

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (ВСЕГЕИ)

ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ
РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

ЛЕНИНГРАД
1971

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (ВСЕГЕИ)

549.1+553.1

ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

ЛЕНИНГРАД
1971

365

В руководстве показаны методика измерения отражательной способности минералов, характер ошибок, которые могут возникнуть при измерении, и способы их устранения. Показаны некоторые области применения отражательной способности. Охарактеризована современная, как отечественная, так и зарубежная, аппаратура, применяемая для этой цели.

В приложениях даны значения отражательной способности рудных минералов в «белом» и монохроматическом свете.

Составители:

*Н. И. Шумская, В. Е. Клейнбок,
Н. П. Александрова*

Научный редактор *П. А. Строна*

Отражательная способность как одно из свойств непрозрачных материалов, которое можно охарактеризовать количественно, привлекала внимание исследователей с самого начала изучения руд под микроскопом. Первые измерения отражательной способности сделаны были в 1900 г., когда Хаген и Рубенс (Hagen, Rubens) измерили на спектрофотометре отражательную способность платины, серебра, никеля, стали, золота, меди в видимой области спектра. В 1902 г. для этих минералов ими были произведены замеры отражательной способности в ультрафиолетовой (с $\lambda = 250$ нм) и инфракрасной (λ до 1500 нм) областях спектра. Кенигсбергер (Koenigsberger) применил этот метод для измерения отражательной способности сульфидов и окислов. Это были прямые замеры на спектрофотометре больших полированных плоскостей. Такие замеры давали большую систематическую ошибку, поэтому Кенигсбергер предложил перейти на относительный метод замеров с помощью эталонов.

Таким образом, 1903 г. можно считать годом возникновения сравнительного метода измерения отражательной способности. Однако начатые Кенигсбергером исследования были продолжены только в 1927 г. Орселем (Orsel) во Франции и в 1928 г. Шнейдерхеном (Schneiderhöhn) в Германии. Почти одновременно этот метод начал развиваться в других странах (Frick, 1930; Berek, 1937; Cissarz, 1932; Faber, 1933; Moses, 1936, и др.).

Затем в исследованиях наступил перерыв, связанный со второй мировой войной. В 1948 г. работа Фолинсби (Folinsbee) «Определение отражательной способности рудных минералов» положила начало новому этапу, продолжающемуся и в настоящее время.

Таким образом, отражательная способность рудных минералов с давнего времени привлекала внимание крупнейших ученых всего мира — исследователей рудных минералов, но метод измерения до последнего времени не имел широкого

применения в практике изучения руд. Причина этого — отсутствие серийных приборов высокого качества и разработанной методики.

Значения отражательной способности, получаемые при измерениях на разной, в большинстве случаев кустарной аппаратуре, плохо сопоставлялись друг с другом, что вызывало недоверчивое отношение к единственной, по-существу, оптической константе, которая подвергается непосредственному измерению и дает количественную оценку свойств рудных минералов. Выпуск промышленных приборов, позволяющих быстро и достаточно точно замерять отражательную способность, является определенным шагом вперед в деле изучения рудных минералов, но требует разработки единой методики.

Данная работа представляет собой методическое руководство по измерению отражательной способности, содержащее характеристику возможностей этого метода.

Одна из задач руководства — объединить рассеянные в литературе, как отечественной, так и, главным образом, в зарубежной, сведения и результаты исследований по изучению отражательной способности (R), а также показать возможности наших приборов и пути получения значений с минимальными ошибками.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МИКРООБЪЕКТОВ

С 30-х годов XX в. в исследованиях отражательной способности развивались два направления: визуальная фотометрия и измерения с помощью фотоэлектрической аппаратуры. Оба направления описаны во многих печатных работах.

Визуальным фотометрированием измеряли отражательную способность Берек, Шнейдерхён (Schneiderhöhn, 1928), Циссарц, Халлимонт (Hallimond, 1957), Леонард (Leonard, 1960), И. С. Волинский (1959, 1963), С. А. Вахромеев (1954), А. З. Конигов (1960). Сущность метода заключается в визуальном сравнении степени интенсивности отражения от испытуемого минерала и естественного или искусственного эталона.

Фотоэлектрическим методом измерения отражательной способности пользовались Орсель (Orcel, 1935), Эренберг (Ehrenberg, 1964), Мозес (Moses, 1936), Фолинсби (Folinsbee, 1949), Бови (Bowie, 1957), Грей и Мильман (Gray and Milman, 1960, 1962), Кэмерон (Cameron, 1966), Пиллер и Гелен (Piller and Helen, 1964), И. А. Пудовкина (1957), М. Н. Пономарева (1965), П. А. Строна (1964), П. С. Бернштейн (1968).

Сущность метода заключается в замере интенсивности отраженного света последовательно от объекта и эталона с помощью фотоэлектрического приспособления. Существует несколько разновидностей этих приспособлений, главные отличия которых заключаются в применении либо различных фотоэлементов (селенового с бариевым слоем, сульфидно-кадмиевого), либо фотоумножителя.

Развитие количественных методов в микроскопии и общий прогресс в области приборостроения способствовали появлению в последние годы ряда оригинальных приборов. Микроскопы-фотометры, с помощью которых можно измерять отра-

жательную способность и пропускание микрообъектов, дисперсию отражения и пропускания, спектры флюоресценции, выпускаются крупнейшими оптико-механическими фирмами за рубежом и в СССР.

Наряду с этим большое количество измерений отражательной способности, в частности рудных минералов, произведено на теперь уже устаревшей аппаратуре. Значительная часть измерений вошла в определители и справочники и широко используется. Поэтому приборы и методы измерений представляют и на сегодня определенный интерес. Представляется полезным рассмотреть приборы и методы измерения отражательной способности микрообъектов, как применявшиеся ранее, так и используемые в настоящее время, останавливаясь подробнее на той аппаратуре и тех приемах измерений, которые имеют какой-либо оригинальный элемент по сравнению с предыдущими работами. При использовании литературных данных для оценки степени их достоверности необходимо знать особенности приборов, на которых проводились измерения.

Умышленное использование нами термина «микрообъекты», хотя в общем работа относится к рудным минералам, объясняется тем, что в применяемых приборах и общих приемах измерений отражательной способности рудных минералов, углей, битумов, искусственных минералов и других микрообъектов нет принципиальных различий.

Классификация методов определения отражательной способности микрообъектов

Отражательная способность может измеряться тремя методами: 1) методом, основанным на измерении элементов эллиптически поляризованного света; 2) методом измерения полной индикатрисы отражательной способности минерала на полусферическом аншлифе, предложенным Эренбергом (Ehrenberg, 1964); 3) методом сравнительного измерения интенсивности отраженного света от объекта и эталона.

Последний метод широко распространен; его можно, в свою очередь, подразделить на несколько разновидностей:

а) по характеру примененных для измерения приборов (измерение отражательной способности на однолучевых микрофотометрах и измерение отражательной способности на двухлучевых микрофотометрах, к которым можно отнести все визуальные микрофотометры);

б) по способу регистрации светового потока (субъективные — регистрация светового потока визуальная и объективные — регистрация потока с помощью фотоэлемента или фотоэлектронного умножителя).

Приборы и методы субъективных измерений отражательной способности микробъектов

Методы субъективных измерений основаны на уравнивании в одном поле зрения освещенности измеряемой и эталонной поверхности. Фиксация момента уравнивания производится визуально, что и определяет в основном возможную точность измерений. Из приборов, применявшихся советскими исследователями, следует отметить сравнительный микроскоп с камерой А. А. Иностранцева, фотометрический окуляр с оптическим клином И. С. Волинского и фотометрический окуляр С. В. Вахромеева с клином, изготовленным фотографическим методом. Из приборов, применявшихся за рубежом, заслуживают внимания щелевой микрофотометр Берека и фотометрический окуляр Халлимонда.

Щелевой микрофотометр Берека

Щелевой микрофотометр, предложенный Береком, фирма «Лейтц» в Германии начала выпускать в начале 30-х годов XX в. На нем было произведено большое число измерений отражательной способности минералов, углей и других микробъектов. Значительная часть этих измерений вошла в определитель Рамдора (1962). Относительная точность измерений на микрофотометре разными исследователями оценивалась несколько различно: Стахом (Stach) в 1%, Даме, Маковской (Dahme, Maskowsku) в 5%, Хантьенсом и Ван Кревеленом (Huntjens, Van Krevelen) в 3% кедровом масле, в 1,5% в воздухе, но в общем довольно высоко. На последних моделях микрофотометра можно измерять поверхности до 17 мкм (радиус полуокружности).

Щелевой микрофотометр конструктивно оформлен в виде самостоятельного оптико-механического узла-насадки, которая может устанавливаться на микроскопе. Микрофотометр (рис. 1) показан совместно с тубусом поляризационного микроскопа. Луч света от лампочки осветителя проходит специальную щелевую апертурную диафрагму (на рисунке не показана) и светоразделительной призмой 1 делится на два

пучка. Один пучок света направляется в сравнительный тубус и, пройдя через поляризационные призмы 2 и 3, направляется фотометрической призмой 5 в наблюдательный окуляр 7. Второй пучок света, пройдя призму 1, попадает в opak-иллюминатор микроскопа и через объектив — на объект, отражается от него и через фотометрическую призму попадает в наблюда-

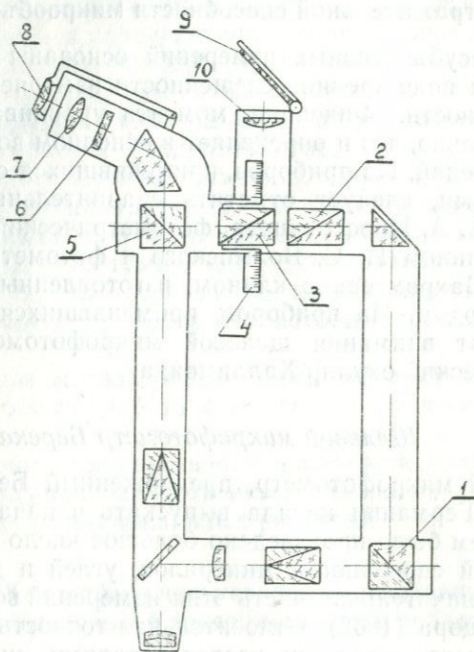


Рис. 1. Щелевой микрофотометр Берека.

тельный окуляр. Таким образом, исследователь в окуляре видит поле зрения, разделенное на две половины. Одна половина поля представляет изображение объекта, другая является полем сравнения. Поворачивая призму 3, связанную со шкалой 4, можно изменять интенсивность сравнительного пучка и, следовательно, освещенность поля сравнения. При полностью скрещенных поляризационных призмах 2 и 3 (ноль на шкале 4) поле сравнения полностью затемнено. Поворачивая призму 3, можно постепенно увеличивать освещенность поля сравнения, доводя ее до максимальной при параллельном поло-

жении призмы (90° на шкале 6). Фотометрическая призма Δ может выводиться из хода лучей и тогда можно вести наблюдение как в обычном микроскопе. С помощью окуляра 10 и зеркала 9 можно наблюдать показания механизма отсчета углов поворота призмы 3. Точность отсчета углов $0,1^\circ$. При помощи откидывающейся вспомогательной лупы 8 можно наблюдать выходной зрачок объектива и одновременно щелевую диафрагму. Щелевая диафрагма устанавливается симметрично в выходном зрачке объектива длинной стороной параллельно плоскости симметрии опак-иллюминатора и значительно сокращает действующую апертуру объектива, приближая тем самым условия измерения к случаю нормального падения света на объект.

Измерение отражательной способности заключается в следующем. Предварительно прибор эталонируется, т. е. при установленном эталоне определяется угол σ_3 поворота поляризационной призмы 3 до положения точного уравнивания двух половинок поля зрения. Затем, не изменяя регулировку микрофотометра, такое же измерение производят на измеряемом объекте, получая в результате угол $\sigma_{об}$.

Отражательная способность вычисляется по формуле

$$R_{об} = \left(\frac{\sin \sigma_{об}}{\sin \sigma_3} \right)^2 R_{эт},$$

где $R_{об}$ — отражательная способность изучаемого объекта;
 $R_{эт}$ — отражательная способность эталона.

Первоначально в качестве эталонов Берек предложит кварц и призму полного внутреннего отражения, затем желтый сфалерит и галенит для измерений в воздухе и в кедровом масле. В дальнейшем круг используемых эталонов значительно расширился. Для измерений в монохроматическом свете могут быть использованы светофильтры 6, устанавливаемые в наблюдательный окуляр. При измерении слабо отражающих свет объектов в ход лучей сравнительного пучка могут быть введены нейтральные фильтры, ослабляющие свет, так как иначе очень незначительный поворот призмы 3 уравнивает освещенность двух половинок поля, точность отсчета угла $\sigma_{об}$ при этом значительно снижается.

Стах (Stach, 1955), сравнивая метод измерения отражательной способности на микрофотометре Берека с методом измерения ее с помощью фотоэлемента, отметил четыре основных преимущества измерений на микрофотометре Берека:

- 1) на уравнивание освещенности двух половинок поля зрения в микрофотометре Берека не влияет наличие на фотометрируемом участке царапин, дырок, включений, сильно искажающих результат измерения фотоэлектрическим методом;
- 2) возможность фотометрирования поверхности до 17 мкм;
- 3) возможность измерения отражательной способности низкоотражающих объектов в масляной иммерсии;
- 4) независимость результатов измерения от стабильности источников освещения.

С внедрением в практику измерения отражательной способности микрообъектов фотоэлектронных умножителей второе и третье утверждения утратили силу, а остальные два по-прежнему справедливы.

Фотометрический окуляр И. С. Волынского (ОКФ-1)

В основу прибора положен принцип уравнивания освещенности с помощью оптического клина, предложенный И. С. Волынским. Выпускаемый фирмой ЛОМО фотометрический окуляр (ОКФ-1) смонтирован на базе окуляра $10\times$ Гюйгенса и крепится на тубусе микроскопа вместо обычного.

В окуляре смонтирован оптический клин 1, представляющий собой прямоугольный участок на стеклянной пластинке 2, на который катодным напылением нанесен слой платины (рис. 2). Светопропускание слоя платины переменное, изменяющееся вдоль длинной стороны прямоугольника от 0,2 до 1. Стеклянная пластинка с клином снабжается 10-миллиметровой шкалой с ценой одного деления 0,1 мм. В паспорте, прилагаемом к фотометрическому окуляру, дана фотометрическая характеристика клина, т. е. значение светопропускания для участков, расположенных против каждого штриха шкалы.

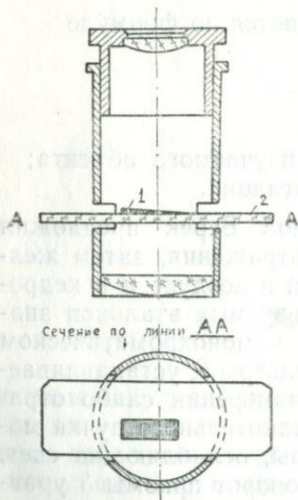


Рис. 2. Фотометрический окуляр И. С. Волынского.

Для работы в монохроматическом свете в комплекте прибора имеется набор интерференционных светофильтров для области длин волн от 430 до 700 нм.

Минимальный размер частиц, отражательная способность которых еще может быть измерена с помощью ОКФ-1, зависит от увеличения применяемого объектива и равен 0,05 мм с объективом 21 \times и 0,01 мм с объективом 95 \times масляной иммерсии.

Паразитическая освещенность может быть учтена отдельным измерением для каждого конкретного условия измерения. Она определяется с помощью сростка двух эталонов или двух минералов, отражательная способность которых известна.

Относительная ошибка, по данным фирмы, не превышает 10%. Она включает, кроме обычных ошибок, свойственных визуальным методам фотометрирования, и ошибку фотометрического эталонирования клина.

Подробное описание ОКФ-1 и методики работы на нем дано в специальной работе И. С. Волынского (1963).

Фотометрический окуляр Халлимонта

Фотометрический окуляр Халлимонта (рис. 3) устанавливается в тубус микроскопа вместо обычного окуляра. Наблюдая в окуляр 2, исследователь видит изучаемый объект и в

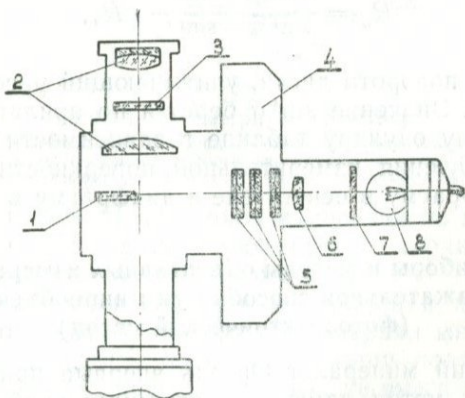


Рис. 3. Фотометрический окуляр Халлимонта.

центре металлизированный скос стеклянной пластинки 1. Скос освещается лампочкой 8 через коллекторную линзу 6, три поляроида 5 и теплозащитный фильтр 7. Для измерений в монохроматическом свете может применяться светофильтр 3.

Направление плоскостей колебаний крайних поляроидов установлено параллельно друг другу. Средний поляроид прочно связан с поворотным диском 4. Для измерения отражательной способности какого-либо минерала он устанавливается так, чтобы в поле зрения микроскопа на фоне измеряемого участка минерала был виден металлизированный скос пластинки 1. Затем поворачивают средний поляроид до тех пор, пока освещенность скоса не уравнивается с освещенностью измеряемого объекта. Угол поворота среднего поляроида при этом σ_1 . Чтобы избежать ошибки при измерениях, эту операцию повторяют, но уже поворачивая диск в другую сторону от нулевого положения, при этом получается угол поворота σ_2 . Угол поворота при измерении на объекте будет

$$\sigma_{об} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}.$$

Ту же самую процедуру повторяют при установленном на столике микроскопа эталоне, получают угол $\sigma_э$. Так как освещенность металлизированного скоса пропорциональна $\sin^4 \sigma$, то отражательная способность исследуемого объекта будет

$$R_{об} = \frac{\sin^4 \sigma_{об} - \sin^4 \sigma_p}{\sin^4 \sigma_э - \sin^4 \sigma_p} \cdot R_э,$$

где σ_p — угол поворота диска, учитывающий рассеянный свет в микроскопе. Значение $\sin^4 \sigma$ берется по прилагаемой к фотометрическому окуляру таблице в зависимости от значения σ . Для ограничения измерительной поверхности используют полевую диафрагму в осветителе и диафрагму в окуляре.

Приборы и методы объективных измерений отражательной способности микрообъектов (фотоэлектрический метод)

Французский минералог Орсель впервые применил фотоэлектрический метод измерения отражательной способности минералов и подробно изложил его в своей работе (Orsel, 1930). Сам принцип сравнения отражательной способности минерала и эталона с помощью фотоэлемента весьма прост и не требует особых пояснений. Если предположить, что фототок, который испускает фотоэлемент при облучении его фотокатода отраженным от участка минерала светом — I_m , а фототок при облучении фотокатода светом, отраженным от

такого же участка эталона, — I_0 , то отражательная способность минерала

$$R_m = \frac{I_m}{I_0} R_0,$$

где R_0 — отражательная способность эталона.

Все это справедливо, конечно, при условии, что рабочий участок световой характеристики фотоэлемента линеен. Необходимо соблюдать еще два основных условия: а) площадь поверхности, от которой отражается свет, попадающий на фотоэлемент, должна быть в точности равна соответствующей

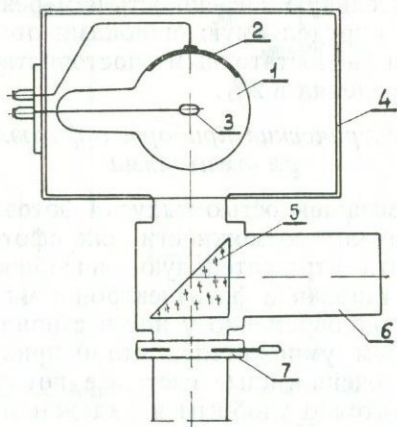


Рис. 4. Фотометрический окуляр:

1—фотоэлемент; 2—катод; 3—анод; 4—экранирующий кожух; 5—призма полного внутреннего отражения; 6—горизонтальный окуляр; 7—ирисовая диафрагма.

площади эталона и б) на период измерений на эталоне и минерале должно соблюдаться постоянство напряжений, питающих лампочку осветителя и фотоэлемент.

Отражательную способность минералов и других микрообъектов с помощью фотоэлемента измеряли многие исследователи, но подавляющее большинство лишь повторило работу Орсея, зачастую в худшем варианте, не внося ничего нового ни в методику измерений, ни в измерительную аппаратуру. Поэтому в качестве примера использования фотоэлемента для измерения отражательной способности минералов вполне достаточно остановиться на классической работе Орсея.

Микрофотоэлектрическая установка смонтирована Орсеем на поляризационном металлографическом микроскопе; кроме микроскопа, она включала фотометрический окуляр

(рис. 4) и усилитель фототока. Для регистрации усиленного фототока использовался гальванометр с чувствительностью от 10^{-9} до 10^{-10} *а/мм*, для получения монохроматического света — призмный монохроматор, в качестве осветительных ламп — три мощные лампы: лампа с короткой спиральной нитью на 18 в и 5 а; лампа «Филипс» с вольтовой дугой; лампа «Филипс» 750-ваттная, применяемая для работы в монохроматическом свете.

Площадь фотометрирования ограничивалась диафрагмой в фотометрическом окуляре. В качестве эталона использовался алмаз. Относительную погрешность измерения отражательной способности, определяемую ошибками отчета показаний гальванометра и недостаточным постоянством источников света, Орсель определял в 2%.

Микрофотоэлектрические приборы с фотоэлектронными умножителями

Освоение промышленностью выпуска фотоэлектронных умножителей увеличило возможности микрофотометрирования, позволив измерять отражательную способность микронных поверхностей. Установки с фотоэлектронными умножителями появились почти одновременно у нас в стране и за рубежом. Если с появлением умножителей стало принципиально возможно измерять очень малые световые потоки, то вопросы, связанные с достаточно удобным и надежным методом локализации измеряемой поверхности и сочленения оптической схемы микроскопа с фотометрической частью, еще вызывали определенные трудности.

Одними из первых этот вопрос успешно разрешили в 1959 г. сотрудники Государственного оптического института Л. С. Агроскин и Н. В. Королев. Они предложили две принципиальные схемы микроскопов — спектрофотометров, отличающихся оптической связью между системами наблюдения и измерения. На рис. 5, а представлена схема светового зонда. Здесь выходная щель монохроматора заменена весьма малым отверстием 1. Это отверстие проектируется в плоскость препарата 4 с помощью полуалюминированной куб-призмы 2 и объектива 3. Свет, собранный микрообъективом на исследуемой, весьма малой поверхности препарата (световой зонд), проходит затем через конденсор 5 к приемнику света 6. Для наблюдения за объектом и поиска участка для измерения служит дополнительная осветительная система, включаемая призмой 7.

Исследователь, наблюдая в микроскоп за объектом, видит обычное поле зрения и в центре светящуюся точку. Вторая схема (см. рис. 5, б) отличается тем, что участок для фотометрирования локализуется на проекции микроизображения при помощи отверстия в центре вогнутого зеркала 2. Свет,

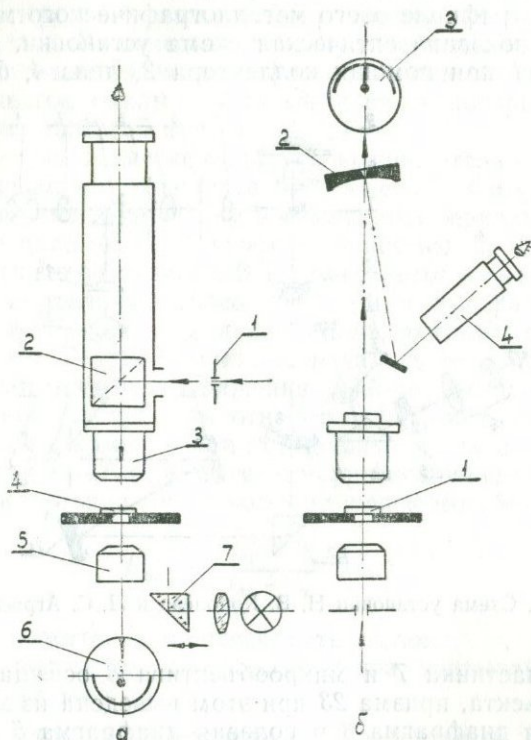


Рис. 5. Принципиальные схемы микроскопов-спектрофотометров (а и б).

прошедший через отверстие, а значит, и через соответствующую точку препарата 1, попадает на фотоумножитель 3. Для наблюдения за объектом и выбора участка для фотометрирования служит оптическая система 4, сфокусированная на поверхность зеркала. Преимуществом ее является возможность контролировать положение поверхности объекта при фотометрировании. Наблюдая в окуляр, исследователь видит обыч-

ное поле зрения и в центре темный кружок (отверстие в зеркале 2), который определяет фотометрируемый участок на объекте.

Примером использования метода светового зонда для измерения отражательной способности микрообъектов является установка, созданная Н. В. Королевым и Л. С. Агроскиным на базе ультрафиолетового металлографического микроскопа. На рис. 6 показана оптическая схема установки. Лампа накаливания 1 при помощи коллектора 2, линз 4, 6, полупро-

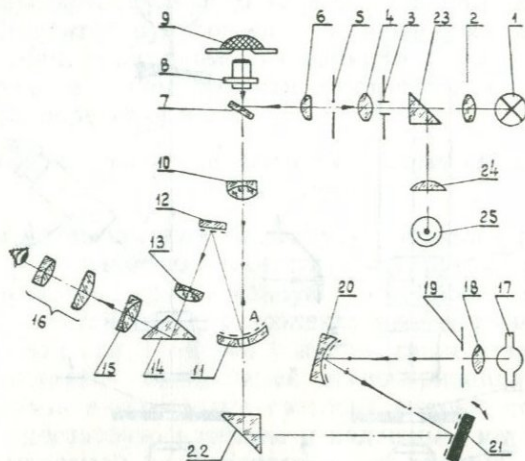


Рис. 6. Схема установки Н. В. Королёва и Л. С. Агроскина.

зрачной пластинки 7 и микрообъектива 8 освещает поверхность 9 объекта, призма 23 при этом выведена из хода лучей. Апертурная диафрагма 3 и полевая диафрагма 5 дополняют осветительную часть прибора. Микрообъектив 8 вместе с ахроматической линзой 10 дает изображение шлифа на поверхности вогнутого зеркала 11, где оно и рассматривается через визирную трубку 13—16. Последнее становится возможным благодаря тому, что зеркало 11 слегка наклонено и отраженные от него лучи направляются сначала на плоское зеркало 12, а затем в объектив визирной трубки. Детали 12 и 14 служат лишь для того, чтобы изменить ход лучей и сделать наблюдение удобным. В центре зеркала 11 с небольшого круглого участка снят алюминированный слой (на рис. 6 это показано условно в виде отверстия в детали). В поле зрения

окуляр этот участок имеет вид темного пятна на изображении аншлифа. Монохроматор, состоящий из коллектора 18, вогнутого сферического зеркала 20, дифракционной решетки 21 (1200 *штр/мм*), входной щели 19 и источника света 17, может освещать отверстие *A* зеркала 11 различными участками спектра с помощью призмы 22, что дает возможность измерять дисперсию отражательной способности различных микрообъектов. В качестве светочувствительного элемента применен сурьяно-цезиевый фотоэлектронный умножитель 25 с увиолевым окном — ФЭУ-18, свет на который направляется через призму 23 и линзу 24.

