI	51	630	—
Арсеносульванит	VIII	36	480	106a
Асболян	XII	25	95	—
Аурипигмент	II	26	38	54
Аурихальцит	II, IV	7	100	74; 164
Аурокупроит	X	63	190	234
Ауросмирид	XI	69	587	249
Барит	IV	6	180	156
Бертьерит	IV, VIII	38	171	117
Берцелианит	II	25	92	29
Бетехтинит	XIII	33	160	—
Бесторневый уранинит	VI	16	800	212
Биберит	II, VII	4	28; 40	81
Биксбиит	VI, XII	22	1018	201
Блокит	VII	35	480	—
Борнит	II, IV	23	100	31; 107
Бравоит	V, VII	50	740	186
Браннерит	VI	16	720	219
Браунит	VI, XII	19	600	203
Брейтгауптит	III, V, VII	50	500; 563	192
Брошактит	IV	8	180	163
Бреггит	VII, XI	45	1020; 905	—
Булажерит	IV, VIII	40; 42	166	128
Бурнонит	IV, VIII	35; 36	160; 192	130
Валентинит	II	15	80	61
Валлерит	II	21	84	18
Ванадинит	II, IV	17	100	59; 153
Ваэсит	VII	31	815	—
Верлит	IX	63	80	—
Вернадит	XII	40	75	—
Вестервелдит	VII	52	750	—
Вилламаннит	VII	30	575	—
Виллиамит	VII	48	700	—
Виоларит	IV, VII	38	458	100
Висмут самородный	I	68	18	6
Висмутин	I, III	48	93	16; 99
Виттихенит	IV	34	198	133
Вольфрамит	IV	18	400	147
Волюнскит	IX	53	77	—
Врбаит	VIII	29	100	—
Вульфенит	II	16	97	60
Вюртцит	IV	17	200	150
Высоцкит	VII, XI	45	470	—
Галенит	II	44	77	19
Галеновисмутит	IV	43	150	116
Гарниерит	II	6	50	67
Гауерит	IV, XII	23	200	110
Гаусманит	VI, XII	20	587, 640	202

Минерал	Номер определительной таблицы	Координаты минералов		Номера минералов в описательных таблицах
		R, %	H, кгс/мм ²	
Гаухекорнит	VII	46	636	—
Гематит	VI, XII	27	1000	204
Геокронит	IV, VIII	41	110	126
Германит	IV	22	427	108
Герсдорфит	V, VII	51; 46	554	187
Гессит	II, IX	40	33; 38	45
Гётит	VI, XII	19; 18	554; 520	206
Гетерогенит	VII	9	100	—
Гетерогенит—2H	VII	24	640	—
Гидрогематит	VI, XII	24	500	197
Гидрогётит	IV, XII	18	305	146
Гидроцинкит	II	5	42	75
Гипс	II	3	57	70
Глаукоdot	V, VII	57; 52	1100; 911	176
Годлевскит	VII	51	397	—
Голандит	XII	30	630	—
Гринокит	II, IV	19; 18	57; 110	32; 112
Графит	II	23	12	43
Гудмундит	V	57	644	180
Гутчинсонит	VIII	27	170	—
Гюбнерит	IV, XII	16	400	149
Давидит	VI	17	800	210
Делафоссит	IV, XII	23; 24	400; 510	138
Джарлеит	XIII	32	82	28a
Джезказганит	XIV	28	229	—
Джемсонит	II	40	100	34
Джерфишерит	VII	24	180	—
Дигенит	II	19	70	30
Дискразит	III	66	170	90
Домейкит	III	56	125	83
Железо самородное	III, XII	63	132	85
Железистая платина	X	68	370	244
Зелигманнит	VIII	34	178	—
Зигенит	V, VII	46	524; 464	184
Золото самородное	I, X	85	50	2; 229
Золото медистое	X	78	74	231
Идант	IV	20	240	121
Изоплатинид железа	X	59	270	247
Изоферроплатина	X	66	280	246
Ильваит	VI	13	800	223
Ильменит	VI, XII	21; 19	640; 620	208
Ильменорутил	VI, XII	20; 17	1000; 820	209
Имгреит	VII	53	215	—
Иорданит	VIII	39	176	—
Ирарсит	XI	47	1188	—
Иридарсенид	XI	46	547	—
Иридинстая платина	X	72	420	238
Иридинстый осмий	XI	64	631	252
Йеншанит	XI	43	650	—
Калаверит	III, IX	63	220	91
Кальцит	IV	5	160	168
Карролит	III, V, VII	46; 43	460; 570; 463	96; 185
Касситерит	VI	12	1100	222
Каттверит	VII	34	1033	—
Кварц	VI	4; 35	1135	226
Кераргирит	II	12	22	57
Кермезит	II	27	32	53

