

Т. Н. ЧВИЛЕВА, В. Е. КЛЕЙНБОК, М. С. БЕЗСМЕРТНАЯ

ЦВЕТ
РУДНЫХ
МИНЕРАЛОВ
В ОТРАЖЕННОМ
СВЕТЕ

Т. Н. ЧВИЛЕВА, В. Е. КЛЕЙНБОК,
М. С. БЕЗСМЕРТНАЯ

ЦВЕТ
РУДНЫХ
МИНЕРАЛОВ
В ОТРАЖЕННОМ
СВЕТЕ

2312



МОСКВА, «НЕДРА», 1977



Чвилева Т. Н., Клейнбок В. Е., Безсмертная М. С. Цвет рудных минералов в отраженном свете. М., «Недра», 1977, 189 с.

Рассматриваются основные понятия и категории колориметрии, принципы расчета цветовых характеристик (координат цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , координат цветности x , y , z , цветового тона λ , нм, числовые характеристики цвета p , %). Приводятся результаты измерений коэффициентов отражения в области $\lambda=410-700$ нм 159 рудных минералов и расчет по этим данным цветовых характеристик относительно источников белого света A , B , C . Даётся описание приборов и методов измерения спектральных коэффициентов отражения в видимой области. Результаты исследований с привлечением литературных данных обобщены в цветной таблице (вкладке) минералов по отражению, которая рекомендуется в качестве определителя 250 минералов.

Книга предназначена для минералогов, геохимиков, технологов, обогатителей; она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Табл. 22, ил. 39, список лит. — 60 назв.

Библияр Н. Т. Болгарской. В. М. Гольдберг и др. — М.: Издательство АН СССР по геологии, 1960. — 128 с., 100 листов с таблицами и рисунками.

В книге приведены результаты определения цвета 159 минералов, отобранных из различных месторождений и коллекций. Каждый минерал описан в виде таблицы, в которой приведены цвета, полученные от полированых и сколированных образцов, а также цвета, полученные от сколированного и полированного кристалла. В таблицах приведены также данные о цвете и форме кристаллов, а также о химическом составе минерала.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы происходят коренные изменения в микроскопических методах исследования рудных (светопоглощающих) минералов в отраженном свете. Все большее внимание привлекают оптические свойства минералов, которые могут быть оценены количественно. Цвет минерала в отраженном свете относится к числу именно таких оптических диагностических свойств. Цветовые различия видны при визуальных наблюдениях под микроскопом, но количественного выражения они пока практически не получили. В литературе при описаниях минералов дается только качественная оценка цвета, выраженная в словесной форме, что вносит неопределенность в характеристику одного из главных оптических свойств минерала.

Материал, полученный по измерениям спектральных коэффициентов отражения большого числа минералов, обеспечивает реальную возможность использования в минерографии колориметрической методики, основанной на теоретических положениях цветоведения и позволяющей получать точную количественную характеристику цвета минерала. Первые опыты в этом направлении были предприняты зарубежными исследователями Х. Пиллером, В. Хтейном и Р. Филлипсом.

В настоящей книге рассмотрены основные понятия и категории колориметрии, принципы расчетов координат цвета, дано описание приборов и методов измерения спектральных коэффициентов отражения в видимой области. Приведены результаты расчетов цветовых характеристик 159 рудных минералов и цветная таблица-систематика минералов по отражению, обобщающая материалы по диагностическим свойствам 250 минералов.

В основу книги положены материалы авторов по расчету цвета рудных минералов в отраженном свете. Количественная интерпретация цвета произведена на основании анализа спектров отражения, полученных для видимой области ($\lambda = 410—700$ нм) на двухлучевом микроспектрофотометре «Блеск». Более подробные сведения об использованном материале приведены в книге «Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости» М. С. Безсмертной, Т. Н. Чвилевой, Л. С. Агроскина и др. М., «Недра»,

1973, а также в работе М. С. Безсмертной, Т. Н. Чвилевой «Определитель рудных минералов». М., «Недра», 1976.

Авторы, впервые в СССР использовавшие колориметрические расчеты для анализа цвета минералов, не сомневаются, что новая методика найдет широкое применение в минерографической практике и надеются, что публикуемые материалы будут способствовать более широкому обсуждению описываемого метода, а также привлекут к его дальнейшей разработке специалистов по рудной микроскопии.

Глава I.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ИЗ УЧЕНИЯ О СВЕТЕ И ЦВЕТЕ И СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ ЦВЕТА

Цвет — это один из признаков или свойств света; из нескольких определений, которые даются в физике понятию «цвет», нашим целям наиболее соответствует следующее: цвет — это свойство видимого излучения, определяемое по вызываемому им у человеческого глаза ощущению. Анализ цветовых явлений неразрывным образом связан с одной стороны с основными законами, изучающими одну из форм энергии — лучистую (или излучение), с другой стороны — с физиологическими особенностями фотоприемника, т. е. человеческого глаза.

В настоящей работе авторы не излагают теории света и цвета, а лишь используют некоторые понятия и положения из этой теории. Знание физической сущности явлений, на которых основаны законы и системы фотометрии и колориметрии, необходимо исследователю руд для ясного понимания и количественной оценки цветовых явлений, возникающих при отражении света полированной поверхностью минералов. Эта глава книги написана авторами с использованием отечественных руководств М. М. Гуревича (1950, 1968), Д. С. Волосова и М. В. Цивкина (1960), В. В. Шаронова (1961), материалов колориметрических стандартов МОК, 1931, основных руководств по количественному определению цвета за рубежом (A. Hardy, 1936; H. Höfert, 1957; D. Judd, 1952; W. Schultze, 1966; G. Wyszecki, W. Stiles, 1967; W. Wright, 1969, а также ряда зарубежных материалов по колориметрии (Committee on Colorimetry, Optical Society of America, 1968).

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ФОТОМЕТРИИ

Оптическое излучение

В современной физике излучением (или лучистой энергией) называется совокупность распространяющихся в пространстве электромагнитных волн; светом — вид электромагнитного излу-

чения, вызывающий зрительное ощущение. Электромагнитная теория света выявила единство физической природы всех видов излучений и установила единый электромагнитный спектр с длинами волн от $1 \cdot 10^{-11}$ до $3 \cdot 10^{10}$ см. Единый электромагнитный спектр условно разбит на отдельные области от гамма-лучей до низкочастотных колебаний (рис. 1). Область оптического излучения, или так называемый оптический спектр, имеет длину

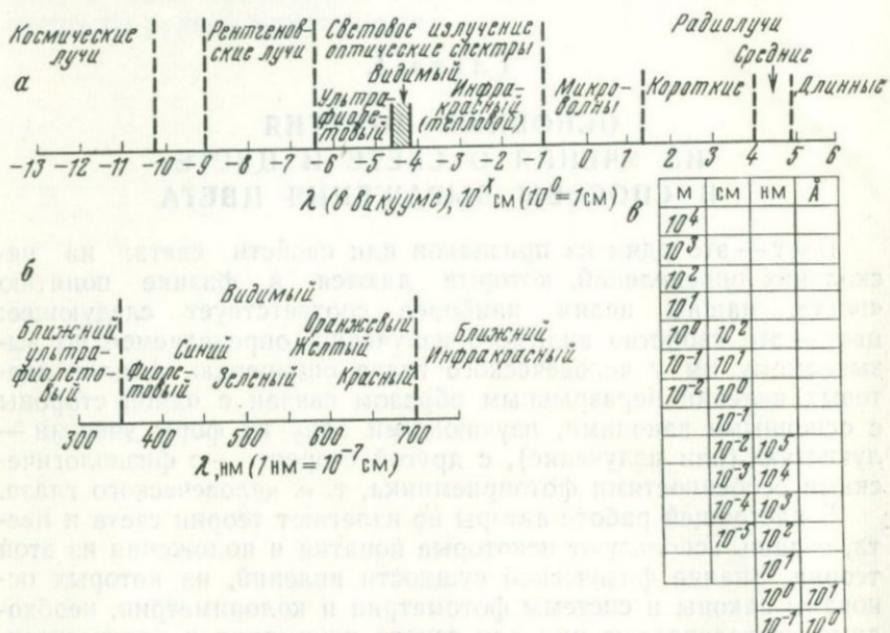


Рис. 1. Электромагнитный спектр: *a* — диапазон электромагнитных колебаний; *b* — световой спектр; *c* — единицы измерений длин волн электромагнитного спектра

волн от ~ 10 нм до $340\,000$ нм (340 мкм). В силу физиологических особенностей глаз человека настроен на восприятие лишь небольшой видимой части оптического спектра, в пределах $\lambda 380$ — 780 нм¹. Причем в этих пределах глаз способен не только ощущать свет, но и выявлять цветовые различия. Обычно в видимом спектре электромагнитного излучения выделяют восемь основных цветов: красный, оранжевый, желтый, желто-зеленый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Границы распределения цветов разными авторами определяются по-разному. Ниже приводятся границы цветов, в нанометрах, по Л. И. Дёмкиной

¹ Длины волн оптического спектра измеряются в мм ($1 \text{ mm} = 10^{-3}$ м), микрометрах ($1 \text{ мкм} = 10^{-6}$ м), нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9}$ м) и ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ м). Видимый спектр принято выражать в нанометрах.

(Шаронов, 1961); в скобках показаны соответствующие цветовые интервалы по Н. Т. Федотову (1935):

Фиолетовый	390—450 (390—430)
Синий	450—480 (430—470)
Голубой	480—510 (470—500)
Зеленый	510—550 (500—530)
Желто-зеленый	550—575 (530—560)
Желтый	575—585 (560—590)
Оранжевый	585—620 (590—620)
Красный	620—800 (620—780)

Излучение, которое характеризуется одной длиной волны¹, называется монохроматическим. Всякое сложное излучение представляет собой совокупность монохроматических излучений.

Если через трехгранную призму пропустить свет обычной электрической лампы накаливания, то этот свет будет разложен в сложный спектр, похожий на спектр солнечных лучей. Все раскаленные тела дают сложные спектры одного и того же вида с непрерывным переходом от одного цвета к другому. Такие спектры называются непрерывными, или сплошными. Газоразрядные лампы дают спектры, состоящие из одной или нескольких цветных линий; такие спектры называются линейчатыми. На рис. 2 приведены некоторые виды спектров, характерные для различных источников излучения. Графики показывают относительное распределение энергии лучистых потоков: на каждом графике за 100% принята величина (значение) максимальной монохроматической составляющей потока, все остальные значения определены относительно максимального.

Излучения различают по мощности (величине лучистого потока) и по спектральному составу; мощность характеризует из-

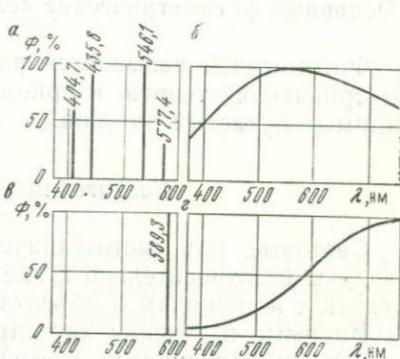


Рис. 2. Распределение лучистых потоков в спектрах различных источников:
а — ртутная газоразрядная лампа; б — солнечный свет; в — натриевая лампа; г — лампа накаливания

¹ Монохроматическое излучение характеризуется также частотой v или волновым числом n (преимущественно в инфракрасной спектроскопии):

$$\nu = \frac{C}{\lambda}; \quad n = \frac{1}{\lambda};$$

где C — скорость света. Единицей измерения частоты служит герц (Гц).

лучение с количественной стороны, а спектральный состав — с качественной.

С видимым излучением человек познакомился с помощью глаза. Поэтому основные свойства излучения, величины, количественно оценивающие излучение, единицы измерения были определены прежде всего для видимого спектра. Позднее (XIX век), когда было обнаружено излучение в областях спектра, непосредственно примыкающих к видимой области, была создана система энергетических величин и единиц измерения, оценивающих свойства невидимых лучистых потоков. Эти две независимые системы единиц связываются в настоящее время с помощью светового эквивалента мощности.

Основные фотометрические величины и единицы их измерения

Фотометрией называется раздел физической оптики, рассматривающий теорию и приемы исследования интенсивности видимых лучистых потоков.

Светотехнические величины

Световые, или светотехнические величины и единицы установлены безотносительно к цвету лучей, поэтому их можно применять к источникам и объектам любого цвета.

Видимые излучения характеризуются следующими светотехническими величинами: световым потоком, силой света, освещенностью, яркостью.

За основную светотехническую единицу принимается единица силы света — кандела — кд (в прежнем обозначении — свеча — св).

Кандела равна силе света, испускаемого с площади $1/600\,000\text{ м}^2$ сечения полного излучателя, в перпендикулярном этому сечению направлении, при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па (паскаля); при этом имеется в виду, что полный излучатель имеет одинаковую яркость во всех направлениях.

Силой света (I) называется угловая плотность светового потока; она представляет собой световой поток, приходящийся на единицу телесного угла, в котором поток распространяется.

Ощущимое представление о силе света может быть получено на некоторых примерах (табл. 1).

Яркостью (B) называется поверхностная плотность силы света (I) в заданном направлении.

Яркость зависит от силы света, которую испускает каждый элемент данной поверхности в направлении глаза наблюдателя. Яркостью поверхности называется отношение силы света потока, излучаемого в данном направлении, к проекции светящейся

Таблица 1

Сила света некоторых источников
(Шаронов, 1961)

Источники света	Сила света, кд	Источники света	Сила света, кд
Солнце	$3 \cdot 10^{27}$	Лучина	$1-10$
Луна	$6 \cdot 10^{17}$	Огонек спички	$0,5-2$
Лампа накаливания (обычная)	5—500	Тлеющая папироса	$10^{-3}-10^{-4}$
Лампа для карманных фонарей	0,5—3	Светячки (светящиеся жучки)	$10^{-2}-10^{-3}$
Керосиновая лампа	1—10	Искры (от костра, от трубы парохода)	$10^{-4}-10^{-5}$
Свеча (стеариновая)	0,5—2		

поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению:

$$B = \frac{I_\beta}{S_1 \cdot \cos \beta},$$

где S_1 — площадь излучающей поверхности; β — угол между нормалью к поверхности излучателя и заданным направлением.

За единицу яркости принята кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$). Кандела на квадратный метр равна яркости равномерно светящейся плоской поверхности площадью 1 м^2 при силе света 1 кд.

В табл. 2 приведены яркости некоторых освещенных предметов и источников света (Ильин и др., 1966; Эпштейн, 1975).

Таблица 2

Яркость некоторых источников света и освещенных предметов

Источники света	Яркость, $\text{кд}/\text{м}^2$	Источники света	Яркость, $\text{кд}/\text{м}^2$
Солнечный диск, наблю- даемый сквозь земную атмосферу	$1,5 \times 10^9$	Белая бумага, освещен- ная солнцем	$3,2 \times 10^4$
Дуга ксеноновой лампы сверхвысокого давле- ния:		Пламя стеариновой свечи	5×10^3
катодное пятно центр	2×10^{10}	Поверхность луны	$2,5 \times 10^3$
Нить лампы накаливания	1×10^9	Небо в пасмурную по- году	1×10^3
	$(1,5-30) \times$ $\times 10^6$	Экран кинотеатра	От 1×10^3 до 5
Люминесцентные лампы	$(3-11) \times 10^3$	Экран телевизора (уров- ень белого)	1×10^2
		Ночное безлунное небо	1×10^{-4}

Наибольшая яркость, безболезненно воспринимаемая нашим глазом, равна $\sim 16 \times 10^4$ кд/м²; наиболее чувствителен глаз к белому свету при яркостях 64—640 кд/м²; световой порог глаза по яркости равен $6,4 \cdot 10^{-7}$ кд/м².

Пространственное распределение световой энергии оценивается с помощью понятия о телесном угле. Телесный угол представляет собой часть пространства, ограниченную произвольной конической поверхностью. За единицу телесного угла принят стерadian.

Стерадиан (ср) равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Световым потоком называется часть лучистого потока, воспринимаемая глазом человека как свет. За единицу светового потока принят люмен (лм).

Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср.}$$

Представление о величине 1 лм дают следующие примеры: осветительная лампа в 127 В и 100 Вт излучает световой поток ~ 1200 лм, электрическая лампочка карманного фонаря излучает поток ~ 6 лм.

Световой поток

$$F = I \cdot \omega,$$

где ω — телесный угол.

Световая энергия W — это произведение светового потока на время его действия

$$W = F \cdot t.$$

Единица световой энергии — люмен-секунда (лм·с) — равна световой энергии светового потока 1 лм, действующего в течение 1 с.

Освещенностью называется поверхностная плотность падающего на поверхность светового потока

$$E = \frac{F}{S_2}.$$

За единицу освещенности принят люкс (лк). Люкс — это освещенность поверхности площадью 1 м² при падающем на нее световом потоке 1 лм.

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/1\text{м}^2.$$

В табл. 3 приведены примеры различных величин освещенности (Ильин и др., 1966).

Количество освещения H характеризует длительность освещения поверхности и выражается произведением $H = E \cdot t$.

Таблица 3

Величины освещенности при различных условиях

Условия освещенности	E , лк	Условия освещенности	E , лк
Земной поверхности в солнечный полдень летом	90 000	Земной поверхности при полной луне	0,2
Необходимая при точных работах	200	Земли в безлунную ночь	0,002
Необходимая для чтения и письма	50	Минимальная освещенность, воспринимаемая глазом на его зрачке	$1,4 \times 10^{-9}$
Создаваемая уличным освещением	10		

За единицу количества освещения принята люкс-секунда ($\text{лк}\cdot\text{с}$); это количество освещения, которое получает поверхность при освещенности ее в 1 лк в течение 1 с. В табл. 4 сведены основные световые величины и единицы.

Таблица 4

Световые величины и единицы

Величины	Единицы	Определение единиц
Сила света	Кандела (кд)	Основная единица
Световой поток	Люмен (лм)	$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$
Световая энергия	Люмен-секунда ($\text{лм}\cdot\text{с}$)	$1 \text{ лм}\cdot\text{с} = 1 \text{ лм} : 1 \text{ с}$
Яркость	Кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$)	$1 \text{ кд}/\text{м}^2 = 1 \text{ кд} : 1 \text{ м}^2$
Освещенность	Люкс (лк)	$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} : 1 \text{ м}^2$
Количество освещения	Люкс-секунда ($\text{лк}\cdot\text{с}$)	$1 \text{ лк}\cdot\text{с} = 1 \text{ лк} : 1 \text{ с}$

Энергетические величины

При измерении лучистой энергии во всем диапазоне электромагнитного спектра пользуются теми же понятиями (световой поток, сила света, яркость и т. д.), прибавляя к терминам прилагательное «энергетический».

В системе энергетических (лучистых) величин мощность излучения называется лучистым потоком (P). При равномерном излучении лучистой энергии

$$P = \frac{W}{t}.$$

Единицей измерения лучистого потока является ватт (Вт). Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Энергетической силой света (I_{Θ}) называется поток излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла, в пределах которого излучение распространяется:

$$I_{\Theta} = \frac{dP}{dW};$$

если лучистый поток равномерно распределен внутри телесного угла ω , то

$$I_{\Theta} = \frac{P}{W}.$$

Энергетическая сила света измеряется в ваттах на стерадиан (Вт/ср). Ватт на стерадиан равен энергетической силе света точечного источника, создающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт.

Энергетическая яркость выражается отношением энергетической силы света элемента излучающей поверхности к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения

$$B_{\Theta} = \frac{I_{\Theta}}{S_1 \cos \beta}.$$

Энергетическая яркость (лучистость) измеряется в ваттах на стерадиан — квадратный метр — Вт/(ср·м²). Ватт на стерадиан — квадратный метр равен энергетической яркости излучателя, перпендикулярно поверхности которого площадью 1 м² испускается свет энергетической силой 1 Вт/ср.

Энергетической освещенностью называется поверхностная плотность потока излучения, падающего на данную поверхность:

$$E_{\Theta} = \frac{dP}{dS_2};$$

где dP — лучистый поток, падающий на элемент поверхности.

Энергетическая освещенность (облученность) измеряется в ваттах на квадратный метр (Вт/м²). Ватт на квадратный метр равен энергетической освещенности поверхности площадью 1 м² при потоке падающего на него излучения 1 Вт.

Соотношения между светотехническими и энергетическими величинами

Светотехнические величины характеризуют только видимые (световые) лучистые потоки; энергетические величины относятся ко всем лучистым потокам, независимо от их качества, т. е. оценивают как видимые, так и невидимые излучения. Эти две

системы величин, как уже было отмечено выше, возникли и существуют независимо друг от друга. Однако при анализе световых (и цветовых) явлений, при сравнении световых потоков различного спектрального состава нередко возникает необходимость в переходе от одних величин к другим, в выражении световых величин в виде общих, энергетических. Такие преобразования и сопоставления осуществляются с помощью механического эквивалента света (или светового эквивалента лучистой энергии). Физический смысл этих эквивалентов может быть вполне ясен после рассмотрения некоторых явлений (и понятий, их объясняющих), связанных с взаимодействием различных световых потоков с человеческим глазом как приемником лучистой энергии. К таким понятиям прежде всего относятся: видность (или световая отдача), относительная видность (спектральная чувствительность).

Глаз человека относится к селективным приемникам: он неодинаково чувствителен к одинаковым по мощности монохроматическим излучениям различных длин волн. Чувствительность глаза к тому или иному монохроматическому излучению определяется той наименьшей мощностью, которая необходима, чтобы глаз начал воспринимать данное излучение. Практика показала, что наиболее чувствителен глаз человека к излучению с длиной волны 554 нм. Именно при этой длине волны необходима наименьшая энергетическая мощность лучистого потока, чтобы получить световое ощущение. Иными словами, при длине волны 554 нм глаз имеет наибольшую видность K_{\max} .

Если ограничить какую-то область излучения сложного спектра длинами волн λ и $\lambda + d\lambda$ и измерить поток этой части спектра в светотехнических и энергетических единицах, то тогда отношение светового потока, измеренного в люменах, к лучистому потоку, измеренному в Вт, будет равно:

$$K_{\lambda} = \frac{F}{P}.$$

Это отношение называется коэффициентом видности (K_{λ}) или световой отдачей излучения для данной длины волны.

Относительной видностью (V_{λ}) для данной длины волны называется отношение коэффициента видности при длине волны λ к максимальному значению этого коэффициента K_{\max} (при $\lambda=554$ нм):

$$V_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_{554}};$$

Минимальная мощность в ваттах, необходимая для создания светового потока в 1 лм при длине волны 554 нм, называется механическим эквивалентом света.

$$M = \frac{1}{K_{\max}} = 0,00146 \text{ Вт/лм.}$$

Этот эквивалент устанавливает связь между энергетическими и светотехническими единицами. Величина, обратная M , называется световым эквивалентом потока

$$K_{\max} = \frac{1}{M} = 681 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

Световой эквивалент устанавливает соотношение между единицей светового потока — люменом (лм) и единицей лучистого потока — ваттом (Вт) — и означает, что при длине волны $\lambda_0=554$ нм монохроматический лучистый поток в 1 Вт соответствует монохроматическому световому потоку (желто-зеленого цвета) в 681 лм.

В табл. 5 приведены значения относительной видности, принятые в 1924 г. Международной комиссией по освещению (МКО).

Таблица 5

Относительная видность (V_λ)
(спектральная чувствительность глаза)

Длина волны, в нм	V_λ	Длина волны, в нм	V_λ	Длина волны, в нм	V_λ
400	0,0004	530	0,862	660	0,061
410	0,0012	540	0,954	670	0,032
420	0,0040	550	0,995	680	0,017
430	0,0116	560	0,995	690	0,0082
440	0,023	570	0,952	700	0,0041
450	0,038	580	0,870	710	0,0021
460	0,060	590	0,757	720	0,00105
470	0,091	600	0,631	730	0,00052
480	0,139	610	0,503	740	0,00025
490	0,208	620	0,381	750	0,00012
500	0,323	630	0,265	760	0,00006
510	0,503	640	0,175	770	0,00003
520	0,710	650	0,107		

Значения V_λ представляют результат (среднее арифметическое) исследования зрения более 300 человек разного возраста, пола, профессии и национальности; эти значения приняты за стандарт, с которым выполняются все цветовые расчеты.

Максимум чувствительности человеческого глаза расположен, как можно видеть из сопоставления рис. 3 и 2, близко к максимуму излучения солнца. Это совпадение С. И. Вавилов (1950) считает вполне закономерным и объясняет как результат длительного эволюционного развития глаза и постепенного приспособления его к наилучшему восприятию света солнца, в лучах которого развивался животный и растительный мир на земле.

Некоторые сведения о строении и физиологии глаза человека

Глаз является важнейшим приемником оптического излучения. Глазное яблоко, близкое по форме к шару, снаружи окружено прочной защитной оболочкой белого цвета — склерой (рис. 4). Передняя часть склеры — роговица — прозрачна. Под склерой расположен слой, представляющий сосудистую оболочку, которая переходит в радужную оболочку (ирис). Ра-

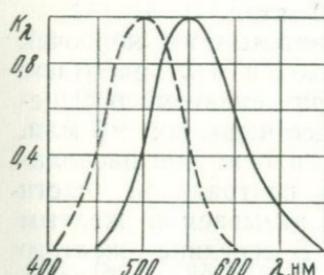


Рис. 3. Кривые относительной видности (спектральной чувствительности) глаза для дневного (сплошная линия) и сумеречного (пунктирная линия) зрения

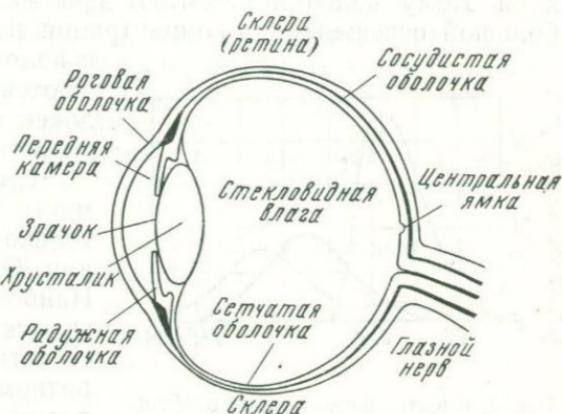


Рис. 4. Схема строения глаза

дужная оболочка глаза может быть различного цвета. Отверстие в ирисе образует зрачок глаза. Мышцы радужной оболочки могут изменять диаметр зрачка.

За радужной оболочкой находится хрусталик — прозрачное упругое студенистое тело, по форме напоминающее двояковыпуклую линзу.

Пространство между роговицей и хрусталиком — передняя камера глаза — заполнено студенистой жидкостью. Остальная полость глаза занята стекловидным телом.

Совокупность оптических сред глаза (роговицы, студенистой жидкости, хрусталика и стекловидного тела) составляет оптическую систему, которая создает изображение рассматриваемых предметов на задней внутренней поверхности глаза, где находится светочувствительная оболочка — сетчатка, или ретина.

Сетчатка глаза имеет светочувствительные элементы двух видов (рецепторы), которые в соответствии с их формой называются палочками и колбочками. Эти элементы содержат светочувствительные вещества, которые диссоциируют при действии

на них света. Родопсин (зрительный пурпур) диссоциирует в палочках, иодопсин — в колбочках. Образующиеся при диссоциации ионы вызывают импульсы тока в нервных клетках, с которыми связаны палочки и колбочки. Нервные клетки зрительного нерва передают полученные сигналы в зрительный центр головного мозга, который анализирует изображение на сетчатке.

Палочки имеют высокую чувствительность к свету; благодаря этому палочки работают при малой освещенности. При большой освещенности концентрация родопсина сильно падает

и палочки практически выключаются. Общее количество палочек в сетчатке составляет около 130 млн.

Чувствительность колбочек много ниже, и они работают только при сильном освещении. Общее число их ~ 7 млн. Наиболее плотно они располагаются в центральной части сетчатки, называемой желтым пятном. В середине желтого пятна, в так называемой центральной ямке, их концентрация особенно высока (палочки же в центральной ямке отсутствуют).