Он питается от высоковольтного выпрямителя с электронной стабилизацией выходного напряжения. Фототок усиливается балансным усилителем и измеряется зеркальным гальванометром типа М-25 с чувствительностью $7 \cdot 10^{-9}$ *а/мм/м*. Используя ртутную лампу СВД 120 *а*, авторы установки измеряли отражательную способность зерен минералов размером до 10 *мкм*², для всех ярких линий ртутного спектра от 578 до 248 *нм*. Ртутная лампа включалась через феррорезонансный стабилизатор напряжения ЭПА-58. Метод измерения отражательной способности относительный, т. е. если отсчет по шкале гальванометра при установленном на столике микроскопа образце — $I_{обр}$, а отсчет при установленном эталоне — $I_{эт}$, то отражательная способность измеряемого образца

$$R_{обр} = \frac{I_{обр} - I_0}{I_{эт} - I_0} \cdot R_{эт},$$

где $R_{эт}$ — отражательная способность эталона;

I_0 — отсчет по шкале гальванометра, учитывающий рассеянный свет.

В Московском государственном университете А. Д. Ракчевым (1960 г.) производилось измерение отражательной способности рудных минералов на установке, собранной на базе поляризационного микроскопа МП-3. В качестве светочувствительного элемента использовался ФЭУ-19, питаемый от высоковольтного стабилизатора типа ВВС-1. ВВС-1 включался в сеть через феррорезонансный стабилизатор напряжения. Фототок регистрировался зеркальным гальванометром с чувствительностью $2,6 \cdot 10^{-9}$ *а/мм/м*. Для получения монохроматического света использовался монохроматор УМ-2. Источником света служила лампа накаливания, питававшаяся от аккумуляторных батарей, подключенных буферно к выпрямителю пере-

менного тока. Изображение объекта рассматривалось на белом наблюдательном экране, в котором сделано отверстие для прохода света от фотометрируемого участка к фотокатоду умножителя. Отражательная способность измерялась относительным методом. Исследуемый аншлиф и эталон монтировались для измерений на одном предметном стекле так, чтобы их полированные поверхности были на одном уровне.

В ВИСе для измерения отражательной способности и твердости минералов была разработана установка ПМТКО-1 (И. А. Пудовкина, А. Л. Якубович, А. А. Ширявцев, 1961 г.). В этой установке для сочленения микроскопа-микротвердометра с фотоэлектронным умножителем применена микрофотонасадка МФН-1, так что плоскость фотокатода ФЭУ сопряжена с плоскостью изображения фотоокуляра. Для выделения участка фотометрирования служила пластинка с тремя калиброванными отверстиями, позволявшими выделять на поверхности минерала участки диаметром до 0,03 мм. В установке применен ФЭУ-27, являющийся до настоящего времени наиболее подходящим для измерений в видимой области спектра. Применен большой набор интерференционных фильтров, перекрывающий диапазон от 403 до 688 нм, через 10—15 нм. Фототок регистрировался микроамперметром М-194. Стабилизатор питания собран на стабилитронах СГ-7 и СГ-9. Питание стабилизатора и лампочки осветителя микроскопа производилось через феррорезонансный стабилизатор напряжения. В качестве эталона при измерениях применялся галенит.

Кроме того, в ВИСе разработана фотоэлектрическая установка на базе микроскопа МИН-6 (А. Л. Якубович, А. А. Ширявцев, Е. К. Аксенова), названная авторами «Яшма». В отличие от предыдущих установок ВИСМа на ней одновременно установлены два фотоэлектронных умножителя или типа ФЭУ-27 для измерений в видимой части света, или типа ФЭУ-28 для измерений в ближней инфракрасной области (до 1100 нм). Для измерения дисперсии отражательной способности и пропускания в установке смонтирован диск с 10 интерференционными светофильтрами. Минимальный участок на поверхности объекта, который еще можно фотометрировать при измерении отражательной способности — 0,01 мм. В установке «Яшма» ФЭУ для измерения отражательной способности закреплен непосредственно на окуляре, поэтому для перехода от фотометрирования к визуальному наблюдению ФЭУ приходится поворачивать в сторону, что, конечно, не-

приемлемо для современных приборов. В дальнейшем аналогичную установку в ВИМСе смонтировали на микроскопе МИН-8.

В Донецком политехническом институте М. Н. Пономаревой, В. И. Марьиным, П. А. Иониным и А. И. Лукиным (авторское свидетельство № 134048) разработана установка для измерения отражательной способности минералов и углей. От других установок для аналогичных целей она отличалась тем, что пластинка со щелью могла передвигаться вместе с фотоэлектронным умножителем вдоль спектра и на фотокатод мог попадать только свет, ограниченный щелью на выбранном участке спектра. В качестве эталона при измерениях применялся алмаз.

В ИГиРГ АН СССР собрана фотоэлектрическая установка на базе металлографического микроскопа МИМ-7. В качестве светоприемника в ней использовался ФЭУ-31, который закреплялся на фотокамере так, что плоскость фотокатода совмещалась с плоскостью изображения в фотокамере. Для получения стабилизированного напряжения для питания ФЭУ использовался высоковольтный стабилизированный выпрямитель типа ВС-22. Лампа осветителя микроскопа питалась через феррорезонансный стабилизатор С-0,75. Фототок измерялся микроамперметром М-95. Для получения монохроматического света использовался интерференционный светофильтр. Участок для фотометрирования выделялся при помощи полевой ирисовой диафрагмы.

Из зарубежных заслуживает внимания установка, собранная Кёттер (Kötter, 1960) для измерения отражательной способности углей. Она смонтирована на базе микроскопа Ortholux с фототубусом фирмы E. Leitz. На рис. 7 показана оптическая схема фотометрической насадки на микроскоп. В измерительном окуляре 1 в плоскости, сопряженной с плоскостью изображения окуляра микроскопа, находится диафрагма 2; свет, отраженный от исследуемого объекта, пройдя отверстие этой диафрагмы и светофильтр 3, попадает на фотокатод ФЭУ 4, вызывая фототок, который измеряется настольным микроамперметром с чувствительностью 2×10^{-9} *a/den*. Размер фотометрируемой поверхности определяется диаметром отверстия в измерительной диафрагме и собственным увеличением применяемого объектива. Например, при диаметре измерительной диафрагмы 0,13 мм и объективе 25 \times размер фотометрируемой поверхности равен 0,007 мм (диаметр кружка). Перед измерениями за счет тщательной

центрировки добиваются совмещения положения центра измерительной диафрагмы с перекрестием наблюдательного окуляра, так как непосредственно диафрагма, ограничивающая фотометрируемую поверхность при визуальном наблюдении, не видна, что, конечно, является большим недостатком установки. В установке применен фотоэлектронный умножитель типа ТУРЕМ-6094В. Фотоэлектронный умножитель и лампочка осветителя микроскопа питаются от стабилизатора.

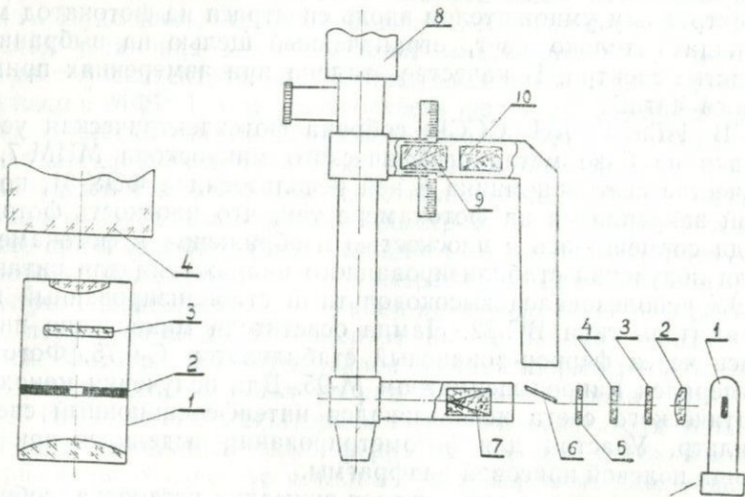


Рис. 7. Схема фотометрической насадки на микроскоп фирмы «Köster».

Рис. 8. Принципиальная схема микрорефлектометра.

ров промышленного типа. В качестве эталона при измерении отражательной способности углей авторы применяли синтетический сапфир.

Интересной и оригинальной установкой является объективный микрорефлектометр, созданный Джонсом (John M. Jones, 1962) на базе щелевого микрорефлектометра Берека. Он смонтирован на микроскопе фирмы «Лейтц». Принципиальная схема его показана на рис. 8. Свет от лампочки 1 проходит через конденсатор 2, тепловой фильтр 3 и вращающийся поляририд 4, в результате плоскость поляризации прошедшего через поляририд света вращается. Плоскость колебаний поля-

ризатора 7 повернута на угол 45° по отношению к плоскости падения света. Апертура светового лучка уменьшается кольцевым поляроидом 5 и ирисовой диафрагмой в опак-иллюминаторе. Таким образом, свет падает на объект синусоидально модулированным с частотой 100 периодов в секунду. Плоскость поляризации поляризационной призмы 10 устанавливается параллельно плоскости поляризации кольцевого поляроида 5. Поляризационная призма 9 имеет шкалу поворота от нуля до 90° . Поворотом призмы 9 достигается уравнивание освещенности двух половинок поля зрения, образованных пучком лучей света, отраженных от объекта, и сравнительным пучком, отраженным от пластинки 6. Более грубое управление световым потоком может производиться набором нейтральных фильтров или диафрагмой. Свет от обоих пучков попадает на фотокатод 8. На экране двухлучевого осциллографа, соединенного с ФЭУ, получается результирующая кривая, представляющая сумму противофазных колебаний от сравнительного луча и луча, отраженного от объекта. Величина конечной амплитуды пропорциональна разнице в интенсивности двух лучей.

При полном уравнивании интенсивности двух лучей на экране осциллографа образуется прямая линия. Подсчет показателя отражения объекта производится по тем же формулам, что и в визуальном фотометре Берека. Микрорефлектометр был создан в основном для измерения отражательной способности углей. Измерения производились в монохроматическом свете при помощи интерференционного светофильтра.

В начале 60-х годов производство микроскопов-фотометров с фотоэлектронными умножителями осваивается нашей промышленностью.

В конце 1962 г. Ленинградская фирма ЛОМО начала выпуск фотометрических насадок ФМЭ-1. Фотометрическую насадку можно установить на поляризационный микроскоп, имеющий гнездо для посадки окулярных тубусов, а также на биологический микроскоп. Насадка ФМЭ-1 позволяет производить фотометрирование в белом свете или в монохроматическом с помощью 9 интерференционных светофильтров в видимой части спектра (λ от 430 до 700 нм). В качестве светочувствительного элемента в насадке вначале использовался ФЭУ-32, а в последующих выпусках ФЭУ-27. Оптическая схема фотометрической насадки показана на рис. 9. Свет, отраженный от объекта, пройдя объектив микроскопа, проходит через линзы 1 и 2, которые проектируют изображение объекта

на поверхность вогнутого зеркала 3. На поверхности зеркала 3 можно рассматривать изображение с помощью зеркала 7, объектива 8 и окуляра 9. Зеркало 3 имеет в слое алюминия отверстие диаметром 0,5 мм. Наблюдая в окуляр, можно видеть изображение объекта и в центре поля зрения темный кружок (отверстие в слое алюминия). Свет, прошедший через это отверстие, при помощи линзы 5 направляется на фотока-

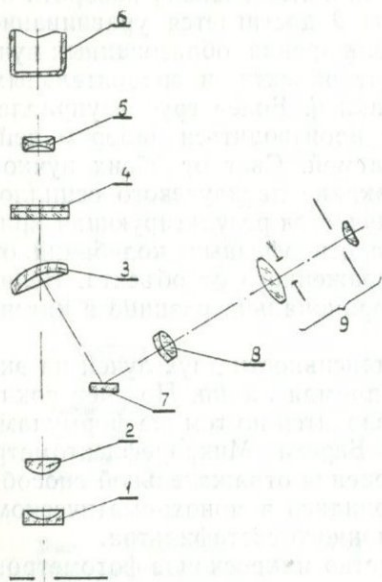


Рис. 9. Схема фотометрической насадки ФМЭ-1.

год фотоэлектронного умножителя 6. Между зеркалом 3 и линзой 5 расположен сменный монохроматический светофильтр 4. Кроме насадки, в комплект прибора входят измерительный пульт и блок питания. В измерительном пульте расположен балансный усилитель фототока и измерительный магазин сопротивления типа КСМ-4, предназначенный для измерения фототока компенсационным методом. В последующих выпусках применен прямой отсчет по шкале микроамперметра М-24. Для питания стабилизированным напряжением фотоэлектронного умножителя, усилителя и осветительной лампочки микроскопа предназначен блок питания.

Как видно из оптической схемы прибора, фотометрируемая площадь при измерениях зависит от увеличения применяемого объектива и диаметра отверстия на слое алюминия зеркала 3.

В 1964 г. во ВСЕГЕИ была разработана микрофотометрическая установка ПООС-1 (авторы разработки В. Е. Клейнбок, Г. Н. Бурэ, схема оптической насадки предложена Н. В. Королевым). С 1966 г. установка ПООС-1 серийно изготавливается ленинградским заводом «Геологоразведка». Она получила широкое распространение в геологических организациях. На ней проведены большие объемы работ по изучению отражательной способности в воздухе и в иммерсии ми-

нералов, углей, битумов, искусственных минералов и других микрообъектов в ряде ведущих организаций страны.

Установка ПООС-1 успешно применяется и для работ в проходящем свете, т. е. для измерения коэффициента пропускания микрообъектов. Все вопросы методики измерения

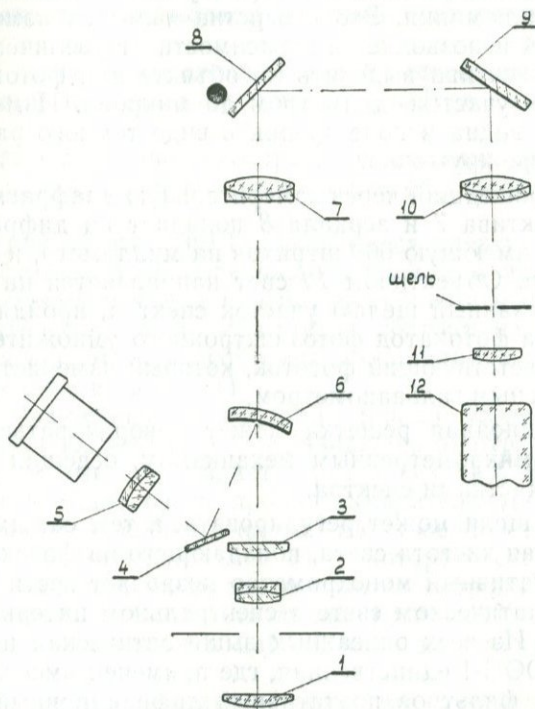


Рис. 10. Схема оптической насадки установки ПООС-1.

отражательной способности минералов, изложенные в данной работе, изучались на установке ПООС-1. Установка ПООС-1 состоит из оптической насадки, источников стабилизированных напряжений для питания ФЭУ и лампочки осветителя микроскопа. Оптическая насадка установки может устанавливаться на любой микроскоп, имеющий гнездо для посадки окулярных тубусов: МИН-8, МИН-9, биологические микроскопы и другие. Оптическая схема ее показана на

рис. 10. Свет, отраженный от объекта объективом микроскопа, линзами 1, 2, 3 направляется на алюминированную поверхность линзы 6. Изображение объекта, полученное на алюминированной поверхности линзы 6, может рассматриваться при помощи зеркала 4, объектива 5 и окуляра. На алюминированной поверхности линзы 6 в центре с участка диаметром 0,2 мм снят слой алюминия. Это отверстие является измерительной диафрагмой и позволяет в зависимости от увеличения применяемого объектива выделять на объекте для фотометрирования малые участки диаметром до микрона. Измерительная диафрагма видна в поле зрения в виде темного расположенного в центре кружочка.

Свет, прошедший через измерительную диафрагму, при помощи объектива 7 и зеркала 8 попадает на дифракционную решетку 9, имеющую 600 штрихов на миллиметр, и разлагается в спектр. Объективом 10 свет направляется на плоскость щели. Вырезанный щелью участок спектра, пройдя линзу 11, попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя 12, вызывая соответствующий фототок, который измеряется высокочувствительным гальванометром.

Дифракционная решетка может поворачиваться соответствующим микрометрическим механизмом, освещая щель различными участками спектра.

Размер щели может регулироваться, тем самым меняется спектральная чистота света, попадающего на фотокатод ФЭУ. Такой портативный монохроматор позволяет вести измерения в монохроматическом свете в спектральном интервале от 365 до 700 нм. Из всех описанных выше оптическая насадка установки ПООС-1 единственная, где применен вместо монохроматических фильтров портативный дифракционный монохроматор. Такая насадка дает возможность получить значительно меньшие потери света в системе, что вместе с высокочувствительным гальванометром обеспечивает возможность фотометрирования участка размером в 1 мк без применения усилителя фототока.

Размер фотометрируемой поверхности определяется размером измерительной диафрагмы (0,2 мм), собственным увеличением применяемого объектива и увеличением сменного окуляра (линзы 1 и 2). С объективом 80^x и сменным окуляром 12,5^x фотометрируемая площадь на объекте составляет 1 мк в диаметре.

В качестве светочувствительного элемента в установке используется фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-27. Фототок измеряется зеркальным гальванометром М-17/9 с чувствительностью $0,1 \cdot 10^{-9}$ а/мм/м.

В качестве источника света используется лампа СЦ-61 с напряжением 8 в, мощностью 20 вт. Для ряда работ может быть с успехом использован ртутный осветитель, например ОИ-18.

Метод измерения отражательной способности — относительный, при помощи эталонов, входящих в комплект установки.

Приводим описание некоторых современных приборов, используемых для измерения отражательной способности за рубежом.

1. Фирмой «Leitz» (ФРГ) выпускался электрический микроскоп-фотометр МРЕ, предназначенный для измерения коэффициента пропускания и отражения различных микрообъектов. Оптическая часть фотометра состоит из микроскопа Ortholux и фотометрической насадки, принципиальная схема которой показана на рис. 11.

Свет, отраженный от объекта, пройдя микрообъектив и увеличительную систему 1 и отразившись от отражающей поверхности призмы 2, попадает через объектив 5 в окуляр наблюдателя 6. Часть света, пройдя измерительную диафрагму, представляющую собой участок на поверхности призмы 2 (призма 2 склеена с призмой 3), с которого снят отражающий слой, попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя 4, вызывая соответствующий фототок. Измерительная диафрагма в поле зрения наблюдается в виде темного кружочка.

Увеличительная система 1 является сменным узлом. В комплекте микроскопа фотометра МРЕ их четыре с соотношением увеличений 10 : 5 : 2,8 : 1,7. Используя нормальный набор микрообъективов и эти четыре системы, можно фотометрировать поверхности диаметром от 400 до 2,8 мкм. Минимально возможная фотометрируемая поверхность составляет в проходящем свете 2,8 мкм (диаметр кружочка), а в отраженном свете 5 мкм. Для измерений в монохроматическом свете в комплекте имеются спектральные фильтры для участка спектра от 420 до 600 нм в проходящем свете и для 450—640 нм в отраженном свете. Для измерения отражательной способности углей имеется интерференционный светофильтр на 530 нм.

Для освещения измеряемых объектов служит лампа накаливания 12 в, 100 вт или ртутная лампа St-75 со стабилизированным разрядом. Могут применяться также обычные лампочки к осветителю микроскопа: 6 в, 15 вт или 6 в, 30 вт. Питание фотоэлектронного умножителя производится от электронного стабилизатора, лампочки осветителя — от низковольтного стабилизированного трансформатора.

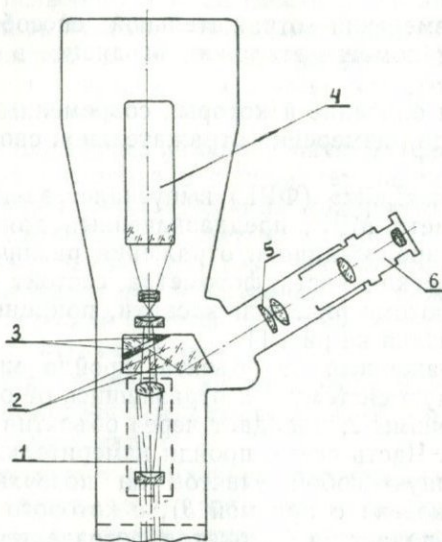


Рис. 11. Схема оптической насадки микроскопа-фотометра МРЕ.

Для регистрации фототока служит настольный зеркальный гальванометр с чувствительностью 10^{-9} а/дел. Его можно использовать и для компенсационного метода измерений. Метод измерения отражательной способности на микроскопе-фотометре МРЕ относительный и ничем не отличается от методов измерений на однолучевом фотометре, описанном выше.

2. Фирмой «Reichert» (Австрия) выпускается микрофотометр, оптическая схема насадки которого совместно со схемой микроскопа показана на рис. 12. Оптическая насадка микрофотометра может устанавливаться на различные типы микроскопов, в частности на микроскоп Zetopan или на микроскоп MeF.

Свет, отраженный от исследуемого объекта (осветительная система на схеме не показана), микрообъективом 1, окуляром 2, через светоразделительное зеркало 3 и линзу 4 направляется на линзу 5, образуя на ее плоской зеркальной поверхности

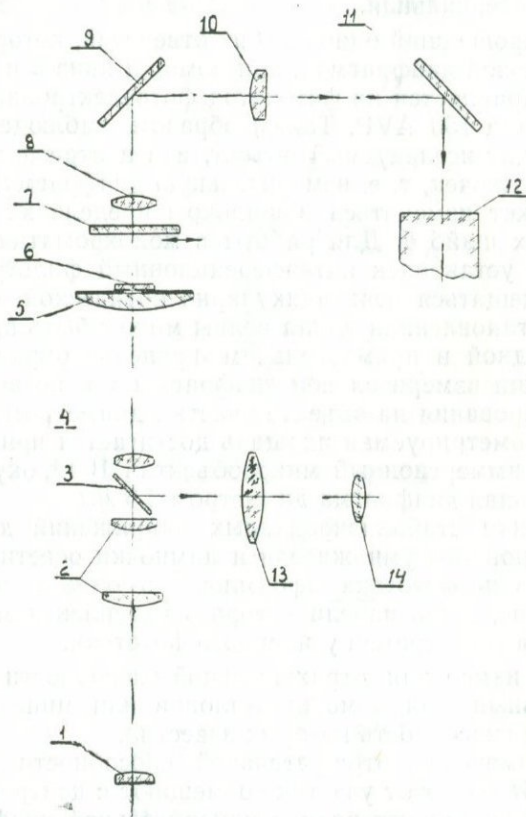


Рис. 12. Оптическая схема микроскопа-фотометра фирмы «Reichert»

изображение объекта. Это изображение может рассматриваться благодаря светоразделительному зеркалу 3, при помощи объектива 13 и окуляра 14. В зеркальном покрытии линзы 5 в центре сделано отверстие диаметром 10 мм. При помощи специального поворотного приспособления, управляе-

мого одним маховичком, напротив отверстия в зеркальном слое линзы 5 устанавливается одна из девяти стеклянных шайб 6. Нижняя поверхность шайб также покрыта зеркальным покрытием, в зеркальном покрытии шайб 6 в центре сделаны отверстия размером от 0,5 до 10 мм. Одна из шайб полностью зеркальная.

Свет, прошедший одно из этих отверстий, которое является измерительной диафрагмой, при помощи линз 8 и 10 и зеркал 9 и 11 направляется на фотокатод фотоэлектронного умножителя 12 типа 150 AVP. Таким образом, наблюдатель в окуляре 7 видит исследуемый объект, а в центре поля зрения — темный кружочек, т. е. измерительную диафрагму, размер которой может изменяться в широком пределе за счет смены стеклянных шайб 6. Для работы в монохроматическом свете в насадке установлен интерференционный фильтр 7. Он может перемещаться перпендикулярно оптической оси насадки, причем установленная длина волны может быть прочитана на шкале, видной в прямоугольном окошечке оправы фильтра. При помощи измерительной диафрагмы можно выделять для фотометрирования на объекте участки диаметром до 0,5 мкм. Такая фотометрируемая площадь достигается при следующих условиях: иммерсионный микрообъектив 100×, окуляр 12,5× и измерительная диафрагма диаметром 0,5 мм.

Источники стабилизированных напряжений для питания фотоэлектронного умножителя и лампочки осветителя, а также усилитель фототока оформлены в общем электронном блоке, на передней панели которого укреплен измерительный прибор для регистрации усиленного фототока.

Метод измерения отражательной способности обычный — относительный, при помощи эталонов или минералов, отражательная способность которых известна.

Для измерения отражательной способности какого-либо участка объекта этот участок совмещают с центром поля зрения, затем подбирают размер измерительной диафрагмы так, чтобы в поле зрения изображение измерительной диафрагмы находилось бы на участке объекта, предназначенного для измерения. Тогда отражательная способность объекта будет

$$R_{об} = \frac{I_{об} - I_0}{I_э - I_0} R_{эт},$$

где $I_{об}$ — отсчет по измерительному прибору при установленном объекте;

I_3 — отсчет по измерительному прибору при установленном эталоне;

I_0 — отсчет, учитывающий рассеянный свет;

R_3 — отражательная способность эталона.

3. Продолжая работу над совершенствованием приборов для микрофотометрирования, фирма «Leitz» начала выпускать

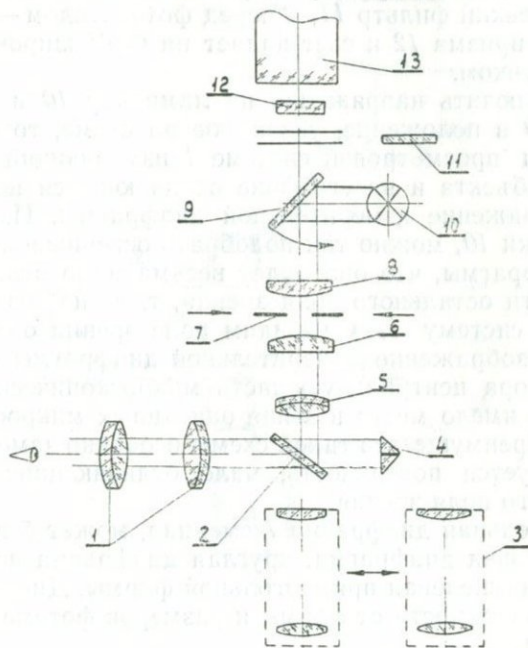


Рис. 13. Схема оптической насадки микроскопа-фотометра MPV.

микроскоп-фотометр MPV. Он также состоит из насадки на микроскоп, источников стабилизированных напряжений, усилителя фототока и прибора, измеряющего фототок.

Схема оптической насадки микроскопа-фотометра MPV показана на рис. 13. Оптическая насадка может устанавливаться практически на любой микроскоп фирмы «Leitz».

Свет, отраженный от измеряемого объекта, проходит объектив (на схеме не показан), сменный окуляр 3 и при помощи светоразделительного зеркала 2 и просмотровой оптической

системы 1 попадает в глаз наблюдателю. Другая часть света с помощью объектива 5 и одной из линз 6 переносит изображение объекта в плоскость измерительной диафрагмы 7.