Минерал	Номер определительной таблицы	Координаты минералов		Номера минералов в описательных таблицах
		R, %	H, кгс/мм ²	
Кировит	II, XII	4	85	78
Киноварь	II	30	78	52
Киткайт	VII, IX	65; 62	110; 94	—
Клаусталит	I	50	50	113
Клинносфлорит	VII	55	720	—
Клокманнит	II	30	64	38
Кобальтин	V, VII	56; 53	1200; 1100	182
Кобеллит	VIII	44	1135	—
Ковеллин	II	20	70	41
Колорадоит	II, IX	38; 40	29; 33	25
Колумбит	VI	17	550	221
Колусит	VIII	28	336	—
Коронадит	XII	28	760	—
Костибит	VII	48	425	—
Костовит	VII	46	781	—
Котульскит	IX	65	240	—
Коффинит	IV	5	260	155
Креннерит	I, IX	70; 68	60; 62	10
Криптомелан	XII	30; 28	20; 300	—
Крокоит	II	10	80	71
Куровит	VII	66	630	—
Кубанит	IV	40	200	124
Кулсонит	VI, XII	21; 22	560; 525	1986
Куперит	XI	39	815	—
Куприт	IV	27	200	136
Купроферроплатина	X	68	150	241
Кюстелит	X	77	84	230
Лазаревичит	IV, VIII	36	470	106
Лампадит	XII	25	95	—
Лангсит	XII	48	820	—
Лаурит	XI	42	2261	—
Лаутит	VIII	30	211	—
Лейкоксен	VI	10	800	225
Лёллингит	V	54	688	191
Лепидокрокит	VI	22	724	205
Лептохлориты	II, XII	5	75; 85	69
Линнеит	III, V, VII	46	500; 530	183
Ливингстонит	VIII	38	129	—
Лопарит	VI	15	811	215
Лорандит	II, VIII	23; 31	47; 41	55
Людвигит	VI	10	567	224
Люшонит	IV, VIII	28	388	119
Маггемит	IV, VI, XII	25	400; 946; 380	111, 196
Магнетит	VI, XII	21	560; 525	198
Макиनावит	VII	46	57	—
Малахит	IV	110	130	161
Манганит	IV, XII	19	400	139
Манганокальцит	XII	4	170	—
Марказит	V	52	930; 950	189
Маттагамит	VII	52	400	—
Маухерит	V, VII	59; 52	704	179
Медь самородная	III	83	134	82
Мелантерит	II, XII	4	38; 85	76
Мелонит	I, III, VII, IX	70; 66	85; 150; 161; 82	11; 15; 89
Мельниковит	II, XII	8; 10	40	65
Менегинит	VIII	43	154	—
Метациннабарит	II	27	78	26
Миаргрит	IV, VIII	34	110; 115	140
Миллерит	III, VII	54; 60	250; 235	97
Моддерит	VII	40	212	—
Молибденит	II	44	20	36
Монтбрейит	IX	68	215	—
Моренозит	II, VII	4	38; 45	79
Мушкетовит	II, XII	21	560	198a