Рис. 5. Спектральные кривые возбуждения цветоощущающих центров глаза:

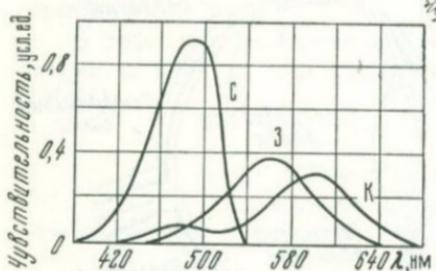
К — красный, З — зеленый, С — синий

чувствуют). Поэтому и разрешающая способность глаза — острота различения — выше всего в центре сетчатки. Еще одной характерной особенностью колбочек является их способность к различению цветов. Различение цветов осуществляется с помощью трех разновидностей иодопсина, имеющих различную чувствительность к излучениям разных длин волн (рис. 5). Соотношение сигналов от этих разновидностей иодопсина определяет воспринимаемый цвет излучения. Эта функция глаза, очень важная для количественного выражения цвета, в следующем разделе будет рассмотрена более детально.

Чувствительность глаза изменяется в зависимости от величины светового потока, попавшего в глаз. Способность глаза приспосабливаться к различным уровням яркости называется адаптацией.

Благодаря адаптации глаз способен работать в очень больших диапазонах яркости — от 10^{-7} до 10^5 кд/м². Колбочки работают при яркостях 10^{-3} — 10^5 кд/м², палочки — при 10^{-7} — 1 кд/м². При яркостях от 10^{-3} до 1 кд/м² колбочный и палочковый аппараты глаза работают совместно; при яркостях выше $1,6 \cdot 10^5$ кд/м² происходит ослепление глаза.

Глаз человека, как уже отмечалось выше, неодинаково чувствителен к монохроматическим излучениям разных длин волн,



15

причем спектральная чувствительность глаза различна при разных яркостях рассматриваемых объектов. На рис. 3 показаны кривые спектральной чувствительности глаза при дневном (чисто колбочковом) зрении и при сумеречном (палочковом) зрении. Максимум чувствительности при дневном зрении приходится на длину волны 554 нм; при снижении яркости кривая спектральной чувствительности, оставаясь такой же по форме, сдвигается в сторону коротких длин волн; при чисто палочковом зрении максимум чувствительности приходится на длину волны = 510 нм. Таким образом, при сумеречном зрении глаз более чувствителен к сине-голубым цветам, а не к оранжево-красным. Это обстоятельство следует иметь в виду и при визуальной оценке цвета в отраженном свете.

Одной из важнейших функций глаза является различение предметов и деталей предметов по их яркостному или цветовому контрастам.

Яркостный контраст объекта и фона, на котором наблюдается объект, характеризуется величиной

$$K = \frac{B_0 - B_\Phi}{B_\Phi},$$

где B_0 — яркость объекта

B_Φ — яркость фона.

Минимальная разность яркостей объекта и фона, при которой глаз еще может различать объект, называется пороговой разностью яркости — ΔB .

$$\Delta B = (B_0 - B_\Phi)_{\min}.$$

Отношение $\frac{\Delta B}{B_\Phi}$ называется пороговой контрастностью, а величина, ему обратная, называется контрастной чувствительностью глаза.

При малых яркостях фона контрастная чувствительность незначительна. По мере увеличения яркости фона контрастная чувствительность растет, а затем снова уменьшается, что объясняется слепящим действием фона. Наивысшая контрастная чувствительность глаза проявляется при яркостях фона примерно от 80 до 320 кд/м². Контрастная чувствительность глаза уменьшается в десятки раз при смещении изображения с желтого пятна на периферию сетчатки. Контрастная чувствительность глаза зависит также от угловых размеров объекта — она увеличивается по мере роста угла и при угле около 3,5° достигает максимума.

Величина контрастной чувствительности зависит от характера границы между объектом и фоном. Чем ближе друг к другу сравниваемые объекты, тем меньше пороговый контраст; если граница между сравниваемыми объектами не резкая, а

представляет собой полосу постепенного перехода от одной яркости к другой, порог контрастности увеличивается.

Глаз хорошо различает разные по величине яркости и с большой точностью устанавливает их равенство, но не может дать яркостям количественную оценку, т. е. во сколько раз или на какую величину отличаются разные яркости.

На принципе уравнивания яркостей объектов основано устройство визуальных фотометрических приборов для определения коэффициентов отражения минералов (фотометрические окуляры Волынского И. С., Халлимонда, микрофотометр Берека).

2. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ КОЛОРИМЕТРИИ

Колориметрией называется раздел цветоведения, в котором излагаются основные принципы, способы и приемы измерения цвета.

Различение цветов

Одной из важнейших функций зрения является различение цветов по их цветовому тону, чистоте цвета и яркости. Под цветовым тоном понимают то свойство цвета, которое позволяет исследователю отнести анализируемый цвет к тому или иному спектральному (монохроматическому) или к пурпурному цвету (смесь красного и фиолетового). Под чистотой цвета понимается степень заметности цветового тона в данном цвете. Спектральные и чисто пурпурные цвета имеют максимальную чистоту (1 или 100%); чистота цвета равна нулю для всех серых цветов — от белых до черных (так называемых ахроматических цветов, отличающихся только по яркости).

Практикой установлено, что число цветовых тонов, различаемых глазом в спектральных цветах, около 150, в пурпурных — около 30. В некоторых участках спектра (желтом и голубом) глаз человека чувствует изменение цветового тона при разнице в длинах волн всего лишь в 1 нм. Число замечаемых ступеней чистоты цвета от чисто спектрального до белого различно для разных излучений: для желто-зеленого 4, для синего и красного 20—25. Количество различаемых ступеней яркости достигает нескольких сотен. Таким образом, общее число различаемых глазом цветов, отличающихся по цветовому тону, чистоте и яркости, составляет несколько десятков тысяч. Глаз получает ощущение цвета только в условиях работы колбочкового аппарата сетчатки. При яркостях, меньших порога возбуждения колбочек (меньше 10^{-3} кд/м²), работают только палочки, и сплошной спектр воспринимается глазом только как различные градации серого цвета.

Способность восприятия глазом такого множества различных цветов объясняют в настоящее время теорией трехкомпонентного цветового зрения, согласно которой допускается существование в нашем глазу трех видов нервных аппаратов, трех цветоощущающих центров. Их принято называть красным, синим и зеленым центрами. Они реагируют на излучения различных длин волн, максимумы чувствительности их занимают разные положения в спектре и соответствуют трем основным цветам (см. рис. 5). Если на сетчатку глаза падает красный свет, возбуждается красный центр, и цвет воспринимается как красный; изолированные возбуждения зеленого или синего центров создают соответственно ощущения зеленого или синего цветов. В общем случае свет сложного спектрального состава возбуждает в различной степени три (или два) центра; глаз анализирует воздействующие на него спектры излучений, раздельно оценивая участие длинно-, средне- и коротковолновых лучей. В мозгу эти относительные величины красного, зеленого и синего излучений синтезируются и, в зависимости от соотношения поступивших в глаз световых потоков, мы ощущаем один результатирующий определенный цвет объекта¹. При сильном и одинаковом по интенсивности (яркости) возбуждении всех трех центров мы ощущаем белый цвет; впечатления серых, ахроматических цветов получаются также при одинаковых, но слабых возбуждениях всех трех центров.

Понятия «цвет» и «цветность»

Различные световые ощущения, как отмечалось выше, отличаются и в количественном (по яркости), и в качественном (по цветности) отношениях в зависимости от величины лучистого потока и спектрального состава. Необходимость в специальной системе величин для оценки излучения по интенсивности и цветности вытекает из следующих положений. Практикой установлено: 1) одинаковые по величине лучистые потоки могут вызывать в зависимости от спектрального состава различные по интенсивности световые ощущения, и, наоборот, одинаковые по интенсивности световые ощущения могут быть результатом воздействия на глаз различных по величине и спектральному составу излучений; 2) заданный спектральный состав излучения однозначно определяет то или иное ощущение цвета. Поэтому данные о спектральном составе (в нашем слу-

¹ Мысль о существовании в глазу трех родов светочувствительных аппаратов, по-разному реагирующих на свет разного спектрального состава, впервые была высказана М. В. Ломоносовым в 1756 г.; в дальнейшем трехцветная теория цветового зрения была значительно развита Юнгом и Гельмгольцем, затем Maxwellом, в наше время — Райтом и Гиллом; результаты последних двух исследователей приняты в 1931 г. за основу для характеристики цветового зрения.

чае — это кривые дисперсии отражения минералов) являются характеристикой цвета. Однако эти данные (и в форме таблиц, и в форме кривых) для каталогизации цвета громоздки и не дают непосредственного представления о цвете излучения (или объекта). Более того, каждому конкретному цвету может соответствовать бесчисленное множество кривых спектрального распределения лучистой энергии. Ввиду этих обстоятельств и возникает необходимость в специальной, числовой системе величин для оценки излучений по интенсивности и цветности.

Для количественной характеристики светового действия излучения колориметрия использует фотометрическую величину — яркость; качественное свойство излучения, оцениваемое по цветовому ощущению, называется цветностью излучения. Качественная и количественная характеристики излучения, вместе взятые, определяют понятие цвета. Иными словами, под термином «цвет» в колориметрии понимают такую физическую категорию, которая представляет собой результат ощущения, функционально зависящий от яркости и цветности излучения.

При визуальной оценке цвета яркость — количественная сторона цвета оказывает определенное влияние на восприятие цвета. Так, при снижении яркости цвета голубой цветности излучения представляются нам синими, розовой — бордовыми. Это обстоятельство всегда следует иметь в виду при сопоставлении результатов расчета цвета с визуальным восприятием.

Число параметров, определяющих цвет

Практикой установлены два основных положения колориметрии: 1 — любой цвет может быть уравнен смесью из определенных количеств любых трех взаимно независимых цветов, т. е. таких цветов, ни один из которых не может быть получен в результате смешения двух остальных; 2 — любой цвет может быть уравнен смесью белого света и какого-либо определенного монохроматического излучения.

Процедура уравнивания цвета с помощью прибора для измерения цвета — колориметра состоит в следующем. Одно из полей сравнения колориметра освещается исследуемым излучением, другое поле — тремя излучениями сравнения известных и взаимно независимых цветов. Изменяя величины потоков трех излучений сравнения, можно добиться полного уравнивания яркости и цветности обоих полей колориметра. Полученное равенство записывается в следующем виде: $C = c_1 + c_2 + c_3$, где C — цвет исследуемого излучения; c_1 , c_2 , c_3 — цвета излучений сравнения.

Три лучистых потока, цвет смеси которых равен исследуемому цвету, являются цветовыми составляющими анализируемого цвета. Однако в ряде случаев никакая комбинация потоков сравнения не дает в сумме цвет исследуемого потока.

В этом случае равенства полей фотометра можно достичнуть, если какой-либо из потоков сравнения прибавить к исследуемому потоку:

$$C + c_2 = c_1 + c_3$$

или

$$C = c_1 - c_2 + c_3.$$

Из полученного равенства следует, что понятие смешения цветов заключает в себе алгебраический смысл.

Второй способ уравнивания анализируемого цвета путем смешения белого света с монохроматическим по существу представляет собой также уравнивание цвета со смесью трех взаимно независимых цветов.

Известно, что белый свет может быть получен путем смешения в определенных количествах любых пар монохроматических излучений, связанных соотношением:

$$(\lambda_2 - 565,52) \cdot (497,78 - \lambda_1) = 223,02,$$

где λ_1 и λ_2 в нм.

Такие пары излучений называются дополнительными. Примеры взаимодополнительных цветов: $\lambda_2 = 600$ нм (красный) и $\lambda_1 = 491$ нм (голубой), $\lambda_2 = 580$ нм (желтый) и $\lambda_1 = 480$ нм (синий), $\lambda_2 = 570$ нм (желто-зеленый) и $\lambda_1 = 400$ нм (фиолетовый). Излучения средней части спектра от 570 до 494 нм дополнительных монохроматических излучений не имеют. Условно приняты в качестве дополнительных к этим монохроматическим зеленым излучениям пурпурные цвета. В сплошном спектре любого источника излучения пурпурные цвета отсутствуют; они могут быть получены при смешении самых крайних в видимом спектре красного и фиолетового цветов. Дополнительными к пурпурным цветам являются монохроматические зеленые излучения с $\lambda = 570 - 494$ нм.

Таким образом, смешение белого света с монохроматическим является также смешением трех независимых монохроматических излучений—двух дополнительных, дающих в сумме белый свет, и добавляемого к белому, монохроматического излучения. Из вышеизложенного следует, что каким бы способом ни определялся анализируемый цвет, для однозначной характеристики его необходимо и достаточно трех параметров, трех чисел. Это, опытом установленное положение, лежит в основе построения всех колориметрических систем. Параметры цвета могут быть выбраны различными способами, но обычно два из них определяют цветность излучения и один — яркость.

Основное положение колориметрии о необходимости и достаточности трех параметров для однозначного определения цвета находится в соответствии с теорией трехцветного зрения.

Основные колориметрические системы

Система параметров B, λ, p

Эта система колориметрии основана на получении любого цвета путем смешения белого света с монохроматическим излучением. Параметр B выражает яркость цвета; параметр λ называется цветовым тоном (в иностранных источниках — доминирующая длина волны) и соответствует длине волны спектрального цвета, который при разбавлении белым светом дает анализируемый цвет; третий параметр — p — чистота цвета определяет долю монохроматического излучения в общей смеси его с белым светом:

$$=d \frac{B_\lambda}{B} = \frac{B_\lambda}{B_\lambda + B_{\text{бел}}},$$

где B — общая яркость смеси, B_λ — яркость монохроматической составляющей, $B_{\text{бел}}$ — яркость белого света в смеси. Параметры λ и p определяют цветность цвета. Чистота цвета спектральных (монохроматических) цветов равна 100%, так как они не имеют примеси белого света. Для белого света $B\lambda=0$ и $p=0$; все ахроматические цвета также имеют $B\lambda=0$ и $p=0$. Чистота цвета всех промежуточных цветов может изменяться от 0 до 100%; чем менее насыщен цвет (более разбавлен белым светом), тем меньше чистота p .

Цветовой тон λ пурпурных цветов характеризуется длиной волны λ' того монохроматического излучения, которое является дополнительным к определяемому пурпурному цвету. Чистым пурпурным цветам приписывается чистота цвета $p=100\%$.

Система параметров B, λ, p очень наглядна, так как позволяет непосредственно получить представление о цвете излучения. Однако эта система непригодна для выполнения цветовых расчетов. Цветовые расчеты производятся с помощью трехцветных систем колориметрии: R, G, B или X, Y, Z .

Трехцветная система колориметрии R, G, B

Трехцветная система колориметрии была утверждена в 1931 г. Международным осветительным конгрессом (МОК). Эта система основывается на возможности получения любого цвета путем смешения каких-либо трех взаимно независимых цветов, принимаемых за основные. Основными монохроматическими излучениями МОК выбраны излучения со следующими длинами волн:

Красное (R) — 700,0 нм
Зеленое (G) — 546,1 нм¹
Синее (B) — 435,8 нм¹

¹ 546,1 нм и 435,8 нм — линии ртутного спектра.

Если рассеивающий белый экран осветить основными цветами, подобрав соответствующим образом их количественные соотношения, то экран будет казаться белым. Из опыта известно, что для получения белого света E соотношение яркостей основных цветов должно быть:

$$B_R : B_G : B_B = 1 : 4,5907 : 0,0601.$$

Соотношение смешиваемых лучистых потоков при этом равно:

$$\begin{aligned} P_R : P_G : P_B &= \frac{B_R}{K_R} : \frac{B_G}{K_G} : \frac{B_B}{K_B} = \frac{1}{0,00410} : \frac{4,5907}{0,98433} : \frac{0,0601}{0,01777} = \\ &= 243,9 \text{ Вт} : 4,633 \text{ Вт} : 3,384 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где K_R , K_G , K_B — относительная видность.

Из приведенного равенства следует, что единица красного лучистого потока $R = 243,9$ Вт, единица зеленого лучистого потока $G = 4,633$ Вт, единица синего — $B = 3,384$ Вт. R , G , B называют также единичными цветами. Таким образом, любой цвет C может быть представлен как смесь цветов R , G и B , взятых соответственно в количествах \bar{r} , \bar{g} и \bar{b} .

$$C = \bar{r}R + \bar{g}G + \bar{b}B.$$

Величины $\bar{r}R$, $\bar{g}G$ и $\bar{b}B$ называют цветовыми составляющими цвета C , числа \bar{r} , \bar{g} и \bar{b} — координатами цвета. Здесь и в дальнейшем изложении используются буквенные обозначения, термины и определения в соответствии с ГОСТ 13088-67 «Колориметрия, термины, буквенные обозначения». Эти обозначения могут отличаться от обозначений, использованных в более ранних публикациях.

Таким образом, координатами цвета называют три числа, показывающие, в каких количествах следует смешивать излучения, отвечающие единичным цветам, чтобы получить колориметрическое равенство с анализируемым цветом. Координаты цвета \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} полностью характеризуют цвет излучения по яркости и по цветности.

Если требуется определить только цветность излучения, то пользуются координатами цветности r , g , b .

$$r = \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} = \frac{\bar{r}}{m}; \quad g = \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} = \frac{\bar{g}}{m};$$

$$b = \frac{\bar{b}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} = \frac{\bar{b}}{m}.$$

Величину $m = \bar{r} + \bar{g} + \bar{b}$, представляющую собой алгебраическую сумму координат цвета, называют цветовым модулем. Сумма координат цветности всегда равна 1, поэтому независи-

мыми переменными, определяющими цветность, являются только две координаты цветности. Исходя из этого, любая цветность может быть изображена графически, и так как цветность определяется двумя параметрами, цветовые графики будут плоскими, в форме треугольника (рис. 6, 7).

Для решения большинства колориметрических задач, в которых имеют дело с излучениями, где спектральный состав за-

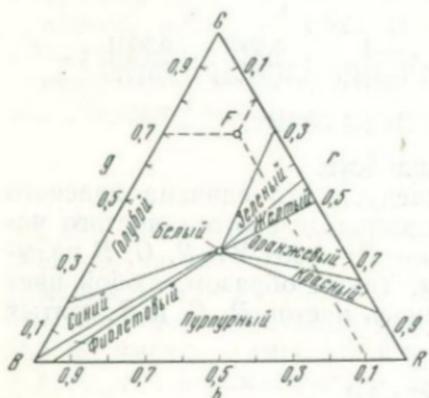


Рис. 6. Цветовой треугольник:

R, G, B — единичные основные цвета; F — точка с координатами цветности r, g, b

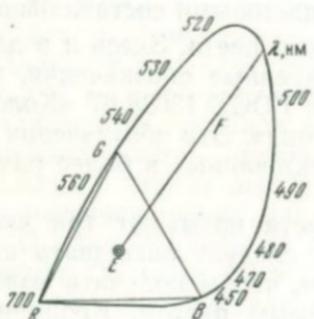


Рис. 7. Цветовой график в системе R, G, B : выпуклая замкнутая кривая линия с обозначениями длин волн — линия спектральных и чистых пурпурных цветов; площадь, описываемая этой линией, — поле реальных цветов; E — положение источника белого света равнозернистого излучения; F — точка цветности объекта

дан соотношением спектральных мощностей излучений в ватах, необходимо иметь значения координат цвета для всех спектральных излучений, рассчитанных на единицу мощности — 1 ватт. Такие координаты называются удельными и обозначаются $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$, $\bar{r}(\lambda) = \frac{\bar{r}}{P}; \bar{g}(\lambda) = \frac{\bar{g}}{P}; \bar{b}(\lambda) = \frac{\bar{b}}{P}$.

Значения координат цветности — r, g, b и удельных координат цвета — $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda)$ и $\bar{b}(\lambda)$ для монохроматических излучений от 380 до 780 нм определены через 5 нм и утверждены МОК в 1931 г. в виде соответствующих таблиц.

Колориметрическая система R, G, B позволяет решать многие задачи колориметрии, в том числе и определение характере-

ристик цвета несамосветящегося объекта по спектрам отражения. Однако эта система имеет ряд существенных неудобств. Одно из них — относительная сложность цветовых расчетов из-за наличия отрицательных координат. Поэтому одновременно с утверждением таблиц трехцветных коэффициентов r , g , b в том же 1931 г. МОК рекомендовал и принял новую систему колориметрических параметров X , Y , Z опирающуюся на систему R , G , B и свободную от недостатков последней.

Колориметрическая система X , Y , Z

Цветовые расчеты, производимые в системе, X , Y , Z , выполняются так же, как и в системе R , G , B с помощью трех исходных цветов. Но в отличие от системы R , G , B , основные цвета этой системы не являются реальными, воспроизводимыми излучениями — каждый из этих трех новых цветов представляет собой комбинацию цветов R , G , B . Выбор основных единиц новой системы осуществлялся при удовлетворении следующих условий:

- 1) ни один спектральный и ни один реально существующий цвет не должен иметь отрицательных координат. В результате выполнения этого условия основные цвета системы оказываются не реально существующими, а имеют чисто расчетный смысл;
- 2) только одна новая единица Y должна определять яркость, единицы X и Z должны быть по яркости равны нулю;
- 3) для белого света E все координаты должны быть равны между собой (как в системе R , G , B).

Для новых единичных основных цветов, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям, были получены следующие выражения:

$$X = 0,4184R - 0,0912G + 0,0009B;$$

$$Y = -0,1587R + 0,2524G - 0,0025B;$$

$$Z = -0,0828R + 0,0157G + 0,1786B.$$

Яркость новых единичных цветов X , Y , Z соответственно выражается:

$$B_x = 0,4184 \cdot 1 - 0,0912 \cdot 4,5907 + 0,0009 \cdot 0,0601 = 0;$$

$$B_y = -0,1587 \cdot 1 + 0,2524 \cdot 4,5907 - 0,0025 \cdot 0,0601 = 1;$$

$$B_z = -0,0828 \cdot 1 + 0,0157 \cdot 4,5907 + 0,1786 \cdot 0,0601 = 0.$$

По аналогии с системой R , G , B любой цвет C в системе X , Y , Z выражается уравнением:

$$C = \bar{x}X + \bar{y}Y + \bar{z}Z,$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} — числа единичных цветов X , Y , Z . Эти числа являются координатами цвета.

Координаты цветности:

$$x = \frac{\bar{x}}{m}; \quad y = \frac{\bar{y}}{m}; \quad z = \frac{\bar{z}}{m};$$

где $m = \bar{x} + \bar{y} + \bar{z}$ — цветовой модуль. Так как $x + y + z = 1$, то независимыми переменными являются только две координаты, обычно x и y .

В системе X, Y, Z яркость цвета равна координате \bar{y} .

На рис. 8 показан цветовой график в системе X, Y, Z . Основные цвета X, Y, Z располагаются в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника.

В прямоугольной вершине находится цвет Z . В центре тяжести треугольника расположен белый цвет E . Линия спектральных цветов расположена внутри треугольника X, Y, Z . Прямоугольные координаты x и y любой точки C треугольника совпадают с координатами цветности цвета, который изображается точкой C . Координаты белого цвета

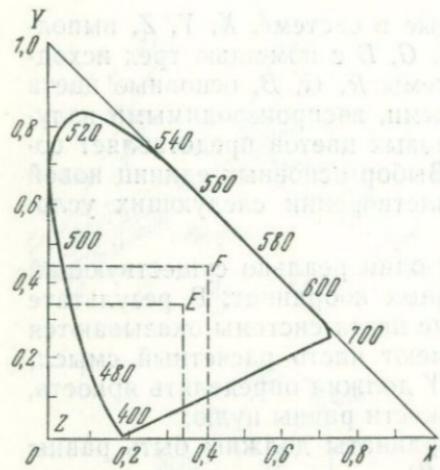


Рис. 8. Цветовой график в системе X, Y, Z :

E — положение на графике равнозенергетического источника белого света; F — произвольная точка

$$E = x = y = \frac{1}{3}.$$

Обычно сам треугольник X, Y, Z на графике не показывают. Цветовой график строят в виде прямоугольного графи-

ка xy . На график наносятся сетки прямых и кривых линий (рис. 9, 10, 11) для определения по известным x и y цветового тона λ и чистоты цвета p . Сетки строятся следующим образом: прямые линии соединяют точку белого света (A, B, C или E) с точками кривой спектральных цветов через равные интервалы длин волн, обычно через 10 нм. Все точки, лежащие на некоторой прямой, соединяющей точку белого света с точкой λ на кривой спектральных цветов, имеют цветовой тон λ .

Кривые представляют собой линии равной чистоты цвета. Они проводятся через равные интервалы чистоты цвета, обычно через $\Delta p = 0,05$ (или 5%). В области пурпурных цветов, как уже отмечалось выше, цветовой тон характеризуется длиной волны λ' дополнительного излучения. Длины волн λ' указаны на прямой линии 400—700 нм чистых пурпурных цветностей.