Свет, прошедший измерительную диафрагму, линзой 8 направляется на фотокатод фотоэлектронного умножителя 13, при этом зеркало 9 выведено из хода лучей в сторону, как показано стрелкой. На пути лучей устанавливается сменный монохроматический фильтр 11, а перед фотокатодом — светорассеивающая призма 12 и свет падает на ФЭУ широким расходящимся пучком.

Если включить напряжение на лампочку 10 и повернуть пластинку 9 в положение, указанное на схеме, то благодаря призме 4 и просмотровой системе 1 измеряющий видит поверхность объекта и на его фоне отличающееся по освещенности изображение измерительной диафрагмы. Изменяя накал лампочки 10, можно так подобрать освещенность изображения диафрагмы, что она будет весьма мало отличаться от освещенности остального поля зрения, т. е., наблюдая в просмотровую систему 1, мы видим поле зрения объекта полностью, а изображение измерительной диафрагмы не исключает из обзора центральную часть микроскопической картины, как это имело место в выше описанных микроскопах-фотометрах. Преимущество такой схемы особенно заметно, когда фотометрируется поверхность, мало отличающаяся по площади от всего поля зрения.

Измерительная диафрагма 7 сменная, может быть использована ирисовая диафрагма, круглая диафрагма постоянного диаметра или щелевая прямоугольной формы. Диафрагму выбирают в зависимости от формы и размеров фотометрируемой поверхности.

Размер фотометрируемой площади зависит от размера измерительной диафрагмы 7, увеличения сменного окуляра 3 и собственного увеличения применяемого микрообъектива. Например, с окуляром $25\times$ и объективом $100\times$ можно достичь фотометрируемой поверхности 1 мкм, а с прямоугольной измерительной диафрагмой — 0,5 мкм.

Источники света, которые можно использовать при работе с микроскопом-фотометром, обычные: низковольтные лампы накаливания, ртутная лампа высокого давления (тип St-75); для получения непрерывного спектра высокой интенсивности — ксеноновая лампа высокого давления 150 W.

В обычном исполнении на микроскопе-фотометре установлен фотоэлектронный умножитель RCA типа 1PГ1. Можно ус-

танавливать и другие фотоэлектронные умножители с другой спектральной характеристикой, например, ЕМJ или умножители американского производства 520-М или 520-А. В качестве регистрирующего фототок прибора может быть использован любой измерительный прибор, имеющий достаточную чувствительность ($2 \cdot 10^{-9}$ а/дел шкалы). Метод измерения отра-

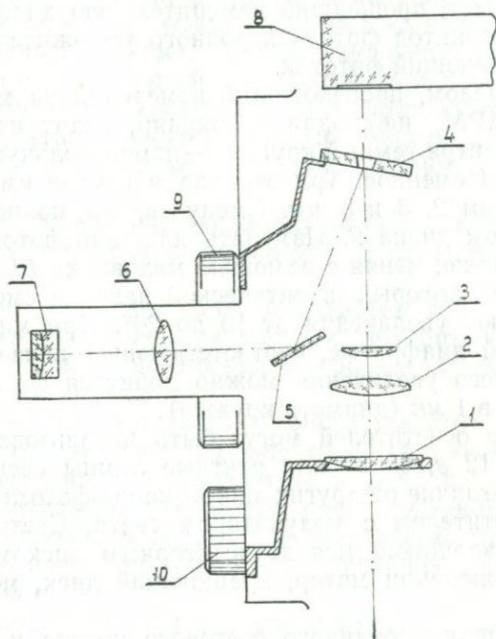


Рис. 14. Схема оптической насадки микроскопа-фотометра МРМ.

жательной способности на данном микрофотометре обычный — относительный, при помощи эталонов.

4. Фирмой «Opton» (ФРГ) выпускается микроскоп-фотометр МРМ, который может быть использован для различных фотометрических работ на микроскопических объектах. Оптическая насадка может быть установлена на любой микроскоп проходящего или отраженного света, поляризационный или неполяризационный.

Схема оптической насадки микроскопа-фотометра МРМ показана на рис. 14. Лучи света, отраженные от измеряемого

объекта микрообъективом (оптическая схема микроскопа на рисунке не показана), с помощью линз 1, 2 и 3 образуют изображение объекта на поверхности зеркала 4. Это изображение может рассматриваться при помощи наблюдательной системы (зеркало 5, линзы 6 и 7).

В зеркале 4 в центре сделано отверстие — измерительная диафрагма. Свет, прошедший измерительную диафрагму, попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя 8, вызывая соответствующий фототок.

Таким образом, производящий измерения на микроскоп-фотометре МРМ, наблюдая в окуляр, видит изображение объекта и в центре темный кружок — измерительную диафрагму. Зеркало 4 сменное. Три зеркала в центре имеют отверстия диаметром 2, 3 и 5 мм. Смену зеркал можно производить поворотом диска 9. Изменять площадь фотометрирования можно также, меняя с помощью маховичка 10 пресекающие линзы 1, которых в оптической насадке смонтировано три; они имеют увеличения от 10 до 20^x. При минимальной измерительной диафрагме, соответствующей линзе 1, и объективе большего увеличения можно добиться фотометрируемой площади в 1 мк (диаметр кружка).

В качестве осветителей могут быть использованы лампы накаливания 12 в, 60 вт или ртутные лампы сверхвысокого давления. В отличие от других микроскопов-фотометров МРМ снабжен осветителем с модулятором света. Световой поток прерывается вращающимся двухсекторным диском. При визуальном наблюдении мотор, вращающий диск, может быть остановлен.

Наличие модулированного светового потока и усилителя фототока, настроенного на частоту модуляции, дает возможность усилить только полезный сигнал, не усиливая темновой ток фотоэлектронного умножителя, и увеличить стабильность положения нулевого отсчета при измерениях.

Для работы в монохроматическом свете используются светофильтры, устанавливаемые вopak-иллюминатор микроскопа. Фотоэлектронные умножители в зависимости от задач исследования могут заменяться.

Для работы в видимой области спектра используется фотоэлектронный умножитель типа RCA-1P28, для работы в более длинноволновой части спектра — КМ1-6256В. В качестве регистрирующего прибора используется гальванометр.

5. Фирма «Виккерс» выпускает микрофотометр EEL. Микрофотометр устанавливается на поляризационном микроскопе

М-74. Кроме отражательной способности участков размером до 1 $\mu\text{к}$, на установке можно также измерять и микротвердость. Состав комплекта установки обычный для электромикрoфотометра.

Отличительной особенностью микрофотометра ЕЕЛ является то, что в качестве регистрирующего прибора применен цифровой вольтметр, а усилитель фототока выполнен на твердой интегральной схеме. Метод измерения отражательной способности относительный, с помощью эталонов.

Таким образом, современные микрофотометры, на которых можно измерять отражательную способность, а также коэффициенты пропускания микрообъектов, имеют следующие общие черты:

1. Все они выполнены по однолучевой схеме и производить измерения на них можно только относительным методом при помощи эталонов.

2. Фотометрическая часть микрофотометров выполнена в виде микрофотометрических насадок, которые могут использоваться с различными типами микроскопов (поляризационные, биологические и т. д.).

3. В качестве светочувствительного элемента во всех микрофотометрах применен фотоэлектронный умножитель.

4. Фотометрируемая поверхность локализуется при помощи измерительной диафрагмы, расположенной в плоскости проекции микроизображения, т. е. фактически применен один из способов, предложенный Л. С. Агроскиным и Н. В. Королевым в 1959 г.

Метод светового зонда, хотя и имеет некоторое преимущество перед методом диафрагмирования на проекции микроизображения, не нашел широкого распространения, так как он несколько усложняет конструкцию (требуются в принципе два источника света: один для фотометрирования, другой для визуального наблюдения) и затрудняет использование различных видов микроскопов.

5. Фотометрическая часть крепко связана с микроскопом, имеется постоянная возможность визуально контролировать фотометрируемую поверхность в процессе измерений.

6. Большинство микрофотометров обеспечивает фотометрирование поверхности до 1 $\mu\text{км}$.

7. Можно производить измерения в монохроматическом свете.

Современная аппаратура дает возможность достаточно точно производить микрофотометрирование и, в частности, из-

мерять отражательную способность минералов, но в то же время она не обеспечивает высокой точности измерений, если не учитывать ряд особенностей метода измерений, связанных с апертурой применяемого объектива, с юстировкой микроскопа, с положением измеряемого объекта на столике микроскопа, с применяемыми эталонами и т. д.

Методы определения отражательной способности, основанные на анализе эллиптической поляризации отраженного света

Линейно поляризованный свет, падающий на поверхность поглощающего минерала, при отражении эллиптически поляризуется. Эллиптическое колебание возникает, когда две друг

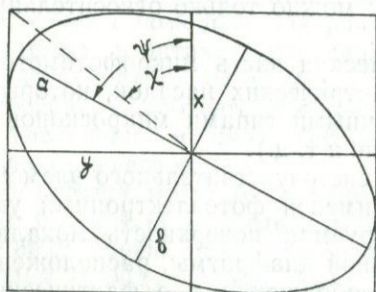


Рис. 15. Схема эллиптических колебаний, возникающих при отражении от поглощающего минерала.

другу перпендикулярные компоненты колебаний, образующиеся при отражении, имеют относительную разность фаз. Так как два перпендикулярно друг другу поляризованных колебания не интерferируют между собой, то интенсивность эллиптических колебаний не зависит от разности фаз и равна сумме интенсивностей образованных компонент. Если обозначить половины осей эллипса отражения a и b , то отражательная способность $R \sim a^2 + b^2$. Так как для каждого прямоугольника, описывающего эллипс (рис. 15), половина длины диагонали равна $\sqrt{a^2 + b^2}$, то, обозначив половины сторон прямоугольника x и y , можно написать

$$x^2 + y^2 = a^2 + b^2.$$

Таким образом, x и y характеризуют амплитуды компонент колебаний, а половина диагонали прямоугольника характеризует направление линейного колебания, которое возникло бы, если компенсировать разность фаз компонент; поэтому угол χ (см. рис. 15) называют азимутом восстановленных линейных колебаний. Угол ψ называется азимутом осей эллипса. Эллиптическое колебание может быть точно охарактеризовано через элементы любого описанного вокруг эллипса прямоугольника. Четыре величины, характеризующие эллипс колебаний: $\Delta_{x, y}$ — разность фаз между компонентами, χ — азимут восстановленных линейных колебаний, ψ — азимут осей эллипса и $V = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}$ — эллиптичность, связаны между собой известными соотношениями из сферической тригонометрии:

$$\operatorname{tg} 2\psi = \operatorname{tg} 2\chi \cdot \cos \Delta_{x, y},$$

$$\cos 2\chi = \cos 2V \cdot \cos \psi,$$

$$\operatorname{tg} 2V = \operatorname{tg} \Delta_{x, y} \cdot \sin 2\psi,$$

$$\sin 2V = \sin 2\chi \cdot \sin \Delta_{x, y}.$$

Любые две из этих величин полностью характеризуют эллипс колебаний.

Применительно к изучению оптических свойств рудных минералов под микроскопом существуют две группы методов анализа эллипса колебаний отраженного света: определение параметров анизотропии минерала в перпендикулярно падающем свете и определение оптических постоянных минерала n (коэффициента преломления) и k (показатель поглощения) при наклонном падении света на объект при помощи соотношений Друде.

Определение параметров анизотропии в перпендикулярно падающем свете

Из параметров анизотропии непосредственно определяется только отношение главных показателей отражения $\frac{R_2}{R_1}$. Двуотражение $R_1 - R_2$ и главные показатели отражения определяются в случае, если известна средняя отражательная способность R , определенная фотометрически.

Для анализа эллиптических колебаний могут быть использованы окуляры по Береку или окуляры по Райту. Окуляр Бе-

река фирмы «Лейтц» крепится вместо обычного окуляра на тубусе микроскопа. Он имеет вращающуюся слюдяную пластинку и поворотный анализатор. Углы поворота могут отсчитываться по нониусу с точностью до 0,1. Откидная линза, которая может быть установлена перед глазной линзой окуляра, делает возможным коноскопическое наблюдение.

Из многих существующих методов анализа наиболее привлекателен метод Мак-Куллага (J. Mac Cullagh), так как процесс измерений по этому методу довольно прост, не требует строго определенного начального положения слюдяной пластинки и точного знания ее разности хода.

Наиболее подходящая разность хода слюдяной пластинки для данного метода, рекомендуемая Береком, составляет от $1/8$ до $1/10\lambda$. На нониусе шкалы окуляра обозначены ориентированные положения направления колебаний слюдяной пластинки и анализатора окуляра (анализатор в тубусе микроскопа не используется). Вначале используют изотропный аншлиф с высокой отражательной способностью. При помощи коноскопического наблюдения, несколько поворачивая слюдяную пластинку и анализатор около первоначального положения, добиваются максимального затемнения центральной части выходного зрачка. Положение слюдяной пластинки при этом G_0 , анализатора — A_0 .

Перейдя к измерениям на анизотропном аншлифе, выключив сначала из хода лучей слюдяную пластинку, определяют диагональные положения аншлифа. В каждом полсжении, включив слюдяную пластинку, проводят компенсацию, т. е. при одновременном повороте слюдяной пластинки и анализатора добиваются наибольшего затемнения центральной части выходного зрачка при коноскопическом наблюдении. В результате для двух диагональных положений получают две пары отсчетов для слюдяной пластинки — G_1 и G_2 и для анализатора — A_1 и A_2 .

Горн (Horn) вывел соотношения между отсчетами $A_0, A_1, A_2, G_0, G_1, G_2$, эллиптичностью V и азимутом ψ_p большой оси эллипса, отнесенной к направлению колебаний поляризатора:

$$\cos 2V = \frac{\sin [(G_2 - G_1) - (A_2 - A_1)]}{\sin (G_2 - G_1)},$$

$$\psi_p = \frac{(G_1 - G_0) + (G_2 - G_0)}{2} \pm 45^\circ = \frac{(A_1 - A_0) + (A_2 - A_0)}{2}.$$

Дальнейшая связь параметров анизотропии с V и ψ_p выведена Береком:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 - \sin 2\psi_p \cos 2V}{1 + \sin 2\psi_p \cos 2V};$$

$$R_1 = (1 + \sin 2\psi_p \cos 2V)R;$$

$$R_2 = (1 - \sin 2\psi_p \cos 2V)R;$$

$$R_1 - R_2 = 2R \sin 2\psi_p \cos 2V.$$

Берек неоднократно утверждал, что фотометрически на анизотропном аншлифе главные показатели отражения R_1 и R_2 определяются менее точно, чем из анализа эллиптических колебаний отраженного света, например, методом, приведенным выше.

Определение оптических постоянных минерала при наклонном падении света

Для определения оптических постоянных n и \varkappa поглощающих сред широко применяется классический метод Друде. Соотношения, данные Друде (1912 г.),

$$n = \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \frac{\cos 2\chi}{1 + \cos \Delta \sin \psi}$$

$$\varkappa = \sin \Delta \cdot \operatorname{tg} 2\chi,$$

связывают оптические постоянные n и \varkappa с углом падения света φ , относительной разностью фаз между отраженными компонентами Δ и азимутом восстановленных линейных колебаний χ по отношению к плоскости падения. Существует много разновидностей метода Друде для определений в видимой и инфракрасной области спектра. Оригинальная разновидность этого метода для определений на микроскопе МИС предложена Н. В. Королевым.

Перенеся классический метод Друде на микроскоп, Берек обосновал методику измерений и дал соответствующие соотношения для определений n и \varkappa рудных минералов.

Линейно поляризованный свет направляется на минерал под углом, близким к главному углу падения. Плоскость колебаний поляризатора ориентирована под углом $\sigma = 45^\circ$ к плоскости падения света (в принципе может быть и под дру-

гим). Под главным углом падения понимают такой угол, при котором оси эллипса колебаний отраженного света параллельны и перпендикулярны плоскости падения. Для прозрачных сред главный угол падения переходит в поляризационный угол Брюстера. Стремление направлять свет на минерал под углом, равным главному, вызвано тем, что при этом уменьшается возможность случайных ошибок при анализе эллипти-

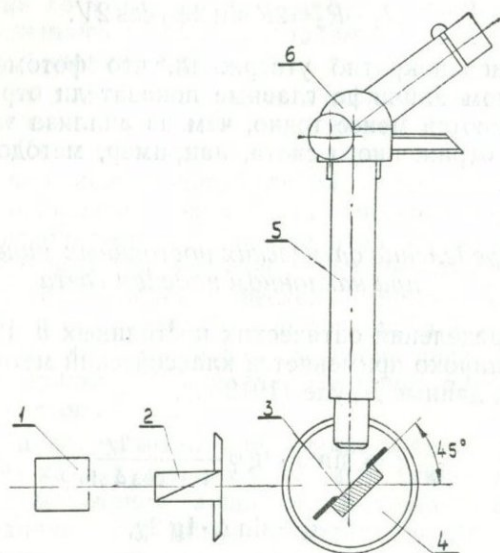


Рис. 16. Прибор для измерений методом Друде (по Береку)

ческих колебаний. Но так как у большинства рудных минералов главный угол падения довольно высок ($70-80^\circ$), то затрудняются условия наблюдения микрообъектов, увеличивается возможность ошибок за счет поверхностного слоя минерала.

Анализируя эти причины, Берек пришел к выводу, что использовать угол падения 45° более целесообразно как в отношении удобства измерений, так и в отношении реальной точности получаемых данных. Аппаратура для измерений (по Береку) показана на рис. 16. В качестве источника света можно использовать монохроматор 1, на рейтере укрепляется по-

воротный поляризатор 2 со шкалой (цена деления $0,1^\circ$). Используются обычный микроскоп 5 с двухокружным универсальным столиком 4, на котором имеется приспособление для закрепления аншлифа минерала 3. В тубусе микроскопа укреплен окуляр 6 для анализа эллиптических колебаний (тот же, что описывался выше). Сам процесс измерения несложен. Развернув поляризатор на угол 45° по отношению к плоскости падения, проводят компенсацию по описанному выше методу Мак-Куллага. По полученным отсчетам получают эллиптичность и азимут большой оси эллипса по отношению к плоскости падения:

$$\cos 2V = \sin[(G_2 - G_1) - (A_2 - A_1)];$$

$$\cos 2\psi = \mp \sin[(G_1 - G_0) + (G_2 - G_0)].$$

Знаки соответственно справедливы: нижний для правого, верхний для левого эллипса колебаний. Из полученных величин по известным соотношениям высчитывают азимут восстановленных линейных колебаний по отношению к плоскости падения и разность фаз:

$$\cos 2\chi = \cos 2\psi \cdot \cos 2V,$$

$$\cos \Delta = \frac{\operatorname{tg} 2\psi}{\operatorname{tg} 2\chi}.$$

Далее следуют выведенные Береком соотношения, по которым можно определить коэффициент преломления n и коэффициент абсорбции K :

$$a = \frac{\operatorname{tg}^2 \chi - \operatorname{tg}^2 \sigma}{\operatorname{tg}^2 \chi + \operatorname{tg}^2 \sigma + 2\operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \sigma \cdot \cos \Delta},$$

$$b = \frac{2\operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \sigma \sin \Delta}{\operatorname{tg}^2 \chi + \operatorname{tg}^2 \sigma + 2\operatorname{tg} \chi \operatorname{tg} \sigma \cos \Delta},$$

$$n = \frac{1}{2} \sqrt{1 + a^2 - b^2 + \sqrt{(1 + a^2 - b^2) + 4a^2b^2}},$$

$$K = -\frac{ab}{2n}.$$

Для прозрачных изотропных минералов вычисления упрощаются: $V=0$; $\chi=\psi$; $\Delta=0$:

$$a = \frac{\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \sigma}{\operatorname{tg} \psi + \operatorname{tg} \sigma}; \quad b = 0;$$

$$n = \sqrt{\frac{1+a^2}{2}} = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \psi + \operatorname{tg}^2 \sigma}{\operatorname{tg} \psi + \operatorname{tg} \sigma}};$$

$$K = 0;$$

Если аншлиф анизотропный, то величины a и b подсчитываются для каждого нормального положения аншлифа и будут a_1, b_1 для первого положения и a_2, b_2 для второго положения. Тогда подсчет значений n и K по Береку следующий:

$$A_1 = \frac{a_1}{a_1^2 + b_1^2}, \quad A_2 = \frac{a_2}{a_2^2 + b_2^2},$$

$$B_1 = -\frac{b_1}{a_1^2 + b_1^2}, \quad B_2 = \frac{b_2}{a_2^2 + b_2^2},$$

$$n_1 = \frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{2A_1 + A_2}{(2A_1 + A_2)^2 + (2B_1 + B_2)^2},$$

$$K_1 = \frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{2B_1 + B_2}{(2A_1 + A_2)^2 + (B_1 + B_2)^2},$$

$$n_2 = \frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{B_1 + 2B_2}{(A_1 + 2A_2)^2 + (B_1 + 2B_2)^2},$$

$$K_2 = \frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{B_1 + 2B_2}{(A_1 + 2A_2)^2 + (B_1 + 2B_2)^2}.$$

По полученным значениям n и K можно подсчитать отражательную способность:

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

Как видно из изложенного, такой метод определения оптических постоянных связан с довольно трудоемкими вычислениями. А. Д. Ракчев (1964) для определения оптических постоянных по методу Друде использовал специально построенные им номограммы.

ВОЗМОЖНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ
ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

В последние 10—15 лет отражательная способность рудных минералов измерялась многими исследователями и результаты этих работ опубликованы в печати, причем значения отражательной способности одного и того же минерала у разных авторов часто не совпадают (см. приложения 1 и 2). Причины расхождений результатов измерений были предметом обсуждений на международных совещаниях по рудной микроскопии. В частности, для уменьшения возможных погрешностей был принят ряд требований к фотоэлектронному умножителю, применяемым эталонам, ориентации поляризации и т. п.

Так, на Международном совещании по рудной микроскопии (IMACOM) от 28/VI—1963 г. был выработан целый ряд условий.

Предложено принять в качестве стандартной волны для измерения отражательной способности $\lambda = 546 \text{ нм}$, а в определительские таблицы включать значения R , замеренные при длинах волн 470, 546, 589 и 650 нм. Для анизотропных минералов должны замеряться минимальное (R_p) и максимальное (R_g) значения отражения, но поскольку R анизотропного минерала изменяется с ориентировкой, его величины могут сравниваться только в том случае, когда они измерялись в поляризованном свете на главных сечениях.

Данные замеров должны сопровождаться сведениями об использованном эталоне, числовой апертуре объектива, при которой производились измерения, об использованном масле и его дисперсии, о фильтрах или типе монохроматора.

Как уже указывалось, существующие приборы позволяют измерять отражательную способность с высокой точностью. Но само по себе качество аппаратуры еще не определяет полностью точность измерений отражательной способности минералов, если не учитывать целый ряд факторов, в большей или меньшей степени влияющих на точность измерений.

Источниками ошибок могут быть: плохое качество фильтров или монохроматоров, использование значений R , замеренных в «белом» свете, апертура объектива и ориентировка поляризатора, «паразитическая» освещенность, плохая линейность прибора, неточность фокусировки, неточность горизон-

тальной установки аншлифа на столике микроскопа, характер образцов (чистота поверхности, способ их изготовления, полировка) и эталонов, при замерах в иммерсии — стандартность иммерсионного масла.

Кроме того, при использовании значений R из литературных источников следует учитывать: а) характер разреза анизотропного минерала, б) длины волн, при которых сделаны замеры, в) возможные колебания в химическом составе (изоморфизм, твердые растворы), вызывающие колебания R , а также то, что в результате разной чувствительности человеческого глаза и фотоэлемента к определенным длинам волн значения R окрашенных минералов, определенные с помощью визуальных микрофотометров, могут отличаться от значений R , измеренных с помощью фотоэлемента.

Все ошибки, вызываемые перечисленными факторами, можно объединить в две группы: 1) ошибки, получаемые за счет аппаратуры, 2) ошибки, возникающие за счет плохой подготовки объекта. Ошибки первой группы стабильны и от них избавляются путем тщательного изучения прибора и внесения в замеры при необходимости соответствующих поправок. Ошибки второй группы более сложны, так как меняются от объекта к объекту и требуют постоянного внимания исследователя.

Рассмотрим причины возможных ошибок.

Необходимость получения монохроматического света при измерениях отражательной способности минералов

Отражательная способность измеряется как в «белом» немонахроматическом свете, так и в монохроматическом. Стремление измерять ее в «белом» свете вызвано, очевидно, тем, что такие измерения намного снижают требования к чувствительности аппаратуры и позволяют фотометрировать меньшие поверхности при ограниченной чувствительности прибора, и отчасти возможностью увязать цифровые значения R с реальным зрительным впечатлением при изучении руд. Как известно, распределение интенсивности по спектру в «белом» свете зависит от цветовой температуры излучения, поэтому измерения в «белом» свете сделать воспроизводимыми можно только в случае, если стандартизировать цветовую температуру нити накала лампочки, которая используется в осветителе микроскопа, а это усложняет процесс измерения отражательной способности.

Измерения R , проводимые в «белом» свете, зависят, кроме того, от применяемого фотоэлемента и его чувствительности к определенным длинам волн.

Как отмечал Бови, величины R , измеренные в «белом» свете, отклоняются в направлении колебаний, при которых элемент работает наиболее интенсивно. Так, кадмиево-сульфидный элемент в красном свете будет давать большие значения, чем селеновый. У фотоумножителя большая чувствительность находится в голубой части спектра.

Проведенные Бови в 1962 г. замеры R галенита и золота по пириту с $R=54,5\%$, принятому за эталон, на разных приборах, но с одним и тем же источником света дали сильно варьирующие значения. Так, прибор с селеновым фотоэлементом показал значение отражательной способности галенита $43,2\%$, золота — $73,5\%$, прибор с сульфидно-кадмиевым фотоэлементом — соответственно $39,5$ и $89,0\%$, а прибор с фотоэлектронным умножителем — соответственно 45 и 59% .

Измерение в монохроматическом свете имеет целый ряд неоспоримых преимуществ. Это сравнительная простота измерений, надежная воспроизводимость результатов с разными источниками света (лампа накаливания, дуговая лампа и т. д.), возможность получать кривые дисперсии отражательной способности минералов. Все современные микроскопы-фотометры снабжаются светофильтрами для работы в монохроматическом свете или встроенным монохроматором (установка ПООС-1), для работы в монохроматическом свете могут быть использованы также отдельные монохроматоры промышленного типа — призменные или дифракционные.

Монохроматические фильтры, которыми комплектуются микроскопы-фотометры, — это в основном интерференционные фильтры с половиной полосы пропускания порядка 10 нм, выполненные или в виде отдельных фильтров для фиксированных длин волн, или в виде пластинчатых фильтров с непрерывной вариацией длин волн как у микроскопов-фотометров фирмы «Reichert» или фирмы «Leitz». Если при работе со светофильтрами выбор полосы пропускания ограничен, то монохроматоры позволяют изменять монохроматичность света за счет изменения ширины выходной щели. Уменьшая ширину выходной щели, мы увеличиваем степень монохроматичности света, т. е. уменьшаем спектральный интервал пучка, прошедшего через щель, но одновременно чувствительно уменьшаем интенсивность светового потока, что в ряде случаев затрудняет проведение измерений. Поэтому вопрос о целесооб-

разной монохроматичности света, используемого при измерении отражательной способности, представляет определенный интерес, конечно, применительно к измерениям с лампой накаливания, имеющей сплошной спектр. (В случае применения газоразрядных приборов в качестве осветителей, имеющих линейчатый спектр, например ртутная лампа, ширина выходной щели может быть значительно увеличена). Кривые дисперсии отражательной способности минералов в видимой части спектра (λ 400—700 нм) имеют в большинстве случаев плавный характер, со сравнительно незначительной крутизной. Перегибы кривой дисперсии если и имеют место у некоторых минералов, то тоже носят плавный характер и имеют сравнительно большой радиус кривизны. Некоторые минералы, например сфалерит, магнетит и ряд других, вообще мало изменяют отражательную способность по спектру.