Минерал	Номер определительной таблицы	Координаты минералов		Номера минералов в описательных таблицах
		R, %	H, кгс/мм ²	
Мышьяк самородный	I, III	58	100	12, 93
Нагиагит	II, IX	40; 38	80; 93	44
Настуран	VI	11	500	213
Науманнит	II, IV	35	78; 148	23; 141
Невьянскит	XI	73	891	174; 248
Никелин	III, VII	68; 55	420; 450	88
Никель самородный	VII	64	200	—
Никельскуттерудит	VII	57	560	—
Нисбит	VII	60	479	—
Овихинит	VIII	42	172	—
Осмий самородный	XI	57	400	255
Осмиридий	V, XI	68	485	169; 250
Осмистый иридий	V	80	550	174
Павонит	I	45	38	17
Палладистая тетраферроплатина	X	68	260	242
Паракостибит	VII	48	1069	—
Парараммельсбергит	V, VII	61	772; 780	178
Паркерит	VII	48	125	—
Пентландит	III, VII	53	220; 230	94
Перовскит	VI	15	1000	216
Петцит	II, IX	40	49	20
Пизанит	II	4	65	77
Пираргирит	II, VIII	32; 29	90; 115	51
Пирит	V	54; 5	1165; 1250	181
Пиrolюзит	IV, VI	40	210; 1300	115; 125; 199
Пирохлор	VI	13	650	217
Пирсеит	VIII	34	153	—
Пирротин	IV	42	280	113
Плагионит	VIII	41	182	—
Платина самородная	III, X	71	126	84; 240
Платинистый иридий	X	73	460	237
Повеллит	IV	11	250	152
Полевые шпаты	XIII	5	780	—
Полибазит	IV, VIII	29; 30	112; 113	142
Полидимит	III, VII	45; 47	400	95
Поликсен	III	70	400	84
Порпещит	X	62	106	235
Прустит	IV, VIII	27	123; 131	143
Псиломелан	VI, XII	35; 30	572; 540; 200	193; 200
Раммельсбергит	V, VII	55; 60	710; 655	177
Реальгар	II	20	54	56
Реньерит	IV	30	320	134
Риккардит	IX	17	150	—
Родонит	XII	7	780	—
Родохрозит	XII	9	170	—
Рутений самородный	XI	60	893	254
Рутенарсенит	XI	49	838	—
Рутениридосмин	XI	59	1115	253
Рутеносмиридий	XI	66	1237	251
Рожковит	X	63	176	233
Рутил	VI, XII	24	1200	207
Самородный иридий	X	68	600	239
Саффорит	III, V, VII	62; 54	430; 600; 590	92; 173; 175
Сенармонит	II	10	60	63
Сера самородная	II	15	30	62
Серебро самородное	I	95	53	1; 227
Сидерит	IV	10	200	165
Сильванит	III, IX	54; 60	100; 120	14; 98
Синнерит	VIII	29	374	—
Скородит	IV	8	247	167
Скуттерудит	V, VII	60; 55	653; 744	172
Смайтит	VII	46	388	—
Смальтин	III, V, VII	62	470; 600	171

Минерал	Номер определительной таблицы	Координаты минералов		Номера минералов в описательных таблицах
		R, %	H, кгс/мм ²	
Смитсонит	IV	9	400	160
Сперрилит	V, XI	55	780; 1156	170
Станнин	IV	28	220	135
Стениерит	VII	9	300	—
Стефанит	II, VIII	28	38	42
Стибиолуцит	IV, VIII	28	388; 344	120
Сурьма самородная	I	74	91	5
Сильванит	IV, VIII	35; 32	159; 153	105
Сфалерит	IV	18	200	144
Сфен	VI	10	800	225
Танталит	VI	14	803	220
Тенорит	IV	22	236	137
Теллур самородный	I, IX	58	42; 40	9
Теллурувисмутит	I, IX	63	20; 60	7
Теннантит	IV, VIII	28	340	104
Тетрадимит	I, IX	56	36	8
Тетраферроплатина	X	68	310	243
Тетраэдрит	IV	30	350	102
Тиллит	II	38	47	48
Тиманнит	II	25	38	27
Тинтинант	VIII	41	153	—
Тиррелит	VII	44	436	—
Титанит	VI	10	800	225
Торнанит	VI	11	1000	214
Треворит	VII	24	917	—
Тронлит	IV	42	256	114
Туламинит	X	66	450	245
Уголь каменный	IV	7, 5	340	—
Уайраунт	VII	54	260	—
Ульманит	V, VII	47	525	188
Умангит	II, IV	20	82; 100	40; 122
Уранинит	VI	17	800	211
Урановая смолка (настуран)	VI	11	500	213
Урановая чернь	II, IV	11	98; 310	58; 145
Фаматинит	IV	27	338	120
Ферберит	IV	17	400	148
Ферримолибдит	II	8	28	66
Флюорит	IV	3	200	158
Франкеит	II	37	52	49
Франклинит	VI, XII	16	760	195
Фрейбергит	IV, VIII	30	345	103
Фробергит	IX	52	270	—
Халькантит	II	6	38	73
Халькозин	II	32	82	28
Халькопирит	III, IV	44	205	123
Халькостибит	IV, VIII	36; 40	270; 228	131
Хизлевудит	VII	57	250	—
Хлоантит	III, VII	62	400	86
Холлингворит	XI	48	750	—
Хризоколла	II, IV	4	97; 100	68; 157
Хромит	VI, XII	12	1200	218
Церуссит	IV	12	120	154
Цилиндрит	II	40	70	46
Цинкениит	IV, VIII	37	170	129
Цинкит	IV	12	230	151
Чаонт	II	40	23	43a
Шватцит	IV, VIII	33	350; 330	101
Шеелит	IV	10	350	159
Штернбергит	II	44	90	35
Штроемерит	II	27	41	39
Эквайрит	II	32	32	37

Продолжение указ.