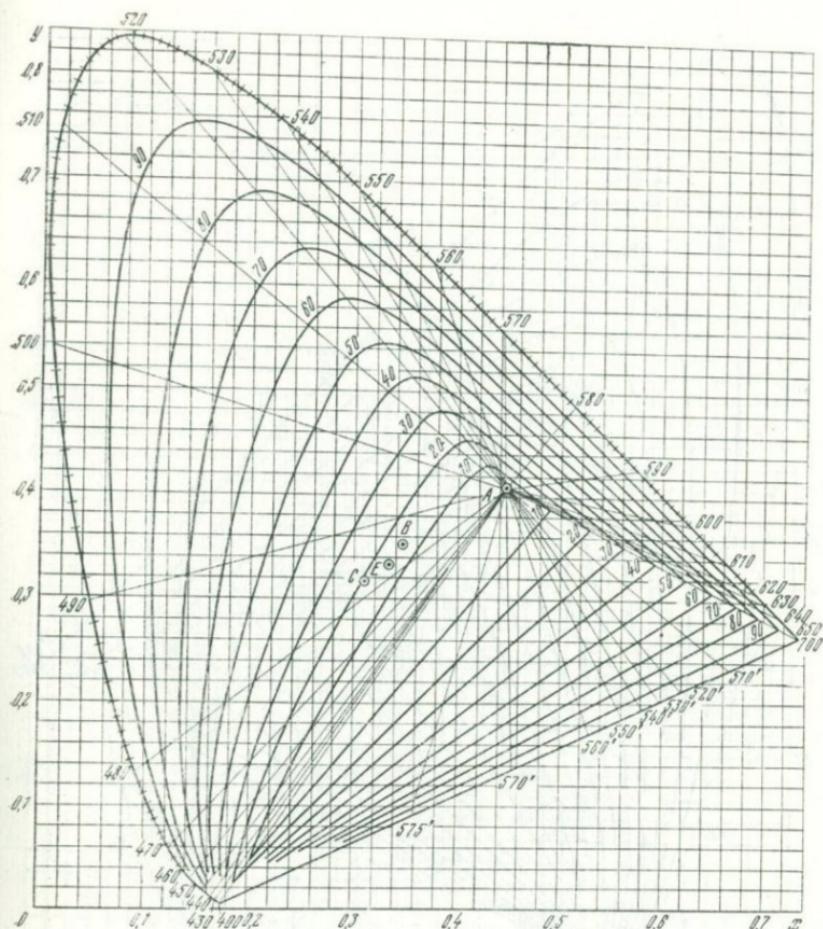


Рис. 9. График для перехода от координат цветности x , y к цветовому тону (λ) и чистоте цвета (p) при источнике A

Цветовые расчеты

Расчет цвета самосветящегося объекта

Из законов колориметрии известно, что каждое излучение является смесью монохроматических излучений, а координаты цвета смеси равны суммам координат цветов смешиваемых компонент. Если разложить сложное излучение на спектральные составляющие с мощностью $I(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ каждое, тогда цвет $\Delta\Phi(\lambda)$ каждой составляющей можно представить

$$\Delta\Phi(\lambda) = I(\lambda)\Delta\lambda[\bar{x}(\lambda)\cdot X + \bar{y}(\lambda)\cdot Y + \bar{z}(\lambda)\cdot Z].$$

Для того чтобы определить цвет Φ всего излучения, нужно произвести суммирование

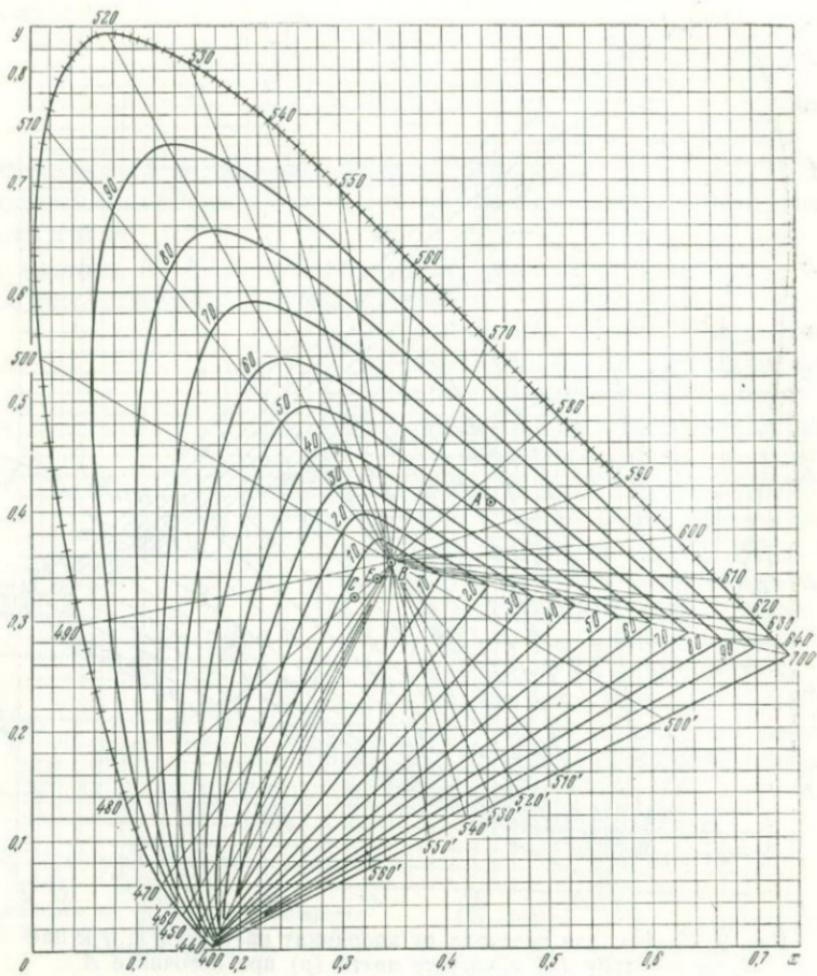


Рис. 10. График для перехода от координат цветности x, y к цветовому тону (λ) и чистоте цвета (p) при источнике B

$$\begin{aligned}\Phi &= \Sigma \Delta \Phi(\lambda) = \Sigma I(\lambda) \Delta \lambda [\bar{x}(\lambda) \cdot X + \bar{y}(\lambda) \cdot Y + \bar{z}(\lambda) \cdot Z] = \\ &= X \Sigma \bar{x}(\lambda) I(\lambda) \cdot \Delta \lambda + Y \Sigma \bar{y}(\lambda) I(\lambda) \cdot \Delta \lambda + Z \Sigma \bar{z}(\lambda) I(\lambda) \cdot \Delta \lambda =\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{где } \bar{x} &= \Sigma \bar{x}(\lambda) I(\lambda) \cdot \Delta \lambda, \\ \bar{y} &= \Sigma \bar{y}(\lambda) I(\lambda) \cdot \Delta \lambda, \\ z &= \Sigma z(\lambda) I(\lambda) \cdot \Delta \lambda\end{aligned}$$

являются координатами цвета Φ . В случае сплошного спектра излучения суммы заменяются интегралами:

$$\bar{x} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{x}(\lambda) I(\lambda) \cdot d\lambda; \quad \bar{y} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{y}(\lambda) I(\lambda) \cdot d\lambda; \quad \bar{z} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{z}(\lambda) I(\lambda) \cdot d\lambda;$$

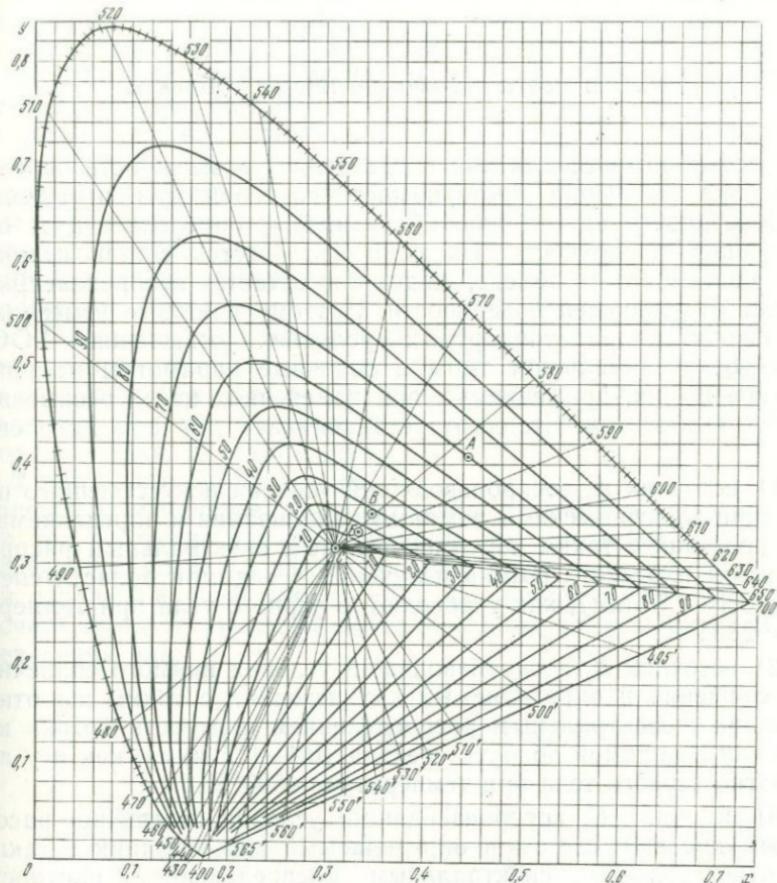


Рис. 11. График для перехода от координат цветности x, y к цветовому тону (λ) и чистоте цвета (p) при источнике C

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ в этих выражениях — кривые сложения трехцветной системы X, Y, Z — представляют собой удельные координаты цвета.

Приведенные выражения являются формулами расчета координат цвета x, y, z произвольного излучения по его спектральному составу. Из координат цвета вычисляют трехцветные координаты x, y, z , определяющие цветность излучения; они вычисляются из отношения каждой координаты цвета — $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ к сумме всех трех:

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}; \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}; \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}.$$

Далее по трехцветным координатам x и y на цветовом графике находят цветовой тон λ и чистоту цвета p .

Расчет цвета несамосветящегося объекта

Особый интерес для нас представляет возможность определить цвет излучения, претерпевшего на своем пути отражение от поверхности какого-либо объекта, т. е. определить цвет отражающей поверхности. Но пока не известен состав излучения, падающего на объект, до тех пор остается неопределенным и цвет отражающей поверхности. Поэтому цветовые измерения производятся при стандартных условиях освещения. ГОСТ 7721—61 устанавливает типы и основные параметры источников освещения, применяемых при измерениях цвета несамосветящихся объектов. Стандарт устанавливает три источника света:

1) источник A , воспроизводящий условия искусственного освещения электрическими лампами накаливания и определяемый как источник с таким же относительным спектральным распределением плотности потока излучения в видимой области спектра ($0,4$ — $0,7$ мкм), как у абсолютно черного тела при температуре 2854°K ;

2) источник B , воспроизводящий условия прямого солнечного освещения и определяемый как источник с таким же относительным спектральным распределением плотности потока излучения в видимой области спектра ($0,4$ — $0,7$ мкм), как и у абсолютно черного тела при температуре 4800°K ;

3) источник C , воспроизводящий условия освещения рассеянным дневным светом и определяемый как источник с таким же относительным спектральным распределением плотности потока излучения в видимой области спектра ($0,4$ — $0,7$ мкм), как и у абсолютно черного тела при температуре 6500°K .

В качестве источника A применяется газополная лампа накаливания с вольфрамовой нитью, питаемая определенным напряжением, обеспечивающим необходимую цветовую температуру нити накала. В качестве источников B и C применяется источник типа A с соответствующими светофильтрами. Стандарт определяет распределение плотности потока излучения для источников A , B и C в спектральном диапазоне. Кроме этих источников белого света используется также и источник света E . Спектральная интенсивность его постоянна в пределах видимого участка спектра (равноинтенсивный источник).

Международной Комиссией в 1931 г. установлены координаты цветности источников A , B и C (табл. 6) (Гуревич, 1950, 1968).

Так как состав излучения стандартных источников белого света A , B , C и E точно установлен, т. е. известны относительные мощности спектральных составляющих $I(\lambda)$ на всем участке видимого спектра, то при расчете цвета пользуются одним из них. Для того чтобы рассчитать цвет отражающего или пропускающего свет объекта, необходимо знать его оптические свойства; при расчете цвета отражающей поверхности должны быть известны коэффициенты отражения поверхности в видимой области спектра $R(\lambda)$, при расчете цвета пропускающей поверхности — коэффициенты пропускания $\tau(\lambda)$. Таким образом, цвет образца отождествляется с цветом определенного излучения, т. е. источника A , B или C (белый свет), претерпевшего изменение при отражении от поверхности образца или при прохождении через образец. Это изменение спектральной интенсивности I_A излучения определяет множитель $R(\lambda)$ при отражении и множитель $\tau(\lambda)$ при пропускании, тогда при расчете цвета отражающей поверхности выражения будут иметь следующий вид:

$$\bar{x} = \int_{\lambda=380 \text{ нм}}^{\lambda=780 \text{ нм}} \bar{x}(\lambda) R(\lambda) \cdot I_A \cdot d\lambda;$$

$$\bar{y} = \int_{\lambda=380 \text{ нм}}^{\lambda=780 \text{ нм}} \bar{y}(\lambda) R(\lambda) \cdot I_A \cdot d\lambda; \quad \bar{z} = \int_{\lambda=380 \text{ нм}}^{\lambda=780 \text{ нм}} \bar{z}(\lambda) R(\lambda) \cdot I_A \cdot d\lambda.$$

Буква A при I означает, что при расчете использовался белый свет источника A . Для определения интегралов наиболее удобен метод вычисления произведений типа $\bar{x}(\lambda) R(\lambda) \cdot I_A$ через равные промежутки длин волн и затем суммирование. Спектральная интенсивность стандартных источников белого света известна и дается в справочниках колориметрии в виде таблиц.

Также в виде таблиц, составляемых через равные промежутки длин волн, даются значения удельных координат $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Можно также пользоваться таблицами заранее составленных произведений $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ на интенсивность источников I_A , I_B , I_C и при цветовых расчетах перемножать их с $R(\lambda)$ или $\tau(\lambda)$. В зависимости от скорости изменения $R(\lambda)$ или $\tau(\lambda)$ можно пользоваться таблицами, составленными через 5, 10

Таблица 6
Значение координат цветности
источников A , B , C

Источники	Координаты цветности	
	x	y
A	0,4476	0,4075
B	0,3484	0,3516
C	0,3101	0,3162

или 20 нм. Таблицы составляются таким образом, чтобы интегральный коэффициент отражения или пропускания измеряемого образца не требовал дополнительных вычислений. Это возможно потому, что координата \bar{y} пропорциональна световому потоку, отраженному от поверхности, а выражение

$$\int_{\lambda=380 \text{ нм}}^{\lambda=780 \text{ нм}} \bar{y}(\lambda) \cdot I_A \cdot d\lambda$$

пропорционально световому потоку, падающему на поверхность от источника. Их отношение является интегральным коэффициентом отражения поверхности R

$$R = \frac{\int \bar{y}(\lambda) R(\lambda) \cdot I_A \cdot d\lambda}{\int \bar{y}(\lambda) \cdot I_A \cdot d\lambda},$$

где R выражен в процентах, если знаменатель дроби равен 100. Это условие и определяет дополнительные требования к таблицам произведений

$$\bar{x}(\lambda) \cdot I_A; \bar{y}(\lambda) \cdot I_A; \bar{z}(\lambda) \cdot I_A.$$

Это требование легко выполнимо, так как для спектрального состава любого источника света характерно только соотношение интенсивностей.

Все цветовые расчеты составлены таким образом, чтобы координата \bar{y} цвета излучения, отраженного от поверхности или прошедшего через образец, оказывалась равной R или τ , т. е. интегральному коэффициенту отражения или пропускания. Сама процедура расчета полностью аналогична описанной выше для самосветящегося объекта.

Кроме описанного метода расчета цвета, существует другой прием — «способ избранных ординат», который был впервые введен П. Л. Чебышевым. При расчетах по этому методу раз и навсегда устанавливаются длины волн «избранных ординат». С кривой $R(\lambda)$ или $\tau(\lambda)$ снимаются коэффициенты отражения (или пропускания), соответствующие длинам волн избранных ординат; эти значения складываются и сумма умножается последовательно на три постоянных множителя (множители различны для разных источников белого света). Полученные произведения представляют собой значения координат цвета x , y , z . Специальные таблицы избранных ординат составлены для источников A , B , C и E , число ординат, в зависимости от формы кривой отражения, может быть 10, 30 и 100 (Гуревич, 1950).

Этот способ позволяет сократить и упростить вычисления, однако он не получил широкого распространения, так как менее точен и предполагает наличие сплошной кривой отражения (или пропускания) для всего видимого спектра.

Оценка цветовых различий

Рассмотренные в предыдущих разделах книги понятия и категории колориметрии основаны на принципе уравнивания цвета с соответствующей смесью основных цветов. Другим важным вопросом колориметрии является оценка цветовых различий. Цвет есть результат нашего зрительного ощущения, колориметрия для оценки цветовых различий пользуется физиологическим понятием «цветового» порога ощущения. Цветовым порогом называется наименьшее изменение цвета, которое глаз еще может заметить. Определив число порогов, разделяющих два цвета, можно этим числом характеризовать различие между цветами. В колориметрии различия цветов обычно рассматриваются при одинаковой яркости, т. е. в действительности оцениваются различия цветностей. Поэтому под цветовым порогом понимается минимально различимое изменение цветности.

Цветовой порог может быть выражен через величины Δx и Δy пороговых изменений координат цветности: $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ и изображен на цветовом графике в виде совокупности радиусов-векторов, имеющих начало в точках цветности x, y , и концы — в точках графика с координатами $(x+\Delta x)$ и $(y+\Delta y)$. Геометрическое место векторов образует замкнутую кривую вокруг точки x, y . Эти кривые, как показали экспериментальные исследования Мак-Адама (Mac Adam, 1942), имеют форму эллипсов. В разных точках цветового графика эллипсы цветовых порогов различны по величине и имеют разные направления (рис. 12). В центре графика, вблизи точек цветностей источников белого света, величины эллипсов близки для всех цветов. Это обстоятельство очень важно, так как большая часть рудных минералов характеризуется низкой чистотой цвета, p .

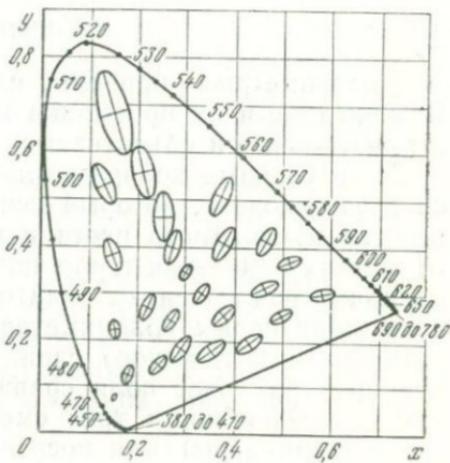


Рис. 12. Диаграмма хроматичности с пороговой чувствительностью (по Мак. Адаму, 1942)

Измерение цвета

В предыдущем разделе были рассмотрены принципы и приемы расчета цвета объекта (светового потока или отражающей поверхности); такие расчеты возможны, если известны спектральные коэффициенты отражения поверхности и распределение энергии в спектре источника излучения. При отсутствии таких данных и в тех случаях, когда в точных цветовых расчетах нет необходимости, цвет объекта может быть измерен непосредственно с помощью предназначенных для этой цели приборов — колориметров или определен путем сравнения с накрасками (цветными полями) цветовых атласов.

Колориметры

Колориметры — приборы, служащие для измерения цвета. В зависимости от приемника излучения различают колориметры визуальные и объективные.

В визуальных колориметрах приемником излучения является глаз человека, который используется для установления равенства измеряемого цвета и цвета сравнения. В зависимости от метода изменения цвета полей сравнения среди визуальных колориметров выделяют аддитивные и субтрактивные.

В аддитивных колориметрах цвет поля сравнения изменяется путем оптического сложения нескольких цветов. В этих колориметрах цвет поля сравнения может изменяться за счет изменения мощности трех смешиваемых излучений (трехцветные колориметры) или посредством смешения белого цвета с монохроматическим излучением (монохроматические колориметры).

В субтрактивных колориметрах цвет смеси сравнения получают путем последовательного вычитания из белого света красной, зеленои и синей составляющих с помощью трех цветных клиньев. Недостатком визуальной колориметрии является зависимость результатов от характеристик цветового зрения людей, производящих измерения.

В объективных колориметрах роль глаза выполняют фотодетекторы. Объективные колориметры дают возможность упростить процесс измерения, наблюдатель не утомляется при проведении большого числа измерений и результаты измерений не зависят от особенностей его зрения.

Цветовые атласы

В практике, кроме описанных выше инструментальных способов определения и расчета цвета, иногда применяется упрощенный способ определения цвета окрашенной поверхности с помощью цветовых атласов.

Цветовой атлас представляет собой альбом, в котором собрано большое число цветных и ахроматических накрасок, расположенных в определенном порядке и имеющих соответствующие характеристики. В накрасках атласов обычно имеются отверстия, позволяющие накладывать их на поверхность, цвет которой нужно определить. При одинаковых условиях освещения цвет накраски сопоставляется с цветом этой поверхности.

Цветовые атласы получили широкое распространение в начале XX века, когда состояние теории и практики колориметрии было недостаточно высоким. Особенно широкое применение они нашли в Германии и США (атласы Манселла и Оствальда). В СССР цветовые атласы были изданы в 1937 и 1948 гг. для стандартизации рецептов архитектурных красок; в 1956 г. был издан атлас цветов, разработанный профессором Е. Б. Рабкиным. В этом атласе все цветовые поля характеризуются координатами цветности в системе X , Y , Z ; кроме того, для всех цветов приведены цветовой тон, чистота цвета и коэффициент отражения.

В 1965 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева был разработан под руководством Юстовой Е. Н. и издан в 1966 г. колориметрический атлас, он содержит 129 цветовых образцов. Для каждого образца в атласе приводятся: коэффициенты отражения в диапазоне 400—700 нм через 20 нм, координаты цвета x , y , z и координаты цветности x и y для источников белого света A , B , C . Изменение коэффициентов отражения образцов производилось на спектрофотометре СФ-10.

Глава II.

ЦВЕТ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ

В минерографической методике изучения рудных минералов в последние годы отмечается значительный прогресс; этому способствовало появление более совершенной измерительной аппаратуры, благодаря которой в микроскопию отраженного света прочно вошли количественные методы. Одним из главных методов является получение спектров отражения, которые служат основой и для количественной интерпретации цвета минералов.

В 1975 г. на русский язык было переведено фундаментальное руководство по минерографии Р. Галопена и Н. Генри «Исследование непрозрачных минералов под микроскопом» (Galopin, Hengy, 1972). В этом руководстве детально изложены теоретические основы отраженного света, знание которых необходимы для понимания существа цветовых явлений, возникающих при наблюдении минералов в отраженном свете. Поэтому авторы на теоретических основах не останавливаются, а приводят материалы, имеющие отношение к практическим приемам измерения коэффициентов отражения и к технике выполнения расчетов цвета.

Как отмечалось ранее, цветовые явления имеют место при наличии двух элементов: источника излучения и приемника (человеческого глаза). Роль глаза в анализе цветовых явлений была рассмотрена в предыдущей главе.

Источниками излучения принципиально могут быть все тела, которые испускают, отражают или пропускают свет. Тела, испускающие свет (самосветящиеся), в физике условно принято называть первичными источниками излучения, а сре́ды или тела, отражающие (или пропускающие) падающие на них лучи, — вторичными. Все понятия и законы цветоведения одинаково приложимы к обоим типам источников.

Рудные минералы в большинстве случаев представляют светопоглощающие объекты, которые изучаются под микроскопом в отраженном свете, поэтому все дальнейшее обсуждение цвета рудных минералов будет относиться к наблюдению объектов в условиях зеркально отраженного поляризованного света.

Если минерал в какой-то степени прозрачен, то он не только отражает падающий на него световой поток, а часть лучей этого потока проникает вглубь и отражается в виде бликов от случайных поверхностей, которые имеются внутри кристалла.

Такими поверхностями могут быть включения, трещины спайности, контакты. Это диффузный свет, который в минерографии принято называть внутренними рефлексами. Степень проявления (светопроницаемость) и цвет внутренних рефлексов используются при диагностике минералов, но только как качественные категории. Количественную оценку внутренних рефлексов из-за случайного характера их проявления имеющимися в настоящее время средствами производить невозможно.

Величина отражения минерала является константой, которая зависит от показателей преломления и поглощения минерала и может быть непосредственно измерена. Так же как показатели преломления и поглощения, величина отражения может быть неодинаковой для разных длин волн. Это явление называется дисперсией отражения.

Если поверхность отражает (или пропускает) световой поток таким образом, что спектральные коэффициенты отражения (пропускания) для всех длин волн видимой области одинаковы, то такая поверхность неизбирательно отражает (пропускает) световой поток и называется ахроматической. Ахроматические поверхности и тела не изменяют при отражении (пропускании) света соотношения между излучениями различных длин волн, при визуальном наблюдении в микроскоп они выглядят бесцветными — белыми, если коэффициент отражения высокий ($\sim 60\%$ и более) и в различной степени серыми, если коэффициент отражения $\sim 40\%$ и менее.

Тела и среды хроматические характеризуются избирательным отражением (пропусканием) и имеют при освещении белым светом тот или иной цвет вследствие того, что в отраженном от хроматических поверхностей пучке лучей будет иное распределение энергии, чем в падающем. К хроматическим цветам относятся все наблюдаемые нами цвета, кроме черного, белого и серых.

Следует напомнить, что прозрачные и в какой-то степени пропускающие минералы в отраженном свете имеют цвет дополнительный к цвету минерала в образце, в порошке, в проходящем свете (а также к цвету внутренних рефлексов). Так, красная киноварь в отраженном свете выглядит голубоватой и имеет красные внутренние рефлексы.

Приемниками отраженного света могут быть либо наш глаз при визуальных наблюдениях, либо светочувствительные элементы, используемые в фотометрии. Необходимо учитывать, что все приемники в свою очередь имеют различную избирательную восприимчивость по спектру. В современных фотометрических приборах в качестве светочувствительных детекторов используются электронные фотоумножители (ФЭУ). Таким образом, показатели ФЭУ будут определяться составом отраженного пучка и кривой чувствительности данного воспринимающего элемента.

1. КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЦВЕТА РУДНЫХ
(СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ) МИНЕРАЛОВ

Большинство светопоглощающих минералов при наблюдении в микроскоп отраженного света выглядят почти бесцветными с бледными довольно неопределенными оттенками, главным образом желтых, розоватых, зеленоватых и голубоватых тонов. Эти оттенки индивидуальны практически почти для каждого минерального вида и поэтому являются одним из наиболее характерных диагностических признаков. Однако, именно большое разнообразие очень слабых оттенков и затрудняет оценку цвета минерала.

На разных этапах развития минерографии неоднократно предпринимались попытки усовершенствовать способы распознавания и классификации хроматических свойств отраженного от минерала светового потока. Первые предложения сводились к разработке цветовых атласов и таблиц, однако такими приемами лишь приближенно оценивалась только качественная сторона наблюдавшихся эффектов.

С развитием метода измерения спектральных коэффициентов отражения появилась возможность количественно характеризовать цвет с помощью колориметрических систем, принятых в цветоведении.

В 1927 г. Ж. Орсель (Orcel, 1927, 1930) впервые предложил характеризовать цвет минерала данными о дисперсии его отражения. В настоящее время над этой проблемой работают уже многие исследователи. Микрофотометрия прочно входит в методику минерографии, кривые спектрального распределения интенсивности отражения являются основным средством современной диагностики светопоглощающих минералов под микроскопом.

В Советском Союзе идеи Ж. Орселя активно развивал И. С. Волынский (1949, 1959, 1966). В 1955 г. им была составлена цветная таблица — систематика минералов по отражению, долгое время служившая в качестве наглядного определителя.

В методическом руководстве И. С. Волынского (1966, с. 127—137) приведен анализ спектральных кривых для определения цвета минерала. При характеристике цвета И. С. Волынский предлагал строго разграничивать понятия светлоты (величины отражения) и цветности; большое внимание уделялось категориям относительных величин, как меры оценки многих оптических контрастов: относительной светлоты разных минералов ($\Delta R_{\lambda_1, 2}$ отн.), силы двоотражения и ее дисперсии у анизотропных минералов ($\Delta R_{\lambda_g, p}$ отн.), насыщенности цветового

тона ($\Delta R_{\lambda_1, 2}$ отн.) и др. Однако состояние методики измерения коэффициентов отражения в 50-е годы и отсутствие необходимого фактического материала ограничивали возможности развития нового прогрессивного направления в исследовании оптических свойств. Лишь в самое последнее время в связи с прогрессом в методике исследования спектров отражения стало возможным строго количественно интерпретировать главные оптические свойства, наблюдаемые в отраженном поляризованном свете; и выразить цвет в числовой форме на основе разработанных в цветоведении колориметрических систем.

Принципы, возможности и преимущества расчетов цвета по результатам измерения спектральных коэффициентов отражения описаны в статьях Х. Пиллера (Piller, 1966, 1974), В. Хтейна и Р. Филлипса (Htein, Phillips, 1973) и в проспектах фирм «Оптон» (Les bases de la colorimetrie), C. Zeiss (Pamphlet 60—669/1, 1962). Х. Пиллер, В. Хтейн и Р. Филлипс рекомендуют использовать для точного количественного определения цвета понятия и методики, предложенные Международной Комиссией по освещению (МКО)¹.

Принципы цветовой системы МКО изложены в первой главе настоящей книги. Для того чтобы использовать их для точного определения цвета рудных минералов в отраженном свете, Х. Пиллер дает в своих статьях практические советы о способах и приемах расчетов, обсуждает пороговую чувствительность метода, влияние иммерсии на величину координат цветности, приводит конкретные примеры определения цветовых величин для ряда рудных минералов; координаты цветности, цветовой тон и чистота цвета (цветовые единицы Гельмгольца) сопоставляются с приведенной в монографии П. Рамдора (1962) качественной характеристикой визуально наблюдаемого цвета минералов.

В статье В. Хтейна и Р. Филлипса рассматриваются те же методические установки, которые приведены у Х. Пиллера; кроме того, на примере пирита, халькопирита и золота показаны возможности использования цветовых характеристик для выявления и объективной оценки у минералов специфики тонких вариаций оттенков, в данном случае желтого цвета.

Приведенная в статьях Х. Пиллера, В. Хтейна и Р. Филлипса информация убедительно свидетельствует, что в настоящее время имеется достаточная экспериментальная база для включения в арсенал приемов исследования светопоглощающих объектов методики количественной оценки цвета в соответствии с принятыми международными стандартами (МКО, 1931).

В СССР расчеты цвета минералов до сих пор никем не проводились. Работа авторов является первым опытом в отече-

¹ ICI — в английской литературе, CIE — во французской.

ственной минерографической практике определения и выражения цвета рудных минералов в количественной (числовой) форме¹. Так как исходными материалами при расчетах цвета, наблюдаемого в рудном микроскопе, являются коэффициенты отражения, достоверность получаемых цветовых характеристик в первую очередь будет определяться точностью измерения отражения. Измерение отражения в СССР относится к числу новых, еще только осваивающихся методов, которые, однако, уже начинают активно внедряться в производство. В связи с этим авторы сочли необходимым включить в книгу описание аппаратуры для измерения спектральных коэффициентов отражения и приемов работы, обеспечивающих получение надежных результатов.

2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

Для измерения коэффициентов отражения минералов в настоящее время в основном используется фотоэлектрический метод, предложенный французским минералогом Орслем (Orcel, 1930; Галопен, Генри, 1975). Отражение минералов с помощью фотоэлектрических приборов изучали многие исследователи, используя для этой цели различные опытные модели приборов, которые собирались непосредственно в лабораториях. Освоение промышленностью фотоэлектронных умножителей позволило создать фотоэлектрические приборы с высокой чувствительностью, обеспечивающей фотометрирование малых площадей зерен минералов. Необходимость измерять отражение микрообъектов привела к тому, что непременной частью фотоэлектрического прибора стал микроскоп, а вся установка получила название микроскопа-фотометра или микроскопа-спектрофотометра. В СССР первая опытная модель была выполнена в ГОИ (Агроскин, Королев, 1960).