Учитывая такой характер дисперсии отражательной способности минералов в видимой области спектра и характер распределения энергии монохроматических пучков в выходной щели монохроматора (Топорец, 1955), можно предположить, что спектральный интервал в 20—25 нм выходящего из монохроматора света обеспечит измерение дисперсии отражательной способности минералов с достаточной для практики точностью.

Естественно, что чем больше угол наклона кривой дисперсии отражательной способности минерала к оси длин волн, что, главным образом, наблюдается в сине-фиолетовом участке спектра, тем выше требования к точности градуировки светофильтров и монохроматоров. Например, у монохроматора оптической насадки ПООС-1 выходная щель не фокусируется при изменении длины волны. За счет дефокусировки щели, вообще неодинаковой для разных длин волн, вызванной остаточными хроматическими аберрациями камерного объектива монохроматора, как бы расширяется спектральный интервал, пропускаемый выходной щелью монохроматора. Поэтому при измерении дисперсии отражательной способности минералов на установке ПООС-1 лучше уменьшить спектральный интервал монохроматического света до 15—20 нм.

Часто в литературе встречаются указания, что значения R получены в зеленом или синем, оранжевом и красном свете без привязки их к какой-либо определенной длине волны. Понятие «синий», «голубой» свет соответствует длинам волн 450—510 нм, зеленый — 510—550 нм, оранжевый — 585—620 нм, красный — 630—760 нм.

Следует учитывать, что в пределах каждого из этих интервалов R может очень ощутимо варьировать, особенно у минералов с сильной дисперсией R . Например, R пирита при 450 нм составляет 43%, а при 510 нм — 51%.

Надо очень хорошо знать характер кривой дисперсии минерала, чтобы выбрать участок длин волн, в котором его R , замеренная на разных приборах, может сравниваться без большей ошибки за счет замеров в несколько отличных длинах волн. Для пирита таким интервалом может считаться 570—620 нм , в пределах которого R повышается на 0,5% в сторону красного края. Знание кривой дисперсии позволит, кроме того, при сравнении внести поправку в сравниваемые данные за счет различия длин волн.

Применяемые за рубежом светофильтры соответствуют обычно следующим длинам волн (в нм): зеленый — 510—520; оранжевый — 580—590; красный — 630—650. Однако нужно учитывать, что фильтры одного и того же цвета могут обладать различной пропускной способностью.

Влияние апертуры применяемого объектива

Отражательная способность минералов характеризуется отношением интенсивности отраженного от полированной поверхности минерала света к интенсивности падающего на эту поверхность света, для случая нормального падения. По формулам

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$$

для прозрачных веществ и

$$R = \frac{(n-1)^2 + n^2\kappa^2}{(n+1)^2 + n^2\kappa^2}$$

для поглощающих,

где n — показатель преломления;

κ — показатель поглощения вещества.

Как видно из этих формул, для случая нормального падения света отражательная способность не зависит от состояния поляризации падающего на объект света. В случае наклонного падения света отражательная способность зависит не только от угла падения i_1 , но и от ориентировки плоскости колебаний поляризованного света. Как видно из рис. 17, с увеличением углов падения отражательная способность при

поляризации света в плоскости, параллельной плоскости падения (R_{\parallel}), увеличивается (сплошная линия), а при поляризации света в плоскости, перпендикулярной плоскости па-

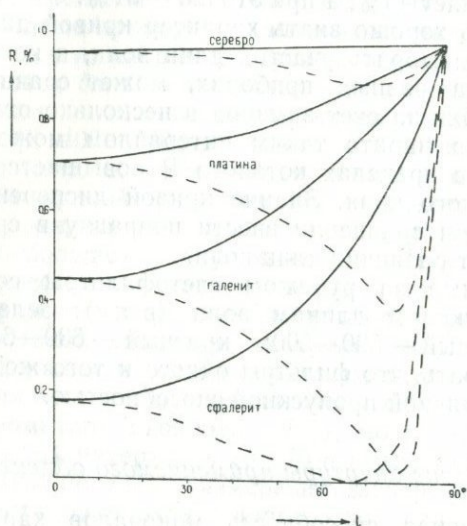


Рис. 17. График зависимости отражательной способности некоторых минералов от угла падения и ориентировки плоскости колебаний поляризованного света.

дения (R_{\perp}), уменьшается. Эта зависимость может быть охарактеризована известными соотношениями:

$$R_{\parallel} = \frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)}, \quad (1)$$

$$R_{\perp} = \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)}; \quad (2)$$

для прозрачных веществ и

$$R_{\parallel} = \frac{(n - \cos i_1)^2 + n^2 \chi^2}{(n + \cos i_1)^2 + n^2 \chi^2}, \quad (3)$$

$$R_{\perp} = \frac{(n \cos i_1 - 1)^2 + n^2 \chi^2 \cos^2 i_1}{(n \cos i_1 + 1)^2 + n^2 \chi^2 \cos^2 i_1} \quad (4)$$

для поглощающих веществ (i_2 — угол преломления).

В случае измерения отражательной способности объектов с помощью микроскопа свет падает на фотометрируемую поверхность в общем наклонно, под различными углами. Для различных лучей падающего пучка угол падения изменяется от 0 до U° . Максимальные углы падения (U) для крайних лучей определяются апертурой применяемого объектива и могут, кроме этого, изменяться с помощью апертурной диафрагмы осветителя микроскопа. Для объективов из нормального набора микроскопа МИН-9 при полностью открытой диафрагме крайние лучи имеют угол падения 12° для объектива $9\times$;

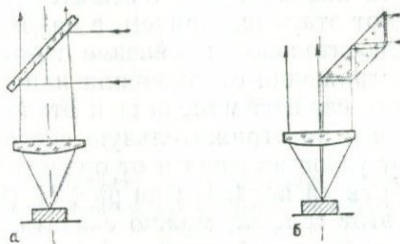


Рис. 18. Схема хода лучей в осветителе отраженного света при использовании пластинки (а) и призмы тройного отражения Берка (б).

27° для $21\times$ и 37° для $40\times$... Условия падения света на объект при использовании в осветителе отражательной пластинки (рис. 18, а) несколько отличаются от условий падения света на объект при использовании в осветителе призмы тройного отражения. В первом случае свет падает на объект коническим пучком и нет преимущественной плоскости падения. При использовании в осветителе призмы (см. рис. 18, б) появляется преимущественная плоскость падения света на объект — это плоскость, перпендикулярная отражающим граням призмы, т. е. плоскость симметрии осветителя. В этом случае начинают проявляться зависимости, характеризуемые формулами (1), (2), (3) и (4), т. е. количество отраженного от измеряемого объекта света увеличивается, если свет поляризован в плоскости падения, и уменьшается, если свет поляризован перпендикулярно плоскости падения. Но так как лучи света, проходя объектив, изменяют направление и ориентировка плоскости падения для различных лучей по отношению к плоскости поляризации становится несколько различной, то

изменение количества отраженного от объекта света за счет наклонного падения меньше, чем определенное с помощью формул (1), (2), (3), (4) для средних углов падения.

Так как при измерении отражательной способности минералов пользуются относительным методом, то интенсивность отраженного света измеряется в одинаковых условиях и для минерала и для эталона, т. е., если предположить, что за счет наклонного падения света на минерал, связанного с апертурой применяемого объектива, количество отраженного от минерала света несколько уменьшается по сравнению со случаем нормального падения, то уменьшится и количество света, отраженного от эталона. Причем, в каком случае произойдет большее относительное изменение количества отраженного света при отражении от минерала или от эталона, зависит от оптических свойств минерала и эталона, т. е. от их n и k . Влияние n и k на отражательную способность вещества в зависимости от углов падения и от ориентировки колебаний поляризованного света показана на рис. 17 (Берек, 1937).

Анализируя этот график, можно сказать, что при измерении отражательной способности серебра по сфалериту для случая направления колебаний поляризованного света перпендикулярно плоскости падения, с увеличением углов падения относительная отражательная способность серебра уменьшается. В этих же условиях при измерении сфалерита по платине (т. е. приняв платину за эталон) относительная отражательная способность сфалерита увеличивается.

Если же измерять отражательную способность минерала по эталону с близкими оптическими свойствами, то изменение относительной отражательной способности минерала с увеличением углов падения практически будет не ощутимо при любой ориентировке поляризатора.

Влияние апертуры объектива на относительную отражательную способность платины, измеренную по кварцу при различных ориентировках поляризатора, показано в табл. 1. Получив довольно значительное изменение относительной отражательной способности платины при ориентировках колебаний поляризатора перпендикулярно и параллельно плоскости падения для различных объектов, Берек пришел к выводу, что измерять отражательную способность следует при среднем положении направления колебаний поляризатора, т. е. под углом 45° . При таком положении поляризатора изменение апертуры применяемого объектива практически не влияет на результат измерения. В связи с этим и на анизотропных мине-

Таблица 1

Относительная отражательная способность платины по кварцу, в зависимости от действующей апертуры объектива и ориентировки поляризатора (Берек, 1937)

Используемая нумерическая апертура объектива	Направление колебаний поляризатора по отношению к плоскости симметрий опак-иллюминатора			
	$R_{\text{плат}} \perp R_{\text{кварц}}$	$R_{\text{плат}} \parallel R_{\text{кварц}}$	45° $R_{\text{плат}} : R_{\text{кварц}}$	45° $R_{\text{плат}}$
0,1	15,3	16,0	15,78	0,722
0,3	14,9	16,5	15,67	0,717
0,6	12,4	19,4	15,73	0,720
0,9	11,3	21,2	15,67	0,717
Вероятная погрешность	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,18$	$\pm 0,008$

Таблица 2

Влияние ориентировки поляризатора и величины апертурной диафрагмы на значения отражательной способности

λ , н.м.	Увели- чение	R объекта	Результаты замеров при апертурной диафрагме			
			прикрытой на 1/3		открытой	
			положение поляризатора			
			0°	45°	0°	45°
450	9 \times	41,6	41,7	42,2	42,3	41,6
550		35,9	36,2	36,6	36,3	36,1
650		33,8	34,0	34,1	33,9	33,8
450	21 \times	41,6	41,9	42,4	42,3	42,0
550		35,9	36,1	36,4	36,1	36,1
650		33,8	33,9	34,2	34,0	34,2
450	40 \times	41,6	38,8	39,8	41,2	41,7
550		35,9	34,9	35,8	35,6	36,2
650		33,8	32,7	33,6	34,2	33,6

ралах Берек рекомендовал фотометрически определять только среднюю отражательную способность. Но такие результаты были получены им на платине и кварце, т. е. на объектах с резко различными оптическими свойствами. На практике такой случай, конечно, следует исключить. Кроме того действующую апертуру объектива можно ограничить при помощи апертурной диафрагмы в осветителе.

А. Д. Ракчев (1964) рассчитал по формулам Френеля (по n и k) теоретические кривые зависимости отражательной способности от угла падения и направления поляризации света, которые подтверждают положение Берека в том случае, если углы падения не превышают 25° . Практические измерения показали, что для случая, когда объект и эталон отличаются по отражательной способности в 3 раза, при измерениях с объективами $9 \times 0,20$ и $21 \times 0,40$, результаты измерения не зависят от ориентировки поляризатора и величины открытия апертурной диафрагмы в осветителе (табл. 2). При работе с объективом $40 \times 0,65$ влияние наклонного падения света на объект становится ощутимым. В этом случае начинает сказываться

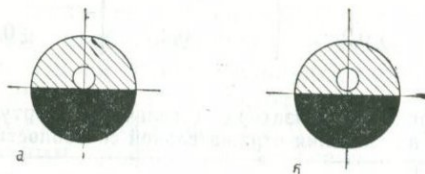


Рис. 19. Вид выходного зрачка объектива при нормальном (а) и смещенном (б) положении апертурной диафрагмы.

положение и размер апертурной диафрагмы осветителя. Если полностью закрыть апертурную диафрагму осветителя и наблюдать в коноскопическом ходе лучей ее положение в выходном зрачке объектива, то видно, что положение ее несколько смещено относительно центра выходного зрачка (рис. 19, а), причем это смещение в некоторых экземплярах осветителей может быть большим (см. рис. 19, б). В этом случае при измерении отражательной способности относительное количество света, падающего под углом в определенной плоскости, значительно увеличивается (рис. 20, б). Такое же явление можно наблюдать и при использовании в осветителе отражательной пластинки, если апертурная диафрагма несколько смещена (см. рис. 20, а). При таком ходе лучей выраженное наклонное падение света на объект вызывает заметное (до нескольких процентов) изменение отражательной способности в зависимости от положения поляризатора.

Анализируя рассмотренное выше, можно сделать следующие практические выводы:

1. При измерении отражательной способности минералов следует ограничивать действующую апертуру объектива при помощи апертурной диафрагмы в осветителе.

2. Не следует полностью закрывать апертурную диафрагму в осветителе при работе с объективами $21\times$ и выше.

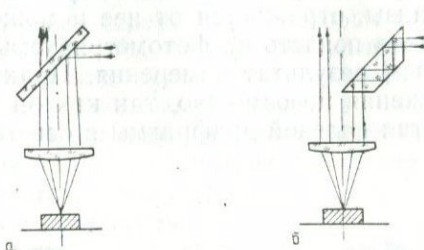


Рис. 20. Схема хода лучей в осветителе отраженного света при использовании отражательной пластинки (а) и призмы тройного отражения Берка (б) при закрытой апертурной диафрагме.

3. Измерять главные показатели отражения с достаточной точностью можно при положении плоскости поляризации поляризатора как параллельном, так и перпендикулярном плоскости падения.

«Паразитическая» освещенность

Под «паразитической» освещенностью понимается отражение света от верхних линз объектива. О наличии ее в приборе свидетельствует слабая освещенность поля зрения при отсутствии объекта на столике микроскопа. «Паразитическую» освещенность легко измерить, если убрать объект из-под объектива и зафиксировать отсчет по шкале гальванометра; разница между этим отсчетом и отсчетом, когда полностью перекрыт свет от осветителя, характеризует ее величину.

Более ощутимы при измерениях отражательной способности отражения от фронтальной линзы объектива в сторону измеряемого объекта. В современных микрофотометрических установках применяется локализация фотометрируемой площади при помощи диафрагмирования измерительной диафрагмой участка на проекции микроизображения. При таком

методе локализации фотометрируемая площадь меньше освещенной поверхности объекта, причем последняя определяется полевой диафрагмой в осветителе микроскопа (рис. 21, а). Так как освещенный участок объекта больше фотометрируемого, то часть лучей, отразившихся от нефотометрируемой, но освещенной поверхности, попадает на переднюю поверхность фронтальной линзы, отражается от нее и может при некоторых углах падения попасть на фотометрируемый участок, искажая тем самым результат измерения. Практически учесть результат искажения невозможно, так как он зависит от величины раскрытия полевой диафрагмы в осветителе, от вели-

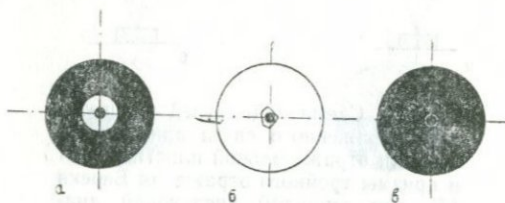


Рис. 21. Вид поля зрения при закрытой полевой диафрагме (а), при открытой полевой диафрагме (б), при полевой диафрагме, размер которой максимально приближен к фотометрируемой площади (в).

чины фотометрируемой поверхности, от соотношений площадей микрообъектов в освещенном поле зрения и их отражательной способности.

Наибольшая погрешность измерения возможна в случае, если полевая диафрагма полностью открыта, а фотометрируется малое зерно минерала, отражательная способность которого значительно отличается от отражательной способности минералов, попавших в освещенную часть поля зрения (см. рис. 21, б). Вероятность погрешности отсутствует, если однородная поверхность при измерениях на минерале и эталоне занимает всю освещенную часть поля зрения. В связи с этим наиболее благоприятные условия измерения, когда полевая диафрагма полностью закрыта и размер освещенного поля зрения максимально приближен к фотометрируемому участку (см. рис. 21, в).

При измерении отражательной способности очень мелких зерен максимальное закрытие ирисовой полевой диафрагмы

в осветителе не обеспечивает достаточно малого отверстия. В этом случае вместо ирисовой полевой диафрагмы применяется выдвижная диафрагма с постоянным отверстием, которая могла бы вводиться в ход лучей на время фотометрирования. Некоторые западноевропейские фирмы в комплекте микрофотометра предусматривают набор сменных полевых диафрагм с разными отверстиями, которые вставляются в осветитель микроскопа. Таким образом, измерения отражательной способности нужно производить при полностью закрытой диафрагме в осветителе микроскопа. Для полного исключения возможных погрешностей при измерении следует выбирать однородные участки минерала, близкие по размерам к освещенному участку поля зрения, т. е. к изображению отверстия полевой диафрагмы.

Линейность световой характеристики аппаратуры

Одним из основных свойств аппаратуры для измерения отражательной способности минералов относительным методом является линейность световой характеристики применяемой аппаратуры, т. е. прямо пропорциональная зависимость измеряемого фототока от интенсивности светового потока, падающего на фотокатод фотоэлектронного умножителя. Нелинейность могут вносить фотоэлектронный умножитель и усилитель фототока. В аппаратуре, выпускаемой промышленностью, влияние нелинейности практически сведено к минимуму. Но поскольку еще широко используется аппаратура непромышленного производства и не исключена возможность некоторой нелинейности в промышленной аппаратуре, следует несколько подробнее остановиться на этом вопросе. Если иметь представление о линейности аппаратуры и знать линейные участки характеристики, то можно легко определить ту наибольшую разность в отражательной способности минерала и эталона, при которой еще можно получить при измерениях удовлетворительные результаты. Проведенные контрольные измерения на ряде установок в различных организациях показывали иногда весьма значительную нелинейность. Характер нелинейности трех различных приборов, один из которых обладает плохой линейностью, другой — удовлетворительной, а третий хорошей, показан в табл. 3.

Для проверки линейности аппаратуры пользуются разными методами.

Зависимость R стекла ТФ-10 от величины R эталона
(паспортное значение R стекла 8,08%), %

Эталон	R эталона	R стекла, полученная при измерении на приборе		
		с плохой линей- ностью	с удовлетвори- тельной линей- ностью	с хорошей линей- ностью
КФ-8	4,23	5,23	7,9	8,09
ТФ-2	6,8	7,23	—	8,04
СТФ-2	13,6	9,58	8,1	8,05
Платиновый-1	27,2	12,03	—	8,15
Кремний	36,1	—	8,5	8,06
Платиновый-2	56,5	—	—	8,05

Филлипс и Брадшау (Phillips, Bradschaw, 1966), например, для контроля линейности световой характеристики фотоэлектронного умножителя использовали зависимость интенсивности света, проходящего через анализатор и поляризатор, от угла между направлениями поляризации последних.

Более прост и надежен метод проверки линейности световой характеристики по ряду эталонов, отражательная способность которых известна достаточно точно. Например, используя стеклянные эталоны установки ПООС-1, можно, непосредственно измеряя отражательную способность одного эталона по другому и сравнивая результат измерения с паспортными данными, выявлять погрешности, вызванные нелинейностью, и учитывать их при дальнейшей работе. Таким методом можно получить данные о линейности световой характеристики аппаратуры, если измеряемые объекты отличаются от эталона по отражательной способности примерно в 2, 3 и 4 раза. Практически можно достаточно точно измерять отражательную способность минералов и на установке, обладающей нелинейностью, если есть возможность выбрать эталон с отражательной способностью, близкой к отражательной способности измеряемого минерала.

Влияние фокусировки на результаты измерений

При относительном методе измерения отражательной способности, когда последовательно производятся отсчеты при установленном объекте и эталоне, большое значение имеет

Эдинаковое положение эталона и объекта по отношению к объективу, что достигается за счет наводки на резкость поверхности объекта и эталона. Влияние фокусировки на точность измерения изучалось Стахом, Эренбергом, Пиллером и Гелленом. Стах построил кривую зависимости отражательной способности от расфокусировки, однако работы Эренберга не подтвердили эту кривую. Эренберг на примере пирита изучал влияние фокусировки и установил, что нерезкость ее может обуславливать колебания отражательной способности до 1%.

По данным Пиллера и Гелена, при измерениях ошибка за счет расфокусировки может составить несколько процентов. М. Н. Пономаревой (1958) применялся так называемый объективный метод наводки на резкое изображение: наведение на резкое изображение производилось по максимальному показанию измерительного прибора, что не всегда имеет место при использовании различной аппаратуры и допустимо только при фотометрировании больших площадей, занимающих все поле зрения, или в том случае, если фотометрируемое зерно очень мало отличается по отражающей способности от окружающего фона. Так как при измерении отражательной способности наводка на резкое изображение объекта и эталона производится одним наблюдателем, то такие дефекты зрения, как близорукость и дальновзоркость, не имеют значения. Важно, чтобы при изменении фокусировки не было бы заметного изменения в показаниях регистрирующего фототок прибора. Чувствительность к расфокусировке увеличивается по мере уменьшения длины волны света и увеличения апертуры объектива. Например, при работе на установке типа ПООС-1 можно проследить увеличение чувствительности к расфокусировке при измерениях в сине-фиолетовом участке спектра, где нужно особо тщательно наводить на резкое изображение минерала и эталона. Для идентичности наводки на минерал и эталон можно производить наводку на резкость по краю или участку полевой диафрагмы.

При измерении отражательной способности важно также знать чувствительность прибора к нефотометрируемым поверхностям, находящимся в непосредственной близости к фотометрируемой поверхности, что может привести к погрешностям при измерениях отражательной способности минералов, имеющих внутренние рефлексии, а также при использовании прозрачных эталонов небольших размеров, например алмаза. Чем меньше увеличение применяемого объектива, т. е.

чем больше глубина резкости, тем больше возможность влияния на результат измерения других плоскостей минерала или эталона. Влияние нефотометрируемой поверхности можно значительно уменьшить, если прикрыть до конца полевую диафрагму в осветителе.

Влияние положения аншлифа на столике микроскопа на результаты измерений

Перекося рабочей поверхности аншлифа может вызвать значительные ошибки при измерении отражательной способности минералов. Рабочая поверхность аншлифа должна быть перпендикулярной оптической оси микроскопа. При наклоне ее изменяются условия диафрагмирования отраженного пучка. Для установки поверхности аншлифа в горизонтальное положение обычно используется выпускаемый промышленностью пресс для аншлифов, но он не всегда обеспечивает необходимую точность.

В работе Эренберга (1964) показано, например, что при наклоне поверхности аншлифа на 32 минуты при измерениях на приборе МРЕ отсчет по шкале измерительного прибора изменяется на 1,9%.

Обычно для контроля положения аншлифа на столике микроскопа используют два способа. Если измеряется минерал изотропный, то, поворачивая предметный столик, наблюдают за показаниями измерительного прибора. При правильном положении аншлифа отсчет по шкале прибора не должен изменяться. Для контроля положения изотропных и анизотропных минералов можно пользоваться методом наблюдения в коноскопическом ходе лучей с линзой Бертрана или с накладной точечной диафрагмой. Если закрыть до конца апертурную диафрагму и поворачивать предметный столик микроскопа, то изображение диафрагмы останется неподвижным при правильно установленном аншлифе и будет несколько перемещаться, если аншлиф перекошен. Кроме методов контроля, важны методы, позволяющие устранить перекося аншлифа или уменьшить чувствительность аппаратуры к возможному перекося.

Пресс для аншлифов обеспечивает достаточную точность установки их, если шток прессы перемещается в направляющей втулке без люфта, а рабочая плоскость шайбы остается параллельной основанию прессы при перемещении штока. Этого можно добиться в условиях любой механической ма-

стерской. Для выравнивания положения аншлифа непосредственно на столике микроскопа Эренберг предложил специальный трехпорный столик с регулируемыми ножками. Минерал прижимается снизу к плоскости столика и столик регулируется при помощи коноскопического наблюдения за изображением апертурной диафрагмы. Подобный столик выпускает фирма «Opton» в комплекте микроскопа-фотометра МРМ.

Чувствительность аппаратуры к перекосу аншлифа можно несколько уменьшить, прикрыв апертурную диафрагму в осветителе микроскопа. Если рассматривать выходной зрачок объектива при коноскопическом наблюдении при включенной в осветителе отражательной призмы (см. рис. 15), то видно, что сечение отраженного от аншлифа пучка лучей определяется изображением апертурной диафрагмы. При вращении предметного столика в случае перекоса аншлифа изображение диафрагмы будет несколько перемещаться по кругу. При этом перемещении можно фиксировать два крайних положения, соответствующих максимальному и минимальному диафрагмированию отраженного светового пучка отражательной призмой. Они соответствуют минимальному и максимальному отсчетам по шкале измерительного прибора, которые фиксируются при повороте предметного столика на 180° . Если не удалось полностью ликвидировать перекося аншлифа, то можно при измерениях изотропного минерала брать средний отсчет по измерительному прибору, равный полусумме максимального и минимального отсчета при вращении столика, а при измерении анизотропного минерала брать 4 отсчета через 90° , соответствующие погасаниям минерала, и из каждых двух отсчетов через 180° брать среднее.

Влияние состояния поверхности аншлифа на результаты измерения отражательной способности

Хорошее качество поверхности исследуемых образцов — одно из основных условий получения достоверных значений.

Возможные ошибки при измерениях отражательной способности минералов могут быть вызваны потускнением поверхности аншлифа под влиянием атмосферных агентов, рельефом, возникающим на поверхности аншлифа при полировке, неудовлетворительным качеством полировки.

Поверхность ряда минералов на воздухе подвергается окислению и постепенно тускнеет. Фрик (Fricks, 1930) изучал изменения поверхности различных минералов с течением вре-

мени и установил, что процесс потускнения протекает с различной скоростью у разных минералов. Например, у аргента уже на третий день отражательная способность понижается на 1%, галенит заметно тускнеет лишь спустя неделю, а халькопирит остается неизменным длительное время.

Таким образом, чтобы избежать ошибок, вызываемых воздействием атмосферных агентов на поверхность аншлифа, необходимо перед измерениями его подполировать.

Источником возможных ошибок при измерении отражательной способности минералов могут быть различия в методах полировки, что являлось, в частности, предметом обсуждения на Международном совещании по рудной микроскопии в 1962 г.

Поверхность аншлифа, представляющего собой агрегат минералов разной твердости, не может быть плоской, так как твердые минералы образуют выпуклости, а мягкие — понижения, что затрудняет измерения аншлифов. По Кэмерону, колебания отражательной способности пирита в 1% могут быть вызваны именно такими неровностями. Всякое отступление от плоскости фотометрируемого участка или наклон фотометрируемой поверхности искажает результат измерения.