Минерал	Номер определительной таблицы	Координаты минералов		Номера минералов в описательных таблицах
		R, %	H, кгс/мм ²	
Электрум	I, X	82	40	3, 228
Эмлектит	IV	37	194	132
Энарцит	IV	27	250	118
Эритрин	IV, VII	9; 10	105; 110	80
Якобсит	VI, XII	19	734	194
Ялпант	II	32	47	50
Ярозит	IV	8	210	166

Примечания. 1. Минералы под номерами с 1 по 226 помещены в описательных таблицах I, II, III. 2. Минералы под номерами с 227 по 255 помещены в описательных таблицах IV, V, VI Л. В. Разина. 3. Минералы без номеров помещены только в определительных таблицах.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Предисловие	3
Часть I	
Главнейшие свойства рудных минералов в отраженном свете и методы их изучения	
Глава 1. Отбор образцов руд для микроскопических исследований и изготовление полированных шлифов	4
Отбор образцов для геолого-минералогических исследований	4
Отбор проб из дробленого рудного материала	8
Полированные шлифы из плотных руд	9
Полированные шлифы из дробленого материала	10
Глава 2. Оптические свойства рудных минералов и методы их изучения	11
Основные соотношения между оптическими постоянными рудных минералов	12
Дисперсия отражения и цвет рудных минералов	16
Оптические явления, наблюдаемые при скрещенных николях	21
Внутренние рефлексy	25
Приборы для исследования оптических свойств рудных минералов	26
Количественные методы исследования оптических свойств рудных минералов	29
Измерение спектров отражения в воздухе при нормальном падении света. Испытание работоспособности прибора	30
Измерение спектров отражения изотропных минералов	32
Измерение спектров отражения анизотропных минералов	34
Определение осности и оптического знака минерала	35
Измерение спектров отражения в иммерсии	38
Визуальные микроскопические методы наблюдения оптических свойств рудных минералов	38
Применение иммерсии в рудной микроскопии	47
Глава 3. Физические свойства рудных минералов и методы их изучения	48
Твердость	48
Магнитность	56
Кристалломорфные особенности рудных минералов	57
Глава 4. Химические свойства рудных минералов и методы их изучения в полированных шлифах	68
Диагностическое и структурное травление	69
Качественный микрохимический анализ	71
Кристаллоскопический метод	74
Капельный метод	75
Метод отпечатков	76
Фазовый микрохимический анализ	78
Метод окрашивания, или пленочный	78
Глава 5. Типоморфные минеральные ассоциации руд и их значение при диагностике рудообразующих минералов	92
Глава 6. Описание рудных минералов по результатам макроскопического и микроскопического изучения	101
Последовательность изучения полированных шлифов начинающим исследователем	106

Часть II

Определительные и описательные таблицы

Глава 7. Методика работы с таблицами	108
Графики вариаций отражения, микротвердости и спектры отражения	110
Примеры определения рудных минералов с помощью таблиц . . .	113
Определительные таблицы	115
Сводная определительная таблица	118
Определительная таблица I	120
Определительная таблица II	122
Определительная таблица III	124
Определительная таблица IV	126
Определительная таблица V	128
Определительная таблица VI	130
Определительная таблица VII	132
Определительная таблица VIII	134
Определительная таблица IX	136
Определительная таблица X	137
Определительная таблица XI	138
Определительная таблица XII	140
Определительная таблица XIII	142
Определительная таблица XIV	144
Условные обозначения и сокращения, принятые в описательных таблицах	146
Описательные таблицы	147
Описательная таблица I	148
Описательная таблица II	172
Описательная таблица III	202
Описательная таблица IV	222
Описательная таблица V	226
Описательная таблица VI	230
Список литературы	234
Приложения	238
Инструкция к курсовой работе по минераграфии	238
Список оборудования и материалов для организации лаборатории по рудной микроскопии	241
Список реактивов, применяемых при изучении химических свойств рудных минералов	243
Буквенные обозначения минералов	245
Алфавитный указатель минералов	246

*Мария Прокофьевна Исаенко,
Серафима Самойловна Боришанская,
Евгения Лукьяновна Афанасьева*

**Определитель главнейших минералов руд
в отраженном свете**

Редактор издательства *Р. В. Добровольская*
Художественный редактор *Е. Л. Юрковская*
Технический редактор *Е. С. Сычева*
Корректор *М. П. Курылева*

Сдано в набор 18.10.77. Подписано в печать 16.11.78. Т-20264.
Формат 70×108¹/₁₆. Бумага № 2. Гарнитура литературная.
Печать высокая и офсет. Печ. л. 16,125 с вкл. Усл. печ. л. 22,57.
Уч.-изд. л. 23,23. Тираж 6800 экз. Заказ 900/6340-14. Цена 85 коп.