С начала 60-х годов производство микроскопов-фотометров осваивается промышленностью. Крупнейшие оптико-механические фирмы различных стран начали серийные выпуски этих приборов. Микроскопы-фотометры находят широкое применение в различных областях науки и техники; в рудной микроскопии, в петрографии, металлографии, авторадиографии, цитологии, гистологии, криминалистике и др. Конструкции микроскопов-

¹ В 1976 г., после того как рукопись настоящей книги была сдана в издательство, в Записках Всесоюзного минералогического общества появилась статья Н. И. Шумской о цветовых коэффициентах рудных минералов. В этой статье для диагностики предложено использовать отношения координат цвета $\frac{x}{y}$ и $\frac{z}{y}$. Координаты цветности x , y , z , цветовой тон λ и чистота цвета p , которые, по нашему мнению, для характеристики цвета более информативны, Н. И. Шумской не рассчитывались.

фотометров постоянно совершенствуются, повышается чувствительность, стабильность, информативная способность. Лучшие модели микроскопов-фотометров снабжены цифровыми индикаторами, имеют выход на цифропечать или перфоратор, или комплектуются цифровыми вычислительными машинами. В настоящее время микроскопы-фотометры выпускаются в СССР, ФРГ, ГДР, Австрии, Англии, Японии и других странах; наибольшее распространение получили однолучевые приборы, оптико-механическая часть которых состоит из фотометрической насадки и микроскопа промышленной серии данной фирмы. Электронная часть установок комплектуется фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), приборами, измеряющими фототок, усилителями фототока, стабилизаторами напряжения питания ФЭУ и лампами освещителя (рис. 13).

Далее будут рассмотрены микроскопы-фотометры, на которых можно измерять спектральные коэффициенты отражения минералов.

Перед описанием микроскопов-фотометров отечественного производства кратко охарактеризуем приборы, входящие в состав установок: микроскопы, источники света, стабилизаторы напряжения ламп накаливания, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), стабилизаторы напряжения питания ФЭУ, усилители фототока и регистрирующие приборы. Все это — приборы широкого применения, используемые для различных целей в науке и производстве (Тудоровский, 1948; Федин, Барский, 1972; Шкурин, 1972).

Стандартизация условий измерения, использование эталонов отражения промышленного изготовления, конструкция фотометров, предусматривающая один и тот же оптический канал для прохождения света, отраженного от эталона и от измеряемого объекта, обеспечили в настоящее время получение различными исследователями хорошо согласующихся результатов.

Аппаратура отечественного производства

Поляризационные микроскопы

До недавнего времени в СССР основными поляризационными микроскопами, используемыми при исследованиях минералов в отраженном свете, являлись микроскопы серии МИН: рудный — МИН-9 и исследовательский — МИН-8. В обеих моде-

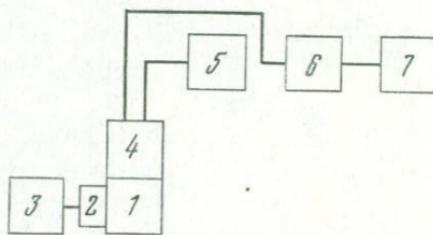


Рис. 13. Блок-схема однолучевого микроскопа-фотометра:

1 — микроскоп; 2 — осветитель микроскопа; 3 — стабилизатор напряжения питания лампы освещителя; 4 — фотометрическая насадка с ФЭУ; 5 — стабилизатор напряжения питания ФЭУ; 6 — усилитель фототока; 7 — прибор для измерения фототока

лях применялся поляризационный осветитель отраженного света типа ОИ-12. При микрофотометрировании существенным недостатком ОИ-12 является сложность центрировки полевой и апертурной диафрагм и недостаточно малый минимальный диаметр ирисовой полевой диафрагмы. Слабый источник света (лампа 8В, 9 Вт) не имеет такого значения, так как конструкция осветителя позволяет использовать и более мощную лампу РН8-20 (8В, 20 Вт).

Микроскоп МИН-8 надежнее для микрофотометрирования, чем микроскоп МИН-9, так как имеет более жесткий штатив и более удобный механизм наводки на резкость изображения за счет перемещения предметного столика.

В настоящее время на Ленинградском оптико-механическом объединении (ЛОМО) освоен серийный выпуск поляризационных микроскопов ПОЛАМ (поляризационные агрегатные микроскопы).

Для работы в отраженном свете выпускаются две модели ПОЛАМ

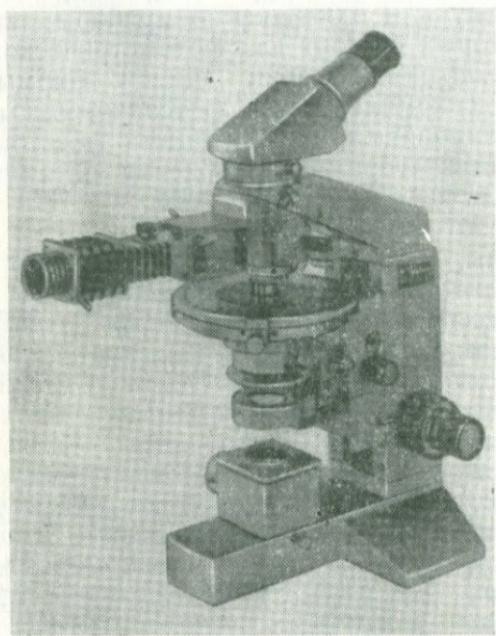


Рис. 14. Рудный поляризационный микроскоп ПОЛАМ Р-311

Р-311 и ПОЛАМ Р-312. Обе модели могут с успехом использоваться в микроскопах-фотометрах для измерения коэффициентов отражения рудных минералов.

ПОЛАМ Р-311 (рис. 14). Оптическая схема микроскопа в принципе та же, что у микроскопа МИН-8 с осветителем ОИ-12, и состоит из двух основных систем — осветительной и наблюдательной. Осветительная система обеспечивает освещение объекта сверху вниз через объектив. Основными агрегатными узлами микроскопа ПОЛАМ Р-311 являются: штатив, поляризационный осветитель отраженного света ОПОС-1, упрощенный осветитель ОИ-37 для проходящего света, предметный столик с кронштейном, тубус, монокулярная насадка, конденсор.

В конструкции поляризационного осветителя отраженного света ОПОС-1, в отличие от ОИ-12, учтены требования микрофотометрии: в осветителе используется лампа РН8-20 (20 Вт); полевая и апертурная диафрагмы смонтированы на подвижных

салазках и удобно центрируются; в ход лучей осветителя могут вводиться ирисовые, плавно регулируемые полевая и апертурная диафрагмы; можно также вводить в ход лучей полевую и апертурную диафрагмы постоянного диаметра, при этом минимальный размер полевой диафрагмы может быть сделан значительно меньше, чем это позволяет ирисовая (полевая) диафрагма. Поляризатор в осветителе может без ограничения вращаться в обе стороны. В качестве устройства, поворачивающего свет на 90° , в осветителе может быть использована или полупрозрачная пластинка или призма тройного отражения Берека; предусмотрен вывод из хода лучей и призмы и пластиинки для работы в проходящем свете; имеются пазы для установки светофильтров.

В комплект микроскопа входят объективы, рассчитанные на длину тубуса 190 мм, для работы без покровного стекла и окуляр $10\times$. Оптические детали объективов не имеют натяжений, влияющих на поляризацию света.

ПОЛАМ Р-312 с тринокулярной насадкой и плечевой фотокамерой для фотографирования изображен на рис. 15. В отличие от микроскопа ПОЛАМ Р-311 в нем имеется промежуточный тубус, в котором смонтированы поворотный анализатор и фокусируемая линза Бертрана. Линза Бертрана, включенная в ход лучей, создает вместе с тубусными линзами изображение выходного зрачка в фокальной плоскости окуляра. Между тубусными линзами в ход лучей может быть введена кварцевая пластиинка или интерференционные светофильтры. Комплект объективов для отраженного света в микроскопе ПОЛАМ Р-312 такой же, как и в микроскопе ПОЛАМ Р-311. Увеличение окуляров $6,3\times$ и $10\times$. Увеличение промежуточного тубуса $1,2\times$. Общее увеличение микроскопа $35,5\times : 1140\times$.

Обе модели микроскопов ПОЛАМ Р-311 и ПОЛАМ Р-312 имеют штативы повышенной жесткости, перемещающийся пред-

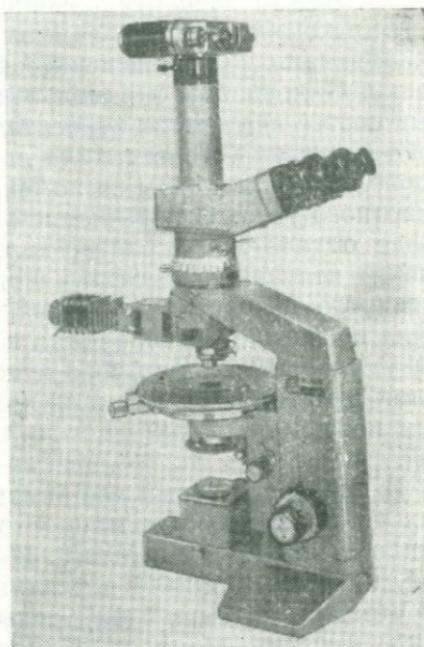


Рис. 15. Рудный поляризационный микроскоп ПОЛАМ Р-312

метный столик и одинаково удобны для работы в комплекте микроскопа-фотометра. Некоторым преимуществом в микроскопе ПОЛАМ Р-312 является наличие линзы Бертрана.

Источники света

В однолучевых микроскопах-фотометрах, используемых для измерения коэффициентов отражения минералов (ПООС-1, ФМЭП-1), источниками света при фотометрировании являются лампы осветителей отраженного света ОИ-12 и ОПОС-1. Осветители комплектуются лампами накаливания РН8-20. Лампы накаливания получили в настоящее время широкое распространение. Они удобны в эксплуатации, имеют широкий спектральный состав излучения, относительную простоту стабилизации потока излучения. Тело накала ламп выполняется из вольфрамовой проволоки или ленты и помещается в вакуум или атмосферу инертного газа. С повышением температуры увеличивается световая отдача ламп, растет доля коротковолновых излучений, и спектр излучения вольфрама становится ближе к спектру естественного дневного освещения, но так как с ростом температуры возрастает и испарение вольфрама, то срок службы лампы уменьшается. Для того чтобы его увеличить, лампу наполняют инертным газом. Для уменьшения распыления и тепловых потерь тело накала изготавливают в виде различных спиралей.

В последнее время все большее распространение в осветителях поляризационных микроскопов получают лампы с иодным циклом, например КГМ9-70. В наполнение этих ламп вводится иод, который вступает в реакцию с вольфрамом, распыленным на стенках колбы. Газообразный иодистый вольфрам при контакте с раскаленной поверхностью вольфрама снова разлагается, т. е. возвращает вольфрам телу накала. В этих лампах тело накала доводится до более высоких температур и яркость накала становится значительно выше.

При фотометрировании в видимой и ультрафиолетовой частях спектра могут использоваться также газоразрядные ксеноновые лампы сверхвысокого давления — ДКсШ-130, ДКсШ-200 и др. Газовый разряд в этих лампах дает излучение с непрерывным спектром, имеющим максимум в ближней инфракрасной области. Яркость в центре разряда ламп ДКсШ-130 и ДКсШ-200 соответственно $5 \cdot 10^7$ кг/м²— $9 \cdot 10^7$ кд/м².

Стабилизаторы напряжения ламп накаливания

При измерениях коэффициентов отражения на однолучевых микроскопах-фотометрах особенно важно поддерживать постоянство светового потока лампы осветителя, так как в лампах накаливания 1% изменения напряжения питания соответствует примерно 3,5% изменения светового потока.

Для стабилизации напряжения питания ламп накаливания могут использоваться промышленные стабилизаторы напряжения ВС-25 и ВС-26.

Промышленность выпускает также стабилизаторы Б5-7 и Б5-21. Эти стабилизаторы используются в настоящее время в комплекте микроскопов-фотометров для питания ламп РН8-20 и КГМ9-70.

Фотоэлектронные умножители

На ранней стадии внедрения микрофотометрии в минералогию для индикации излучения использовались фотоэлементы, что вызывало необходимость иметь внешние усилители, так как в большинстве случаев измерять приходилось слишком малые световые потоки. Этого можно избежать, если применять фотоэлектронные умножители (ФЭУ — электровакуумный прибор, преобразующий излучение в УФ, видимой, ИК-областях спектра в электрический сигнал с последующим его усилением).

Внутреннее усиление в ФЭУ достигается за счет использования вторичной эмиссии, т. е. явления, заключающегося в способности веществ эмитировать вторичные электроны при бомбардировке их поверхности электронами. В ФЭУ фотоэлектроны, освобожденные из фотокатода под действием излучения, направляются ускоряющим напряжением к системе последовательных вторичных эмиттеров или динодов. С каждого динода один попавший на него электрон выбивает несколько вторичных. В результате усиление может достигать до 10^9 раз, что позволяет измерять очень малые световые потоки.

Анализ показывает, что порог чувствительности ФЭУ принципиально лучше, чем у фотоэлемента, с таким же катодом в комбинации с электронной усилительной схемой, дающей такое же усиление (Эпштейн, 1975).

Освоение промышленностью ФЭУ позволило создать высокочувствительные и точные микроскопы-фотометры для работы в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном (до $1200 \div 1300$ нм) участках спектра. Для того, чтобы оценить качество ФЭУ и возможности использования его для решения различных задач, в паспортах на ФЭУ и в специальной литературе сообщаются их параметры и характеристики (Анисимова, Глуховский, 1974).

В табл. 7 приведены параметры ФЭУ, получивших наибольшее распространение в микроскопах-фотометрах для измерений R в видимой области спектра. ФЭУ-27 и ФЭУ-51 применялись в микроскопах-фотометрах ранних выпусков. В современных приборах для работы в видимой области используются, главным образом, ФЭУ-79. В приборах, которые позволяют проводить измерения не только в видимой, но и УФ области спектра,

Основные параметры ФЭУ

Тип ФЭУ	Фотокатод	Область спектральной чувствительности, нм		Чувствительность фотокатода мКА/лм
		диапазон	максимум	
ФЭУ-27	Висмут-серебряно-цезиевый	300—800	480—520	30
ФЭУ-51	Сурьмяно - калиево - натриево-цезиевый	300—800	430	Не более 60
ФЭУ-79	То же	300—830	430	Не более 120
ФЭУ-100	Сурьмяно - натриево-калиево-цезиевый	170—830		Не более 10
ФЭУ-104	То же	300—830		190
ФЭУ-106	Сурьмяно - калиево-натриево-цезиевый	170—830	400—440	180
ФЭУ-114	Сурьмяно-калиево - цезиевый	250—360		Не более 60

используются ФЭУ-100. Кроме того, в настоящее время промышленностью осваиваются новые модели ФЭУ-104, ФЭУ-106 и ФЭУ-114 (Анисимова и др., 1974), которые могут быть рекомендованы для микрофотометрирования.

Стабилизаторы напряжения питания фотоэлектронных умножителей

Источники питания ФЭУ должны быть высокостабильными и иметь небольшие пульсации для того, чтобы обеспечить постоянство выходного сигнала.

Зависимость изменения коэффициента усиления ФЭУ от изменения каскадного напряжения определяется формулой:

$$\frac{\Delta M}{M} = (0,7-1,0) n \cdot \frac{\Delta u}{u},$$

где $\frac{\Delta M}{M}$ — относительное изменение коэффициента усиления;

$\frac{\Delta u}{u}$ — относительное изменение питающего напряжения;

n — число каскадов ФЭУ.

Чтобы обеспечить постоянство выходного сигнала в пределах 1%, необходимо, чтобы, например, для 11-ти каскадных ФЭУ напряжение источника не колебалось свыше $0,06 \div 0,09\%$. Такую и более высокую стабилизацию обеспечивают электронные стабилизаторы напряжения, выпускаемые промышленностью, например ВС-22.

В последнее время промышленность освоила выпуск и других высоковольтных источников: Б5-40 и Б5-41 вместо Б5-14 и Б5-15. В основу работы этих источников питания положен метод высокочастотного преобразования предварительно стабилизированного постоянного низкого напряжения в переменное высокое, с последующим выпрямлением переменного напряжения в постоянное высокое и включением по высокому постоянному напряжению компенсационного стабилизатора.

Для питания ФЭУ микроскопа-фотометра может также использоваться высоковольтный стабилизатор БВ2-2, который выпускается промышленностью для питания сцинтиляционных детекторов и ионизационных камер.

Усилители фототока и регистрирующие приборы

Измерение фототока при работе на микроскопах-фотометрах может быть осуществлено различными способами: с помощью гальванометров, цифровых вольтметров и др. В случаях измерения фототока после предварительного усиления сигнала в комплекте приборов используются специальные усилители и усилители широкого применения. Приборы ФМЭЛ-1 и ФМЭП-1 (первой партии) комплектовались электрометрическим усилителем У5-7, имеющим высокое входное сопротивление до 10 ГОм, диапазон измерения по напряжению $\pm(10 \text{ мВ} \div 10\text{В})$ и диапазон измерения по току от $1 \cdot 10^{-22}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ А.

В приборах ПООС-1, ФМЭП-1 измерение фототока осуществляется непосредственно после ФЭУ. В ПООС-1 и ПООС-2 используется зеркальный гальванометр М17/9.

Появление в последнее время ФЭУ с более высокими коэффициентами усиления позволило применять для измерения фототока и менее чувствительные настольные микроамперметры. Так, в комплекте ФМЭП-1 используется микроамперметр М95 с чувствительностью 0,1 мкА на всю шкалу.

Цифровые вольтметры имеют некоторые преимущества. Это повышенная точность измерений, отсутствие субъективных ошибок оператора при снятии показаний, меньшая утомляемость оператора. Промышленность выпускает малогабаритные достаточно чувствительные цифровые вольтметры, которые могут с успехом применяться для измерения фототока в микроскопах-фотометрах. Это цифровые вольтметры В7-16, Щ1312, интегрирующий вольтметр Щ1413, цифровой вольтметр Ф403. Перечисленные приборы характеризуются высокими техническими данными, такими как быстрота действия, большое входное сопротивление, ряд поддиапазонов измерения.

В однолучевых микроскопах-фотометрах при измерениях коэффициентов отражения рудных минералов могут применяться более простые однопредельные щитовые вольтметры Омского завода «Электроточприбор» типа Ф204/1.

Микроскопы-фотометры

В настоящее время в Советском Союзе для измерения спектральных коэффициентов отражения изготавливаются в основном фотометрические насадки; потребителю насадки поставляются без микроскопов (предполагается, что он имеется у исследователя), поэтому весь выпускаемый комплект называется фотометрической насадкой, а не микроскопом-фотометром.

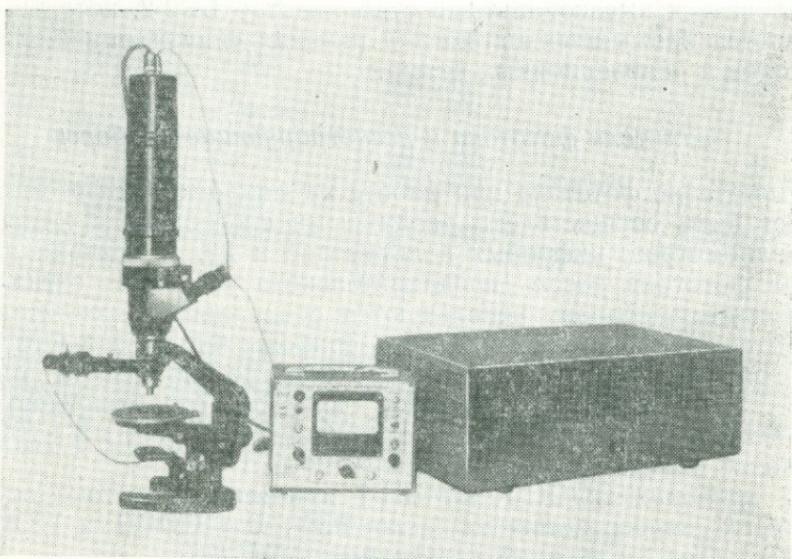


Рис. 16. Фотометрическая насадка ФМЭП-1, установленная на микроскопе МИН-9

Фотометрическая насадка ФМЭП-1. В 1962 г. Ленинградская фирма ЛОМО впервые начала выпуск микроскопов-фотометров ФМЭ-1. В дальнейшем насадка ФМЭ-1 была модернизирована и в настоящее время выпускается под шифром ФМЭП-1 (рис. 16). Оптическая схема насадки показана на рис. 17. Объективом микроскопа (на схеме не показан) изображение объекта проектируется на алюминированную поверхность зеркальной линзы 1, 2 или 3 (линзы сменные). Изображение объекта на этой поверхности можно рассматривать с помощью зеркала 4, объектива 5 и окуляра 6. Линзы 1, 2 и 3 имеют в слое алюминия отверстия с диаметром соответственно 0,2 мм, 0,5 мм и 1,5 мм. Эти отверстия позволяют выделить на объекте участок для фотометрирования, размер которого определяется диаметром отверстия и увеличением применяемого объектива. Так, установив в ход лучей зеркальную линзу 1 с отверстием 0,1 мм и используя объектив 21 \times , можно выделить на объекте

участок для фотометрирования диаметром $\frac{0,1}{21} = 0,0048$ мм ≈ 5 мкм.

Свет, прошедший через отверстие в зеркальной линзе, линзой 8 направляется на фотокатод фотоэлектронного умножителя 9 типа ФЭУ-79. Для фотометрирования в монохроматиче-

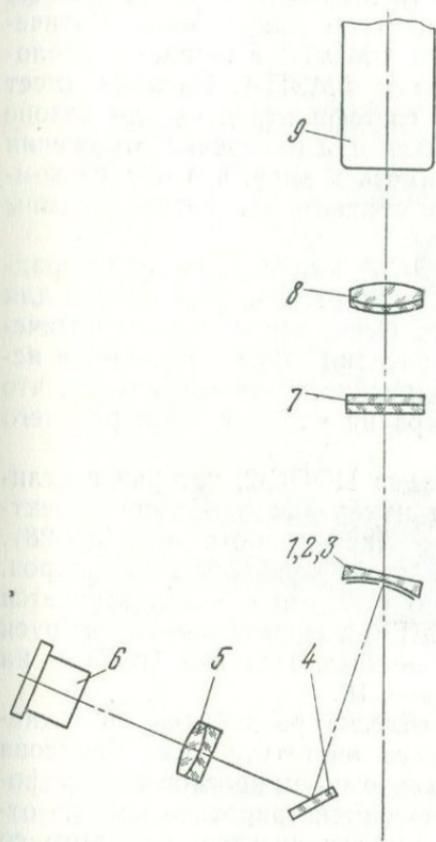


Рис. 17. Оптическая схема насадки ФМЭП-1

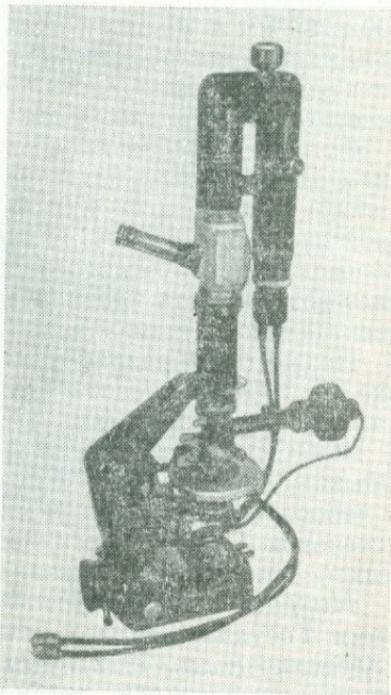


Рис. 18. Спектрофотометрическая насадка ПООС-2, установленная на микроскопе МИН-8

ском свете вводится один из девяти укрепленных на револьвере интерференционных светофильтров 7, имеющих ширину полосы пропускания в середине максимума (полуширину пропускания) 10—12 нм. Для питания лампы РН8-20 осветителя микроскопа в комплект насадки входит стабилизированный блок питания Б5-7, для питания фотоэлектронного умножителя используется стабилизированный блок питания Б5-24А. Фототок измеряется настольным микроамперметром типа М95. Комплект насадки

содержит эталон из кремния и эталоны из оптического стекла, в том числе и из теллуритового стекла СТФ-3. Спектральный диапазон измерений $400 \div 700$ нм.

Фотометрическая насадка ФМЭЛ-1. До начала промышленного выпуска насадок ФМЭП-1 на ЛОМО был освоен серийный выпуск фотометрических насадок типа ФМЭЛ-1, предназначенные для определения интенсивности люминесценции различных объектов при работе на люминесцентных микроскопах. Оптическая схема и конструкция насадки ФМЭЛ-1 в принципе аналогичны схеме и конструкции насадки ФМЭП-1. Насадка имеет 18 сменных интерференционных светофильтров в диапазоне $400 \div 700$ нм и может использоваться для измерения отражения рудных минералов. Необходимо иметь в виду, что она не комплектуется стабилизированным источником для питания лампы осветителя и эталонами отражения.

Фотометрическая насадка ПООС-1 выпускается ленинградским заводом «Геологоразведка» с 1966 г. и предназначена для работы в диапазоне 400—700 нм. Основным отличием оптической системы ПООС-1 от схемы насадки ФМЭП-1 является использование портативного дифракционного монохроматора, что дает возможность проводить измерения в любой точке рабочего спектрального диапазона.

Позже была разработана насадка ПООС-2, которая в отличие от ПООС-1 позволяет вести измерения в большем спектральном диапазоне 400—1150 нм (при работе с ФЭУ-28). В ПООС-2 смонтированы три «зонда» различных диаметров. Опытный образец ПООС-2 с 1970 г. успешно эксплуатируется в лаборатории минерографии ВСЕГЕИ. Промышленный выпуск установок ПООС-2 организован не был. Насадка ПООС-2 на микроскопе МИН-8 показана на рис. 18.

Микроскоп-спектрофотометр «Блеск» разработан сотрудниками Государственного оптического института им. Вавилова (Агроскин и др., 1972). Это двухлучевой микроскоп-спектрофотометр; он позволяет автоматически регистрировать кривую отражения минералов в видимой области спектра, при этом со значительно большей производительностью, чем на однолучевых приборах типа ФМЭП-1 и ПООС-1. Двухлучевой способ построения оптической схемы позволяет использовать лампы в осветителях без стабилизации их источников питания и значительно реже пользоваться эталоном, так как при такой схеме эталоны необходимы только для настройки прибора и для периодической ее проверки. В оптической схеме прибора предусмотрено использование его и для регистрации спектров пропускания. Прибор «Блеск» находится в стадии промышленного освоения на ЛОМО.

Микроскопы-фотометры, выпускаемые за рубежом

Микроскопы-фотометры зарубежных оптических фирм кроме отражения, позволяют измерять абсорбцию, люминесценцию, спектры излучения, могут использоваться в микроавторадиографии.