Современная фотоэлектрическая аппаратура позволяет фотометрировать очень маленькие участки поверхности и облегчает выбор, например на выступающем зерне минерала, плоского участка, параллельного поверхности предметного столика. Так как в большинстве случаев отступление от плоскости фотометрируемой поверхности или наклон ее приводит к уменьшению измеренной отражательной способности, пригодный для измерения участок на зерне минерала следует выбирать по наибольшему отсчету по шкале измерительного прибора. Фотометрируемая поверхность должна быть без царапин, трещин и отверстий.

Как известно, шлифовка и полировка минерала могут изменять структуру верхнего слоя аншлифа. Возможно образование поверхностного слоя с оптическими постоянными, отличными от оптических постоянных данного минерала. Но по этому вопросу существуют разные точки зрения. Цицсарц сравнивал отражательную способность поверхностей спайности галенита, сфалерита и антимонита до и после полировки. После полировки отражательная способность в зеленом свете уменьшалась у сфалерита на 1,5%, у галенита на 1,8%, у антимонита на 3,6%. Фолински считает, что несовершенства по-

лировки в общем снижают отражательную способность, но известны и исключения.

По Рамдору и Шнейдерхёну, отражательная способность почти не зависит от степени полировки.

Берек (Berek, 1937) разработал теорию влияния поверхностного слоя на отражательную способность и параметры анизотропии минералов и сделал следующие выводы:

1) отражательная способность минералов благодаря шлифовке и полировке всегда снижается, 2) у твердых минералов образуются тонкие поверхностные слои, поэтому отражательная способность их мало изменяется под действием шлифовки и полировки.

Эти выводы подтверждаются и работами П. С. Бернштейна (1968), который указал, что в зависимости от полировки значения отражательной способности у твердых минералов, таких, как магнетит, пирит, арсенопирит, изменяются в пределах 2—3% от измеряемой величины; у мягких и плохо полирующихся минералов — в пределах 5—10%, а у золота — до 15%.

Халлимонт и Бови (Hallimond and Bowie, 1964) изучали изменение отражательной способности кристалла пирита на различных стадиях полирования на разных плоскостях. Им установлено, что грани пирита отличаются по твердости и полируются неодинаково. Различные способы полировки в конечном итоге приводили к одинаковым значениям отражательной способности на всех гранях, хотя и за разное время. Наиболее медленно повышалась отражательная способность до общего уровня на грани куба. Авторы отмечают, что пирит, отполированный различными способами, обладает отражательной способностью, изменяющейся в пределах $\pm 0,5\%$. Как показали наши исследования эталонных образцов (кремний, германий, стекло СТФ-2) при ручной полировке стандартным способом, достижение однородной гладкой зеркальной поверхности, без видимых царапин и черных точек, является достаточным для получения соответствующего значения отражательной способности. На отполированных таким образом прозрачных эталонах измеренная отражательная способность соответствует подсчитанной по точно измеренному показателю преломления.

Однако вопрос выбора рациональных методов шлифовки и полировки и их влияния на отражательную способность различных минералов окончательно не разработан.

Эталоны для измерения отражательной способности минералов

Поскольку с помощью современной фотоэлектрической аппаратуры измерять отражательную способность минералов можно только относительным методом, то одним из важнейших условий получения объективных результатов измерений является наличие надежных эталонов, так как относительная ошибка в знании истинного коэффициента отражения эталона непосредственно переносится на результат измерения. Практически с того времени, как начали измерять отражательную способность минералов относительным методом, и ведется обсуждение и дискуссия по поводу возможности применения тех или иных эталонов. В качестве эталонов были использованы различные вещества: призма полного внутреннего отражения из оптического стекла (Берек); алмаз (Орсель, Халлимонд, Пономарева и др.); сфалерит (Берек, Циссарц, Волинский, Пудовкина, Строна); галенит (Берек, Строна, Королев и Агроскин); кварц (Грей и Мильман); кремний (Янсен, Бернштейн, Безсмертная и Логинова, Рябьева и Аксенова); карборунд (Бови и Тейлор); сапфир и гранат (Халлимонд); вольфрам, никель, алюминий (Янсен); хром и молибден (Бови и Тейлор); черный турмалин (Кэмерон); чистая ртуть, покрытая стеклом (Грей и Мильман). Числовые значения R этих эталонов показаны в табл. 4. Целесообразность применения различных эталонов обсуждалась и был принят ряд рекомендаций на международных совещаниях комиссии по рудной микроскопии. В частности, на совещании в Нью-Дели 14 декабря 1964 г. были рекомендованы следующие эталоны: черное стекло, синтетический карборунд, кремнезем (временно), пирит (временно) и зеркало с серебряной амальгамой.

Требования, которым должны удовлетворять эталоны, в общем сформулированы довольно полно: это должны быть изотропные вещества, хорошо полирующиеся, достаточно твердые, желательна с небольшой дисперсией отражательной способности. По теории поверхностного слоя это должны быть твердые вещества, по возможности с меньшей абсорбцией. При шлифовке и полировке в них образуются тонкие поверхностные слои и поэтому их отражательная способность мало зависит от методов шлифовки и полировки. Важно, чтобы значение отражательной способности эталонов было достаточно близким к отражательной способности измеряемых объектов. Это обеспечивает удовлетворительные результаты и при на-

личии некоторой нелинейности световой характеристики измерительной аппаратуры.

Как показала практика, материал для эталонов, которые удовлетворяли бы перечисленным требованиям, подобрать легче, чем получить достаточно точные значения отражательной способности их. Отражательная способность эталонов различными авторами определялась одним из трех методов: подсчетом по точно измеренному показателю преломления для прозрачных веществ, подсчетом по n и k , определенным из анализа эллиптических колебаний отраженного света по методу Друде, и непосредственно фотометрированием. Естественно, что относительная точность измерения отражательной способности эталонов должна превышать необходимую относительную точность измерений отражательной способности минералов (0,5—1%). С этой точки зрения три вышеперечисленных метода далеко не равноценны.

Для прозрачных веществ показатель преломления может быть определен с высокой точностью непосредственным измерением на рефрактометре.

Подсчет отражательной способности по n и k , определенным методом Друде, дает значительно меньшую точность, соизмеримую (по данным Берека) с точностью измерения R непосредственно микрофотометрированием. Определение R эталонов методом абсолютных измерений на фотоэлектрических установках в основном определяется качеством аппаратуры.

Кроме указанной разницы в методах определения отражательной способности, следует различать два принципиально разных случая использования данных измерения отражательной способности эталонов. В первом случае в качестве эталонов используются непосредственно те образцы, на которых определялась отражательная способность. В другом случае значение R эталона берется из литературных источников, которые таят в себе ошибки. Но особенно осторожно следует относиться к значениям отражательной способности минералов, используемых в качестве эталонов.

Кроме обычных ошибок измерения, на величину отражательной способности минералов могут влиять содержащиеся в них элементы-примеси, различия в приемах полировки и т. п.

Значительный интерес представляют прозрачные вещества, отражательная способность которых определяется сравнительно легко по n . Такие вещества, как кварц, в сечении, перпендикулярном оптической оси, и бесцветный алмаз, нашли

Автор сведений об эталоне	Кварц (ба- зальная плос- кость)	Химически чистая ргуть с покровным стеклом	Алмаз	Пирит	Галенит	Сфалерит	Кремний
Грей и Мильман (1962)	+*	+	+	—	—	—	—
Орсель (1936)	—	—	+	$\frac{54,5^{**}}{\text{в белом свете}}$	—	—	—
Халлимонд (1957)	—	—	$\frac{17,6}{580}$	$\frac{54,3}{580}$	—	—	—
Янсен (1964)	—	—	—	—	—	—	$\frac{38,0}{580}$
Берек (1937)	—	—	—	$\frac{54,5}{\text{в белом свете}}$	—	—	—
Бови и Тейлор (1958)	—	—	—	То же	—	—	—
Леонард (1960)	—	—	—	$\frac{54,0}{\text{в зеле-ном свете}}$	—	—	—
Сиззарц (1932)	—	—	—	—	$\frac{41,6}{\text{в оран-жевом свете}}$	$\frac{16,0}{\text{в оран-жевом свете}}$	—
Кэмерон (1961)	—	—	—	—	—	—	—
Пиллер (1964)	—	—	—	—	—	—	—
С. И. Волюнский (1959)	—	—	—	—	+	+	—
П. С. Бернштейн (1969)	—	—	—	—	—	—	$\frac{34,6}{589}$
И. А. Пудовкина (1966)	—	—	—	—	—	+	—
П. А. Строна (1964)	—	—	—	—	$\frac{43,0}{\text{в бе-лом свете}}$	$\frac{16,0}{\text{в бе-лом свете}}$	—

* Значения R авторами не приводятся.

** В числителе — значение R в %, в знаменателе — длины волн в $\mu\text{м}$.

*** Серебро.

Карборунд (базальная плоскость)	Сапфир	Гранат	Вольфрам	Никель	Алюминий	Хром	Молибден	Черный турмалин	Кварц	Флюорит	Теннантит	Зеркала раз- личных напы- ленных метал- лов
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	$\frac{7,6}{580}$	$\frac{8,2}{580}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	$\frac{54,5}{589}$	$\frac{62,0}{589}$	$\frac{83,0}{589}$	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$\frac{20,3}{\text{в белом}} \\ \text{свете}$	—	—	—	—	—	$\frac{65,0}{\text{в белом}} \\ \text{свете}$	$\frac{55,0}{\text{в белом}} \\ \text{свете}$	—	—	—	—	$\frac{95,3^{***}}{546}$
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	6,4	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

или характеристика света.

широкое применение как эталоны для измерения отражательной способности в большей части низкоотражающих объектов.

Удобны для использования в качестве эталонов оптические стекла. Промышленность Советского Союза выпускает широкий ассортимент оптических стекол с показателем преломления примерно от 1,49 до $\sim 2,1$. ГОСТ 3514-57 предусматривает четыре категории оптического стекла по допускаемым отклонениям показателя преломления: в оптическом стекле 1-й категории допускаемое отклонение по $Np \pm 5 \cdot 10^{-4}$, в стекле 4-й категории $\pm 20 \cdot 10^{-4}$. Благодаря этому, используя оптическое стекло в качестве эталона для измерения отражательной способности, не нужно измерять показатель преломления. Зная марку оптического стекла, достаточно найти по ГОСТу соответствующий показатель преломления, который сообщается ГОСТом для шести длин волн видимой части спектра. Максимальное отступление значения показателя преломления, допускаемое ГОСТом для стекла 4-й категории, $\pm 20 \cdot 10^{-4}$ может вызвать колебания коэффициента отражения примерно $\pm 0,03\%$. Высокая однородность оптического стекла и отработанная технология полировки и контроля поверхности позволяют получать идеальную полировку и плоскостность поверхности. При использовании оптического стекла в качестве эталонов важны также и другие характеристики оптического стекла, нормируемые ГОСТом, — это относительная твердость по сошлифовыванию и группа химической устойчивости. Они определяют способность поверхности стекла сохранять свои свойства без переполировки. Например, оптическое кварцевое стекло, стекла К-8, БК-6, имеющиеся в эталонном комплекте установки ПООС-1, сохраняют без подполировки значения отражательной способности в течение многих месяцев при обычных методах хранения и эксплуатации. Но несмотря на эти преимущества оптических стекол, широкому внедрению их в качестве эталонов для измерения отражательной способности минералов мешает сравнительно маленький показатель преломления и соответственно низкая отражательная способность. В этом отношении значительный прогресс представляют высокопреломляющие оптические стекла, предложенные А. К. Яхкиндо (ГОИ).

Использование в этих стеклах в качестве главного стеклообразующего компонента двуокиси теллура (вместо окиси свинца) позволило достигнуть высоких значений показателя преломления (около 2,4) и хорошей химической стойкости.

В табл. 5 приведена отражательная способность таких теллуритовых стекол СТФ-2 и СТФ-3, включенных в эталонный комплект установки ПООС-1. Они позволяют с достаточной точностью измерять минералы с отражательной способностью до 40—45%. Теллуритовые стекла служат хорошими первичными эталонами, по которым можно определять отражательную способность различных веществ, включенных в эталонный комплект. Практически наличие в эталонном комплекте оптических стекол СТФ-2 и СТФ-3 дает возможность измерять отражательную способность любых объектов в воздухе и в кедровом масле, конечно, при удовлетворительной линейности световой характеристики аппаратуры, например, на установке типа ПООС-1.

Таблица 5

Значения отражательной способности теллуритовых стекол, %

λ , нм	СТФ-2	СТФ-3
434,7	14,73	16,67
486,1	14,1	15,57
546,1	13,6	15,00
589,8	13,37	14,7
656,3	13,11	14,4

Сложней обстоит дело с более высокоотражающими эталонами. Первый опыт изготовления высокоотражающих эталонов в комплекте прибора ФМЭ-1 был не совсем удачным. Платиновые эталоны, покрытые покровным стеклом, из этого комплекта эталонировались на спектрофотометре СФ-10. Естественно, что на спектрофотометре регистрировалось отражение не только от поверхности платины, но и от покровного стекла. Наиболее объективные результаты получались при измерениях отражательной способности с этими эталонами с объективом 9^x, что подтверждается также и данными Е. Г. Рябевой и Е. К. Аксеновой (1968). При использовании объективов большего увеличения данные измерений получаются завышенными, так как при измерениях на эталоне в этом случае учитывается значительно меньшая часть света, отраженного от покровного стекла, что зависит также от величины полевой диафрагмы в осветителе. Этими эталонами можно пользоваться, предварительно определив их отражательную способность для конкретных условий измерения, т. е. для определенного объектива и определенной полевой диафрагмы.

Такой же примерно конструкцией эталона пользовались Грей и Мильман, используя ртуть, покрытую покровным стеклом. Полученные ими данные свидетельствуют не в пользу этого эталона. Значения R для целого ряда замеренных ими

минералов, судя по критическим замечаниям Рамдора (1964), плохо согласуются со свойствами минералов.

Из других высокоотражающих веществ наиболее перспективен химически чистый кремний. Он имеет плавную и монотон-

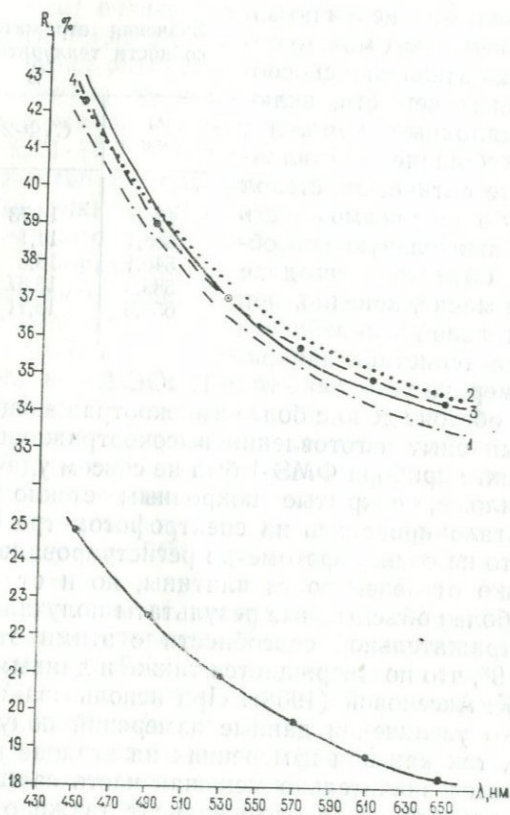


Рис. 22. Дисперсия отражательной способности кремния в воздухе (верхняя кривая) и в масле (нижняя):

1 — по данным П. С. Бернштейна; 2 — по данным Национальной Физической лаборатории кембриджа; 3 — по данным М. С. Безсмертной; 4 — измерено по стеклу СТФ-2.

но изменяющуюся кривую дисперсии отражательной способности. Образец кремния, используемый нами в качестве эталона, без переполитровки в течение более чем двух лет не изме-

нил практически отражательную способность своей рабочей поверхности. Данные измерений последних лет отражательной способности разных образцов кремния, полученные в разных лабораториях на различной аппаратуре (табл. 6, рис. 22), довольно близки.

Таблица 6

Значения отражательной способности кремния по данным разных авторов, %

λ , нм	Физ. лаборатория в Кембридже	ВСЕГЕИ, по стеклу СТФ-2	П. С. Берш- тейн (1968)	М. А. Безмерт- ная (1968)
450	42,05	42,7	41,4	42,2
490	39,35	39,45	38,6	38,9
530	37,5	37,1	36,6	37,1
570	36,2	35,5	35,3	35,8
610	35,25	34,85	34,3	34,95
650	34,55	34,10	33,7	34,4

Таким образом, эталонный комплект из ряда надежных эталонов (оптические стекла, кремний и т. п.) обеспечивает измерение отражательной способности любых минералогических объектов в воздухе и в иммерсии с достаточной точностью. Необходимым условием надежных измерений является воспроизведение паспортных значений эталонов при измерении отражательной способности одного эталона по другому. Измерение отражательной способности одного эталона по другому является не только хорошим методом контроля состояния поверхности эталона, но и комплексной проверкой правильности работы всей аппаратуры в целом. Для примера в табл. 7 показаны результаты измерения R эталонов по эталонам на установке ПООС-1 при длине волны λ 546 нм.

Из анализа данных табл. 7 видно, что значения R эталонов из стекол К-8, СТФ-2 и кремния хорошо воспроизводятся друг по другу, и результаты измерений отвечают паспортным данным. Эталон из стекла ТФ-10 фактически не обладает отражательной способностью, указанной для него в паспорте, и все измерения по нему имеют значительные погрешности. Фактическая отражательная способность вследствие изменения поверхности составляет у данного образца 8,08%, а не 8,36%, как указано в паспорте.

Указанные факторы, влияющие на точность измерений, определяют те методические приемы и их последовательность,

Результаты измерения отражательной способности эталонов по эталонам на установке ПООС-1, %

Измеряемый объект и его R по паспорту	Эталон			
	стекло К-8	стекло СТФ-2	кремний	стекло ТФ-10
Стекло К-8 4,23	—	4,24 (0,24)	4,26 (0,29)	4,37 (3,2)
Стекло СТФ-2 13,60	13,62 (0,15)	—	13,68 (0,6)	14,16 (4,12)
Кремний 36,1	35,7 (1,1)	36,21 (0,3)	—	37,29 (3,3)
Стекло ТФ-10 8,36	8,09 (3,23)	8,05 (3,7)	8,10 (3,11)	—

Примечание. В скобках указана относительная ошибка.

которых нужно придерживаться для правильного измерения отражательной способности минералов или любых других микрообъектов.

Подготовка микроскопа к работе

1. Центрировка полевой и апертурной диафрагмы осветителя микроскопа обычно производится на заводе-изготовителе, но практически после установки осветителя на микроскоп необходимо вновь отцентрировать полевую диафрагму.

2. Для целей микрофотометрирования особенно важна правильная настройка освещения, так как от этого зависит чувствительность при измерениях. При помощи юстировочных винтов на осветителе и поворота самой лампочки осветителя выводят изображение нити накала в выходной зрачок объектива при коноскопическом наблюдении так, чтобы изображение нити накала полностью перекрывало бы выходной зрачок объектива. При этом по шкале измерительного прибора фиксируется максимальный отсчет.

3. Тщательно центрируется объектив.

4. Правильно по отношению к плоскости падения отражающей призмы или пластинки в осветителе устанавливается поляризатор. Для этого можно пользоваться методом Берека по чувствительным к положению погасания минералам или

методом Кэмерона (1966). Найденное правильное положение поляризатора полезно отметить. При измерениях на изотропных объектах лучше устанавливать его под углом 45° .

5. Приводится в надлежащее состояние пресс для аншлифов.

Цена деления
гальванометра

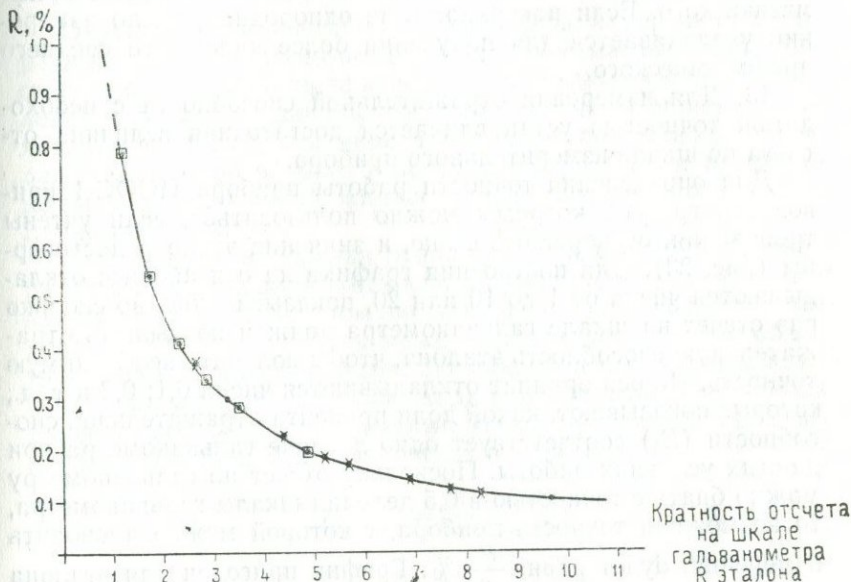


Рис. 23. График для определения точности работы прибора при заданных условиях.

6. Из эталонного комплекта отбираются необходимые эталоны и проверяются методом измерений эталона по эталону.

7. Непосредственно перед измерением проверяется горизонтальность поверхности аншлифа.

8. При измерениях полевая диафрагма полностью закрывается, апертурная прикрывается примерно наполовину или несколько больше.

9. Размер фотометрируемых поверхностей желательно выбирать близким к размеру изображения полевой диафрагмы.

10. Анизотропные объекты измеряются в нормальных положениях (положениях погасания).

11. Спектральная чистота монохроматического света — желательна 20 нм или меньше.

12. Число измерений на одном шлифе определяется характером поверхности. Однородная чистая поверхность, без рельефа, обычно не требует большого числа измерений, так как уже после 3—5 отсчетов видно, что они практически одинаковы и увеличение числа отсчетов не изменит среднего арифметического. Если поверхность не однородная, число измерений увеличивается для получения более надежного среднего арифметического.

13. Для измерения отражательной способности с необходимой точностью устанавливается достаточная величина отсчета по шкале измерительного прибора.

Для определения точности работы прибора ПООС-1 приводится график, которым можно пользоваться, если учтены требования, оговоренные выше, и значения эталона достоверны (рис. 23). Для построения графика на оси абсцисс откладываются числа от 1 до 10 или 20, показывающие, во сколько раз отсчет на шкале гальванометра должен превышать отражательную способность эталона, чтобы получить необходимую точность. По оси ординат откладываются числа 0,1; 0,2 и т. д., которые показывают, какой доли процента отражательной способности (R_1) соответствует одно деление гальванометра при данных условиях работы. Поскольку отсчет по гальванометру можно брать с точностью в 0,5 деления шкалы гальванометра, то возможная точность прибора, с которой можно проводить измерения, будет равна $\frac{R_1}{2} \%$. График пригоден для эталона с любым значением R для любой длины волны и не зависит от R измеряемого объекта.

Глава 3

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ, СВЯЗАННЫХ С ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Измерение отражательной способности дает возможность получить ряд важных для минералов характеристик, к которым относятся дисперсия отражательной способности в воз-

духе и иммерсии, т. е. две цветовые характеристики, двуотражение при любой длине волны и в белом свете, дисперсия двуотражения, осность и знак минерала. Кроме того, можно рассчитывать дополнительные числовые характеристики, представляющие собой комбинации указанных характеристик.

Измерение отражательной способности минералов в иммерсионной жидкости и определение n и κ

Отражательная способность минералов, измеренная в двух разных средах (обычно воздух и кедровое масло), дает единственную возможность при помощи фотометрических определений вычислить величины n и κ непрозрачного минерала или характеризовать n и κ минерала при помощи отношения отражательной способности в воздухе к отражательной способности в иммерсионной жидкости, как это предложил П. С. Бернштейн (1968).

Сам процесс измерения отражательной способности минералов в иммерсионной жидкости в принципе не отличается от измерений в воздухе. Обычно измерения производятся с иммерсионным объективом и между фронтальной линзой объектива и измеряемой поверхностью минерала или эталона помещается капля иммерсионной жидкости. Определение отражательной способности прозрачных эталонов в иммерсии не вызывает затруднений и вычисляется по формуле

$$R_{\text{эт.имм}} = \left(\frac{n - n_1}{n + n_1} \right)^2,$$

где n — показатель преломления эталона;

n_1 — показатель преломления иммерсионной жидкости.

Подсчет отражательной способности в иммерсионной жидкости непрозрачных эталонов по формуле

$$R_{\text{эт.имм}} = \frac{(n - n_1)^2 + n^2\kappa^2}{(n + n_1)^2 + n^2\kappa^2}$$

осложняется тем, что нужно достаточно точно знать показатель поглощения (κ) эталона. Поэтому отражательную способность непрозрачных эталонов в иммерсионной жидкости целесообразней определять непосредственно фотометрированием.

Ряд авторов идет несколько по иному пути. Кембон (Campton, 1949) предложил метод измерения отражательной способности углей в иммерсионной жидкости с сухими объективами. Позже Нихол и Филлипс перенесли этот метод и на рудные минералы. Сущность метода заключается в том, что исследуемый образец с нанесенной на него иммерсионной жидкостью покрывается покровным стеклом. Общая отражательная способность такого объекта складывается из отражений на границе воздух—покровное стекло, покровное стекло—иммерсионная жидкость и иммерсионная жидкость—минерал.

Если подобрать покровное стекло с коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления кедрового масла (например, стекло К-8), то отражения на границе покровное стекло—кедровое масло практически не будет. Зная измеренную общую отражательную способность $R_{\text{общ}}$ и отражательную способность покровного стекла r , можно высчитать отражательную способность минерала в иммерсии.

В 1968 г. П. С. Бернштейн и Л. И. Бочек предложили аналогичный метод определения отражательной способности минерала в иммерсии

$$R_{\text{мин. имм}} = \frac{R_{\text{общ}} - r}{1 - 2r + R_{\text{общ}} \cdot r}.$$

При измерении таким методом не требуется иммерсионный объектив и знания отражательной способности эталона в иммерсионной жидкости, однако начиная с объектива $21\times$ и при большем увеличении при измерениях учитывается только часть света, отраженного от границы покровное стекло—воздух. Она определяется применяемым объективом и зависит от величины отверстия полевой диафрагмы в осветителе.

Измерение отражательной способности минерала в иммерсионной жидкости и в воздухе дает возможность, решив предварительно систему уравнений

$$\begin{cases} R_{\text{в}} = \frac{(n-1)^2 + n^2\chi^2}{(n+1)^2 + n^2\chi^2} \\ R_{\text{имм}} = \frac{(n-n_0)^2 + n^2\chi^2}{(n+n_0)^2 + n^2\chi^2}, \end{cases}$$

где $R_{\text{в}}$ — отражательная способность минерала в воздухе;
 $R_{\text{имм}}$ — отражательная способность минерала в иммерсии;
 n_0 — показатель преломления иммерсионной жидкости,

вычислить n и k минерала по формулам:

$$n = \frac{1}{2} \cdot \frac{n_0^2 - 1}{n_0 \left(\frac{1 + R_{\text{ИММ}}}{1 - R_{\text{ИММ}}} \right) - \frac{1 + R_{\text{В}}}{1 - R_{\text{В}}}}$$
$$k = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(n+1)^2 R - (n-1)^2}{1-R}}$$

Вычисление значений n и k по этим формулам с удовлетворительной точностью возможно только при высокой точности измерений отражательной способности, в пределах 1%. И в самом деле, как показал Циссарц, относительная ошибка измерений в кедровом масле в 3,3% приводит к относительной ошибке вычисленного значения n в 26,5%. Кеммел (Kaemmel, 1962) по литературным данным для отражательной способности минералов в воздухе и в иммерсии подсчитал значения n и k . В ряде случаев у него получились мнимые значения показателя поглощения k или отрицательные значения n .