Издательство «Недра», 103633. Москва, К-12.
Третьяковский проезд, д. 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

Уважаемый товарищ!
Издательство «Недра»
готовит к печати новые книги

КОПЧЕНОВА Е. В. Минералогический анализ шлихов и рудных концентратов. 20 л., 1 р. 40 к.

Минералогическое изучение шлихов и рудных концентратов, получаемых при отмывке водой природных рыхлых отложений или раздробленных плотных горных пород, широко используется при проведении геологопоисковых и разведочных работ. В книге описана общая схема минералогического анализа шлихов. Рассмотрены подготовка проб и разделение их на фракции. Описаны различные физические и химические методы диагностики минералов шлихов. Дана таблица — определитель минералов по их физическим и химическим свойствам. Особое внимание уделено диагностике минералов россыпей.

Книга предназначена в качестве методического и практического руководства для специалистов, занимающихся минералогическим анализом. Она также представляет интерес для геологов и минералогов, проводящих шлиховые поиски.

КУЗЬМИН В. И., ДОБРОВОЛЬСКАЯ Н. В. СОЛНЦЕВА Л. С. Турмалин и его использование при поисково-оценочных работах. 20 л., 1 р. 70 к.

Книга посвящена турмалину — минералу, широко распространенному в различных геологических формациях. Дана характеристика месторождений турмалина как кристаллосырья для приборостроения и ювелирной промышленности. Детально рассмотрены состав, свойства и особенности турмалина как минерала-спутника многих полезных ископаемых: олова, полиметаллов, золота, керамического сырья и др. Выявлены типоморфные признаки турмалина в зависимости от условий образования. Предложен вероятностно-статистический метод определения формационной принадлежности турмалина по результатам спектрального анализа ряда элементов-примесей. Установлена возможность оценки вертикальной зональности на турмалинсодержащих оловорудных месторождениях. Даны рекомендации по использованию типоморфных признаков турмалина при поисках и оценке месторождений разнообразных полезных ископаемых и при технологических исследованиях турмалинсодержащих руд.

Книга рассчитана на геологов, занимающихся поисками, разведкой и изучением месторождений полезных ископаемых.

ЛЯХОВИЧ В. В. Акцессорные минералы горных пород: Учеб. пособие для вузов, 20 л., 90 к.

В книге дано всестороннее описание акцессорных минералов горных пород. Охарактеризованы особенности формы, состава и содержания минералов рудных и редких элементов в изверженных, эффузивных и осадочно-метаморфических породах. Изложена методика их выделения. Приведены средние содержания акцессорных минералов в различных типах горных пород по среднему содержанию в них рудных и редких элементов. Показана эффективность и важность использования этих данных при решении многих металлогенических и петрологических задач.

Учебное пособие предназначено для студентов геологических специальностей вузов и соответствует программе курса «Петрография изверженных горных пород». Книга также будет полезна петрологам, петрографам и минералагам научно-исследовательских и производственных геологических организаций.

МИЛОВСКИЙ А. В. Минералогия и петрография: Учебник для техникумов. 4-е изд., перераб. и доп. 30 л., 1 р. 40 к.

Книга состоит из разделов «Минералогия» и «Петрография». Раздел «Минералогия» включает общую часть, посвященную рассмотрению химического состава, свойств, морфологии, условий образования минералов, и часть, содержащую описание минералов. В разделе «Петрография» изложены основные сведения о магматических, осадочных и метаморфических горных породах. Приведены также основные понятия по кристаллографии и геохимии, знакомящие студентов с этими дисциплинами и способствующие усвоению материала по минералогии и петрографии.

В четвертом издании (3-е изд.—1973) учтены новейшие данные по характеристике некоторых минералов и горных пород.

Учебник предназначен для учащихся средних геологоразведочных учебных заведений по курсам «Минералогия» и «Петрография».

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга—почтой» магазинов:

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

№ 59 — 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20.

Издательство «Недра»