Микроскопы-фотометры фирмы «Оптон». Микроскоп-фотометр 01 состоит из фотометрической насадки 01 и

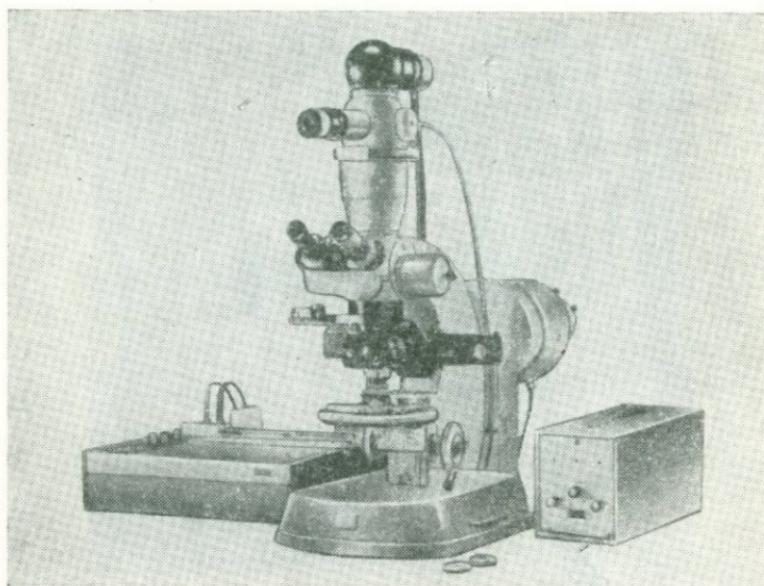


Рис. 19. Микроскоп-фотометр 01

одного из серийных микроскопов фирмы — «Универсал», «Фотомикроскоп» или «Ультрафот». На рис. 19 показан микроскоп-фотометр 01 для измерения коэффициентов отражения с усилителем фототока и прибором, регистрирующим результаты измерений (может использоваться и цифровой индикатор). Выделение участка для фотометрирования производится в фотометрической насадке 01 с помощью измерительных фотометрических диафрагм, смонтированных на револьвере. Можно ввести в ход лучей плавно изменяющуюся ирисовую диафрагму, круглые диафрагмы разных диаметров и прямоугольную диафрагму с плавно изменяющимися размерами сторон. С помощью этих диафрагм на объекте выделяется участок фотометрирования диаметром до 0,5 мкм. Измерения можно проводить в монохроматическом свете с помощью непрерывного интерференционного фильтра в области 400—700 нм или в ультрафиолетовой, види-

мой и ближней инфракрасной областях с помощью монохроматора М4М. В качестве преобразователя светового потока в электрический ток используются фотоэлектронные умножители RCAIP28 (RCA — фирма в США) с областью спектральной чувствительности 200—600 нм и ЕМJ 6256В с областью спектральной чувствительности 200—700 нм. При измерении световой поток модулируется оптико-механическим способом. При визуальном наблюдении мотор, вращающий модулятор, останавливается.

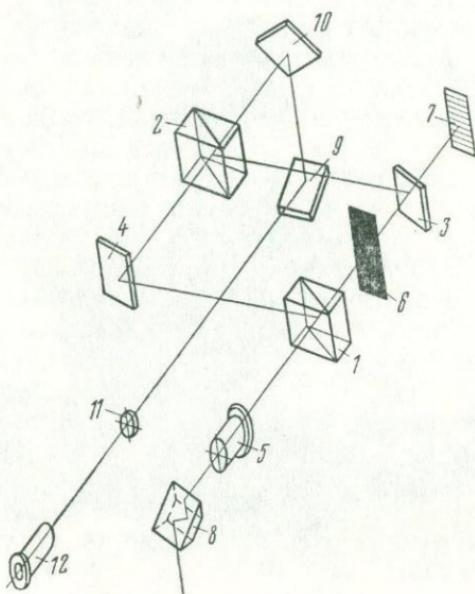


Рис. 20. Оптическая схема фотометрической насадки 05 фирмы «Оптон»

Микроскоп-фотометр 05 состоит из фотометрической насадки 05 и одного из микроскопов «Универсал» или «Фотомикроскоп». Насадка предназначена для измерений в видимой и УФ областях спектра. При тех же объективах, которые используются в насадке 01 с помощью измерительных фотометрических диафрагм этой насадки можно изменять в широких пределах размеры участков, выделяемых для измерения; минимальный диаметр фотометрируемой площади 0,2 мкм. В процессе фотометрирования одновременно можно наблюдать центральную часть поля зрения и фотометрируемый участок объекта (рис. 20). Призмы 1, 2, а также зеркала 3 и 4 выводятся из хода лучей в сторону. С помощью призмы 8 и проекционного окуляра 5 увеличенное изображение препарата проектируется в плоскость полевой фотометрической диафрагмы 6. Пройдя диа-

фрагму 6, свет попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя 7. В комплект насадки 05 входит револьвер с семью круглыми отверстиями, имеющими диаметры 0,5; 0,8; 1,25; 2; 3,2; 5 и 8 мм, и два типа диафрагм: 1) ирисовая диафрагма (диаметр может изменяться от 1 до 10 мм) и 2) регулируемая прямоугольная диафрагма, размеры сторон 0,2—10 мм.

Для выбора на объекте фотометрируемого участка и правильного выбора размера диафрагм платформа с призмами и

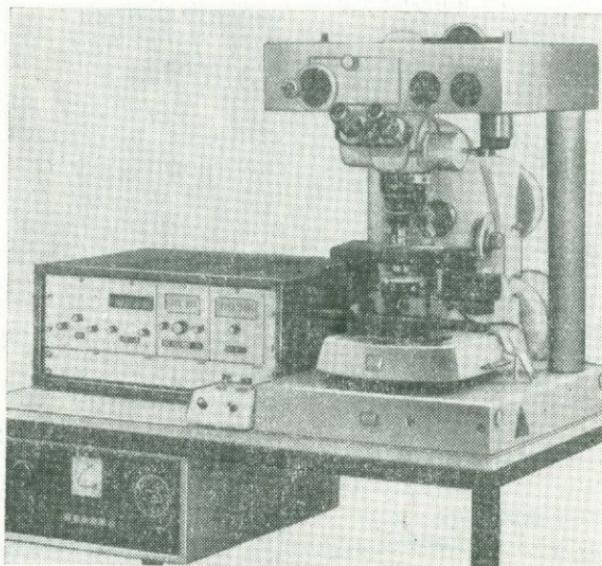


Рис. 21. Микроскоп-фотометр 05 со сканирующим столом

зеркалами поворотом рукоятки вводится в ход лучей. При этом часть лучей отражается призмой 1, зеркалом 4, проходит призму 2 и после отражения зеркалами 9 и 10 попадает в визирную трубку со сменным окуляром 12. Часть света, прошедшая измерительную фотометрическую диафрагму 6, отражается зеркалом 3, призмой 2, зеркалами 6 и 7 и также попадает в окуляр 12 визирной трубы и создает изображение полевой измерительной фотометрической диафрагмы на фоне изображения объекта. Если необходимо наблюдать объект в ультрафиолетовых лучах, вместо визирной трубы устанавливается электронно-оптический преобразователь ЭОП.

Для измерения коэффициентов отражения микроскоп-фотометр 05 имеет такие же возможности, что и микроскоп-фотометр 01, но у него более устойчивая и стабильная конструкция, что позволяет использовать его для автоматической фотометрии со

сканирующим столом. На рис. 21 показан микроскоп-фотометр 05 со сканирующим столом, выполненный по схеме «фотомикроско- па». С одной стороны размещен унифицированный электронный блок для количественной микроскопии и дистанционный пульт управления сканирующим столом. Для управления ра- ботой сканирующего стола и для обработки информации, полу-

ченной при фотометрирова-
нии по выбранной программе,
микроскопы-фотометры 05
комплектуются цифровыми вы-
числительными машинами
РДР 12/20 или РДР8Е, или
WANG 700 S.

В настоящее время фирма «Оптон» разработала микро- спектрофотометры МРМ01К и МРМ 03. Для целей измере- ния коэффициентов отражения они имеют принципиально те же возможности, что и насад- ки 01 и 05.

Микроскопы-фото-
метры фирмы «Лейтц»
(ФРГ). Фирма Э. Лейтц вы-
пускает микроскопы-фотомет-
ры MPV-1 и MPV-2.

Микроскоп-фотометр MPV-1
состоит из микроскопа «Орто-
план» или «Ортолюкс II» и фо-
тометрической насадки. Опти-
ческая схема фотометрической
насадки показана на рис. 22.
Свет, отраженный от поверх-
ности исследуемого образца,
проходит объектив микроскопа
(на схеме не показан), смен-
ный окуляр 2 и при помо-
щи

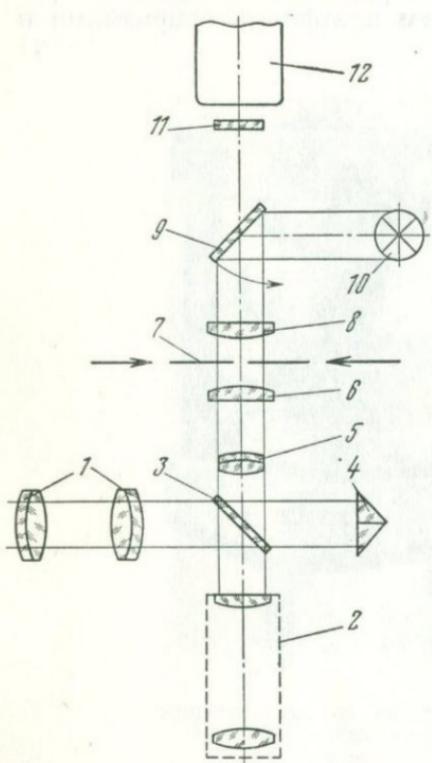


Рис. 22. Оптическая схема фотомет-
рической насадки микроскопа-фото-
метра MPV-1

светоразделительного зеркала 3 и просмотровой оптической си-
стемы 1 попадает к наблюдателю. Другая часть света с по-
мощью линз 5 и 6 переносит изображение объекта в плоскость
измерительной фотометрической диафрагмы 7. Свет, прошед-
ший измерительную диафрагму, линзой 8 направляется на фо-
токатод фотоэлектронного умножителя 12, при этом зеркало 9
выведено из хода лучей в сторону, как показано стрелкой. Пе-
ред фотокатодом устанавливается светорассеивающая пластин-
ка 11, благодаря которой изображение выходного зрачка объек-
тива распределяется на большую поверхность фотокатода фо-
тоэлектронного умножителя.

Если повернуть пластинку 9 в положение, указанное на схеме, то благодаря призме 4 и просмотровой системе 1 измеряющий видит поверхность исследуемого 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 остального поля зрения. Это обеспечивает определенные удобства при фотометрировании больших площадей, мало отличающихся от всего поля зрения. Измерительная диафрагма 7 сменная, может быть заменена ирисовой диафрагмой, диаметр которой можно изменять от 1 до 16 мм, или от 0,5 до 6 мм; прямоугольной диафрагмой, отношение сторон которой может плавно изменяться от 16 : 0,1 мм до 0,1 : 16 мм; постоянными диафрагмами диаметром 0,3—5,0 мм. Величина поверхности, выделяемая измерительной диафрагмой на объекте, определяется размерами применяемой измерительной диафрагмы, увеличением микроскопа, уменьшением в 0,25 \times оптической системы, встроенной в MPV. Например, при использовании объектива 100 \times , тубусной линзы 1,25 \times , окуляра 25 \times и измерительной диафрагмы диаметром 0,8 мм на объекте выделяется участок диаметром \sim 1 микрон. В комплекте с насадкой, в зависимости от целей измерения, могут использоваться фотоэлектронные умножители PCA1P21, EM19592, EM16094, EM19558 и другие типы.

Для фотометрирования в монохроматическом свете предусмотрены интерференционные светофильтры с полушириной пропускания 20 нм и пропусканием 60%, прецезионные интерференционные светофильтры с полушириной пропускания 12 нм и пропусканием до 30%, непрерывные интерференционные фильтры для спектральной области 400 \div 700 нм. Кроме того, могут быть поставлены два типа непрерывных фильтров с полушириной пропускания 25 нм и 13,5 нм. При необходимости можно использовать монохроматор.

На рис. 23 показана насадка MPV-1 на базе микроскопа «Ортолюкс II», с одной стороны гальванометр, с другой — прибор питания фотоэлектронного умножителя.

Микроскоп-спектрофотометр MPV-2 предназначен для автоматических измерений. Оптическая схема MPV-2 с микроскопом «Ортоплан» показана на рис. 24. Все наблюдения и установка участка для фотометрирования производятся с помощью бинокулярного тубуса 7, на который может надеваться автоматическая фотокамера 8, типа «Ортомат».

Фотометрический тубус 6 содержит оптические детали, переносящие изображение объекта в плоскость измерительной фотометрической диафрагмы 9. Измерительные диафрагмы сменные, такие же, как и в MPV-1. В ход лучей может быть введен интерференционный фильтр 10. Перед фотокатодом фотоэлектронного умножителя, расположенного в блоке 11, где также

расположен делитель напряжения и усилитель, установлена рассеивающая пластинка, аналогичная пластинке в MPV-1. Лампочка 12 и система зеркал обеспечивают возможность наблюдения измерительной диафрагмы на фоне всего поля зрения. Корпус 3 с зеркалами дает возможность проводить измерения в проходящем и отраженном свете. В тубусе 2 расположены смен-

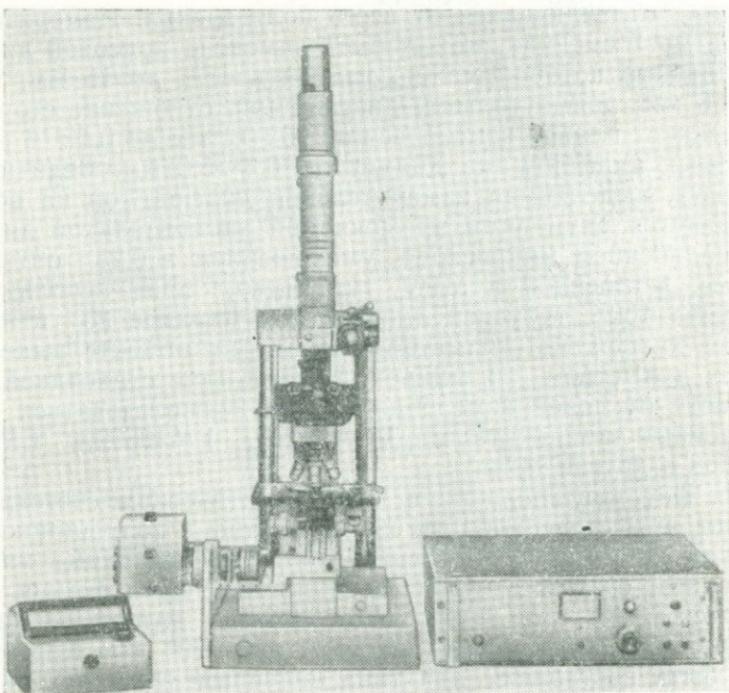


Рис. 23. Микроскоп-фотометр MPV-1

ные полевые диафрагмы и держатель фильтров. На тубус 2 крепится корпус осветительной лампы. В MPV-2 применяются два способа освещения. При одном способе освещения от одной лампы производится визуальное наблюдение и фотометрирование. При втором способе используются два источника освещения, например лампа с юодистым циклом 12 В, 100 Вт и ксеноновая лампа 150 Вт. При необходимости можно проводить спектральные измерения с монохроматором.

На рис. 25 показан MPV-2, смонтированный для спектральных измерений с монохроматором 1. Дифракционный монохроматор (дифракционная решетка 600 штрихов на 1 мм, относительное отверстие 1 : 10, дисперсия 6,6 нм/мм) сопрягается с микроскопом посредством согласующей зеркальной системы 2.

Электронный блок MPV-2 содержит источник питания лампы освещения измерительной диафрагмы, нестабилизированный источник питания лампы для визуального наблюдения 12 В 100 Вт, источник высокого напряжения для фотоэлектронного умножителя, сетевой регулируемый стабилизатор тока; в блоке смонтирован четырехзначный цифровой индикатор. Можно подключать телетайп или перфоратор.

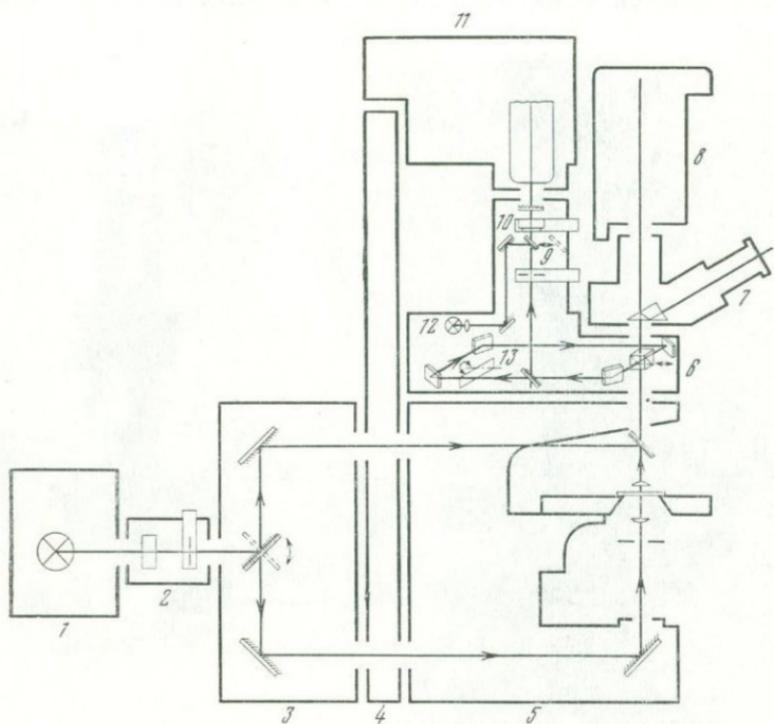


Рис. 24. Оптическая схема микроскопа-фотометра MPV-2

MPV-2 — более совершенная модель микроскопа-фотометра, чем MPV-1, и предназначена в основном для автоматических измерений. Например, при автоматическом сканировании различных объектов подключается цифровая вычислительная машина RDP8 или RDP12 для управления сканирующим столом, установленным на MPV-2. Результаты фотометрирования при сканировании запоминаются в ЭВМ и могут быть обработаны по выбранной программе.

Микроскоп-фотометр фирмы «Рейхерт» (Австрия). Оптическая схема микроскопа-фотометра показана на рис. 26. 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 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, управляемого маховиком, напротив отверстия в зеркальном слое линзы 5 устанавливается одна из девяти стеклянных шайб 6. Нижняя

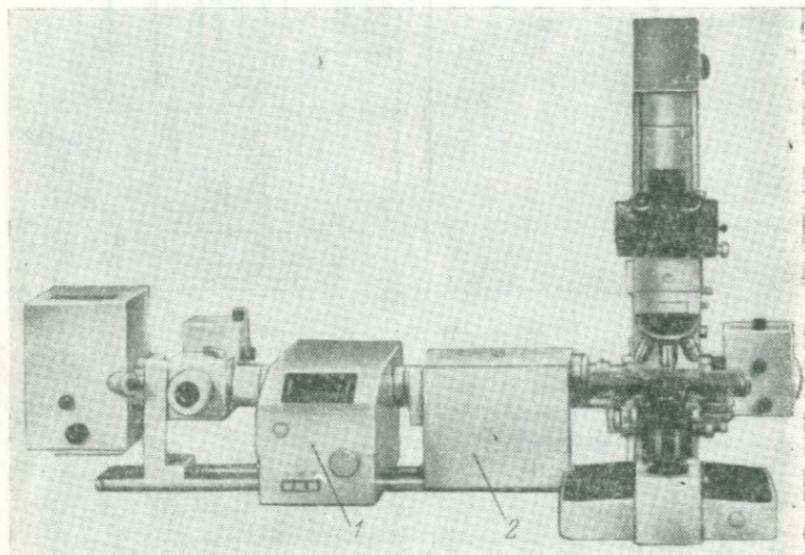


Рис. 25. Микроскоп-фотометр MPV-2, смонтированный для спектральных измерений с дифракционным монохроматором

поверхность шайб также имеет зеркальное покрытие. В зеркальном покрытии шайб 6 в центре сделаны отверстия размером от 0,5 до 10 мм. Отверстия являются измерительными фотометрическими диафрагмами. Одна из шайб не имеет отверстия. Свет, прошедший одно из этих отверстий линзами 8 и 10, зеркалами 9 и 11, направляется на фотокатод фотоэлектронного умножителя 12. Таким образом, наблюдатель в окуляре 14 видит исследуемый объект, а в центре поля зрения — темный кружок, т. е. измерительную фотометрическую диафрагму, размер которой изменяется в зависимости от установленной шайбы 6. Для работы в монохроматическом свете используется непрерывный интерференционный светофильтр 7 для спектрального ди-

пазона $400 \div 740$ нм. Фильтр этот может перемещаться перпендикулярно оптической оси, причем установленная длина волны может быть прочитана на шкале, видной в прямоугольном оконечке оправы фильтра. С помощью измерительных фотометрических диафрагм можно выделять на объекте участок диамет-

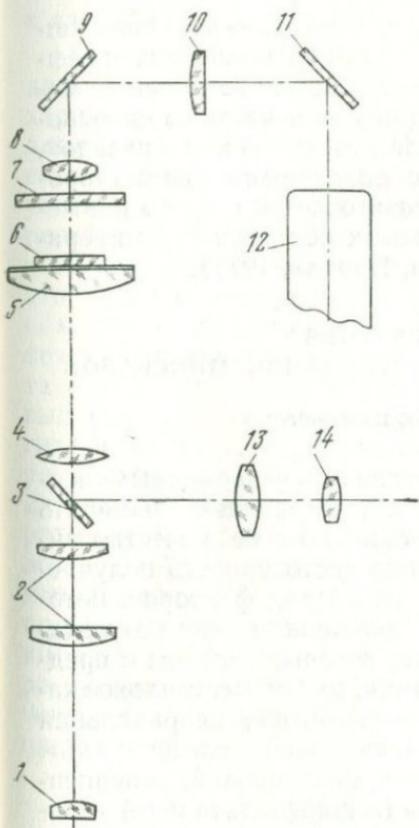


Рис. 26. Оптическая схема микроскопа-фотометра фирмы «Рейхерт»

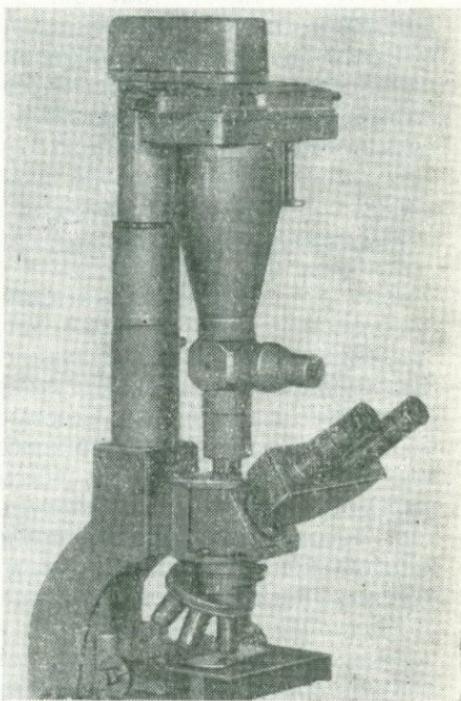


Рис. 27. Микроскоп-фотометр фирмы «Рейхерт»

ром от 0,5 мкм до нескольких миллиметров. Например, при микрообъективе $100\times$, окуляре $12,5\times$ и измерительной диафрагме 0,5 мм выделяется фотометрируемая площадка диаметром 0,5 мкм.

Для уменьшения возможных погрешностей при измерениях около источника освещения смонтирован револьвер с набором полевых диафрагм, которые при измерениях ограничивают освещенный участок объекта и могут выводиться из хода лучей для наблюдения всего поля зрения.

Электронный блок содержит источник регулируемого напряжения для питания фотоэлектронного умножителя с автомати-

ческой компенсацией темнового тока. Индикаторный прибор, смонтированный в блоке, имеет подвижную освещенную шкалу с линейной частью (0—100 делений) и логарифмической. Электронный блок имеет выход на цифровой прибор или самописец. На рис. 27 показан микроскоп-фотометр фирмы Рейхерт на базе микроскопа «Цетопан».

В основном микроскопы-фотометры, выпускаемые промышленностью, выполнены по однолучевой схеме. Измерения коэффициентов отражения на них производятся относительным методом с помощью эталонов. Фотометрическая часть микроскопов-фотометров оформлена в виде фотометрических насадок, которые могут быть использованы с различными типами промышленных микроскопов. Это дает возможность широко применять микроскопы-фотометры в различных областях — в минералогии, биологии, медицине (Агроскин, Папаян, 1977).

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

Подготовка приборов к измерению

Технические и эксплуатационные данные современных микроскопов-фотометров, как указывалось, позволяют измерять отражение с высокой точностью. Но само по себе качество аппарата не обеспечивает необходимую достоверность получаемых результатов, если не учитывать целый ряд факторов, которые могут привести к значительным искажениям этих результатов. Источниками ошибок, помимо тех, которые связаны с предварительной подготовкой самих объектов, могут быть: плохое качество фильтров, большая апертура объектива, неправильная ориентировка поляризатора, «паразитическая освещенность», плохая линейность прибора, неточность фокусировки, неперпендикулярность полированной поверхности шлифа (эталона) к оптической оси микроскопа, неправильная аттестация эталона, нестандартность иммерсионного масла (при измерениях в иммерсии).

Далее перечислены источники погрешностей и даются практические рекомендации по соблюдению некоторых мер предосторожности для их устранения.

О степени монохроматичности света

Степень монохроматичности света определяет чувствительность микроскопа-фотометра и влияет на точность измерения отражения. При использовании источника света со сплошным спектром (лампа накаливания) величина светового потока, падающего на фотоумножитель, пропорциональна квадрату спектрального интервала (Пейсахсон, 1970). Так, при измерении от-

ражения в монохроматическом свете с монохроматичностью 5 нм требуется при прочих равных условиях в 9 раз больший световой поток, чем при измерениях с монохроматичностью 15 нм. Важно знать, какая степень монохроматичности обеспечивает достаточную точность при измерении отражения, чтобы не предъявлять излишне высокие требования к монохроматорам и светофильтрам.

Спектральные кривые отражения рудных минералов в видимой части спектра в большинстве случаев имеют плавный характер со сравнительно небольшими углами наклона к оси длин волн (см. прил. 2). Отражение или постепенно уменьшается с увеличением длины волны (нормальная дисперсия) или увеличивается (аномальная дисперсия), или кривые имеют перегибы со сравнительно большим радиусом кривизны. Расчеты и экспериментальные исследования В. Е. Клейнбока показали, что при плавном изменении кривых дисперсии отражения необходимая точность при измерениях отражения минералов обеспечивается спектральным интервалом монохроматического света в 15—20 нм; однако при резко изменяющейся крутизне кривых (как у молибденита, сульванита, золота, риккардита, умангита и им подобных минералов) раскрытие щели монохроматора должно быть более узким ~ 10 нм. С таким спектральным интервалом монохроматора были выполнены все измерения отражения на приборе «Блеск» (Определение рудных минералов..., 1973); такой же интервал монохроматора рекомендуют использовать Галопен и Генри (1975). Очевидно, оптимальным при измерениях отражения в видимой области следует считать интервал в 12—15 нм; дальнейшее сужение щели монохроматора сильно ограничивает световой поток, в результате снижается точность измерений из-за уменьшения величины сигнала, поступающего на фотоумножитель.

Влияние апертуры применяемого объектива

Отражение минералов принято характеризовать коэффициентом отражения при условии нормального падения света на поверхность, поэтому следует рассмотреть вопрос — при каких отступлениях от нормального падения результат измерения R будет достаточно близок к коэффициенту отражения при нормальном падении. Для случая нормального падения света на объект коэффициент отражения не зависит от состояния поляризации падающего света; в случае наклонного падения света величина отражения определяется углом падения i_1 и ориентировкой плоскости колебания поляризованного света. Теоретическое обоснование этого положения приводится в работах М. Берека (1937) и У. Вустера (1958). Зависимость отражения от угла падения и от ориентировки колебаний поляризованного света для некоторых минералов показана на рис. 28.

Как видно из рис. 28, с увеличением углов падения i коэффициент отражения R при поляризации света в плоскости, параллельной плоскости падения, увеличивается (сплошные линии), а при поляризации света в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, уменьшается (пунктирные линии).

Поляризатор в осветителе отраженного света поворотный. Это дает возможность изменять направление поляризации света, падающего на объект, изменения при этом и ориентировку направления поляризации относительно плоскости падения.