Пиллер и Гелен (Piller, Gellen, 1964) выделили ограниченные области для поля n/k (где k — коэффициент поглощения, $k = nk$), в пределах которых точность расчетов будет удовлетворительной. В некоторых случаях подобные области можно наметить только для n , в других только для k . В остальных областях, по мнению авторов, проводить измерения n и k бессмысленно.

И. С. Волынский и Л. Я. Яснопольский (1959) показали, что подсчет при значениях $R_{\text{В}} = 42\%$ и $R_{\text{ИММ}} = 27\%$, измеренных с погрешностью $\pm 5\%$, дает возможные значения n с погрешностью в 230%. Для удобства определения численных значений n и k ими построены номограммы.

Дисперсия отражательной способности минералов

Кривая дисперсии отражательной способности минерала, т. е. кривая, характеризующая зависимость отражательной способности минерала от длины волны света, построенная по данным измерений в воздухе или в иммерсионной жидкости в видимой области спектра, является полной колориметрической характеристикой минерала. Построение кривой не вызывает трудностей, так как для этого достаточно измерить отражательную способность минерала в ряде точек спектра и по полученным данным построить кривые в системе координат:

длина волны λ — отражательная способность R . Но на практике измерения осложняются тем, что при переходе от измерений в одной длине волны к измерениям в другой длине в связи с разной чувствительностью фотоэлектронного умножителя к свету разных длин волн и дисперсией отражательной способности самого минерала отсчет по шкале измерительного прибора изменяется. Поэтому, желая сохранить отсчет по шкале измерительного прибора на уровне, обеспечивающем оптимальные условия измерения, т. е. достаточно большим, но в пределах шкалы измерительного прибора, в процессе измерения дисперсии отражательной способности нужно менять условия измерения. Изменять отсчет по шкале измерительного прибора можно многими способами: изменением накала осветителя, изменением величины апертурной диафрагмы, размера выходной щели монохроматора, напряжения, подающегося на фотоэлектронный умножитель, коэффициента усиления фототока и т. п. Так как в основном все эти способы изменения отсчета по шкале не обеспечивают достаточно точной воспроизводимости условий измерений, после измерений на минерале в этой же длине волны нужно произвести измерения на эталоне, т. е. практически необходимо после измерений на минерале снять аншлиф со столика микроскопа, установить на его место эталон, произвести измерения по эталону и затем снова установить аншлиф на столик микроскопа. Если это и приемлемо для сравнительно больших однородных поверхностей минерала, когда установить для измерения в следующей длине волны ту же поверхность минерала нетрудно, то поиск мелких зерен для продолжения измерений на минерале в других длинах волн трудоемок и порой неприемлем. Поэтому большую ценность для измерения дисперсии отражательной способности представляют способы, позволяющие производить измерения без снятия аншлифа минерала со столика микроскопа.

В установке ПООС-1 предложен металлический мостик (Бурэ, Клейнбок, 1968), пользуясь которым, можно опустить столик микроскопа, поставить под объектив эталон для измерений, не сдвигая аншлифа минерала. После измерений на эталоне мостик отодвигается и, поднимая столик микроскопа, можно сфокусировать микроскоп точно на прежнюю точку минерала для продолжения измерений в следующей длине волны. Для этих же целей фирмой «Opton» к микроскопу-фотометру МРМ прикладываются эталоны с магнитной оправой. Их можно крепить на объективе микроскопа и производить

измерения на эталоне, не снимая аншлиф минерала со столика. Способ измерения дисперсии отражательной способности без снятия аншлифа со столика микроскопа был предложен Г. Н. Бурэ и В. Е. Клейнбоком (1965).

В установке ПООС-1 предусмотрена возможность фиксированного изменения напряжения накала лампочки осветителя. Способ сравнительно прост: последовательно производятся измерения на минерале в ряде точек спектра. Для того чтобы отсчет по измерительному прибору был в пределах шкалы, при измерении в каждой длине волны переключатель накала устанавливается в соответствующее положение, которое записывается. Затем минерал снимается со столика микроскопа и производятся измерения на эталоне в тех же длинах волн и соответственно при тех же положениях переключателя накала; после этого вычисляется отражательная способность для каждой длины волны. Такой способ несколько менее точен, чем при использовании мостика. В принципе такой же способ измерения можно реализовать, пользуясь набором нейтральных фильтров разной плотности.

Выше были рассмотрены условия получения точных результатов при измерениях дисперсии отражательной способности минералов. Другая сторона рассматриваемого вопроса — это интерпретация кривых дисперсии. Как известно, кривую дисперсии, опускающуюся от фиолетового к красному концу спектра, называют нормальной (например, у галенита), аномальная же дисперсия характеризуется кривой, поднимающейся к красному концу спектра (пирит, борнит).

И. С. Вольнский (1962) предложил, пользуясь кривой дисперсии минерала, выражать колориметрическую характеристику одним числом, которое определяет относительную разницу показателей отражения минерала для различных участков видимой области спектра. Это число предложено называть значением дисперсии. Например, если отражательная способность минерала для $\lambda=440$ нм равна $R_{\lambda 440}$, а для $\lambda=700$ нм равна $R_{\lambda 700}$, то значение дисперсии в этом случае

$$\Delta R_{\lambda 440,700} = \frac{R_{\lambda 440} - R_{\lambda 700}}{R_{\lambda 440}} = 1 - \frac{R_{\lambda 700}}{R_{\lambda 440}}.$$

Значение дисперсии можно определять как для крайних точек видимой части спектра, в случае нормальной или аномальной дисперсии, так и для более узких спектральных интервалов, если кривая дисперсии имеет перегибы.

П. С. Бернштейн (1968) предлагает цвет минерала выражать точкой в равностороннем треугольнике, вершины которого принимаются за 100% R при длинах волн 440, 590 и 640 нм. Для целей диагностики рудных минералов он предлагает использовать отношение R в воздухе к R в иммерсии и дисперсию этого отношения. Это тем более интересно, что величина отношения мало зависит от качества полировки поверхности.

Современная трехцветная теория цвета дает возможность по кривой дисперсии отражательной способности рассчитать коэффициенты цвета, затем коэффициенты цветности и с помощью графиков определить основные характеристики цвета: цветовой тон и чистоту цвета. С приемами расчета можно познакомиться в книгах М. М. Гуревича (1950), Д. С. Волосова, М. В. Цивкина (1960) и др.

Измерение главных показателей отражения в случайных сечениях анизотропных минералов

Отражательная способность минералов обычно измеряется в поляризованном свете с одним никодем — поляризатором, причем поляризатор ориентируется так, что его плоскость колебаний параллельна или перпендикулярна плоскости симметрии осветителя. Если падающий на анизотропный минерал свет линейно поляризован, то

$$R = \frac{(n_1 - n_0)^2 + K_1^2}{(n_1 + n_0)^2 + K_1^2} \cos^2 \varphi_1 + \frac{(n_2 - n_0)^2 + K_2^2}{(n_2 + n_0)^2 + K_2^2} \cos^2 \varphi_2,$$

где n_0 — показатель преломления среды между минералом и объективом;

n_1, K_1 или n_2, K_2 — показатели преломления и коэффициенты поглощения для обоих направлений колебаний в минерале;

φ_1 и φ_2 — азимуты колебаний в минерале по отношению к направлению колебаний в поляризаторе.

Главные направления в минерале, отвечающие главным показателям отражения R_1 и R_2 , определяются поворотом столика до совмещения одного из этих направлений с направлением колебания в поляризаторе, т. е. когда φ_1 или φ_2 равны 0.

$$R_1 = \frac{(n_1 - n_0)^2 + K_1^2}{(n_1 + n_0)^2 + K_1^2}; \quad R_2 = \frac{(n_2 - n_0)^2 + K_2^2}{(n_2 + n_0)^2 + K_2^2}.$$

Следовательно, вращая предметный столик с аншлифом, можно последовательно измерить главные показатели отражения R_1 и R_2 . Тогда для данного сечения двойное отражение $R = R_1 - R_2$. Понятно, что на любом сечении изотропного минерала $\Delta R = 0$. $\Delta R = 0$ и на изотропном сечении анизотропного минерала, и для оптически двухосных кристаллов в сечениях, перпендикулярных оси вращения. Таким образом, чтобы вычислить двуотражение, необходимо измерить главные показатели отражения, т. е. максимальные и минимальные для данного сечения, или R_g и R_p для главного сечения минерала.

Медленно поворачивая предметный столик микроскопа, можно измерить два максимальных и два минимальных значения отражательной способности и средним для максимальных значений считать $R'g$, а средним для минимальных значений — $R'p$. Более удобный метод измерения главных показателей отражения данного сечения заключается в том, что в скрещенных николях находят нормальное положение минерала, т. е. положение полного погасания, когда одно из направлений колебаний в минерале совпадает с направлением колебаний в поляризаторе. После этого, выключив анализатор, измеряют один из главных показателей отражения, другой измеряют в следующем нормальном положении минерала. Положение погасания можно довольно точно определить при коноскопическом наблюдении. Для правильного определения нормального положения минерала в скрещенных николях требуются не только точно скрещенные николи, но и правильно ориентированный поляризатор по отношению к плоскости падения света в отражающей призме, т. е. плоскость колебаний поляризатора должна быть точно параллельной или перпендикулярной главной плоскости падения света в отражающей призме осветителя. Небольшие отступления от этого положения могут вызвать значительные ошибки в определении положений погасания минерала. Если поляризатор правильно ориентирован, то интервалы между погасаниями в анизотропном минерале равны 90° . Для точной юстировки поляризатора Берек (Berek, 1953) рекомендует использовать чувствительные к положению погасания минералы никелин и молибденит и предлагает следующую методику:

1. Добиваются хорошего скрещивания николей на сильно отражающем изотропном минерале (например, галените) при коноскопическом наблюдении.

2. Установив один из указанных выше минералов, поворачивают предметный столик и определяют интервалы между

положениями погасания. Если они больше или меньше 90° , то поляризатор и соответственно анализатор сдвигают до положения полного скрещивания.

3. Снова проверяют интервалы между положениями погасания и положение поляризатора; если последнее ухудшено, то поворачивают поляризатор несколько в другую сторону и т. д. Таким образом можно добиться положения, когда интервалы погасания будут отличаться от 90° не более чем на 2° .

Определение оптического знака и осности минералов, с помощью отражательной способности

Впервые на возможность определить оптический знак одноосного минерала по отражательной способности указал Орсель. Для этого он рекомендовал сравнивать отражательную способность минерала в сечении, перпендикулярном оптической оси, т. е. в изотропном сечении, с отражательной способностью в любом другом случайном сечении. И. С. Волинский в примечании к переводу работы Орделя (1936) указал на целесообразность использования статистического приема при определении оптического знака и осности минерала.

Позднее эту идею развил Кэмерон (Cameron, 1963), разработав способ определения осности и знака для минералов различных сингоний. Основное условие — большое число замеров исследуемого анизотропного минерала в разноориентированных зернах. Отражательная способность замеряется в монохроматическом свете в каждом зерне при двух положениях погасания, для того чтобы определить значения R , соответствующие двум главным направлениям колебаний в зерне. Необходимость проведения замеров в монохроматическом свете вызывается тем, что в рудных минералах с изменением длины волны оптический знак может меняться на обратный.

Интерпретация полученных значений R производится следующим образом:

1. Если высокие значения R у всех зерен данного минерала одинаковые в пределах погрешности измерений, а низкие значения в разных зернах различные — минерал одноосный отрицательный. Если же низкие значения R одинаковы, а высокие различны — минерал одноосный положительный.

2. Если оба значения варьируют от зерна к зерну — минерал двуосный. В этом случае определяется пограничное число, по одну сторону которого будут располагаться значения $R'p$ и $R'm$, а по другую — $R'm$ и $R'g$, которые при точных за-

мерах не должны переходить в другую зону. Если пограничное число ближе к максимальным значениям — минерал отрицательный, если пограничное число ближе к минимальным значениям — минерал положительный. Например (по данным Кэмерона), зерно манганита имеет значение R_1 , колеблющееся от 13,0 до $19,1 \pm 0,1$ % и $R_2 = 19,1 - 20,2$ %. Следовательно, минерал при данной длине волны (549 нм) оптически отрицательный.

В том случае, если вариации значений $R'_1(Rm - R'p)$ и $R_2(R'g - Rm)$ оказываются приблизительно одинаковыми, а пограничное число устанавливается легко, знак минерала не определяется, а пограничное число соответствует Rm . Когда минимальные значения R_2 перекрывают максимальные значения R_1 , Rm может быть определено лишь очень грубо, знак же определяется как указано ранее. Например, штроейерит, значения R_1 которого колеблются в пределах 28,2—29,0%, а $R_2 = 30,6 - 33,1$ %, по аналогии с одноосными минералами определяется как положительный. Грубо Rm может быть определено из отношения $\frac{R'g_{\min} - R'p_{\max}}{2}$. Если Rm ближе к $R'p$, чем к $R'g$, неизвестный минерал оптически положительный; когда Rm ближе к Rg — минерал оптически отрицательный.

Предложенный метод определения Rm неприемлем: а) к минералам, слабо двуотражающим (таким, как халькопирит), б) если $Rm - R'p$ или $R'g - Rm$ для минерала низкой симметрии меньше ошибки измерения, так как в этом случае минерал близок к одноосному.

ЛИТЕРАТУРА

Агроскин Л. С., Королев Н. В. Микроскопы-спектрофотометры. Оптика и спектроскопия, т. 6, вып. 6, 1959.

Барабанов В. Ф., Клер М. М., Степанова С. М. Определение отражательной способности минералов на микрофотометре МФ-2. Вестник ЛГУ, № 12, серия геол., вып. 2, 1964.

Безсмертная М. С. Метод и прибор для измерения оптических постоянных рудных минералов в отраженном свете. В кн. Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения. М., Госгеолтехиздат, 1963.

Безсмертная М. С., Логинова Л. А. Опыт использования отечественной аппаратуры для измерения спектров отражения и расчетов показателей преломления (n) и коэффициентов поглощения (κ) рудных минералов. В кн. Доклады к семинару «Новые методы и аппаратура для минералого-петрографических исследований». М., ВИМС, 1968.

Березовский В. Н. Диагностика рудных минералов на двойном микроскопе МИС-11, оснащенный поляризационной оптикой. Тр. ВСЕГЕИ, нов. серия, т. 121, 1968.

Бернштейн П. С. Оптические методы диагностики рудных минералов, малозависящие от качества полировки. В кн. Доклады к семинару «Новые методы и аппаратура для минералого-петрографических исследований». М., ВИМС, 1968.

Бернштейн П. С. Определение показателей преломления и поглощения микрообъектов в отраженном свете. Тр. ЦНИГРИ, вып. 86, т. 2, 1969.

Бурэ Г. Н., Клейнбок В. Е. Некоторые особенности аппаратуры и техники измерения отражательной способности минералов и микрокомпонентов углей. Матер. IX совещ. работн. лабор. геол. организ., вып. 5. М., ВИМС, 1965.

Бурэ Г. Н., Клейнбок В. Е. К вопросу измерения отражательной способности минералов и углей. В сб. Геофизическая аппаратура, № 24. Л., Недра, 1965.

Бурэ Г. Н., Клейнбок В. Е. Прибор для измерения отражательной способности микрообъектов. В сб. Геофизическая аппаратура, № 29. Л., Недра, 1965.

Бурэ Г. Н., Клейнбок В. Е. Микрофотометрическая установка ПООС-1 и условия точных измерений. В кн. Доклады к семинару «Новые методы и аппаратура для минералого-петрографических исследований». М., ВИМС, 1968.

Вахромеев С. А. О применении фотометрического окуляра системы И. С. Волинского в практике минераграфии. ЗВМО, № 3, 1954.

Вахромеев С. А. Отражательная способность рудных минералов и ее измерение с помощью отечественной аппаратуры. Тр. УФАН СССР, вып. 14, 1948.

Волосов Д. С., Цивкин М. В. Теория и расчет светооптических систем. М., Искусство, 1960.

Волинский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом, т. 3. М., Госгеолыздат, 1949.

Волинский И. С. К методике измерения оптических постоянных рудных минералов. Тр. Ин-та минералогии, геохимии, кристаллохимии редких элементов, вып. 3, 1959.

Волинский И. С., Яснопольский С. Л. Определение n и κ светопоглощающих минералов по измеренным значениям отражательной способности. Тр. ИМГРЭ, вып. 3, 1959.

Волинский И. С. Измерение оптических постоянных рудных минералов с помощью фотометрического окуляра ОКФ-1. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Волинский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом, т. 1. М., Недра, 1966.

Гелен К., Пиллер Х. К оптике ковеллина. В сб. Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии, № 1. М., ИМГРЭ, 1966.

Гелен К., Пиллер Х. Об ошибках определений отражательной способности и расчетов значений показателя преломления (n) и коэффициента поглощения (κ). В сб. Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии, № 1. М., ИМГРЭ, 1966.

Грей И., Миллман А. Результаты измерения отражательной способности рудных минералов. В сб. Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии, № 1. М., ИМГРЭ, 1966.

Грей И., Миллман А. Показатели отражения рудных минералов. Там же, 1966.

Гуревич М. М. Цвет и его измерения. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.

Друде П. Оптика. М., Изд-во иностр. лит., 1935.

Иванова Н. В., Дружинина И. А., Ожигова В. А. Микрофотометрическая насадка ФМЭ-1 к микроскопам. В сб. Экспериментально-методические исследования рудных минералов. М., Наука, 1965.

Коников А. З. Приспособление «серебряный клин» для определения отражательной способности минералов. Бюлл. научно-техн. информ., № 2, ВИМС, 1960.

Королев Н. В., Агроскин Л. С. Установка для определения отражательной способности минералов. Геология рудных месторождений, № 4, 1959.

Кэмерон Ю. Н. Рудная микроскопия. М., Мир, 1966.

Муратов Э. М. Фотографический метод измерения отражательной способности микровключений минералов. Изв. АН СССР, серия геол., № 6, 1966.

Нихол Я., Филлипс Р. Измерение спектральной отражательной способности марганцевых окисных минералов. В сб. Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии. М., ИМГРЭ, 1968.

Орсель Ж. Измерение отражательной способности рудных минералов при помощи фотоэлементов. В сб. методич. работ по микроскопическим исследованиям руд в отраженном свете, 1936.

Пономарева М. Н. К вопросу о зависимости отражательной способности рудных минералов от их структурных особенностей. ДАН СССР, т. 121, № 1, 1958.

Пономарева М. Н. К вопросу использования иммерсии при диагностике рудных минералов в отраженном свете. Тр. Донецкого политехн. ин-та, т. 50, 1960.

Пономарева М. Н., Зубкова Л. М. О зависимости показателей отражения рудных минералов в воздухе и в иммерсии. Тр. Донецкого политехн. ин-та, т. 50, 1960.

Пономарева М. Н. К характеристике относительного значения двуотражения. Тр. Донецкого политехн. ин-та, вып. 4, т. 64, 1962.

Пономарева М. Н. Об отражательной способности некоторых сульфидов и подобных им соединений. Мин. сб. Львовского ун-та, № 19, 1965.

Пономарева М. Н. К вопросу о систематике рудных минералов по отражательной способности. ДАН СССР, № 5, т. 163, 1965.

Пономарева М. Н., Павлов Н. В., Чупрынина И. И. Определение состава некоторых минеральных видов хромшпинелидов по показателям отражения. Геология рудных месторождений, № 3, 1964.

Пудовкина И. А., Якубович А. Л., Ширявцев А. А. Методы получения количественных характеристик свойств минералов в отраженном свете видимой области спектра. Бюлл. научно-техн. информ., № 5—6. М., ВИМС, 1962.

Пудовкина И. А., Якубович А. О., Ширявцев А. А. Прибор для определения микротвердости и коэффициента отражения минералов (ПМТКО-1). В сб. Минеральное сырье, вып. 3. М., ВИМС, 1961.

Пудовкина И. А., Рябева Е. Г., Аксенова Е. К. Количественные методы изучения свойств рудных минералов и их применение. В сб. Минеральное сырье, вып. 12. М., ВИМС, 1966.

Пришивалко А. П. Отражение света от поглощающих сред. Минск, 1963.

Ракчеев А. Д. Измерение дисперсии отражательной способности рудных минералов. Геология рудных м-ний, № 3, 1960.

Ракчеев А. Д. К методике получения эталонных значений отражательной способности рудных минералов. Геология рудных м-ний, № 1, 1964.

Ракчеев А. Д. Главный угол падения и азимут восстановленной линейной поляризации как диагностические константы рудных минералов. БМОИП, отд. геол., 40, № 3, 1965.

Ракчеев А. Д. Определение показателей преломления и поглощения анизотропных рудных минералов по главному азимуту и главному углу падения. БМОИП, отд. геол., 42, № 2, 1967.

Рябева Е. Г., Аксенова Е. К. Опыт применения приборов типа ПООС-1 и «ЯШМА» для определения дисперсии отражательной способности. В кн. Доклады к семинару «Новые методы и аппаратура для минералого-петрографических исследований». М., ВИМС, 1968.

Строна П. А. Об использовании окулярной насадки сравнения ОКФ-1 при работе с микроскопами МП-3 и МП-5. ЗВМО, вып. 4, 1961.

Строна П. А. Отражательная способность некоторых рудных минералов в полированных шлифах. ЗВМО, вып. 1, 1964.

Строна П. А. Таблицы для определения рудных минералов в отраженном свете. Л., ЛГИ, 1969.

Топорец А. С. Монохроматоры. М., Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955.

Фекличев В. Г. Способ измерения оптически непрозрачных кристаллов по методу Друде на микроучастках в полированных шлифах. Геология рудных м-ний, № 4, 1962.

Фекличев В. Г. Применение микрофотонасадки МФН-1 для измерения оптических констант, их дисперсии и фотографирования минералов под микроскопом. В сб. Физические свойства редкометалльных минералов и методы их исследования. М., Наука, 1968.

Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики, т. 3. М., Физматгиз, 1959.

Халлимонд А., Бови С. Влияние полировки на отражательную способность пирита. В сб. Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии, № 1. М., ИМГРЭ, 1966.

Чечик О., Файнштейн С. М., Лифшиц. Электронные умножители. М., Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957.

Юшко С. А. Методы лабораторного исследования руд. М., Недра, 1966.

Якубович А. Л., Ширявцев А. А., Аксенова Е. Н. Прибор «Яшма» для объективного определения оптических характеристик микрообъектов в отраженном и проходящем свете. Матер. IX совещ. работн. лабор. геол. организ., вып. 5. ВИМС, 1965.

Янсен Г. Рабочие эталоны для измерения отражательной способности непрозрачных рудных минералов. В сб. Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии, № 1. М., ИМГРЭ, 1966.

Berek M. Optische Messmethoden im polarisierten Licht, insonderheit zur Bestimmung von Erzmineralien mit einer Theorie der Optik der absorbierenden Kristalle. Fortschr d. Min., 22, 1937.

Bowie S. H. U. Reflection characteristics of ore minerals. Econ. geol., vol. 57, 1962.

Bowie S. H. U., Sc. B. The photoelectric Measurement of reflectivity. Mineral. magazine, vol. 31, N 237, 1957.

Bowie S. H. U., Taylor V. A system of ore mineral identification. Mining magazine, vol. XCIX, N 5—6, 1958.

Campbell W. The microscopic examination of opaque minerals. Econ. geol. vol. 751, 1906.

Cameron E. Optical Symmetry from reflectivity measurements. American mineralogist, vol. 48, N 9—10, 1963.

Cissarz A. Reflexionsmessungen an absorbierenden Kristallen. Z. Krist, 82, pp. 438—450, 1932.

Commission on ore Microscopy. Econ. geol., vol. III—IV, N 2, 1967.

Ehrenberg H. Reflexionsmessungen in der Erzmikroskopie Eine Übersicht über die Methoden und neueren Instrumente. «Zeitschrift Wissenschafte Mikroskopien». Bd. 66, Hft. 6, 1964.

Faber W. Das Reflexionsvermögen und die Bireflexion des Rotnickel-Kieses. Z. Krist, 85, s. 223—231, 1933.

Folinsbee R. E. The determination of the reflectivity of the ore minerals. Econ. geol., vol. 44, N 5, 1949.

Frick H. Reflexionsmessungen an Erz- und Metallanschliffen mit Hilfe eines Reflexions-Photometers-Okulars. N. Y. f. Min., Beil. Bd. 61, 1930.

Gray J. and Millman A. Spectral reflectivity of ore minerals. Nature, N 4734, vol. 187, 1960.

Hagen E., Rubens H. Das Reflexionsvermögen von Metallen und belegten glasspiegeln. Ann. Phys., I, s. 352, 1900.

Hagen E., Rubens H. Das Reflexionsvermögen einiger Metalle für ultraviolette und ultrarote Strahlen. App. Phys.. N 8, S. 17, 1902.

Hallimond A. F. Direct measurement of standard reflectances with the microphotometer. Mineral. magazine, vol. 31, N 237, 1957.

Hallimond A. F. and Bowie S. H. U. On the Reflectivity of Pyrite. Mining magazine, vol. VIII, N 6, 1964.

Harman Miroslav. Untersuchung von Pyrit mit den Methoden der Elektronenmikroskopie. Geol., N 1, S. 17, 1966.

Jansen G. J. Proposed working reflectivity standards for opaque ore minerals. Econ. geol., vol. 59, N 6, 1964.

Informal Meeting of JMA Commission on Ore Microscopy (COM) held at Cambridge, 1963.

John M., Jones. A new macro-reflectometer. *Econ. geol.*, vol. 57, 1962.

Kaemmel T. Die Werte des Brechungsindex und des Absorptionsindex der Erzminerale errechnet aus ihrem Reflexionsvermögen in Luft und Öl. *Geol. Jahrg.* 11, Hft. 2, Berlin, 1962.

Koenigsberger J. Über Absorption und Reflexion bei Metallsulfiden und oxyden und die gültig-keit der Maxwell'schen Beziehungen. *Zs. Phys.*, 4, S. 495, 1902—1903.

Koenigsberger J. Über Quarz als Reflexionsnormale. *Zs. Phys.*, 4, Jahrg. N 18, 1903.

Koenigsberger J. Über Messungen des Reflexionsvermögens und Bestimmung der optischen Konstanten. *Ann. Phys.* 43, S. 1205, 1914.

Koritnig S. Das Reflexionsvermögen opacuer mischkristallreihen. *Nenes Jahrb. Mineral. Monatsh.*, Hft. 8, S. 225—231, 1964.

Kötter U. K. Die mikroskopische Reflexionsmessung mit dem Photomultiplier und ihre Anwendung auf die Kohlenuntersuchung. «*Brennstoff—Chemie*», Bd. 41, N 21, 1960.

Leonard B. F. Reflectivity measurements with a Hallimond visual microphotometer. *Econ. geol.*, vol. 55, N 6, 1960.

Moses J. M. The identification of opaque minerals by their reflecting power as measured photoelectrically. Doctor's Thesis, Harvard Univ., 1936.

Murchison D. G. Reflectance techniques in coal petrology and their possible application in ore mineralogy. *Vull. Inst. Min. Met. London.* N 689, vol. 73, pt. 7, 1964.

Orcel J. La mesure de pouvoir reflecteur des mineraux opaques á l'aide de la cellule photoélectrique et ses applications, *Société Français de Mineralogie, Bull.*, N 53, 301—349, 1930.

Orcel J. L' eclat des mineraux et la mesure de leurs pouvoirs reflecteurs. *Arch. Mus., Hist. Nat.*, 6. ser., t. XII, p. 171—188, 1935.

Orcel J. et Fastré P. Courbes de dispersion de quelques étalons de pouvoirs réflecteurs utilisables dans l' étude microscopique des mineraux metalliques. *Comptes Rendus*, N 17, t. 200, 1935.

Rinne-Berek. Anleitung zu optischen Untersuchungen mit dem Polarisations-mikroskop. Stuttgart, 1953.

Schneiderhöhn H. Ein neues Photometer-Okular zur Messung des Reflexionsvermögens in Erzanschliffen. Centrall. Min. eit. A. II. S. 394—396, 1928.

Stach V. E. und Michels. Reflexionsmessungen an Kohlenanschliffen mit dem Berek—Mikrophotometer insbesondere am Exinit der Ruhrkohlen flöze. Geologisches Jahrbuch. Bd. 71, 1955.

Bowie S. H. U. Microscopy: Reflected Light. «Physical methods in determinative mineralogy», 1967.

Sample No.	Mineral	Reflection Coefficient (%)	Notes
1	Quartz	12	
2	Calcite	18	
3	Orthoclase	15	
4	Microcline	14	
5	Albite	13	
6	Plagioclase	16	
7	Pyrite	25	
8	Galena	30	
9	Fluorite	22	
10	Spinel	28	
11	Staurolite	20	
12	Andalusite	19	
13	Sillimanite	21	
14	Kyanite	23	
15	Staurolite	24	
16	Andalusite	25	
17	Sillimanite	26	
18	Kyanite	27	
19	Staurolite	28	
20	Andalusite	29	
21	Sillimanite	30	
22	Kyanite	31	
23	Staurolite	32	
24	Andalusite	33	
25	Sillimanite	34	
26	Kyanite	35	
27	Staurolite	36	
28	Andalusite	37	
29	Sillimanite	38	
30	Kyanite	39	
31	Staurolite	40	
32	Andalusite	41	
33	Sillimanite	42	
34	Kyanite	43	
35	Staurolite	44	
36	Andalusite	45	
37	Sillimanite	46	
38	Kyanite	47	
39	Staurolite	48	
40	Andalusite	49	
41	Sillimanite	50	
42	Kyanite	51	
43	Staurolite	52	
44	Andalusite	53	
45	Sillimanite	54	
46	Kyanite	55	
47	Staurolite	56	
48	Andalusite	57	
49	Sillimanite	58	
50	Kyanite	59	
51	Staurolite	60	
52	Andalusite	61	
53	Sillimanite	62	
54	Kyanite	63	
55	Staurolite	64	
56	Andalusite	65	
57	Sillimanite	66	
58	Kyanite	67	
59	Staurolite	68	
60	Andalusite	69	
61	Sillimanite	70	
62	Kyanite	71	
63	Staurolite	72	
64	Andalusite	73	
65	Sillimanite	74	
66	Kyanite	75	
67	Staurolite	76	
68	Andalusite	77	
69	Sillimanite	78	
70	Kyanite	79	
71	Staurolite	80	
72	Andalusite	81	
73	Sillimanite	82	
74	Kyanite	83	
75	Staurolite	84	
76	Andalusite	85	
77	Sillimanite	86	
78	Kyanite	87	
79	Staurolite	88	
80	Andalusite	89	
81	Sillimanite	90	
82	Kyanite	91	
83	Staurolite	92	
84	Andalusite	93	
85	Sillimanite	94	
86	Kyanite	95	
87	Staurolite	96	
88	Andalusite	97	
89	Sillimanite	98	
90	Kyanite	99	
91	Staurolite	100	

Отражательная способность рудных минералов

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Волынский (1949)
Агвиларит	Ag_4SeS	—	—	—
Азурит	$2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	—	—	—
Айкинит	$PbCuBiS_3$	46	—	—
Алабандик	MnS	21	23,4	—
Алтаит	$PbTe$	60	65,5	—
Альгодонит	$Cu_{6-7}AS$	~67	—	—
Аляскаит	$(AgCu)_2PbBi_4S_8$	47	—	—
Андорит	$AgPbSb_3S_6$	31	—	—
Арамайонт	$Ag(Sb, Bi)S_2$	31	—	—
Антимонит	Sb_2S_3	—	—	—
Аргентит	Ag_2S	36	29	—
Аргиродит	Ag_8GeS_6	—	—	—
Арсенопирит	$FeAsS$	54	51,7—55,7 (53,7)	—
Аурипигмент	As_2S_3	20—26	20,3—25	—
Бенжаминит	$Pb(Cu, Ag)Bi_2S_4$	45	—	—
Бертонит	$Pb_2(Cu_7Sb_5S_{13})$	—	—	35
Бертьерит	$FeSSb_2S_3$	27—38	30,0—40,0 (35)	—
Биксбит	$(Mn, Fe)MnO_3$	20	23,0	—
Борнит	Cu_5FeS_4	~20	21,9	—

в белом свете по данным разных авторов, %

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пудовкина (1966)	Рамдор (1962)	П. А. Строна (1964)	Фоллинсби (1949)	А. Л. Якубович (1965)	и другие
—	31,6	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	24,8	21,8	—	—	23,9	—	—
—	—	61,8	—	—	—	59,4	—
—	63,2	—	—	—	63,6	—	—
—	—	42,5—45 (44)	—	—	—	—	—
—	37,8	35,1—37 (35,9)	—	—	—	—	—
—	38,5	—	—	—	36,7	—	—
—	—	—	—	37,2	—	32,8—44,2	—
—	27,3	29,5—30,3 (29,8)	—	—	31,6	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	51,8—56,5 (54)	—	57,2	—	55,5	—
—	—	21—22,5 (21,7)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	23—35	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	Орсель (1936): 22,6
—	—	23,9	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Вольский (1949)
Бравойт	$(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})\text{S}_2$	40—50	45,5	—
Браннерит	$(\text{U}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Y})_3\text{Ti}_5\text{O}_6$	15,52	13,7—16,0 (14,8)	—
Браунит	$3(\text{Mn}, \text{Fe})_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$	19	17,8—19,8	—
Бреггит	$(\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ni})\text{S}$	~40	—	—
Брейтгауптит	NiSb	42—50	45,3—54,6 (49,9)	—
Буланжерит	$\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$	32—40	37,0—44,1	—
Бурнонит	PbCuSbS_3	35	36,0—38,2	—
Валлерит	$\text{Cu}_2\text{S} \cdot 2\text{Fe}_2\text{S}_3$	15—46	—	15—46
Вейссит	Cu_2Te	31	—	28
Виоларит	Ni_2FeS_4	—	—	38
Висмут	Bi	68	67,9	—
Висмутин	Bi_2S_3	—	—	—
Виттихенит	Cu_3BiS_3	34	—	—
Вольфрамит	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$	16—18	16,2—18,5	—
Врбаит	$\text{TiS}_2(\text{As}, \text{Sb})_2\text{S}_8$	23	—	—
Галенит	PbS	43	43,2	—
Галеновисмутит	PbBi_2S_4	34	—	—
Гацерит	MnS_2	~25	—	—
Гаусманит	Mn_3O_4	16—19	16,0—19,0	—
Гематит	Fe_2O_3	24—27	25—30	—
Германит	$\text{Cu}_3(\text{Fe}, \text{Ge})\text{S}_4$	—	—	—
Геокронит	$\text{Pb}_5(\text{Sb}, \text{As})_2\text{S}_8$	36	—	—
Герсдорфит	Ni ASS	49	47,5	—

Кэмерон (1966)	Мозес (1966)	И. А. Пу- довкина (1966)	Рамлор (1962)	П. А. Стро- на (1964)	Фолинсби (1949)	А. Л. Яку- бович (1965)	и другие
—	—	51,0—54,0 (52,5)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	20,1	—	Орсель (1936) 20—21
—	—	35,0	—	—	—	—	—
—	50,2	46,3—52,7 (49,5)	—	—	—	—	—
—	—	36,7	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	15,0—46,0 (37,5)	—	—	—	—	—
—	31,8	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	65,2	62,2	—	—	71,3	67,8	—
—	—	—	—	—	41,0	—	—
—	—	31,9—40,9 (36,4)	—	—	—	—	—
—	—	15,4—27,5 (20)	—	—	—	—	—
—	—	22,1	—	—	—	—	—
—	43,8	40,6—47,9 (42,6)	—	—	42,4	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	24	—	—	—	23,5	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	25,9	—	—	—	—	—
—	24,2	21,8	—	—	—	—	—
—	—	36,8—40,9 (38,4)	—	—	—	—	—
—	—	54,0—55,5 (55)	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Вольский (1949)
Гессит	Ag_2Te	38	38,5	—
Гетит	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	—	16,1—18,5	—
Гидрогематит	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	15—17	16,1—18,5	—
Глаукоdot	$(\text{Co}, \text{Fe}) \text{ASS}$	57,0	52,5	—
Горсфордит	Cu_5Sb	—	—	~50,0
Гриноцит	Cds	19	—	18,5
Гуанахуатит	Bi_2SeS_3	46	—	—
Гюбнерит	MnWO_4	—	—	16
Делафоссит	CuFeO_2	22	—	—
Джемсонит	$\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$	32—38	—	—
Джордизит	MoS_2	13,2	—	—
Дигенит	Cu_{2-x}S	—	22,0	—
Дискразит	Ag_3Sb	—	—	62,0—64,5
Домейкит	Cu_3As	56	—	—
Дюфренуазит	$\text{Pb}_2\text{As}_2\text{S}_5$	36	—	—
Железо углеродистое	Fe	63	—	—
Зигенит	$(\text{Co}, \text{Ni})_3\text{S}_4$	46	48,6	—
Золото	Au	84	74	84
Ильваит	$\text{CaFe}_2^{+}\text{Fe}^{3+}(\text{OH})\text{Si}_2\text{O}_8$	10,14	—	10,14
Ильменит	FeTiO_3	17—21	17,8—21,1 (19,4)	22,0
Ильменорутил	$(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe})\text{O}_2$	16—20	—	—
Иорданит	$\text{Pb}_5\text{As}_2\text{S}_8$	38	—	—
Калаверит	AuTe_2	56—60	—	—
Каллилит	$\text{Ni}(\text{Sb}, \text{Bi})\text{S}$	—	—	—

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пу- довкина (1966)	Рамдор (1962)	П. А. Стро- на (1964)	Фолинсби (1949)	А. Л. Яку- бович (1965)	и другие
—	—	38,3—38,6 (38,5)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	8,0	—	—	—	—	—
—	—	51,4	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	19,5	—	—	18	—	—
—	—	45,9	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	38,4	—	—	37,7	—	Бови и Тейлор (1958) 36—40 (38)
—	—	—	—	—	—	—	—
—	33,4	24,0—26,9	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	55,7	50,0—61,4 (57,9)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	45,8	—	—
—	—	55,6—61,5 (59,1)	—	—	—	—	—
—	—	50,2	—	—	—	—	—
—	—	76,1	—	74	73,4	—	Айтенбогардт (1951) 73,4
—	—	12,2	—	—	—	—	—
—	—	16,7—19,2 (18,2)	—	—	—	—	Орсель (1936) 21—18
—	—	20,4—22,6	—	—	—	—	—
—	38,4	—	—	—	—	—	—
—	64,1	—	—	—	63,2	—	—
—	—	—	—	—	47,4	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Волынский (1949)
Кальцит	CaCO_3	4—7	—	—
Канфилдит	Ag_8SnS_6	25	—	—
Карролит	CO_2CuS_4	46	44,0	—
Касситерит	SnO_2	11,0—12,5	11,2—12,8 (12,0)	12
Кварц	SiO_2	4,5	—	—
Кермезит	$\text{Sb}_2\text{S}_2\text{O}$	27	—	25
Киноварь	HgS	23—27	—	23,09—27,44
Клаусталит	PbSe	49	—	49
Кюпит	$(\text{Ca}, \text{Cl}) (\text{Ti}, \text{Fe})\text{O}_3$	15,5	—	—
Кобальтин	CoASS	52	52,7	—
Кобеллит	$\text{Pb}_8\text{FeBi}_4\text{Sb}_2\text{S}_{16}$	37	40,9—43,2 (42,1)	37
Ковеллин	CuS	5—20	14,5	—
Козалит	$\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$	31,1—41,1	—	46,0
Колорадоит	HgTe	38	—	—
Колумбит	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6$	14—18	16,3—18,0	—
Коринит	$\text{Ni}(\text{As}, \text{Sb})\text{S}$	47—49	—	—
Коронадит	$\text{Mn Pb Mn}_6\text{O}_{14}$		26—32 (29)	—
Креннерит	$(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$	56	—	—
Крокоит	PbCrO_4	19,3	—	—
Кубанит	CuFe_2S_3	40	—	—
Куперит	PbS	40	—	—
Куприт	Cu_2O	29	27,1	—
Купроплатина	$\text{Pt}_5\text{Fe}_4\text{Cu}$ — — $\text{Pt}_3\text{Fe}_3\text{Cu}_2$		—	—

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пудовкина (1966)	Рамлор (1962)	П. А. Строна (1964)	Фоллинсби (1949)	А. Л. Якубович (1965)	и другие
—	—	6,1	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	8,8—14,0 (11,9)	—	11,7	—	—	Орсель (1936) 12,4—11,0
—	—	4,9	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	25,6	—	25,2	—	—	—
—	—	—	—	—	50,4	—	—
—	—	12,9	—	—	—	—	—
—	—	48,8—51,1 (49,8)	—	—	52,5	—	—
—	—	34,4—43,4 (37,8)	—	—	—	—	—
—	—	9,6—19,7	—	—	—	—	—
—	—	45,5	—	—	—	43,0	—
—	36,2	—	—	—	37,7	—	—
—	—	14,7—17,2 (15,8)	—	17,4	—	—	—
—	—	45,2—46,5 (46)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	61,8	—	—	—	60,9	—	—
—	—	17,9—27,3 (18,9)	—	—	—	—	—
—	44	39,3	—	—	41,3	—	—
—	—	40,0—42,4 (41,2)	—	—	—	—	—
—	—	27,5	—	28,5	—	—	Айтенбогардт (1951) 27,7
—	—	67,8—70,1 (68,2)	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Вольский (1949)
Лаурит	$Ru S_2$	40	—	—
Лейкоксен		—	—	—
Лейкопирит	$Fe As_2$	56	53,8	—
Леллингит	$Fe As_2$	56	53—54,7	—
Лепидокрокит	$FeO \cdot OH$	10—19	15,8—25,0 (20,4)	—
Ленгенбахит	$Pb_6(Ag, Cu)_2As_4S$	36	—	—
Ливингстонит	$HgSb_4S_7$	36—37	—	—
Линнеит	Co_3S_4	40—46	—	—
Лорандит	$TlAs S_2$	24	—	29
Людвижит	$(Mg, Fe)_2O_2Fe^{+3}BO_3$	9,25	—	—
Маггемит	Fe_2O_3	23,0	25,0	—
Магнетит	Fe_3O_4	20,0	21,1	20,0
Малахит	$Cu_2[CO_3] [OH]_2$	6,3—9,8	—	—
Манганит	$MnO(OH)$	15—19	14,0—20,0 (17,0)	—
Марказит	FeS_2	55	48,9—55,5 (52,2)	—
Маухерит	$Ni_{11}As_8$	59	51,2	—
Медь	Cu		81,2	—
Менегинит	$CuPb_{13}Sb_7S_{23}$	40,5—33,5	—	—
Миаргирит	$Ag SbS_2$	35	31,8—36,0 (33,9)	—
Метациннабарит	HgS		—	—

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пу- довкина (1966)	Рамдор (1962)	П. А. Стро- на (1964)	Фолинсби (1949)	А. Л. Яку- бович	и другие
—	—	43,6	—	—	—	—	—
—	—	18,9—36,8 (25,6)	—	—	—	—	—
—	—	54,9—58,2 (51,8)	—	—	—	—	—
—	—	52,9—54,9 (53,8)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	36,7	—	—
—	—	—	—	—	31,6	—	—
—	—	—	—	—	47,4	—	Орсель (1936) 46,2
—	—	26,2—27,8 (27,2)	—	—	—	—	—
—	—	8,2—12,2 (9,6)	10	—	—	—	—
—	—	19,3—23,3 (21,1)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	20,8	—	—	Орсель (1936) 22,0 Айтенбогарт (1951) 21,1
—	—	9,4	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	52,0—59,0 (56,0)	—	—	—	—	Орсель (1936) 49,1
60	—	—	—	—	—	—	—
—	58,3—71,3	71,2—78,0 (74,6)	—	72,2	73,3	—	—
—	—	—	—	—	37,7	—	—
—	38,5	—	—	—	34,0	—	—
—	28,8	—	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Вольский (1949)
Миллерит	Nis	54	54,0—60	—
Молибденит	MoS ₂	15—35	15—37	—
Мышьяк	As	58	48—51	—
Нагиагит	Pb ₅ Au(Fe, Sb) ₄ S ₅₋₈	41	—	—
Никелин	NiAs	56	52—58,3	—
Овихит	Ag ₂ Pb ₅ Sb ₆ S ₁₅		—	34
Парараммельсбергит	NiAs ₂		61	—
Пентландит	(Fe, Ni) ₉ S ₃	53	52,0	—
Петцит	Ag ₃ AuFe ₂	39	—	39,0
Пираргирит	Ag ₃ SbS ₃	25—32	24,8—30,8 (29,6)	32,0
Пирит	FeS ₂	53,0	54,5	—
Пиролозит	MnO ₂	30—40	30,0—41,5	—
Пирротин	Fe _n S _{n+1}	37	42,6	—
Пирсеит	(Cu, Ag) ₁₆ As ₂ S ₁₁	~29	30,1	—
Плагионит	Pb ₅ Sb ₃ S ₁₇	32	—	—
Платина	Pt	70	70,1	—
Полианит	MnO ₂	33	—	—
Платинистый иридий	Ir ₄ Pt		—	—
Полибазит	(Ag, Cu) ₁₆ Sb ₂ S ₁₁	29,0	—	—
Полидимит	Ni ₃ S ₄	46	—	—
Поликсен	PtFe—Pt ₃ Fe ₂	—	—	—

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пу- довкина (1966)	Рамлор (1962)	П. А. Стро- на (1964)	Фолинсби (1949)	А. Л. Яку- бович	и другие
—	55,4	53—54,5 (53,7)	—	—	54,5	—	—
21—28	—	18,7—30,8	—	—	—	—	—
—	52,8	47,2—48,2 (47,7)	—	—	52,6	—	—
—	40—41	—	—	—	—	—	—
—	54,3	55,2	—	—	52,6	—	Айтенбогардт (1951) 52,6
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	>60	—	—	—	—
—	51,0	49,6	—	—	45,2	—	—
—	—	37,9	—	—	—	—	—
—	—	30,3—33,5 (31,6)	—	—	—	—	—
—	—	49,5—56,6 (54,6)	—	57,2	—	—	Айтенбогардт (1951) 54,5
—	—	—	—	—	33,1	—	—
—	43,0	37,6—40,4 (39,0)	—	—	39,9	—	—
—	—	—	—	—	30,2	—	—
—	—	—	—	—	37,1	—	—
—	—	70	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	39,7	—	—
—	—	80	—	—	—	—	—
—	—	31,1—31,9 (31,6)	—	—	—	—	—
—	—	45,0—47,0 (46,2)	—	—	—	—	—
—	—	64,5—69,0 (66,7)	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Волынский (1949)
Прустит	Ag_3AsS_3	~ 27	25,0—27,7 (26,4)	—
Псиломелан	$\text{BaMn}^2\text{Mn}_6^4\text{O}_{16}(\text{OH})_4$	до 33,0	23,0—24,0 (23,5)	—
Раммельсбергит	NiAs_2	57	58—60 (59)	57
Ратит	$\text{Pb}_3\text{As}_4\text{S}_9$	31—38	—	34
Реальгар	AsS	19—21	18,5	—
Реньерит	$(\text{Cu}, \text{Fe})_3(\text{Ge}, \text{Fe})\text{S}_4$	—	—	—
Рецбаниит	$\text{Pb}_3\text{Cu}_2\text{Bi}_{10}\text{S}_{19}$	40	—	—
Рутил—черный	TiO_2	20—24	20,2	—
Рутил—красный	—	—	—	—
Саффлорит	CoFeAs_2	54—57	—	—
Семсейит	$\text{Pb}_9\text{Sb}_8\text{S}_{21}$	36—39	—	—
Серебро	Ag	95	—	—
Сидерит	FeCO_3	—	—	—
Сильванит	$(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$	48,0	48—60	—
Скuttersидит	CoAs_3	60,0	55,8	—

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пу- довкина (1966)	Рамдор (1962)	П. А. Стро- на (1964)	Фолисби (1949)	А. Л. Яку- бович	и другие
—	—	—	—	—	29,9	—	—
—	—	—	—	—	32,7	—	—
—	—	58,0	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	34,2	—	—
—	—	20,4	—	—	—	—	—
—	—	30,9	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	43,3	—	Папп (1932) 34,8—44,5
—	—	19,5—24,6 (22,5)	—	—	—	—	Орсель (1936) 21—25
—	—	24,1—27,2 (25,6)	—	—	—	—	—
—	—	56,9—61,0 (59,0)	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	37,7	—	—
—	86,0—97,0	93,5	—	96,8	93,8	—	Орсель (1936) 95 Шнейдерхен (1928) 95
—	—	5,7—9,3 (6,5)	—	—	—	—	—
—	56,6	—	—	—	56,3	—	—
—	—	51,6—53,5 (52,7)	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Вольский (1949)
Сперрилит	$PtAs_2$		—	56
Станнин	$Cu_2S \cdot FeS \cdot SnS_2$	21—24	28	24
Стефанит	Ag_5Sb_4	28	—	—
Сфалерит	ZnS	17,0	—	—
Сульванит	Cu_3VS_4		—	27
Сурьма	Sb		72—77,1	—
Теллур	Te	63	—	—
Танталит	$(Fe_3Mn)Ta_2O_6$	14	—	—
Теннантит	$Cu_{12}As_4S_{13}$	29	28,9	—
Тенорит	CuO	~24	20,0—26,9	20
Тетрадимит	Bi_2Fe_2S	48	—	53—55
Тетраэдрит	$Cu_{12}Sb_{14}S_{13}$	~30	30,7	—
Тиллит	$PbSnS_2$		—	40
Тиманнит	$HgSe$		—	~29
Ульманит	$NiSbS$		47,5	—
Фаматинит	Cu_3SbS_4		—	25
Ферберит	$FeWO_4$	17	—	—
Флюорит	CaF_2	3	—	—
Франкеит	$Pb_5Sn_3Sb_2S_{14}$		—	33—34

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пудовкина (1966)	Рамдор (1962)	П. А. Строна (1964)	Фоллисби (1949)	А. Л. Якубович (1965)	и другие
—	—	—	—	—	—	—	—
—	28—29,8	27,1	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	18,5	17—18 (17,2)	—	17,0	17,8	—	Айтенбогардт (1951) 17,8
—	31,2	—	—	33	—	—	—
—	72,6	—	—	—	74,6	—	—
—	56,3	—	—	—	56,5	—	—
18,5	—	18,5—20,2	—	—	—	—	—
—	30,0—32,8	29,7	—	—	28,8— —31,2	—	—
—	—	17,2—17,9 (17,5)	—	—	21,1	—	—
—	44	47,5—53,5 (50,3)	—	57	56,9	—	—
—	30—32,8	30,9	—	—	28,8— —31,2	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	27,1	—	—	—	25,5	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	3,2	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—

Минерал	Химическая формула	Справочник "Минералы" (1960)	Бови (1962)	И. С. Волынский (1949)
Франклинит	$(\text{Zn, Fe, Mn})(\text{Fe, Mn})_2\text{O}_4$	—	—	16
Фрейбергит	$(\text{Cu, Fe, Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_3$	—	29,8	—
Халькозин	Cu_2S	32	32,2	—
Халькопирит	CuFeS_2	47	—	—
Халькостибит	CuSbS_2	—	—	36
Хлоантит	$\text{NiAs}_{3-2}(\text{Ni, Co})\text{As}_{3-x}$	56	55,8	—
Хромит	$(\text{Fe, Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$	12—14	12,1	14
Церуссит	PbCO_3	8—12	—	8,2—12,3
Цилиндрит	$\text{Pb}_3\text{Sn}_4\text{Sb}_2\text{S}_{14}$	33	—	—
Цинкениит	$\text{PbS} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$	34	32,3	—
Цинкит	ZnO	11,5	11,2	11,5
Шеелит	CaWO_4	10	10	—
Шмальтин	$(\text{CoNi})\text{As}_{3-x}$	56	—	—
Штромейерит	$\text{Ag}_{1-x} \cdot \text{CuS}$	~32	25,5—28,7	—
Эвкайрит	CuAgSe	—	—	32
Эмплектит	CuBiS_2	41	36—41	—
Энаргит	Cu_3AsS_4	26—29	25—28	23

Примечание. В скобках приводится среднее значение R.

Кэмерон (1966)	Мозес (1936)	И. А. Пудовкина (1966)	Рамдор (1962)	П. А. Строна (1964)	Фолинсби (1949)	А. Л. Якубович (1965)	и другие
—	—	—	—	—	18,9	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	33,4	10,6—16,0 (13,2)	—	—	—	—	—
—	44,9	47—49 (48,5)	—	—	43,2	46,5	—
—	—	—	—	—	—	—	Орсель (1936) 40,1—47,9
—	—	54,8	—	—	—	—	—
—	—	10,8—13,5 (12,1)	—	—	—	—	—
—	—	10,3	14	—	—	—	Орсель (1936) 14,0
—	—	33,3	—	—	—	—	—
—	—	32,7	—	—	—	—	—
—	—	11,4	—	—	—	—	—
—	—	11,2—11,6 (10,9)	10	—	—	—	—
—	—	56,4	—	—	—	—	—
—	32,1—34,0	27,6	—	—	32,3	—	—
—	48,6	—	—	—	49,9	—	—
—	—	40,9—43,9 (42,7)	—	—	—	—	—
—	29,6	24,7	—	—	28,0	—	—

Отражательная способность рудных минералов
по данным разных авторов, %

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Агвиларит	—	—	35	—	—	Фолинсби (1949)
Айкинит	—	44	—	37,5	38	Рамдор (1962)
	41,4	—	—	—	—	Мозес (1936)
Алабандин	—	24	—	21	20	Рамдор (1962)
Алтаит	—	61	—	55	52	" "
	—	—	—	62,2	—	Бови (1958)
Андорит	—	31,5	—	27,5	25,5	Рамдор (1962)
Арамайонт	—	35	—	31	28	" "
	—	—	—	$\frac{589^*}{36,7}$	—	Кэмерон (1961)
Антимонит	—	30,5—44	—	25—38	24,5—33,5	Рамдор (1962)
	69,4	—	—	—	—	Мозес (1936)

* В числителе — длина волны в нм, в знаменателе — R в %.