Свет при этом падает на фотометрируемую поверхность в общем наклонно, под различными углами. Для разных лучей падающего пучка угол падения изменяется от 0 до i_{\max}° . Максимальные углы падения для крайних лучей определяются апертурой применяемого объектива и могут, кроме этого, изменяться с помощью апертурной диафрагмы осветителя микроскопа. При полностью открытой апертурной диафрагме крайние лучи имеют углы падения: при объективе $9\times - 12^{\circ}$, при объективе $21\times - 27^{\circ}$ и при объективе $40\times - 37^{\circ}$. В поляризационном осветителе отраженного света может быть использована

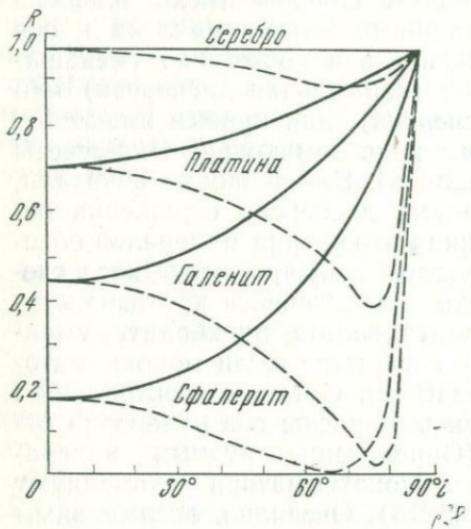


Рис. 28. График зависимости отражения некоторых минералов от угла падения и ориентировки плоскости колебаний поляризованного света

или отражательная пластина или призма тройного отражения, при этом условия падения света на объект оказываются различными. В первом случае свет падает на объект коническим пучком и нет преимущественной плоскости падения, поэтому в каждом пучке имеются и лучи, поляризованные в плоскости падения и перпендикулярные к ней. При использовании призмы появляется преимущественная плоскость падения света на объект — это плоскость, перпендикулярная отражающим граням призмы, т. е. плоскость симметрии осветителя.

Анализируя график на рис. 28, можно видеть, что если измерять коэффициент отражения минерала по эталону с близкими значениями R , то изменение коэффициента отражения минерала с увеличением углов падения практически будет неощущимо. Это очень важное положение для выбора эталонов при относительном методе измерения. Экспериментальные измерения на эталонах, отличающихся по величине коэффициентов отра-

жения в 3 раза, с объективами $9 \times 0,20$ и $21 \times 0,40$ показали, что результаты заметно не изменяются при разной ориентировке поляризатора и разной величине открытия апертурной диафрагмы осветителя.

При работе с объективом $40 \times 0,65$ влияние наклонного падения света на объект становится ощутимым. В этом случае начинает сказываться положение и размер апертурной диафрагмы осветителя. Если апертурную диафрагму осветителя закрыть до минимального размера, то при наблюдении без окуляра или с линзой Бертрана ее положение видно в выходном зрачке объектива. Если апертурная диафрагма смешена по отношению к центру выходного зрачка объектива, то при измерении отражения относительное количество света, падающего под углом в определенной плоскости, увеличивается. Такое явление можно наблюдать при использовании в осветителе как отражательной пластинки, так и призмы, при этом измеренный коэффициент отражения может измениться (увеличиться или уменьшиться в зависимости от положения поляризатора) на несколько процентов. Для уменьшения влияния наклонного падения при измерениях отражения рекомендуется:

1. При измерениях с объективом $21 \times$ и большего увеличения лучше пользоваться отражательной пластинкой в опак-иллюминаторе; при этом изображение апертурной диафрагмы должно быть в центре выходного зрачка объектива; действующую апертуру объектива ограничивают при помощи апертурной диафрагмы, расположенной в осветителе. Однако сильно закрывать диафрагму не следует, так как малый световой поток может не обеспечить необходимого сигнала.

2. Измерять коэффициент отражения с достаточной точностью можно при положении плоскости поляризации как параллельно, так и перпендикулярно плоскости падения света на призму или пластинку опак-иллюминатора. Предпочтительнее параллельное положение, так как оно обеспечивает больше света при измерениях.

3. Влияние наклонного падения света на объект особо следует учитывать при анализе точности измерения на двухлучевых микроскопах-фотометрах, в оптических ветвях которых эти влияния могут быть различными.

Количественно аналитически определить влияние наклонного падения света очень трудно. В каждом конкретном случае, в зависимости от применяемого объектива, размера и положения апертурной диафрагмы осветителя, а также от оптических свойств измеряемого минерала и эталона влияние его будет различным. Однако для принятых условий измерения влияние наклонного падения может быть оценено экспериментально. Для этого нужно измерить отражение минерала при положении ко-

лебаний поляризатора параллельно плоскости падения света на призму (или пластинку); затем развернуть поляризатор на 90° и вновь провести измерение. Разница между двумя измеренными значениями коэффициента отражения будет характеризовать влияние наклонного падения света.

«Паразитическая» освещенность

Под «паразитической» освещенностью обычно понимается освещение видимого поля зрения за счет отражения света от линз объектива вверх. О наличии ее в приборе свидетельствует освещенность поля зрения при отсутствии объекта на столике микроскопа. «Паразитическую» освещенность можно измерить, если убрать объект со столика и зафиксировать отсчет по шкале измерительного прибора; разница между этим отсчетом и отсчетом, когда полностью перекрыт свет от осветителя, характеризует величину «паразитической» освещенности. Кроме того, существует «паразитическая» освещенность, порождаемая отражением света от фронтальной линзы объектива в сторону измеряемого объекта; влияние этой компоненты на результат измерения значительно более сложное. В современных однолучевых микроскопах-фотометрах (ФМЭП-1, ПООС-1, MPV-1, MPV-2, MPM и др.) применяется ограничение фотометрируемой площади на проекции микроизображения при помощи измерительной фотометрической диафрагмы. При таком методе ограничения фотометрируемая площадь оказывается значительно меньше освещенной поверхности объекта; 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 и исказить результат измерения. Величина погрешности зависит от величины раскрытия полевой диафрагмы в осветителе, от величины фотометрируемой поверхности, от соотношения площадей микрообъектов в освещенном поле зрения и их коэффициентов отражения. Наибольшая погрешность измерения возможна в случае, если полевая диафрагма в осветителе полностью открыта и фотометрируется малое зерно, величина отражения которого отличается от отражения объектов, попавших в освещенную часть поля зрения. Наименьшие погрешности будут тогда, когда полевая диафрагма закрыта до минимального диаметра, а размер освещенного поля зрения максимально приближен к фотометрируемой площади. Погрешности не возникают, если всю освещенную часть поля зрения занимает однородная поверхность при измерениях и на минерале и на эталоне.

В некоторых микроскопах-фотометрах зарубежных фирм в осветителе можно устанавливать постоянные полевые диафраг-

мы, подбирая из набора диафрагму, наиболее близкую по размеру к фотометрируемой площадке.

В отечественных приборах, в которых используются микроскопы МИН-8 и МИН-9 с осветителями ОИ-12, полевая диафрагма ирисовая с довольно большим минимальным размером; ее следует заменить выдвижной диафрагмой с постоянным отверстием меньшего диаметра. В комплекте микроскопов серии ПОЛАМ имеются полевые диафрагмы малых диаметров, которые при фотометрировании с помощью салазок могут вводиться в ход лучей.

Таким образом, для уменьшения погрешностей, связанных с «паразитической» освещенностью, необходимо подбирать размер полевой диафрагмы в осветителе меньший, чем фотометрируемое зерно. Соотношение площадок, наблюдаемых в поле зрения между полевой диафрагмой и фотометрической диафрагмой — «зондом», должно быть таким, чтобы четко просматривалось освещенное кольцо между краями полевой диафрагмы и «зондом». Это условие обеспечивает возможность центрировки полевой диафрагмы по отношению к «зонду» и наводку на резкость по краю полевой диафрагмы. Применительно к размерам «зондов» в фотометрической насадке ФМЭП-1 (ФМЭЛ-1) можно из практики измерений рекомендовать следующие относительные размеры полевых диафрагм: при работе с «зондом» 0,1 мм видимый диаметр полевой диафрагмы удобно иметь \sim в 3 раза больше видимого диаметра «зонда»; при работе с «зондом» 0,5 мм видимый диаметр полевой диафрагмы может быть \sim в 2 раза больше (см. раздел «Фокусировка микроскопа»).

Фокусировка микроскопа при измерениях

При относительном методе определения коэффициентов отражения измерения производятся последовательно на объекте (минерале) и на эталоне. При этом расстояние от поверхности эталона и объекта до объектива микроскопа должно быть одинаковым. Это достигается идентичностью наводки на резкое изображение (т. е. фокусировки) поверхности объекта и эталона. Так как наводка на резкость и минерала и эталона производится одним наблюдателем, то такие дефекты зрения, как близорукость или дальнозоркость, не будут иметь значения.

Влияние фокусировки на точность измерения коэффициентов отражения рассматривали в своих работах Х. Эренберг (Ehrenberg, 1964), К. Гелен и Х. Пиллер (1966). Эренберг на примере пирита показал, что нерезкость наводки может вызывать колебания в значениях отражения до 1%; по данным Гелена и Пиллера, погрешность за счет расфокусировки может достигать нескольких процентов.

Глубина резкого изображения выражается формулой

$$T = \frac{1000}{7AG} + \frac{\lambda}{2A^2}, \text{ мкм},$$

где A — апертура объектива;

Γ — увеличение микроскопа;

λ — длина волны света.

Глубина резкого изображения прямо пропорциональна длине волн, при которой производится измерение отражения, и обратно пропорциональна квадрату апертуры и увеличению объектива. Из этих зависимостей следует, что особенно тщательная фокусировка необходима в коротковолновой области спектра и при работе с объективами больших увеличений.

При измерениях R очень важно, чтобы положение фокуса было одинаковым для образца и эталона. Непосредственная фокусировка на их поверхность осуществлена быть не может, так как фотометрируемые участки обоих объектов не должны иметь дефектов полировки. Поэтому наводку на резкость в том и в другом случае производят по какому-нибудь (одному и тому же) краю полевой диафрагмы. Резкое изображение краев полевой диафрагмы должно быть совмещено с плоскостью резкого изображения поверхности объекта. Если такое совмещение отсутствует, необходимо перемещением фокусирующей линзы вдоль горизонтальной оси осветителя найти такое положение, при котором изображение полевой диафрагмы и объекта будет фокусироваться одновременно. В тех случаях, когда фотометрируемое зерно минерала меньше изображения полевой диафрагмы осветителя и имеет высокий или низкий рельеф, возможны ошибки фокусировки, так как края полевой диафрагмы будут фокусироваться не на поверхность фотометрируемого зерна.

В практике измерения отражения могут встретиться также случаи, когда нефотометрируемые участки зерна минерала или эталона находятся близко по высоте к фотометрируемой поверхности и влияют на результат измерения. Это может быть при измерении отражения минералов с внутренними рефлексами и при использовании прозрачных эталонов небольших размеров, например алмаза. Влияние нефотометрируемых поверхностей, расположенных на некотором расстоянии от плоскости резкой наводки, необходимо исключать, уменьшая диаметр полевой диафрагмы осветителя или применяя объектив с меньшей глубиной резкости.

Положение шлифа на столике микроскопа

В случае, когда поверхность шлифа неперпендикулярна оптической оси микроскопа, появляются значительные ошибки при измерениях, так как наклон рабочей поверхности изменяет условия диафрагмирования рабочего пучка.

Для контроля положения шлифа на столике микроскопа используют два способа. Когда измеряется изотропный минерал, поворачивают предметный столик (предварительно тщательно отцентрировав объектив) и наблюдают за показаниями измерительного прибора. При правильном положении рабочей поверхности отсчет не должен изменяться. При этом методе контроля можно непосредственно оценить в процентах возможную погрешность измерения, вызванную наклоном рабочей поверхности.

Можно пользоваться также методом наблюдения в коноскопическом ходе лучей (с линзой Бертрана или с накладной точечной диафрагмой без окуляра). Если максимально закрыть апертурную диафрагму осветителя и поворачивать предметный столик микроскопа, то изображение апертурной диафрагмы будет неподвижно, если рабочая поверхность шлифа перпендикулярна оптической оси микроскопа. Если же поверхность шлифа наклонена, то изображение апертурной диафрагмы будет перемещаться. Такой метод контроля недостаточно чувствителен при работе с объективами $21\times$ и выше, но он может использоваться при измерении отражения и изотропных, и анизотропных минералов.

Для установки поверхности шлифа в нужное положение обычно используется выпускаемый промышленностью минералогический пресс. Пресс обеспечивает правильную установку шлифа, если шток пресса перемещается в направляющей втулке без люфта, а рабочая плоскость прижимной шайбы остается параллельной основанию пресса. При установке шлифа с помощью пресса не следует использовать большое количество пластилина, так как это может привести к последующему перекосу поверхности и загрязнению шлифа.

В последнее время фирма ЛОМО начала выпуск ручных прессов новой улучшенной конструкции (заводская марка МРП), вполне удовлетворяющих требованиям фотометрии.

Для выравнивания измеряемой поверхности непосредственно на микроскопе фирма «Оптон» выпускает специальный трехпорный столик с регулируемыми по высоте ножками и с отверстием в центре. С помощью лапок шлиф прижимается рабочей поверхностью снизу к верхней части этого столика. В работе (Галопен, Генри, 1975) описан столик Ланхама, на котором также предусмотрена возможность выравнивания поверхности шлифа. Такую же возможность имеет и столик, описанный в работе (Сервель, 1971).

Чувствительность микроскопа-фотометра к перекосу шлифа можно несколько уменьшить, прикрывая апертурную диафрагму осветителя.

Непременным условием при количественных измерениях отражения являются хорошо отполированные и чистые поверхности минерала и эталона.

Погрешности при измерениях отражения могут быть следствием потускнения поверхности шлифа под влиянием окисления, а также наличия рельефа. По данным Фрика (Frick, 1930), например, у аргентита уже на третий день коэффициент отражения снижается на 1%, галенит заметно тускнеет через 7 дней, пирит остается неизмененным длительное время. Непосредственно перед измерениями полировку необходимо обновлять; образцы, долго лежавшие и сильно потускневшие, необходимо слегка ободрать на тонком минутнике и вновь отполировать.

Шлифование и полирование минерала изменяют структуру верхнего слоя. Образуются поверхностные слои с оптическими свойствами, отличающимися от свойств минерала. Влияние поверхностного слоя на коэффициент отражения минералов различными исследователями оценивается по-разному. Так, А. Циссарц (Cissarz, 1932) сравнивал отражение поверхностей спайности галенита, сфалерита и антимонита до полировки и после. После полирования коэффициент отражения (в зеленом свете) уменьшился у сфалерита на 1,5%, у галенита на 1,8%, у антимонита на 3,6%. М. Берек (Берек, 1937), изучая влияние поверхностного слоя на коэффициент отражения и параметры анизотропии минералов, пришел к следующим выводам: коэффициент отражения минералов после шлифования и полирования всегда снижается; у твердых минералов образующиеся поверхностные слои тонкие, поэтому коэффициент отражения их изменяется мало.

Применяющиеся в настоящее время различные способы изготовления полированных шлифов дают при соблюдении некоторых предосторожностей хорошие результаты. Однако для строгой оценки результатов измерения отражения Рудная комиссия при Международной минералогической ассоциации рекомендует в материалах, присыпаемых в Комиссию, указывать, каким способом осуществлялись шлифование и полирование.

Как показал опыт, гладкая зеркальная поверхность без глубокого рельефа, без видимых царапин и черных точек является достаточной для получения правильных значений коэффициентов отражения.

Современные методы изготовления полированных шлифов, используемые за рубежом, рассматриваются в методических руководствах Ю. Кэмерона (1966) и Р. Галопена и Н. Генри (1975).

Центрировка и выбор размера полевой и апертурной диафрагм осветителя

В микроскопах МИН-9 и МИН-8 используется осветитель ОИ-12, центрировка диафрагм производится на заводе-изготовителе, но для точных работ после установки осветителя на микроскоп центрировку необходимо уточнить. Предварительно следует строго отцентрировать объектив. Затем апертурную диафрагму закрывают до минимальных размеров, полевую диафрагму полностью открывают. Сняв окуляр, наблюдают положение апертурной диафрагмы осветителя; она должна быть в центре поля, если в осветителе используется отражательная пластина (рис. 29, а). Если используется призма тройного отражения, то положение апертурной диафрагмы должно быть таким, как показано на рис. 29, б). При фотометрировании полевую диафрагму закрывают до минимально возможного размера; во всех случаях ее изображение должно быть концентричным полю зрения.

В микроскопах ПОЛАМ Р-311 и ПОЛАМ Р-312 выбор размера апертурной и полевой диафрагм и их центрировку удобно производить непосредственно перед измерениями. Для использования в качестве полевой диафрагмы из имеющихся в комплекте диафрагм с постоянными отверстиями выбирается такая, видимый диаметр отверстия которой (при установке ее в осветитель) будет несколько больше видимого диаметра измерительной фотометрической диафрагмы — «зонда». В качестве апертурной также выбирается диафрагма с постоянным диаметром, примерно наполовину меньшим, чем видимый диаметр выходного зрачка объектива. Затем апертурную и полевую диафрагмы центрируют, как показано выше.

Настройка освещения

Правильная настройка освещения при фотометрировании особенно важна, так как она обеспечивает условие нормального падения света на поверхность шлифа и от нее зависит чувствительность при измерениях. Снимают окуляр, полностью открывают апертурную диафрагму и наблюдают выходной зрачок

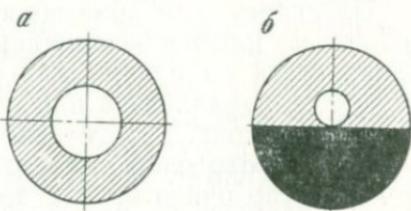


Рис. 29. Вид выходного зрачка объектива и изображения апертурной диафрагмы:

а — при использовании отражательной пластины в осветителе микроскопа; б — при использовании призмы тройного отражения в осветителе микроскопа

объектива. Юстировочными винтами патрона лампочки и поворотом самой лампочки добиваются равномерного и яркого освещения выходного зрачка объектива: изображение нити лампы должно целиком заполнить выходной зрачок, при этом на приборе, измеряющем фототок, должен быть максимальный отсчет. Чтобы убедиться в этом, нужно, слегка поворачивая лампочку в патроне, найти положение, соответствующее максимальному фототоку по шкале измерительного прибора.

Ориентировка поляризатора и анализатора

Плоскость колебаний поляризатора устанавливают точно параллельно или перпендикулярно по отношению к плоскости падения света на призму или отражательную пластинку осветителя, т. е. параллельно или перпендикулярно плоскости симметрии микроскопа. Это условие необходимо для обеспечения нормального положения минерала в скрещенных николях. Если поляризатор ориентирован правильно, то интервалы между погасаниями в анизотропном минерале равны 90° . Для точной установки поляризатора Берек (Ринне, Берек, 1937) рекомендует, используя чувствительные к положению погасания оптически одноосные минералы никелин или молибденит, проделать следующие операции: а) добиться хорошего скрещивания николей на сильно отражающем изотропном минерале (например галените) при коноскопическом наблюдении; б) установив никелин или молибденит, поворачивают предметный столик и определяют интервалы между положениями погасания. Если они меньше или больше 90° , поляризатор и анализатор поворачивают до положения полного скрещивания; в) вновь проверяют интервалы между положениями погасания, если они опять не равны 90° , поворачивают поляризатор в другую сторону и т. д. Таким образом добиваются положения, когда интервалы погасания будут отличаться от 90° не более, чем на 2° .

Р. Галопен и Н. Генри (1975) предлагают проверять скрещенность николей по пириту. Используя объектив $40\times$, наблюдают коноскопическую фигуру; после чего, поворачивая одновременно анализатор и поляризатор, стараются получить наиболее темный крест. Если николи скрещены, но несимметричны относительно плоскости падения, крест будет иметь окрашенный центр. Если положение поляризатора симметрично относительно плоскости падения, а анализатор не скрещен с ним, центр креста будет белесый. Для окончательной проверки правильности скрещенности николей авторы рекомендуют использовать ильменит. Наилучшее угасание этого минерала и интервал между угасаниями в 90° можно получить для ильменита только при правильном положении николей. Описанные способы применимы и в микроскопах ПОЛАМ Р-312 и МИН-8, где анализатор и поляризатор поворотные. В микроскопах ПОЛАМ

Р-311 и МИН-9 это делать трудней, так как анализатор устанавливается на заводе.

Ю. Кэмерон (1966) описывает способ проверки ориентировки поляризатора и анализатора с помощью пластиинки Накамуры.

До начала измерений отражения в приборе необходимо определить ориентировку плоскости колебаний поляризатора. Как упоминалось выше, более предпочтительным при измерениях является перпендикулярное положение плоскости колебаний по отношению к плоскости падения света на призму, так как при такой ориентировке поляризатора поле зрения микроскопа освещено сильнее. Определить направление колебаний, пропускаемых поляризатором, можно простым способом, принцип действия которого основан на явлении поляризации при отражении (Татарский, 1965). Какую-нибудь плоскую поверхность, расположенную горизонтально (можно использовать переплет книги, желательно темный), освещают настольной лампой, стоящей рядом. Поляризатор (в оправе) вынимают из осветителя, держат его вертикально и параллельно корешку книги, поворачивают вокруг оси и через него смотрят на переплет книги. При повороте поляризатора освещенность книги меняется; легко заметить два положения — наиболее темное и наиболее светлое. При положении, когда книга наиболее светлая, колебания, параллельные отражающей поверхности, проходят через поляризатор. Это положение отмечается на оправе поляризатора; оно показывает направление колебаний, пропускаемых поляризатором.

Эталоны для измерения коэффициентов отражения

Измерение отражения на современных микроскопах-фотометрах производится относительным методом, с помощью эталонов сравнения. В двухлучевом микроскопе-фотометре «Блеск» эталон используется для настройки и периодической проверки прибора. Отсюда ясно, что достоверность получаемых при измерениях результатов определяется прежде всего качеством эталона, т. е. состоянием его поверхности и точностью аттестации. Погрешности в значениях эталона непосредственно переносятся на результат измерения минерала. Поэтому аттестация эталонов производится на приборах более высокого класса прямым методом. Полезно иметь несколько эталонов; чтобы уменьшить погрешности, возникающие за счет вторичных бликов, нужно использовать тот эталон, значения отражения которого наиболее близки к отражению исследуемого минерала. Материалы, используемые в качестве эталонов, должны удовлетворять следующим требованиям: 1) материал должен быть химически стойким, устойчивым против коррозии, травления; 2) должен иметь высокую твердость, чтобы в процессе эксплуатации на

полированной поверхности эталона не появлялось царапин; 3) эталоны должны изготавляться из монокристаллов кубической сингонии или одноосных кристаллов; в последнем случае рабочая плоскость эталона делается строго перпендикулярной оптической оси кристалла; 4) материал эталона не должен иметь внутренних рефлексов, плоскостей спайности, трещин; 5) спектр отражения эталона должен быть ровным, близким к горизонтальному.

В последние несколько лет по рекомендации Комиссии по рудной микроскопии в качестве международных эталонов использовались кремний, карборунд, нейтральное стекло и пирит. Этalonы были аттестованы на специальной фотометрической установке абсолютным методом в Национальной физической лаборатории (НФЛ) в Кембридже. Международные эталоны, полученные Советским Союзом, имеются в ИГЕМе. В качестве рабочих эталонов в лабораториях Советского Союза использовались два эталона: пирит Березовского месторождения и кремний, плоскопараллельные пластинки которого были выполнены из монокристаллов высокой чистоты. Оба эти эталона были аттестованы на установке «Пиор» по эталонам НФЛ.

В настоящее время Комиссия по рудной микроскопии утвердила три новых международных эталона: карбид вольфрама, карбид кремния и специальное черное стекло. Эти материалы более твердые, более стойкие химически, поэтому лучше, чем прежние, удовлетворяют всем необходимым требованиям.

Значения отражения всех эталонов приведены в табл. 8. Этalon из кремния из-за отсутствия новых международных эталонов и сейчас является общепринятым в минерографических лабораториях Советского Союза. Отечественные микроскопы-фотометры, кроме кремния, комплектуются эталонами из теллуритовых стекол, которые используются для измерения отражения низкоотражающих объектов. Эти эталоны удобны тем, что они не нуждаются в аттестации, так как коэффициенты отражения их точно вычисляются с помощью формул Френеля по коэффициентам преломления. Недостатком этих эталонов, так же, как и кремния, является сравнительно невысокая твердость.

Более обстоятельно проблема эталонов рассмотрена в руководстве Р. Галопена и Н. Генри (1975) и в книге Л. Н. Вяльсова (1976).

Процедура измерения отражения

До начала измерений отражения прибор должен быть приведен в рабочее состояние, а шлиф — детально изучен на обычном рудном микроскопе и хорошо отполирован. Практические рекомендации по подготовке приборов к процедуре измерений содержатся во многих работах: И. С. Волынского (1959, 1966),

Таблица 8

Значения коэффициентов отражения ($R, \%$) эталонов в интервале спектра $\lambda=400-700$ нм

Эталоны	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
Кремний ¹			42,9	41,2	39,9	38,8	37,9	37,1	36,5	35,9	35,5	35,0	34,7	34,4		
Карборунд ¹			21,1	20,9	20,8	20,6	20,5	20,4	20,3	20,2	20,1	20,0	20,0	20,0	20,0	
Стекло черное ¹			4,50	4,48	4,47	4,45	4,44	4,42	4,41	4,40	4,39	4,38	4,37	4,36		
Карбид кремния ¹	22,2	21,8	21,6	21,3	21,1	20,9	20,7	20,6	20,5	20,4	20,3	20,2	20,1	20,0	19,9	19,9
Карбид вольфрама ²				~45,1				~44,2	~49,7				~43,3			
Стекло БК6 ³	4,73		4,68	4,66		4,60			4,55		4,51		4,48	4,46		
Стекло СТФ-3 ³					14,35	14,24		13,84			13,58		13,37			13,05
" K8 ³	4,38		4,34		4,28			4,23		4,21				4,17		
Пирит ⁴		38,6	41,0	44,3	48,4	51,0	52,8	53,8	54,5	54,9	55,1	55,2	55,5	55,9	56,3	56,8

¹ Аттестованы в НФЛ (Национальной Физической Лаборатории Англии, Лондон).² Значения R даны для длин волн: 470, 546, 589, 650 нм (Галопен, Генри, 1975, с. 200).³ Эталоны из комплектов отечественных микроспектрофотометров, значения R даны для длин волн: 404,7; 434,1; 450; 500; 550; 600; 650; 700 нм. В первых выпусках приборов ПООС-1 теллуритовое стекло СТФ-3 имело другие значения показателей преломления и коэффициентов отражения (см. паспорта приборов).⁴ Аттестован на «Блеске» по кремнию ИМГРЭ.

Н. И. Шумской и др. (1971), коллектива авторов (Определение рудных минералов в полированных шлифах..., 1973), В. Кэмерона (1967), Р. Галопена и Н. Генри (1975), Л. Н. Вяльсова (1976), в статьях Х. Пиллера (Piller, 1966, 1973, 1974), в инструкциях и каталогах фирм-изготовителей. Поэтому мы ограничимся лишь перечислением необходимых проверок прибора и некоторыми практическими советами по тем методическим приемам измерений и обработки результатов, которые были использованы нами.

Для определения готовности прибора к работе выполняются следующие операции: 1) проверка стабильности показаний прибора и дрейфа нуля, 2) проверка перпендикулярности плоскости симметрии микроскопа к плоскости предметного столика, 3) проверка установки поляризатора, 4) центрировка полевой и апертурной диафрагм, 5) настройка освещения, 6) центрировка объектива, 6) проверка состояния пресса и перпендикулярности установки шлифа, 7) проверка состояния эталонов — путем измерений эталона по эталону, 8) уточнение ширины раскрытия щели монохроматора.

Исследование спектров отражения, помимо непосредственных измерений R , включает и приемы обработки результатов измерений; в случае изучения анизотропных минералов для правильного представления об индикаторах коэффициентов отражения важное значение имеет интерпретация полученных спектров.

Первичная обработка результатов измерений R заключается в построении кривых дисперсии отражения в нужном масштабе. При работе с однолучевыми приборами значения R для фиксированных длин волн (обычно с интервалом в 20 нм) вычисляются по формуле

$$R_{\min}, \% = \frac{I_{\min} - C}{I_{\text{эт}} - C} \cdot R_{\text{эт}}, \%,$$

где $R_{\min}, \%$ — значение коэффициента отражения измеряемого минерала, I_{\min} — отсчет по шкале измерительного прибора для минерала, $I_{\text{эт}}$ — отсчет по шкале измерительного прибора для эталона, C — отсчет при отсутствии на столике объекта и эталона, возникающий за счет рассеянного света и темнового тока прибора, $R_{\text{эт}}$ — значение коэффициента отражения эталона. Чтобы упростить вычисление, отсчет C можно совместить с нулем шкалы и тогда

$$R_{\min}, \% = \frac{I_{\min}}{I_{\text{эт}}} \cdot R_{\text{эт}}, \%.$$

По полученным результатам строится кривая дисперсии R в системе координат: длина волны (λ) — коэффициент отражения (R). В последнее время наиболее широко используется масштаб, при котором равным отрезкам на осях абсцисс и ор-

динат отвечают соответственно 10 нм и 1%; таким соотношением осей пользуются Ж. Орсель (Orgel, 1930), И. С. Волынский, К. Гелен и Х. Пиллер; в этом же масштабе построены и все кривые, полученные авторами.

При измерении на приборе «Блеск» со спектральной кривой, записанной прибором, снимались значения R , по которым строилась новая кривая в принятом масштабе.

Для ускорения работы по измерению отражения минералов полезно зарисовать общую ситуацию в шлифе (при исследовании шлифа на обычном рудном микроскопе) и отметить участки сечения зерен, которые в дальнейшем будут использованы для измерения. В случае изотропных объектов выбор сечения определяется только качеством полированной поверхности; при изучении минералов анизотропных отыскивается несколько сечений с максимальным двуотражением (и без дефектов полировки).

Сама процедура измерений состоит в следующем. Детально изученный и подготовленный к измерениям шлиф устанавливается на столик микроскопа-фотометра. Выбранный для измерений участок подводится к центру поля зрения и ставится под зонд; прикрываются полевая и апертурная диафрагмы, рабочий участок шлифа проверяется на перпендикулярность оптической оси микроскопа. В случае измерения изотропного минерала, при достаточно точной установке шлифа и хорошем качестве поверхности, отклонений в показаниях гальванометра при вращении столика микроскопа на 360° либо не наблюдается совсем, либо они незначительны. При заметных отклонениях зерно оставляется и проверяется следующее. Если и следующее зерно не удовлетворяет необходимой точности, шлиф снимается со столика, заново монтируется на предметном стекле и вновь проверяется на перпендикулярность оптической оси микроскопа. Измерение R изотропного минерала авторы всегда проводили в положении с максимальным отсчетом на регистрирующем блоке. Кривые дисперсии строились отдельно для каждого измеренного зерна. Количество измеренных зерен изотропного минерала не должно быть меньше 3—4 при хорошем совпадении результатов; для характеристики спектра отражения избиралась кривая с самыми высокими значениями R .

При работе с анизотропными минералами для определения кривых дисперсии R_g и R_p авторы использовали сечения с наиболее резко выраженным двуотражением. Так же, как и при измерении изотропных минералов, исследуемый участок проверялся на перпендикулярность оптической оси микроскопа. Измерения проводились только на тех сечениях, у которых при вращении столика на 360° максимальный и минимальный отсчеты повторялись через 180° . Положения R_{\max} и R_{\min} запоминаются (или записываются) и последовательно измеряются. Главные отражения сечения могут быть определены и иначе —

по наиболее полному погасанию в скрещенных николях, когда одно из главных направлений в минерале совмещается с направлением колебаний поляризатора. При исследовании спектров анизотропных минералов авторы измеряли не менее 3—5 сечений. В зависимости от полученных результатов и сложности спектральных кривых количество измеренных сечений увеличивали. Из полученных нескольких пар кривых для характеристики спектров максимального и минимального коэффициентов отражения выбирали сечения с самым высоким двутражением, в котором было определено и самое высокое значение R_{\max} . Такой выбор спектров гарантирует от занижения величины R_p .

Измерения отражения по спектру на однолучевых микроспектрофотометрах могут быть выполнены двумя способами: 1) сначала измерить эталон при всех длинах волн, затем эталон заменить минералом и его измерить при тех же длинах волн, полностью воспроизводя весь режим измерения эталона; 2) измерять поочередно эталон — минерал при каждой длине волны. Первый способ удобнее и быстрее, но применение его возможно только при очень высокой стабильности всей аппаратуры. Практика показала, что второй способ точнее и поэтому применяется чаще, хотя он занимает значительно больше времени. Сложность работы вторым способом заключается в необходимости быстрой замены при каждой длине волны образца эталоном, эталона — образцом. Чтобы осуществлять эту операцию быстро и не снимать со столика микроскопа закрепленный образец, авторы использовали эталон в виде строго плоскапараллельной круглой (диаметром с 5-копеечную монету) пластинки, которую клади на образец для измерений при каждой длине волны. Некоторые исследователи применяют специальные приспособления в виде мостиков или столиков, облегчающих процедуру замены образца эталоном.

На рис. 30 показан металлический мостик конструкции Буре и Клейнбока (1968), включенный в комплект микроскопа-фотометра ПООС-1. Мостик 1 с укрепленным на нем эталоном 2 подводится под объектив 5 микроскопа. После измерений на эталоне мостик с эталоном снимается со столика микроскопа, микроскоп фокусируется в прежнюю точку объекта, производится измерение при следующей длине волны. Недостатком этого мостика является невозможность пользования препараторов-дителем, а также частые подъем и опускание стола микроскопа.

На рис. 31 показано другое приспособление, предложенное В. Е. Клейнбоком. На дюралевом корпусе 1 закреплены направляющие планки 3, в которых можно перемещать планку 2 с укрепленным на ее поверхности эталоном 4; шлиф 5 крепится на пластинке держателя с помощью пресса. Положение держателя на прессе показано на рис. 32. Шайба пресса прижимает шлиф минерала до тех пор, пока не упрется в бортики корпуса

держателя. Поверхность бортиков и основание корпуса держателя сделаны строго плоскопараллельными, что обеспечивает правильное положение рабочей поверхности образца после прижима, даже если у пресса имеется люфт. Держатель со шлифом устанавливается на столик микроскопа непосредственно или в препаратороводитель; микроскоп фокусируется на объект. После измерения объекта столик микроскопа опускается вниз, планка с эталоном вдвигается под объектив и производится измерение на эталоне. Меняется длина волны, производится новое изме-

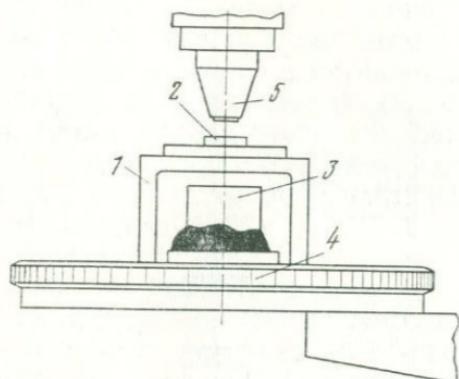


Рис. 30. Мостик для крепления объекта на столике микроскопа:
1 — металлический мостик; 2 — эталон; 3 — шлиф; 4 — столик микроскопа; 5 — объектив микроскопа

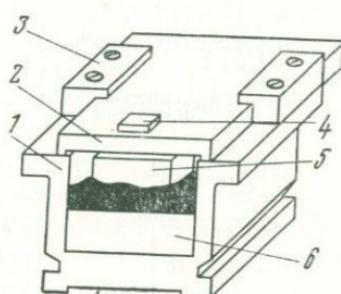


Рис. 31. Держатель шлифов:
1 — корпус держателя; 2 — планка;
3 — направляющая; 4 — эталон;
5 — шлиф; 6 — пластилинка

рение на эталоне. Затем планка с эталоном выдвигается, микроскоп снова фокусируется на объект.

Хорошие результаты дает приспособление, предложенное Л. Н. Вяльсовым, но для реализации этого предложения необходимо модернизировать осветитель отраженного света. На рис. 33 изображена схема осветителя конструкции Л. Н. Вяльсова (Вяльсов, 1976). В осветитель отраженного света добавляются эталонный объектив 4, внутренний стандарт 3 и шторка 5, которая поочередно перекрывает свет, идущий в эталонный объектив и в рабочий объектив. Объективы эталонной и рабочей ветвей обычно выбираются одного типа, но могут быть и разные. Перед началом работы производится градуировка для выбранных условий измерения. На столик микроскопа устанавливается эталон, лучше такой же, как и в эталонной ветви. Перекрывая шторкой свет, идущий в эталонную ветвь, записывают отсчет для рабочей ветви; затем, перекрыв шторкой свет, идущий в рабочую ветвь, записывают отсчет для эталонной ветви. Отношение этих отсчетов является коэффициентом неидентичности ветвей. Этот коэффициент определяется для каждой длины волны и является поправочным коэффициентом при расче-

так. Сам процесс измерения весьма прост и производителен. Минерал помещают на столик микроскопа, устанавливают нужную длину волны, записывают отсчет для минерала, поворачивают шторку и записывают отсчет для эталона, и так для каждой длины волны. При этом методе время между отсчетами на минерале и на эталоне измеряется секундами. Вычисление коэффициентов отражения лучше производить после окончания работы на приборе.

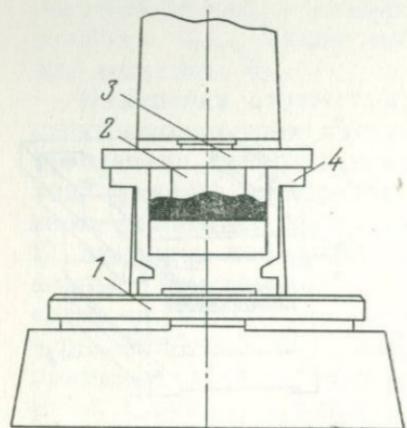


Рис. 32. Положение держателя шлифов на прессе при установке шлифа:

1 — опорная шайба; 2 — шлиф; 3 — прижимная шайба пресса; 4 — корпус держателя

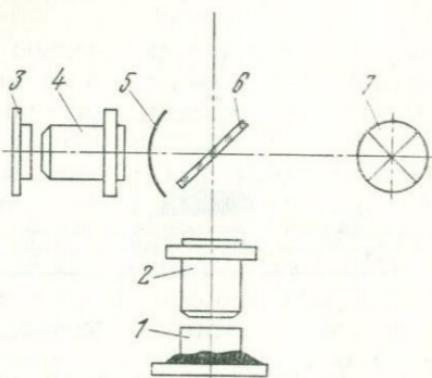


Рис. 33. Схема осветителя, модернизованный Л. Н. Вяльсовым:
1 — шлиф; 2 — объектив микроскопа; 3 — эталон; 4 — объектив сравнительной зетви;
5 — шторка; 6 — отражательная пластина микроскопа; 7 — лампа осветителя

В микроскопах-фотометрах фирмы «Оптон» применяется эталон с магнитной оправой; эталон крепят на объективе микроскопа и производят измерения эталона, не снимая шлифа со столика. Перефокусировка микроскопа необходима и в этом случае.

В работе Р. Галопена и Н. Генри (1975) описан столик Ланхама, в котором минерал и эталон монтируются в отдельных держателях, но так, чтобы их рабочие поверхности были на одном уровне. С помощью салазок их можно поочередно устанавливать под объектив. Упоры, имеющиеся на каждом конце салазок, ограничивают перемещение пластины с образцом и эталоном с точностью до единиц микрон.

Цервел (1971) при измерении отражения пользовался специальным столиком с салазками, которые также позволяли быстро менять местами минерал и эталон. Магнитные упоры обеспечивали, по сведениям автора, воспроизводимость при многократных установках до 1,5 мкм.

О точности результатов измерения

Согласно паспортным данным, воспроизводимость результатов на современных микроскопах-фотометрах оценивается в 1—1,5% относительных, что обеспечивает большинство исследовательских и диагностических задач. Однако реальная точность метода не может быть выражена количественно, так как все еще существует много факторов, связанных непосредственно с процедурой измерений, конкретное влияние которых пока трудно учесть. Результаты различных исследователей нередко отличаются на недопустимо большие величины. Очевидно, в ряде случаев имеют место и случайные, грубые ошибки, являющиеся результатом неправильной диагностики минералов. В частности, такая ошибка была допущена с гудмундитом и арсенопиритом в статье «Редкие минералы сурьмы и их парагенезисы...» (авт. Н. С. Бортников, Ю. С. Бородаев, Л. Н. Вяльсов, Н. Н. Мозгова, 1975).

Интересный эксперимент был проведен Международной Комиссией по рудной микроскопии (ММА)¹ в 1971 г. (Cervelle, 1971). Сотрудники геологической службы США синтезировали в идентичных условиях 40 образцов PbS. Образцы, соответствующим образом запакованные, были разосланы в разные страны. В каждой стране из образца был изготовлен шлиф и измерены коэффициенты отражения в области 400—700 нм на имеющейся аппаратуре. Сравнение результатов проводилось для длины волны 546 нм. Разброс полученных значений составлял (40,7—43,6%) 7% относительных.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦВЕТА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТАМ ОТРАЖЕНИЯ

Как было показано в первой главе книги, расчет цвета отражающей поверхности производится с помощью трех уравнений:

$$\lambda = 780 \text{ нм}$$

$$\bar{x} = \sum x(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot I_A \Delta \lambda;$$

$$\lambda = 380 \text{ нм}$$

$$\lambda = 780 \text{ нм}$$

$$\bar{y} = \sum y(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot I_A \Delta \lambda;$$

$$\lambda = 380 \text{ нм}$$

¹ MMA — Международная Минералогическая Ассоциация (International Mineralogical Association: Commission on Ore Microscopy).

$$\bar{z} = \Sigma \bar{z}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot I_A \Delta \lambda,$$

$$\lambda = 380 \text{ нм}$$

где

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$, стоящие в левой части равенств — координаты цвета;

I_A — спектральная интенсивность источника белого света, в данном примере источника A ;

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ — удельные координаты цвета, рассчитанные по кривой спектральной чувствительности нормального человеческого глаза (см. рис. 3 и табл. 5);

$R(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения поверхности объекта.

Таким образом, для определения цвета отражающей поверхности необходимо знать три категории величин. Распределение энергии в спектре стандартного источника белого света (I_A) и удельные координаты цвета являются постоянными величинами при всех расчетах и их значения следует брать из таблиц. В таблицах для упрощения вычислений приведены значения произведений $\bar{x}(\lambda) \cdot I_A, \bar{y}(\lambda) \cdot I_A, \bar{z}(\lambda) \cdot I_A$ для определенных длин волн с интервалами в 1, 5 и 10 нм для спектрального диапазона от 380 до 780 нм (прилож. 1). Переменной величиной при расчетах являются только значения коэффициентов отражения исследуемых объектов [$R(\lambda)$]. Процедура расчета координат цвета $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ очень проста и сводится к следующему: коэффициент отражения объекта при определенной длине волны умножается последовательно на три коэффициента — $\bar{x}(\lambda) \cdot I_A, \bar{y}(\lambda) \cdot I_A, \bar{z}(\lambda) \cdot I_A$, взятых для этой же длины волны из таблиц; произведения, полученные для ряда длин волн, суммируются по всему спектральному диапазону от 380 до 780 нм; в итоге получаются три суммы x, y, z , которые и представляют искомые координаты цвета отражающей поверхности исследуемого объекта, вычисленные для источника белого света A . Точность полученных значений координат цвета определяется только точностью измерения отражения, так как все величины, кроме R , используемые в расчете цвета, постоянны, и только R зависит от процедуры измерения отражения. Точность измерения R на современных микроспектрофотометрах в лучшем случае находится в пределах 1—2% (относительных); поэтому и координаты цвета $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ могут быть определены с точностью, не превышающей этой величины.

Определение спектрального диапазона измерений R минералов, достаточного для расчета цвета

В колориметрии для определения цвета излучения используется спектральный интервал от 380 до 780 нм. Современная фотометрическая аппаратура из-за недостаточной чувствительности фотоумножителей в большинстве случаев ограничивает оптимальный диапазон измерений отражения длинами волн 420 и 660 нм. Х. Пиллер (1966) для расширения расчетного спектрального интервала до 380 и 780 нм предлагает получать необходимые данные по коэффициентам отражения путем экстраполяции, исходя из сравнительно простой структуры спектров на концах видимого интервала у большинства минералов. Авторы настоящей книги, изучившие спектры отражения более чем 200 минералов, полагают, что экстраполяция кривых дисперсий на таком значительном протяжении — 120 нм — может привести к грубым ошибкам. Мы ограничили расчетный интервал 410 и 700 нм. Чтобы определить, какую погрешность может внести в расчет координат цвета такое ограничение, следует обратиться к таблице произведений $\bar{x}(\lambda) \cdot I$, $\bar{y}(\lambda) \cdot I$, $\bar{z}(\lambda) \cdot I$. Как видно из приложения 1, для участков спектра 380—410 нм эти произведения имеют очень низкие значения. Если предположить, что коэффициент отражения минерала будет монотонно изменяться в этих частях спектра, то, ограничивая выбранный интервал пределами 410—700 нм, получим следующие (относительные) погрешности расчетов координат (для источника А): по \bar{x} — 0,22 %, по \bar{y} — 0,08 %, по \bar{z} — 0,3 %. Ошибки могут оказаться более значительными в тех случаях, когда отражение в областях 380—410 и 710—780 нм резко возрастает. Такие спектры известны у небольшого числа минералов (см. вкладку). Это риккардит, умангит, купростибит, вулканит, никелин, брейтгауптит, борнит, ковеллин и некоторые др. Согласно исследованиям Райта и Гилда, цветности всех излучений с длинами волн больше 700 нм одинаковы (Гуревич, 1950, с. 64). Исходя из этого обстоятельства, можно полагать, что у минералов типа риккардита наименее существенными будут погрешности в определении цветового тона λ .

Приемы расчета цвета

Значения коэффициентов отражения для нужных длин волн снимаются со спектральных кривых; при измерениях на приборах типа «Блеск» это будут кривые, записанные самим прибором в процессе измерений; при работе на однолучевых микроспектрофотометрах (ПООС, ФМЭП) значения R снимаются с кривых, построенных по результатам измерений. Х. Пиллер (1966), а также В. Хтейн и Р. Филлипс (1973) рекомендуют

для расчетов метод «избранных ординат» (см. стр. 32). Число конкретно рассчитываемых точек в пределах рабочего интервала определяется структурой спектра. В случае монотонной кривой (пиротиновый тип спектра) по Х. Пиллеру достаточно 6 ординат (по Хтейну и Филлипсу 8). Для кривых с экстремальными точками должно быть предусмотрено сгущение плотности ординат в более сложных участках, так, для характеристики спектральной кривой ковеллина Х. Пиллер рекомендует использовать 14 ординат, для кривой умангита 37.

Авторы выполняли расчеты по методу взвешенной ординаты, т. е. с использованием коэффициентов отражения через одинаковые промежутки длин волн. В начале работы был принят интервал в 10 нм. Однако проведенный опыт показал, что даже в случае достаточно сложных спектров (типа валлерита, золота, сульванита, риккардита) увеличение интервала до 20 нм не оказывает существенного влияния на результаты (табл. 10, прил. 4).

Выбор источника «белого» света

Для измерения отражения минералов можно использовать любой источник света, обеспечивающий необходимую интенсивность в рабочем участке спектра. Качество источника света не оказывает влияния на результат измерения R , так как измерения проводятся в монохроматическом свете и относительным методом, т. е. по эталону. Поэтому при измерениях можно использовать обычную лампу накаливания, ксеноновую, лампу с иодистым циклом.

Визуальное восприятие цвета минерала в отраженном свете зависит от спектрального состава падающего на него излучения. При обычных наблюдениях в микроскопе используется лампа накаливания с фильтром дневного света. Эти условия освещения ближе всего соответствуют стандартному источнику белого света C ; поэтому и визуальная оценка цвета минералов должна отвечать цветовым характеристикам, рассчитанным относительно источника C . Расчет цвета минерала может быть выполнен относительно любого стандартного источника белого света A , B или C ; получаемые при этом цветовые характеристики, хотя и близки, но в ряде случаев будут заметно отличаться, поэтому всегда необходимо указывать, к какому стандарту белого света они отнесены.

В опубликованной литературе в настоящее время имеются материалы по расчету цвета только для 13 минералов (Piller, 1966, 1974; Htein, Phillips, 1973). Поэтому нами в порядке опыта цветовые характеристики рудных минералов определены со всеми тремя стандартными источниками белого света.

Примеры расчета цвета минералов

В табл. 9, 10, 11 приведены расчеты координат цвета галенита и валлерита.

Таблица 9

Расчет цвета галенита

λ , нм	R	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_A$	$R\bar{x}(\lambda) \cdot I_A$	$R\bar{y}(\lambda) \cdot I_A$	$R\bar{z}(\lambda) \cdot I_A$
1	2	3	4	5	6	7	8
410	0,493	0,07	0,002	0,33	0,03	0,001	0,16
420	0,488	0,27	0,01	1,28	0,13	0,005	0,62
430	0,483	0,65	0,03	3,16	0,31	0,01	1,53
440	0,478	0,93	0,06	4,65	0,44	0,03	2,18
450	0,472	1,63	0,12	5,44	0,49	0,06	2,57
460	0,465	1,02	0,21	5,86	0,47	0,10	2,72
470	0,460	0,78	0,36	5,14	0,36	0,16	2,36
480	0,455	0,42	0,62	3,62	0,19	0,28	1,65
490	0,451	0,16	1,04	2,33	0,07	0,47	1,05
500	0,446	0,03	1,79	1,51	0,01	0,80	0,67
510	0,443	0,06	3,08	0,97	0,03	1,36	0,43
520	0,439	0,42	4,76	0,53	0,18	2,09	0,23
530	0,435	1,21	6,32	0,31	0,53	2,75	0,13
540	0,432	2,31	7,60	0,16	0,99	3,28	0,07
550	0,430	3,73	8,57	0,07	1,60	3,68	0,03
560	0,429	5,51	9,22	0,03	2,42	3,95	0,01
570	0,427	7,57	9,46	0,02	3,23	4,04	0,01
580	0,426	9,71	9,22	0,02	4,14	3,93	0,01
590	0,425	11,58	8,54	0,01	4,92	3,63	0,004
600	0,424	12,71	7,55	0,001	5,39	3,20	0,000
610	0,424	12,67	6,36	0,004	5,37	2,70	0,000
620	0,424	11,36	5,06	0,002	4,82	2,14	0,000
630	0,425	9,00	3,71	0,000	3,82	1,58	0,000
640	0,426	6,55	2,56	0,000	2,78	1,09	0,000
650	0,427	4,34	1,64	0,000	1,85	0,70	0,000
660	0,427	2,62	0,97	0,000	1,12	0,41	0,000
670	0,428	1,45	0,53	0,000	0,62	0,26	0,000
680	0,428	0,80	0,29	0,000	0,34	0,12	0,000
690	0,428	0,41	0,15	0,000	0,17	0,06	0,000
700	0,427	0,21	0,07	0,000	0,09	0,03	0,000



Координаты цвета: $\bar{x} = 46,91$; $\bar{y} = 42,92$; $\bar{z} = 16,43$.

В первой вертикальной колонке таблицы даны длины волн в нм (с интервалом 10 нм), во второй — значения коэффициентов отражения минерала в долях единицы для каждой длины волны. В третьей, четвертой и пятой колонках значения произведений соответственно $\bar{x}(\lambda) \cdot I_A$, $\bar{y}(\lambda) \cdot I_A$ и $\bar{z}(\lambda) \cdot I_A^1$, взятые из

¹ В приведенных примерах буква A при символе I означает, что расчет цвета ведется для источника «белого» света A . Значения произведений $x(\lambda) \cdot I$, $y(\lambda) \cdot I$, $z(\lambda) \cdot I$ округлены до второго знака.

Расчет цвета валлерита (R_g)

$\lambda, \text{ нм}$	R_g	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_A$	$R_g \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot I_A$	$R_g \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot I_A$	$R_g \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot I_A$
1	2	3	4	5	6	7	8
420	0,102	0,27	0,01	1,28	0,03	0,001	0,13
430	0,107	0,65	0,03	3,16	0,07	0,003	0,34
440	0,113	0,93	0,06	4,65	0,10	0,007	0,53
450	0,120	1,03	0,12	5,44	0,12	0,01	0,65
460	0,127	1,02	0,21	5,86	0,13	0,03	0,74
470	0,134	0,78	0,36	5,14	0,10	0,05	0,69
480	0,142	0,42	0,62	3,62	0,06	0,09	0,51
490	0,151	0,16	1,04	2,33	0,02	0,16	0,35
500	0,159	0,03	1,79	1,51	0,005	0,28	0,24
510	0,166	0,06	3,08	0,97	0,01	0,51	0,16
520	0,173	0,42	4,76	0,53	0,07	0,81	0,09
530	0,179	1,21	6,32	0,31	0,22	1,13	0,05
540	0,185	2,31	7,60	0,16	0,43	1,41	0,03
550	0,191	3,73	8,57	0,07	0,71	1,64	0,01
560	0,196	5,51	9,22	0,03	1,08	1,81	0,006
570	0,201	7,57	9,46	0,02	1,52	1,90	0,004
580	0,205	9,71	9,22	0,02	1,99	1,89	0,004
590	0,210	11,58	8,54	0,01	2,43	1,79	0,002
600	0,213	12,71	7,55	0,001	2,71	1,61	0,002
610	0,218	12,67	6,36	0,004	2,76	1,39	0,001
620	0,223	11,36	5,06	0,002	2,53	1,13	0,004
630	0,228	9,00	3,71	0,000	2,05	0,85	0,000
640	0,232	6,55	2,56	0,000	1,52	0,59	0,000
650	0,236	4,34	1,64	0,000	1,02	0,39	0,000
660	0,240	2,62	0,97	0,000	0,63	0,23	0,000
670	0,244	1,45	0,53	0,000	0,35	0,13	0,000
680	0,246	0,80	0,29	0,000	0,20	0,07	0,000
690	0,251	0,41	0,15	0,000	0,10	0,04	0,000
700	0,253	0,21	0,07	0,000	0,05	0,02	0,000

Координаты цвета: $\bar{x} = 23,03$; $\bar{y} = 19,98$; $\bar{z} = 4,57$

прилож. 1. В шестой, седьмой и восьмой колонках помещены произведения $R \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot I_A$, $R \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot I_A$, $R \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot I_A$ для каждого значения длины волны первой колонки. Результаты суммирования произведений каждой из колонок 6, 7, 8 соответствуют трем координатам цвета минерала: \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} .

Полученные в результате расчета координаты цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} дают полное и точное количественное определение цвета любого излучения. Колориметрическая система X , Y , Z и все расчеты, выполняемые в ней, составлены таким образом, что значение координат \bar{y} соответствует видимой яркости излучения; в случае рудных минералов — величине отражения, оцениваемого визуально в белом свете; две другие координаты \bar{x} и \bar{z}

Расчет цвета валлернита (R_p)

$\lambda, \text{ нм}$	R_p	$\bar{x}(\lambda) I_A$	$\bar{y}(\lambda) I_A$	$\bar{z}(\lambda) I_A$	$R_p \bar{x}(\lambda) I_A$	$R_p \bar{y}(\lambda) I_A$	$R_p \bar{z}(\lambda) I_A$
1	2	3	4	5	6	7	8
410	0,117	0,07	0,002	0,33	0,01	0,001	0,04
420	0,117	0,27	0,01	1,28	0,03	0,001	0,15
430	0,118	0,65	0,03	3,16	0,08	0,004	0,37
440	0,119	0,93	0,06	4,65	0,11	0,007	0,55
450	0,119	1,03	0,12	5,44	0,12	0,01	0,65
460	0,119	1,02	0,21	5,86	0,12	0,025	0,70
470	0,119	0,78	0,36	5,14	0,09	0,04	0,61
480	0,119	0,42	0,62	3,62	0,05	0,07	0,43
490	0,120	0,16	1,04	2,33	0,02	0,12	0,28
500	0,120	0,03	1,79	1,51	0,004	0,21	0,18
510	0,120	0,06	3,08	0,97	0,007	0,37	0,12
520	0,120	0,42	4,76	0,53	0,05	0,57	0,06
530	0,120	1,21	6,32	0,31	0,14	0,76	0,037
540	0,120	2,31	7,60	0,16	0,28	0,91	0,02
550	0,120	3,73	8,57	0,07	0,45	1,03	0,008
560	0,120	5,51	9,22	0,03	0,66	1,11	0,004
570	0,120	7,57	9,46	0,02	0,91	1,14	0,0024
580	0,120	9,71	9,22	0,02	1,16	1,11	0,0024
590	0,120	11,58	8,54	0,01	1,39	1,03	0,001
600	0,120	12,71	7,55	0,001	1,53	0,91	0,000
610	0,120	12,67	6,36	0,004	1,52	0,76	0,000
620	0,120	11,36	5,06	0,002	1,36	0,61	0,000
630	0,120	0,00	3,71	0,000	1,08	0,44	0,000
640	0,120	6,55	2,56	0,000	0,79	0,31	0,000
650	0,120	4,34	1,64	0,000	0,52	0,20	0,000
660	0,120	2,62	0,97	0,000	0,31	0,12	0,000
670	0,120	1,45	0,53	0,000	0,17	0,06	0,000
680	0,120	0,80	0,29	0,000	0,10	0,035	0,000
690	0,120	0,41	0,15	0,000	0,05	0,02	0,000
700	0,120	0,21	0,07	0,000	0,025	0,008	0,000

Координаты цвета: $\bar{x}=13,13$; $\bar{y}=11,98$; $\bar{z}=4,22$

очевидно физического смысла не несут, так как принятые единичные цвета этой системы не являются реально воспроизведимыми излучениями, а составлены искусственно для удобства расчетов (см. гл. I, с. 25). Такое чисто математическое, абстрактное выражение цвета, хотя оно и самое точное, недостаточно наглядно, так как не создает зрительного образа цвета и не дает возможности сопоставлять числовые величины с визуальным восприятием цвета и визуально оценивать рассчитанные цвета. Для этих целей служит другая система выражения цвета — B , λ , p ; параметры этой системы путем несложных графических преобразований выводятся из координат цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} ; каждый

параметр системы B , λ , p имеет определенный физический смысл, что облегчает задачу визуальной оценки и сравнения цвета минералов.