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Антимонит	74,4	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{37,4}$	—	Строна (1964)
Аргентит	—	37	—	33	30	Рамдор (1962)
Аргиродит	—	24,5	—	21	18,5	" "
	—	—	25	—	—	Бови (1958)
Арсенопирит	—	—	—	51,3—54	—	" "
	—	—	—	$\frac{589}{56,4}$	—	Строна (1964)
	—	—	—	$\frac{589}{52,4}$	—	Кэмерон (1961)
	52,8	—	—	—	—	Мозес (1936)
	$\frac{470}{49,3-51,9}$	$\frac{546}{51,3-51,6}$	$\frac{589}{52,2-51,4}$	$\frac{650}{53,4-52}$	Шумская**	
Аурипигмент	—	27—32	—	18—26	20—26	Рамдор (1962)
	—	—	—	26	—	Вольнский (1949)
Бертьерит	—	27,5—39	—	26,5—34,5	26—34	Рамдор (1962)
	34	—	—	—	—	Мозес (1936)
	34,5	—	—	—	—	Фолинсби (1949)

** Измерения проводились на ПООС-1, эталон — кремний.

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Борнит	—	18,6	—	26,5	27,5	Рамдор (1962)
	$\frac{470}{15,8}$	—	$\frac{546}{18,5}$	$\frac{589}{22,3}$	$\frac{650}{27}$	Шумская
Браунит	—	18,5	—	16,5	16	Рамдор (1962)
	19,8	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
	20,3	—	—	—	—	Мозес (1936)
Брейтгаунтит	—	35—45	—	42—49	42,5—51	Рамдор (1962)
	41,1	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	56	—	—	Вольнский (1949)
Буланжерит	—	38	—	34,5	33	Рамдор (1962)
	39,5	—	—	—	—	Мозес (1936)
	39,2	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
Бурнонит	—	33,5	—	32	29	Рамдор (1962)
	$\frac{465}{38-40}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	34,5	—	—	—	—	Мозес (1936)
Валлернит	—	19—47,5	—	15—46	18—45	Спр. „Мине- ралы“ (1960)
	19—48	—	—	—	—	Бови (1958)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Виоларит	—	—	38	—	—	Волынский (1949)
Висмут (сам)	—	67,5	—	62	65	Рамдор (1962)
	—	55,5	—	65,5	59,5	Эренберг (1964)
	—	58—61	—	62—69	61—65	Дессау (1935)
Висмутин	—	41,5—54,5	—	40,9—53	36,9—49,2	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{45-51}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	42—48	—	—	Волынский (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{41}$	—	Кэмерон (1961)
Виттихенит	—	35	—	29,5	28	Рамдор (1962)
Вольфрамит	—	17	—	15	14	" "
	—	—	16	—	—	Волынский (1949)
Галенит	—	43,4	—	41,6	40,0	Рамдор (1962)
	—	—	—	41,7	—	Бови (1953)
	$\frac{440}{49,1}$	$\frac{480}{46,6}$	$\frac{540}{44,1}$	$\frac{589}{42,2}$	$\frac{620}{41,9}$	Пудовкина (1957)
	$\frac{405}{45,2}$	$\frac{436}{43,1}$	—	$\frac{578}{40,5}$	—	Королев (1959)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Галенит	$\frac{468}{45}$	—	$\frac{582}{43}$	—	$\frac{698}{41}$	Спр. „Минералы“ (1960)
	$\frac{460}{48}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{43,5}$	—	Эренберг (1964)
Германит	—	22	—	21,5	21,5	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{26,8}$	—	$\frac{540}{29,2}$	$\frac{580}{28,3}$	$\frac{660}{25,6}$	Логинова (1960)
Гетеролит	—	—	—	$\frac{589}{13-17,7}$	—	Кэмерон (1961)
Гетит	—	17,5	—	14	13	Рамдор (1962)
	16,1	—	—	—	—	Мозес (1936)
Геттардит	$\frac{470}{36,3-44,2}$	—	—	$\frac{589}{34-40,8}$	$\frac{650}{32,2-39}$	Ямбор (1967)
Гидрогематит	16,1	—	—	—	—	Мозес (1936)
Гитерманит	—	39	—	32,5	29,5	Спр. „Минералы“ (1960)
	—	—	37	—	—	Волинский (1949)
Графит	—	22,5	—	23,5	23	Рамдор (1962)
Гуанахуатит	46,2	—	—	—	—	Мозес (1936)
Гаусманит	—	—	—	$\frac{589}{17,5}$	—	Кэмерон (1961)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Делафоссит	22,3	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{22,2}$	—	Кэмерон (1961)
Джемсонит	—	39	—	32	29,5	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{37,7}$	—	Кэмерон (1961)
	—	$\frac{480}{37,1}$	—	—	—	Фолинсби (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{39,5-44}$	—	Чвилева (1969)
Дискразит	—	66	—	62,5	61	Рамдор (1962)
	—	—	65	—	—	Волынский (1949)
Домейкит	—	$\frac{480}{52,6}$	—	—	—	Мозес (1936)
	—	$\frac{480}{50,6}$	—	—	—	Фолинсби (1949)
Железо углерод.	—	64	—	59	58	Рамдор (1962)
Золото	—	47	—	82,5	86	Спр. „Минералы“ (1960)
Ильменит	—	18	—	18	18	Рамдор (1962)
	—	—	—	17,3—20,2	—	Бови (1958)
	—	—	—	$\frac{589}{19,2}$	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{19,6}$	—	Фолинсби (1949)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Иорданит	—	39	—	32,5	29,5	Рамдор (1962)
Калаверит	—	56,5	—	54	52,5	Рамдор (1962)
	—	—	56	—	—	Волинский (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{63,2}$	—	Фолинсби (1949)
	$\frac{465}{55,4-62}$	—	$\frac{523}{58-66}$	$\frac{589}{59-65}$	—	Орсель (1936)
Канфильдит	—	24,5	—	21	18,5	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{24}$	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{26,6}$	—	Фолинсби (1949)
Каролит	—	—	—	$\frac{589}{48,9}$	—	Мозес (1936)
Касситерит	—	11	—	10	8,5	Рамдор (1962)
	—	—	$\frac{546}{12,8}$	$\frac{589}{11,7}$	—	Строна (1964)
	—	$\frac{480}{12}$	—	—	—	Фолинсби (1949)
Кварц	—	4,6	—	4,58	4,54	Рамдор (1962)
Киноварь	—	30	—	25,5	26	" "
	—	—	27	—	25	Волинский (1949)
	—	—	$\frac{546}{24,4}$	$\frac{589}{24,1}$	—	Строна (1964)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Клаусталит	—	50	—	43	40	Рамдор (1962)
Клокманнит	—	—	—	$\frac{589}{19-31}$	—	Кэмерон (1961)
Кнопит	—	—	15	—	—	Волынский (1949)
Кобальтин	—	52	—	52,5	48	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{52,1}$	—	Фолинсби (1949)
	—	—	51	—	—	Волынский (1949)
Кобеллит	—	37,5	—	33,5	32	Рамдор (1962)
Ковеллин	—	18,5—27	—	15—24	10—22	" "
	$\frac{470}{18-26}$	—	$\frac{546}{12-22}$	$\frac{589}{8,5-19,5}$	$\frac{650}{5-19}$	Шумская
	$\frac{460}{15-31}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{9,5-15,1}$	—	Кэмерон (1961)
Козалит	—	—	—	$\frac{589}{43}$	—	" "
Колорадоит	$\frac{465}{38,2}$	—	$\frac{527}{36,9}$	—	$\frac{589}{36,9}$	Фастрэ (1935)
	$\frac{465}{37,1}$	—	$\frac{527}{36,4}$	—	$\frac{589}{37,6}$	Орсель (1936)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Колумбит	—	15	—	17	14	Рамдор (1962)
	—	—	17,3	16,6	—	Строна (1964)
	—	—	—	$\frac{589}{18,5}$	—	Фолинсби (1949)
Коронадит	—	—	27,5—32,5	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{30,6-34,4}$	—	Кэмерон (1961)
Креннерит	—	65—72	—	64—74	68—75	Фастрэ (1935)
	$\frac{465}{63,2-70}$	—	$\frac{527}{63,7-70}$	$\frac{589}{69-76}$	—	Орсель (1936)
Кубанит	—	41	—	41	39	Рамдор (1962)
	$\frac{470}{29,7-31}$	—	$\frac{546}{36,7-38}$	$\frac{589}{38,9-40}$	$\frac{650}{41,5-42,4}$	Шумская
Куперит	—	41	—	34	34	Рамдор (1962)
	—	—	40	—	—	Волинский (1949)
Куприт	—	30	—	22,5	23,2	Рамдор (1962)
	—	—	—	24,3	—	Бови (1958)
	—	—	23	—	—	Волинский (1949)
	—	—	$\frac{546}{28,7}$	$\frac{589}{25,5}$	—	Строна (1964)
	—	—	—	$\frac{589}{27,2}$	—	Мозес (1936)
	—	$\frac{480}{27,7}$	—	—	—	Фолинсби (1949)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Леллингит	—	57	—	52,5	48	Спр. „Минералы“ (1960)
	$\frac{470}{57-54}$	—	$\frac{546}{53,2-54,8}$	$\frac{589}{51,9-54,8}$	$\frac{650}{51,2-54,7}$	Шумская
	—	—	—	$\frac{589}{55}$	—	Кэмерон (1961)
Лепидокрокит	—	20,5	—	17	16	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{16-25}$	—	Кэмерон (1961)
Ливингстонит	—	37	—	32,5	30	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{31,6}$	—	Кэмерон (1961)
Линнеит	—	46,5	—	44	46	Рамдор (1962)
Лонэит	$\frac{470}{38,6-46,2}$	—	$\frac{546}{36,9-43,8}$	$\frac{589}{36,2-42,7}$	$\frac{650}{40,9-35,5}$	Ямбор (1967)
Лорандит	—	29,5	—	23	20	Рамдор (1962)
Люционит	—	23,5	—	25	25	Спр. „Минералы“ (1960)
	$\frac{405}{26,8}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
Магнетит	—	21	—	21	21	Рамдор (1962)
	—	—	$\frac{546}{22,2}$	$\frac{589}{21,4}$	—	Строна (1964)
	—	—	—	$\frac{589}{20,7}$	—	Мозес (1936)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Магнетит	—	—	—	$\frac{589}{21,4}$	—	Фолинсби (1949)
	$\frac{461}{22}$	$\frac{490}{22}$	—	$\frac{598}{21}$	—	Якубович (1962)
Манганит	—	16,5—19	—	12—16	15,5—17,5	Рамдор (1962)
	$\frac{465}{15,2-21}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	$\frac{480}{19}$	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{19-31,4}$	—	Кэмерон (1961)
Марказит	—	52	—	45,5	44,5	Рамдор (1962)
	$\frac{465}{44-49,7}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{50,3}$	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{52,7}$	—	Фолинсби (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{51,5}$	—	Кэмерон (1961)
	$\frac{470}{50-48}$	—	$\frac{546}{50,4-49,6}$	$\frac{589}{50,6-50,6}$	$\frac{650}{51-51,8}$	Шумская
Матильдит	$\frac{470}{44,8}$	—	$\frac{546}{44,4}$	$\frac{589}{44,9}$	$\frac{650}{43,6}$	Харрис (1969)
Маухерит	—	60	—	55,5	51	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{51}$	—	Кэмерон (1961)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Медь самор.	—	61	—	83	89	Рамдор (1962)
	—	—	$\frac{546}{87}$	$\frac{589}{86,5}$	—	Строна (1964)
	—	—	90	—	—	Волынский (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{72,8}$	—	Фолинсби (1949)
Менегинит	—	40,5	—	35	35,5	Рамдор (1962)
	$\frac{480}{37,7}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{43}$	—	Кэмерон (1961)
	—	—	—	$\frac{589}{37,5-43}$	—	Чвилева (1969)
Миаргрит	—	33	—	29	28	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{34}$	—	Кэмерон (1961)
Метациннабарит	$\frac{480}{27,1}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
Миллерит	—	53	—	54	54	Рамдор (1962)
	—	—	56	—	—	Волынский (1949)
	$\frac{470}{40-45}$	—	$\frac{546}{54,7-52,2}$	$\frac{589}{57,3-54,6}$	$\frac{650}{60-57,5}$	Шумская
Молибденит	—	15,5—36	—	18—31,5	15—30,5	Рамдор (1962)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Молибденит	$\frac{460}{20-42}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	$\frac{480}{24,0}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	$\frac{470}{23,8-55,7}$	—	$\frac{546}{20,4-45,8}$	589	$\frac{650}{19-45,5}$	Шумская
Мышьяк самородный	—	61,5	—	50,5	50,0	Рамдор (1962)
	—	—	58	—	—	Волинский (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{52,6}$	—	Кэмерон (1961)
Нагиагит	—	43	—	35	34	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{39}$	—	Фолинсби (1949)
	$\frac{465}{43,8-49}$	—	$\frac{527}{41,6-47}$	$\frac{589}{38,1-40,7}$	—	Фастрэ (1935)
Никелин	—	42,8—48,9	—	55,2—57,1	58,5—57,1	Рамдор (1962)
	—	—	—	51—61	—	Бови (1958)
	$\frac{480}{52,6}$	—	—	—	—	Кэмерон (1961)
	$\frac{480}{51,6}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	$\frac{480}{53,6}$	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
Пентландит	—	51	—	51	51	Рамдор (1962)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Пентландит	—	—	—	$\frac{589}{45,6}$	—	Мозес (1936)
	$\frac{465}{42}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	$\frac{470}{45}$	—	$\frac{546}{51}$	$\frac{539}{52,8}$	$\frac{650}{55,3}$	Шумская
Петцит	$\frac{468}{42,2}$	—	$\frac{530}{39,8}$	$\frac{589}{38,2}$	—	Рамдор (1962)
Пираргирит	—	32,5	—	27	24,5	" "
	$\frac{460}{34,6-36,8}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{31}$	—	Фолинсби (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{30,9}$	—	Кэмерон (1961)
Пирит	—	54	—	53,5	52,5	Рамдор (1962)
	$\frac{470}{47}$	—	—	$\frac{590}{55}$	$\frac{650}{52}$	Орсель (1936)
	$\frac{470}{47,6}$	—	$\frac{546}{53,9}$	$\frac{590}{54,7}$	$\frac{650}{54,9}$	Бови (1966)
Пирит	$\frac{440}{45,4}$	$\frac{498}{52,6}$	$\frac{540}{55}$	—	$\frac{650}{54,8}$	Пудовкина (1957)
	$\frac{470}{49,1}$	—	$\frac{550}{52,7}$	$\frac{580}{54,3}$	$\frac{650}{56,4}$	Халлимонд (1957)
	$\frac{470}{44,5}$	—	$\frac{545}{51,1}$	$\frac{580}{52,7}$	$\frac{660}{56,4}$	Муратов (1969)
	$\frac{470}{48,2}$	—	$\frac{546}{53,9}$	$\frac{589}{55,1}$	$\frac{650}{56,1}$	Шумская

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Пирротин	—	37	—	37	36	Фрик (1930)
	—	33	—	36	37	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{32-35}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
✓	—	—	—	$\frac{589}{39,9}$	—	Кэмерон (1963)
Пирсеит	—	29,5	—	25,5	25,5	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{30,2}$	—	Кэмерон (1963)
Плагионит	—	37,2	—	34,4	31,1	Спр. „Минералы“ (1960)
	$\frac{480}{37,1}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{35,4-42,5}$	—	Чвилева (1969)
Платина сам.	—	73	—	70	70	Рамдор (1962)
Полианит	$\frac{460}{39,7}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	33	—	—	Волынский (1949)
Полибазит	—	29,5	—	25,5	25,5	Рамдор (1962)
	$\frac{480}{30,8}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{34,9}$	—	Фолинсби (1949)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Полидимит	—	45	—	44,5	49	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{48,2}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
Поликсен	—	70	—	73	70	Рамдор (1962)
Прустит	—	28	—	21,5	20,5	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{29,9}$	—	Кэмерон (1961)
Раммельсбергит	—	58	—	52	54,5	Спр. „Минералы“ (1960)
	—	—	—	$\frac{589}{60}$	—	Мозес (1936)
	$\frac{470}{57,7}$	—	$\frac{546}{56,3}$	$\frac{589}{55,8}$	$\frac{650}{56,4}$	Шумская
Ратит	$\frac{480}{33,1}$	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
Реальгар	—	20,5	—	26	26,5	Рамдор (1962)
Реньерит	—	—	—	$\frac{589}{30}$	—	Кэмерон (1961)
	$\frac{460}{7,2-19,2}$	$\frac{500}{10,8-21,5}$	$\frac{510}{14,8-25,8}$	580	660	Логинова (1960)
Рецбаниит	—	—	—	$\frac{589}{43,2}$	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{43,4}$	—	Фолинсби (1949)
Рикардит	—	—	—	$\frac{589}{28-37}$	—	Кэмерон (1961)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Саффорит	—	58	—	52	51,5	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{57,5}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	$\frac{546}{58}$	—	—	Кэмерон (1961)
	$\frac{470}{55,8}$	—	$\frac{546}{53,7}$	$\frac{589}{52,9}$	$\frac{650}{53}$	Шумская
Селен	—	—	—	$\frac{589}{25-36}$	—	Кэмерон (1961)
Семсейит	—	41,1—42	—	35,6—36,44	32,8—33,26	Спр. „Минералы“ (1960)
Серебро самородное	—	95,5	—	94	95	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{86,5}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{92,5}$	—	Мозес (1936)
	$\frac{486}{95}$	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
	—	—	$\frac{546}{96,8}$	$\frac{589}{94,7}$	—	Строна (1964)
Сильванит	—	57	—	48	46	Рамдор (1962)
	$\frac{465}{55-60}$	—	$\frac{527}{56-61}$	$\frac{589}{56-60}$	—	Фастрэ (1935)
	$\frac{460}{53,6-58,4}$	—	$\frac{530}{55-60}$	$\frac{589}{57-61}$	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{56,3}$	—	Кэмерон (1961)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Скуттерудит	—	60	—	53,5	51	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{60,5}$	—	—	$\frac{589}{61,9}$	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{55,4}$	—	Фолинсби (1949)
Сорбит	$\frac{470}{39-45}$	—	—	$\frac{589}{36-41}$	$\frac{650}{34-40}$	Ямбор (1967)
Сперрилит	—	56,5	—	55	52,5	Рамдор (1962)
Станнин	—	23	—	21	19	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{24}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{27,6}$	—	Кэмерон (1961)
Стефанит	—	29	—	27,5	24,5	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{29,9}$	—	Кэмерон (1961)
Сульванит	—	28	—	25,5	25,5	Рамдор (1962)
Сыссерскит	—	67,5	—	66	67	" "
Сфалерит	—	18,5	—	18,5	18,0	Рамдор (1962)
	—	—	16,9	16,7	—	Строна (1964)
	$\frac{440}{19,6}$	$\frac{498}{18,4}$	$\frac{540}{18,1}$	$\frac{589}{17,5}$	$\frac{650}{17,0}$	Пудовкина (1957)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Твинниит	$\frac{470}{38,7-45,6}$	—	—	$\frac{589}{35,9-41,6}$	$\frac{650}{34,9-39,6}$	Ямбор (1968)
	—	62,5	—	63	55	Рамдор (1962)
Теллур	—	—	—	$\frac{589}{56,5}$	—	Кэмерон (1961)
	—	29,5	—	24	21,5	Рамдор (1962)
Теннантит	—	15	—	17	14	" "
Тенорит	—	27,1	—	—	20	" "
	$\frac{460}{19,6}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
Тетрадимит	—	48,5	—	48	47,5	Рамдор (1962)
	$\frac{490}{56,9}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	57,3	57,5	—	Строна (1964)
	—	—	—	$\frac{589}{56,9}$	—	Кэмерон (1961)
Тетраэдрит	—	27	—	24	20,5	Рамдор (1962)
	$\frac{470}{29-32}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	$\frac{490}{31,2}$	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{29,9}$	—	Фолинсби (1949)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Тиллит	—	41	—	38,5	36	Рамдор (1962)
Тиманнит	—	30	—	27	25	" "
Тунгстенил	—	—	—	$\frac{589}{17-33}$	—	Кэмерон (1961)
Ульманит	—	44	—	42	42	Рамдор (1962)
	$\frac{460}{54,6}$	$\frac{530}{56}$	—	$\frac{580}{55,8}$	$\frac{660}{57}$	Орсель (1936)
	—	—	47—49	—	—	Вольнский (1949)
Умангит	—	—	—	$\frac{589}{15,3}$	—	Кэмерон (1961)
Ферберит	—	17	—	15	14	Рамдор (1962)
	—	—	—	—	$\frac{620}{17,9}$	Мозес (1936)
	—	$\frac{490}{16,8-17,2}$	—	—	—	Фолинсби (1949)
Франкеит	—	37,5	—	32,5	31	Рамдор (1962)
Франклинит	—	16,5	—	14,5	11	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{19}$	—	Фолинсби (1949)
Фрейбергит	—	29	—	23	21	Рамдор (1962)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Халькозин	—	30	—	24	23	Рамдор (1962)
	23,5	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
	—	$\frac{490}{31,8}$	—	—	—	Мозес (1936)
	—	—	—	$\frac{589}{32,3}$	—	Кэмерон (1961)
Халькопирит	—	44,5	—	48,3	44,3	Рамдор (1962)
	—	—	—	43,2	—	Бови (1958)
	—	$\frac{490}{42,7}$	—	—	—	Мозес (1936)
	$\frac{470}{\text{Rp}-43,5-47,3}$	—	$\frac{546}{\text{Rp}-42,9-43,3}$	$\frac{589}{\text{Rp}-43,9-44,2}$	$\frac{650}{\text{Rp}-39,8-44,1}$	Международная комиссия по рудной микроскопии (1960)
	$\text{Rg}-43,7-43,9$	—	$\text{Rg}-43,9-44,2$	$\text{Rg}-44,2-44,4$	$\text{Rg}-44-44,2$	
Халькоперит из Печенгской группы месторождений	$\frac{470}{37,5}$	—	$\frac{546}{47,5}$	$\frac{589}{49,4}$	$\frac{650}{49,9}$	Шумская
Халькостибнит	—	42	—	35	34	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{39,2}$	—	Кэмерон (1961)
Халькофанит	—	—	—	$\frac{589}{9-30}$	—	Кэмерон (1961)
Хизлевудит	—	—	—	$\frac{589}{55}$	—	Тредголд (1961)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	желтой	оранжевой	красной	
Хлоантит	—	$\frac{490}{56,2}$	—	—	—	Мозес (1936)
	—	$\frac{490}{54,1}$	—	—	—	Фолинсби (1949)
	$\frac{460}{60,5}$	—	—	$\frac{589}{61,9}$	—	Орсель (1936)
Хромит	—	15	—	12,5	12,5	Рамдор (1962)
	—	$\frac{490}{12,2-14}$	—	$\frac{589}{14}$	—	Мозес (1936)
	$\frac{470}{14-14,4}$	—	$\frac{546}{13,8-14,2}$	$\frac{589}{11-11,5}$	$\frac{650}{10,8-11,4}$	Междунар. комиссия по рудной микроскопии (1960)
Церрусит	—	—	11,5	—	—	Рамдор (1962)
Цилиндрит	—	41	—	38,5	35	Рамдор (1962)
	$\frac{490}{32,3}$	—	—	—	—	Мозес (1936)
	$\frac{490}{33,6}$	—	—	—	—	Фолинсби (1949)
Цинкеит	—	37,5	—	33	31	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{38-41}$	—	Чвилева (1969)
Цинкит	—	11	—	10	8	Рамдор (1962)
Шмальтин	—	58,5	—	56	50	Рамдор (1962)
	—	$\frac{490}{55,4}$	—	$\frac{589}{55,4}$	—	Мозес (1936)
Штрмейерит	—	27,5	—	26	26	Рамдор (1962)
	—	—	—	$\frac{589}{32,3}$	—	Кэмерон (1961)

Минерал	R в области спектра					Автор
	голубой	зеленой	жел- той	оранже- вой	красной	
Штернбергит	—	—	—	$\frac{589}{37}$	—	Кэмерон (1961)
Эвкайрит	—	33	—	27	28	Рамдор (1962)
Эмплектит	—	37,5	—	35	35	Рамдор (1962)
	—	—	41	—	—	Волынский (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{39,1}$	—	Кэмерон (1961)
Эмпрессит	—	—	—	$\frac{589}{45}$	—	Кэмерон (1961)
Энаргит	—	24,3—28,5	—	23,1—26	22,3—24,7	Рамдор (1962)
	—	23	—	21,5	21,5	Спр. „Ми- нералы“ (1960)
	$\frac{460}{26,6—31}$	—	—	—	—	Орсель (1936)
	—	$\frac{490}{27,5}$	—	—	—	Фолинсби (1949)
	—	—	—	$\frac{589}{28}$	—	Кэмерон (1961)
Эсколаит	—	—	—	$\frac{589}{21}$	—	Кэмерон (1961)
Якобсит	—	19,5	—	17	16	Рамдор (1962)
	—	—	20	—	—	Волынский (1949)
	$\frac{468}{19,3}$	—	—	—	—	Орсель (1936)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>Глава 1.</i> Приборы и методы измерения отражательной способности микрообъектов	5
Классификация методов определения отражательной способности	6
Приборы и методы субъективных измерений отражательной способности	7
Щелевой микрофотометр Берека	7
Фотометрический окуляр Воынского (ОКФ-1)	10
Фотометрический окуляр Халлимонта	11
Приборы и методы объективных измерений отражательной спо- собности микрообъектов (фотоэлектрический метод)	12
Микрофотоэлектрические приборы с фотоэлектронными умно- жителями	14
Методы определения отражательной способности, основанные на анализе эллиптической поляризации отраженного света	34
Определение параметров анизотропии в перпендикулярно па- дающем свете	35
Определение оптических постоянных минералов при наклон- ном падении света	37
<i>Глава 2.</i> Возможные погрешности при измерении отражательной способности	41
Необходимость получения монохроматического света при измере- нии отражательной способности минералов	42
Влияние апертуры применяемого объектива	45
«Паразитическая» освещенность	51
Линейность световой характеристики	53
Влияние фокусировки на результаты измерений	54
Влияние положения аншлифа минерала на столике микроско- па на результаты измерений отражательной способности	56
Влияние состояния поверхности аншлифа на результаты изме- рения отражательной способности	57
Эталоны для измерения отражательной способности минералов	60
<i>Глава 3.</i> Методика определения оптических констант рудных мине- ралов, связанных с отражательной способностью	70

Измерение отражательной способности рудных минералов в иммерсионной жидкости и определение n и k	71
Дисперсия отражательной способности рудных минералов	73
Измерение главных показателей отражения в случайных сечениях анизотропных минералов	76
Определение оптического знака и осности минералов с помощью отражательной способности	78
Литература	79
Приложение 1.	86
Приложение 2.	104

**Измерение отражательной способности рудных минералов
Методическое руководство**

Редактор **Н. И. Домнич**
Техн. редактор **А. А. Иванова**
Корректор **И. Б. Васильева**

М-26500 Подписано к печати 28/IX-71 г. Формат бумаги $60 \times 84^{1/16}$
Объем 4,76 уч.-изд. л. Заказ 354 Тираж 300 Цена 44 коп.

Типография № 3 УПЛ. Ф. 2. Ленинград. Московский пр., 26.

Цена 44 коп.

365