Для перехода к графическому способу определения цветовых характеристик (λ и p) следует выполнить несколько расчетов: 1) координаты цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} складывают, получают сумму, называемую цветовым модулем; 2) каждую координату цвета делят на цветовой модуль и получают координаты цветности:

$$\bar{x} + \bar{y} + \bar{z} = m; \quad \frac{\bar{x}}{m} = x; \quad \frac{\bar{y}}{m} = y; \quad \frac{\bar{z}}{m} = z.$$

Координаты цветности в сумме равны 1 ($x+y+z=1$); с помощью последних на цветовом графике находят точку, которая определяет цветность исследуемого объекта. Цветовой график представляет собой диаграмму, совмещающую в себе две системы координат — прямоугольную и типа «полярной»; в прямоугольной системе положение цветности на диаграмме определяется значениями координат x и y ; положение той же точки по системе «полярных» координат — значениями цветового тона λ и чистоты цвета p .

Для определения длины волны λ , характеризующей цветовой тон, проводится прямая, через найденную точку цветности и точку белого света до пересечения с линией спектральных цветов, на которой нанесены значения спектральных цветностей через каждые 10 нм; величина p определяется по кривой равной чистоты (все поле реальных цветов покрыто семейством кривых равной чистоты — от нуля — точки белого цвета — до 100% — линии спектральных цветов через каждые 5%).

Для графического определения цветовых характеристикрудных минералов координат цветности x , y , z , цветового тона λ и чистоты цвета p цветовые графики, приводимые в литературе (см. рис. 9, 10, 11), необходимо увеличить; большая часть минералов имеет цвета низкой насыщенности, точки цветностей которых находятся в центральной части диаграммы вблизи от точки белого света. Поэтому авторы сильно увеличили центральную, рабочую часть графиков (см. рис. 9, 10, 11); на увеличенную диаграмму нанесли дополнительно линии равной чистоты цвета через 1%, и прямые, соединяющие точку белого света с линией спектральных цветов, через 2 нм; при снятии с графиков значения λ определили интерполяцией до 1 нм, значения p в области низких насыщений до 0,1%.

В табл. 12 приведены цветовые характеристики галенита и валлерита: координаты цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , координаты цветности x , y , z , цветовой тон λ и чистота цвета p , снятые с цветовых графиков.

Для того чтобы выяснить возможность увеличения спектрального интервала при расчетах координат цвета, в качестве опыта для золота, сульванита, валлерита и риккардита расче-

Таблица 12

Характеристика цвета в отраженном свете галенита и валлериита
(относительно источника А)

Минералы	Координаты цвета			Цвето- вой мо- дуль	Координаты цветности			Цвето- вой тон λ , нм	Чисто- та цвета p , %
	\bar{x}	\bar{y}^1	\bar{z}		m	x	y		
Галенит R	46,91	42,92	16,43	106,26	0,441	0,404	0,155	486	1,1
Валлериит, R_g	23,03	19,98	4,57	46,31	0,497	0,404	0,10	587	36,2
Валлериит, R_p	13,13	11,98	4,22	29,33	0,447	0,408	0,144	580	1,0

¹ Координату \bar{y}^1 (интегральный коэффициент отражения) Х. Пиллер предложил называть «визуальным отражением» и обозначать $R_{\text{виз}}$.

ты были выполнены в двух вариантах — с интервалами 10 и 20 нм.

Спектры минералов, приведенных в табл. 13, имеют значительную скорость изменения коэффициентов отражения с длиной волны (см. вкладку), однако различия в значениях коорди-

Таблица 13

Координаты цвета золота, сульванита, валлериита и риккардита

Минерал	Интервал расчета 10 нм			Интервал расчета 20 нм		
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
Золото, R	89,78	78,33	14,25	89,90	78,54	14,20
Сульванит, R	32,02	28,99	8,80	32,07	28,99	8,84
Валлериит, R_g	23,03	19,98	4,57	23,04	20,00	4,57
Риккардит, R_p	20,74	15,52	7,60	20,84	15,49	7,58

нат цвета, подсчитанных через 10 и 20 нм, не превышают 0,5% (относительных). Эти примеры показывают, что при расчетах координат цвета рудных минералов можно пользоваться интервалом в 20 нм. Таким образом, 15 значений коэффициентов отражения по спектру через интервал в 20 нм в спектральном диапазоне 420—700 нм обеспечивают достаточную точность координат цвета даже для минералов, имеющих сложные и быстро меняющиеся с длиной волны спектры. Для расчета цвета с таким интервалом нужно определить 45 произведений и 3 сум-

мы по 15 слагаемых в каждой. Вся эта процедура расчета, выполняемая на электронных счетных машинах «Искра» и «Электроника», занимает около 15—20 мин. Нами координаты цвета и координаты цветности рассчитаны с использованием интервала в 10 нм; расчет выполнялся на ЭВМ по несложной программе для трех источников белого света одновременно.

Фактический материал, использованный при расчетах

Для расчетов цветовых характеристик минералов были использованы спектральные кривые отражения, записанные на приборе «Блеск». Материалы измерений R подробно характеризуются в работе М. С. Безсмертной и Т. Н. Чвилёвой (1976), а также в книге «Определение рудных минералов в полированых шлифах по спектрам отражения». Для сравнения цветовые характеристики были определены в разных условиях освещения источниками белого света A , B и C (ГОСТ 7721—61). Фактические материалы расчетов приведены в приложении 4. Цветовые характеристики рассчитаны для 159 рудных минералов (см. указатель минералов). Из них оптически изотропных — 72, оптически анизотропных — 87. Для анизотропных минералов были рассчитаны числовые цветовые характеристики, соответствующие двум главным положениям минерала, т. е. для коэффициентов отражения R_g и R_p . В приложении 4 для каждого минерала даются цветовые характеристики, рассчитанные для интервала 410—700 нм относительно трех стандартных источников белого света A , B и C : координаты цвета $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, цветовой модуль (m), координаты цветности (x, y, z) , цветовой тон (λ), чистота цвета (p); в приложении 4 приведены также коэффициенты отражения минералов через 20 нм для интервала 420—700 нм.

Глава III.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЧИСЛОВЫХ ЦВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ВЫРАЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ЦВЕТА МИНЕРАЛОВ

Цветовые характеристики, полученные в результате расчета, дают возможность количественно охарактеризовать цвет и сопоставить результаты расчета с визуальным восприятием цвета минералов. Качественная характеристика цвета минералов приводится в таблице-систематике минералов по отражению (см. вкладку). Поэтому прежде чем перейти непосредственно к сопоставлению качественных и количественных оценок цвета, в следующем разделе этой главы необходимо рассмотреть принципы, положенные в основу составления таблицы.

1. ТАБЛИЦА-СИСТЕМАТИКА

«ГЛАВНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ»

Эта таблица составлена М. С. Безсмертной и Т. Н. Чвилёвой в 1974 г. и демонстрировалась на передвижной выставке ВДНХ. В 1976 г. таблица была опубликована в книге «Определитель рудных минералов» тиражом 1000 экз. Такой тираж таблицы не удовлетворил читательский спрос, поэтому авторы сочли необходимым еще раз опубликовать ее в данной книге, дополнив сведениями о количественной оценке цвета минералов.

Таблица-систематика представляет дальнейшее развитие таблицы И. С. Волынского, составленной в 1955 г. (Волынский, 1955) с целью упорядочения данных о диагностических свойствах, функционально связанных с коэффициентами отражения, и анализа зависимости свойств минералов от состава.

В новом варианте таблицы, как и в том, который был предложен И. С. Волынским, для каждого минерала отведена самостоятельная ячейка; в ней с помощью простых условных обозначений наглядно показаны основные диагностические свойства и приведены формулы минералов. Минералы в таблице расположены в последовательности убывающих значений коэффициентов отражения при $\lambda=590$ нм. Этот участок спектра

ближе всего отвечает условиям визуальных наблюдений в обычном «белом» свете; поэтому систематика минералов по величине отражения при $\lambda=590$ нм является хорошей основой для количественной визуальной оценки интенсивности отражения любого определяемого минерала методом сравнения, которым постоянно пользуются исследователи руд при микроскопических наблюдениях. Значения отражения минералов даны в процентах при $\lambda=590$ нм и показаны в средней части каждой ячейки. Для минералов анизотропных приведены крайние значения R главного сечения (R_g и R_p). Постоянный коэффициент отражения одноосных минералов, отвечающий значениям R в круговом сечении кристалла и присутствующий во всех случайных сечениях минерала в шлифе, выделен шрифтом и подчеркнут; у минералов одноосных отрицательных это соответствует максимальному значению $R(R_g)$, у одноосных положительных — минимальному (R_p). Значения R изотропных минералов (кубической сингонии) показаны тем же шрифтом. В новом варианте таблицы, в отличие от прежних (Волынский, 1955, 1966), приведены спектральные кривые, показывающие распределение интенсивности отражения в пределах всей видимой области (см. ключ к таблице-вкладке); спектры отражения, полученные авторами книги на исследованных ими минералах, даны сплошной линией, сведения, заимствованные из литературы, — пунктиром.

Отношение минерала к поляризованному свету обозначено символами «И» (изотропный) или «А» (анизотропный). Знак (+) или (—), поставленный перед символом А, соответствует оптическому знаку минерала; два знака ($\pm A$) стоят у минералов, изменяющих в пределах видимой области оптический характер (кривые пересекаются). Числовой коэффициент при символе А количественно выражает (в долях единицы) силу эффекта двоутражения при $\lambda=590$ нм ($\Delta R_{\text{отв}}$)¹.

У минералов со сложными, резко непараллельными кривыми дисперсии главных коэффициентов отражения, двоутражение сопровождается изменением цвета. В. Хтейн и Р. Филлипс предлагают называть этот эффект термином «плеохроизм отражения», закрепив термин «двоутражение» только за количественным изменением силы контраста разных направлений в минерале по светлоте, $\Delta R=R_g-R_p$.

Наиболее ярко цветной эффект двоутражения (или плеохроизм отражения по Хтейн и Филлипсу) выражен у риккарди-

¹ Многие исследователи для характеристики степени анизотропности минералов используют абсолютное значение силы двоутражения $\Delta R=R_g-R_p$. Однако эта величина не передает меры зрительной оценки эффекта. И. С. Волынский предложил степень оптической анизотропности минералов выражать через понятие об относительной величине двоутражения $\Delta R_{\text{отв}}=\frac{R_g-R_p}{R_g}$.

По этой формуле сила двоутражения выражена в долях единицы; чтобы получить значение $\Delta R_{\text{отв}}$ в процентах, следует умножить на 100.

та, умангита, ковеллина, купростибита. В таблице (вкладке) ячейки таких минералов разделены диагонально и каждая часть ячейки закрашена в соответствующий цвет.

Цвет минерала в «белом» свете характеризуется, как и в первых вариантах таблицы И. С. Волынского, окраской поля ячейки. Авторы использовали 12 наименований цветов: кремовый, светло-желтый (Ж)¹, насыщено желтый (Ж), зеленовато-кремовый, кремово-зеленоватый (ЗЖ), оранжевый (РЖ, ПЖ), коричневатый (Кр), розовый (Р), розовато-кремовый, кремово-розоватый (ЖР), малиново-розовый, пурпурный (П), сиреневый (П), зеленоватый (З), оливково-зеленый, зеленовато-коричневый (ЗКр), голубой, голубоватый (Г). У минералов бесцветных, «нейтральных» (Н), поле ячейки не закрашено (минералы с высокими значениями R) или показано светло- и темно-серым (умеренно-низко и низкоотражающие). Условно принятая ограниченная гамма цветов, несомненно, недостаточна для передачи всех многочисленных нюансов цветовой тональности минералов, поэтому авторы рассматривают такой способ передачи как грубое отражение исключительно богатого природного многообразия цветов минералов. Однако и такая, пока приближенная, характеристика была очень полезна и совершенно необходима при диагностике. В таблице, которая публикуется в этой книге, дополнительно к качественной характеристике приведены расчетные значения параметров цвета — B , λ , r для сечений R_g и R_p минералов (см. ключ к таблице). Внутренние рефлексы (интенсивность проявления и цвет) показаны в таблице маленькими квадратами в левом углу ячейки.

Цифры над формулой (правый угол ячейки) обозначают твердость: римские — группу относительного рельефа, арабские — твердость по микроравниванию. Группировки минералов по относительному рельефу даны по И. С. Волынскому (1949, 1966), с учетом новых данных Айтебогердта (Uytenbogaardt, 1971); значения твердости по микроравниванию для материала, изученного авторами, — по С. И. Лебедевой. В зависимости от твердости и размера выделений минералов С. И. Лебедевой применялись различные нагрузки:

Пределы твердости, H , кгс/мм ²	Оптимальные нагрузки, г	Пределы твердости, H , кгс/мм ²	Оптимальные нагрузки, г
1—30	2—7	350—550	50—100
30—60	7—15	550—800	100—150
60—120	15—20	800—1100	100—200
120—200	20—30	>1100	150—200
200—350	30—50		

¹ В скобках даны буквенные обозначения цветов минералов, использованные авторами в табл. 2 справочника «Определение рудных минералов в полированных щлифах по спектрам отражения и твердости» М., «Недра», 1973.

Таким образом, в таблице для каждого минерала приведен достаточно полный комплекс сведений о физических диагностических свойствах в отраженном свете. Поэтому таблица может быть использована в качестве определителя. Более того, как показал в своей работе И. С. Волынский (1955), она является также удобной основой для выявления взаимозависимости оптических свойств и анализа закономерностей изменения свойств в зависимости от состава. Предлагаемый вариант таблицы содержит характеристики 250 минералов.

2. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ РАСЧЕТА ЧИСЛОВЫХ ЦВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН С ВИЗУАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ЦВЕТА МИНЕРАЛОВ

Все результаты расчета цветовых характеристик рудных минералов, как уже отмечалось выше, сведены в таблице фактического материала (прилож. 4). Часть этих характеристик, соответствующих категориям визуального восприятия цветовых эффектов — цветовой тон λ , чистота цвета r и яркость \bar{y} — для удобства сравнения вынесены в самостоятельные таблицы. В табл. 14 сопоставляются результаты расчетов цвета относительно двух стандартов белого света — источников А и С; в табл. 15 минералы систематизированы в последовательности убывающих значений λ . Прежде чем перейти к сравнению числовых цветовых величин с качественными, визуальными характеристиками цвета, необходимо проанализировать особенности цветовых параметров, полученных для различных стандартов белого света, рассмотреть условия, при которых осуществляется визуальное восприятие цвета, определить их роль и влияние на результат цветового восприятия и, наконец, определить возможности визуальной оценки.

Анализ результатов расчета вскрывает следующие особенности количественных колориметрических характеристик:

1) По числовым величинам, определяющим цветовой тон, основное количество исследованных минералов принадлежит к двум группам — фиолетово-голубой ($\lambda=450—510$ нм) и желто-оранжевой ($\lambda=560—620$ нм). Характерно почти полное отсутствие минералов с цветовым тоном зелено-спектральной области ($\lambda=510—580$ нм);

2) цвета рудных минералов в отраженном свете в большинстве случаев характеризуются низкими значениями насыщенности r . Так из исследованных нами 159 минералов 71 минерал имеет насыщенность цвета r ниже 2%, 40 минералов имеют $r=2—5\%$ и лишь 48 минералов характеризуются насыщенностью цвета r выше 5%. Подавляющее число минералов со значительной насыщенностью цвета принадлежат желто-оранжевой области спектра; минералы с λ фиолетово-голубого участка

Таблица 14

Характеристика цветности минералов относительно источников А и С

Минерал	R	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	p, %	λ , нм	p, %		
Агвиларит	R	496	2,8	484	1,7	НЗ	
Айкинит	$R'g$	568	2,0	576	2,3	НЖ	
	$R'p$	540	1,2	574	0,9	НЖ	
Аканти	R	497	2,1	481	1,5	НЗ	
Акташит	R	500	1,1	400	0,0	НЗ	
Алабандин	R	488	1,6	460	1,0	Н	
Алмаз	R	504	0,7	553'	0,1	Н	
Алтант	R	508	2,5	502	1,4	Н	
Антимонит	$R'g$	494	3,5	480	3,0	Н	
	$R'p$	503	1,6	490	0,9	НЗ	
Аргиродит	R	400	00	560'	0,3	НП	
Арсенопирит призма	$R'g$	585	5,8	581	6,0	НЖР	
	$R'p$	578	3,1	581	3,2	НГ	
Арсенопирит торец	$R'g$	585	5,8	581	6,0	НЖР	
	$R'p$	504	0,7	553'	0,1	НГ	
Арсеносульванит	R	583	16,8	577	16,5	НКр	
Аурипигмент	$R'g$	488	2,2	465	1,4	Н	
	$R'p$	485	2,5	465	2,0	Н	
Ауростибит	R	585	3,5	587	3,0	Н	
Балканит ²	$R'g$	494	2,1	476	1,2	Н	
	$R'p$	492	3,3	479	2,8	Н	
Бертьерит	$R'g$	492	1,7	470	1,0	Н	
	$R'p$	604	1,3	498'	1,2	НП	
Берцелианит	R	498	7,7	487	7,0	НГ	
Бетехтинит	$R'g$	498	1,3	478	0,7	НЖР	
	$R'p$	573	0,1	553'	0,3	НЖР	
Борнит	R'	524	22,0	589	18	ЖР	
Брейтгауптит	R_g	596	10,0	605	7,0	П	
	$R'p$	700	5,2	497'	5,0	П	
Буланжерит	$R'g$	494	2,6	476	1,5	НЗ	
	$R'p$	497	2,3	479	1,2	НЗ	
Бурнонит	$R'g$	497	2,1	479	1,1	НЗ	
	$R'p$	494	1,9	474	1,0	НЗ	

Продолжение табл. 14

Минерал	R	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	p, %	λ , нм	p, %		
Вакабаяшилит	$R'g$	486	1,7	465	1,2	H	
	$R'p$	487	2,2	465	1,6	H	
Валлерит	$R'g$	587	36,2	579	35,0	НКр	
	$R'p$	580	1,0	592	1,2	H	
Верлит	$R'g$	590	4,2	591	3,7	НЖ	
	$R'p$	590	4,2	590	3,2	НЖ	
Виоларит	R	589	8,2	583	8,5	НКр	
Висмут	R_g	588	9,5	585	8,7	НЖР	
	$R'p$	593	7,2	592	5,9	НЖР	
Висмутин	$R'g$	508	1,8	490	0,5	НЖ	
	$R'p$	494	0,9	400	0,0	НЖ	
Волынскит	R	593	1,0	496'	0,7	НП	
Вулканит	$R'g$	586	47,0	578	46,0	Ж	
	$R'p$	584	5,0	472	5,5	Г	
Галенит ²	R	486	1,1	450	0,4	H	
Галенобисмутит ²	$R'g$	494	1,9	476	1,2	H	
	$R'p$	491	1,2	465	0,5	H	
Галлит ²	R	494	1,9	476	1,0	H	
Галхант	R	491	3,5	478	3,1	Н	
Гематит	R_g	497	4,0	483	3,0	НГ	
	$R'p$	496	3,7	480	2,4	НГ	
Геокронит	$R'g$	492	1,7	467	0,9	НЗ	
	$R'p$	494	1,4	470	0,7	НЗ	
Германит ²	R	607	6,0	640	3,9	НЖР	
Герсдорфит	R	480	0,1	553'	0,3	H	
Гессит	$R'g$	588	5,7	586	4,8	НКр	
	$R'p$	495	0,1	520'	0,3	НКр	
Гетероморфит	$R'g$	497	2,3	479	1,2	H	
	$R'p$	503	1,6	484	0,7	H	
Гетчелит	$R'g$	491	3,9	477	3,0	НГ	
	$R'p$	491	3,9	478	3,2	НГ	
Графит	R_g	588	9,0	583	8,5	НКр	
	$R'p$	580	2,1	581	2,5	H	

Продолжение табл. 14

Минерал	R	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	p, %	λ , нм	p, %		
Грейгит	R	590	9,0	583	8,4	НКр	
Гринокит ²	R	500	3,1	489	2,7	НГ	
Гуанахуатит ³	$R'g$	586	7,2	584	6,5	Н	
	$R'p$	588	18,7	584	16	Н	
Гудмундит	$R'g$	498	1,7	480	0,8	НГ	
	$R'p$	588	3,0	604	2,0	НЖр	
Делафоссит	$R'g$	578	3,1	581	3,2	НКр	
Джезказганит	R	562'	0,2	520'	0,8	НЖР	
Джемсонит	$R'g$	497	2,5	480	1,7	НЗ	
	$R'p$	494	1,9	477	1,0	НЗ	
Джерфишерит	R	586	21,0	579	22,0	НКр	
Догначкаит ²	$R'g$	530	1,2	610	0,2	НЖ	
	$R'p$	515	1,0	553'	0,1	НЖ	
Железо	R	504	0,7	506'	0,2	Н	
Жозеит А	$R'g$	575	1,8	582	1,9	НЖ	
	$R'p$	583	3,0	584	2,8	НЖ	
Жозеит Б	$R'g$	586	4,2	585	3,8	НЖ	
	$R'p$	585	3,5	587	3,0	НЖ	
Зелигманнит	$R'g$	501	1,8	480	0,8	НЗ	
	$R'p$	494	1,9	473	0,9	НЗ	
Зиннерит	R	502	0,9	553'	0,2	НКр	
Золото	R	585	50,0	577	48,0	Ж	
Золото медистое	R	592	32,0	586	28,0	ЖР	
Идаит ²	$R'g$	555'	0,2	510'	0,3	ЖР	
	R_p	596	33	592	27	ЖР	
Ильвант ²	$R'g$	503	1,6	490	0,5	НП	
	$R'p$	495	6,0	482	4,8	НГ	
Индит	R	494	1,9	476	1,0	Н	
Иорданит	$R'g$	494	1,7	476	1,0	НЗ	
	$R'p$	494	1,4	467	0,7	НЗ	
Калаверит	$R'g$	583	8,0	578	8,6	НЖ	
	$R'p$	584	8,6	579	9,0	НЖ	
Кан菲尔дит	R	483	1,0	450	0,4	НП	

Продолжение табл. 14

Минерал	R	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	p, %	λ , нм	p, %		
Кёстерит	R	562	1,5	573	2,0	Н	
Киноварь	$R'g$	493	2,2	476	1,5	НГ	
	R_p	488	1,6	467	1,0	НГ	
Клаусталит ²	R	489	3,7	474	2,2	Н	
Клокманнит	$R'g$	496	3,5	482	2,7	Г	
	R_p	500	5,5	489	4,5	НЖЗ	
Кобальтин	R	591	7,5	592	5,9	Р	
c Ni	R	590	5,5	591	4,5	Р	
Кобеллит ²	$R'g$	492	1,7	472	1,0	Н	
	R'_p	492	1,7	472	1,2	Н	
Ковеллин ²	$R'g$	489	5,0	477	4,7	Г	
	R_p	489	22,0	481	32,5	Г	
Козалит ²	$R'g$	486	1,1	450	0,5	Н	
	R'_p	487	1,3	450	0,5	Н	
Колорадонит	R	589	3,3	591	3,7	НКр	
Колусит	R	587	15,5	581	14,5	НКр	
Коффинит	R	490	0,3	553'	0,2	Н	
Креннерит	$R'g$	585	9,8	578	10,2	НЖ	
	R'_p	584	13,5	578	13,0	НЖ	
Крукесит	$R'g$	485	0,4	558'	0,3	НП	
	R'_p	587	2,0	615	1,2	НП	
Кубанит	$R'g$	583	18,2	575	20,0	ЖР	
	R'_p	585	26,0	578	26,0	НП	
Куприт	R	492	4,3	478	3,7	НГ	
Купростибит	$R'g$	455	0,5	450	0,8	ЖР	
	R_p	570'	2,5	562'	1,4	П	
Кюстелит	R	585	12,5	580	12,0	НЖ	
Лаутит	R	479	0,7	450	0,4	НП	
Лёллингит	$R'g$	581	5,0	580	4,6	НЖ	
	R'_p	493	2,2	476	1,5	НГ	
Лёллингит-Со	$R'g$	585	3,5	587	3,0	НЖ	
	R'_p	492	1,5	466	0,8	НГ	
Ливингстонит	$R'g$	495	3,3	481	2,6	НЗ	
	R'_p	494	2,1	477	1,3	НЗ	

Продолжение табл. 14

Минерал	R	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	p, %	λ , нм	p, %		
Лиллианит ²	$R'g$	490	1,8	465	0,9	Н	
	$R'p$	487	1,3	465	0,9	Н	
Лорандит	$R'g$	492	3,4	477	2,7	НГ	
	$R'p$	500	3,3	484	2,1	НГ	
Люционит ²	$R'g$	591	9,0	590	7,8	НП	
	R_p	596	11,6	603	4,2	НП	
Маггемит	R	474	0,5	440	0,3	НП	
Магнетит	R	593	1,0	496'	0,7	НЖр	
Макинавит	$R'g$	584	13,5	578	14,0	НЖр	
	$R'p$	588	7,0	586	6,0	Н	
Макинстрийт	$R'g$	491	2,8	475	2,2	Н	
	$R'p$	491	2,0	474	1,4	Н	
Марказит	$R'g$	576	9,5	570	12,0	ЖЗ	
	$R'p$	581	8,0	576	9,1	Ж	
Маухерит	R	591	9,0	586	8,0	НП	
Медь ²	R	594	33,2	589	28,0	Р	
Мелонит	R_g	588	12,0	582	12,0	П	
	$R'p$	593	8,0	595	5,8	П	
Менегинит	$R'g$	497	1,9	480	1,0	НЗ	
	$R'p$	498	1,3	476	0,4	НЗ	
Метациннабарит	R	488	1,1	445	0,2	НЖ	
Миллерит	R_g	584	32,5	575	33,5	Ж	
	$R'p$	584	20,0	576	22,0	Ж	
Молибденит	R_g	482	1,8	465	1,5	Н	
	$R'p$	489	3,4	475	3,0	Н	
Монтбреййт	$R'g$	584	9,0	580	9,5	НЖ	
	$R'p$	586	11,0	578	10,2	НЖ	
Моусонит ²	$R'g$	590	33,0	583	30,0	ЖР	
	R_p	592	19,0	586	16,5	ЖР	
Мышьяк	R_g	490	0,4	520'	0,3	Н	
	$R'p$	484	1,2	455	0,6	Н	
Нагиагит	$R'g$	492	2,8	477	2,0	Н	
	$R'p$	494	1,9	476	1,0	Н	

Продолжение табл. 14

Минерал	<i>R</i>	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	<i>p</i> , %	λ , нм	<i>p</i> , %		
Наастуран	<i>R</i>	485	0,4	562'	0,2	Н	
Науманнит	<i>R</i>	494	3,3	479	2,5	НЗ	
Никелин	R_g	591	16,2	585	14,0	ЖР	
	$R'p$	591	22,0	587	19,0	ЖР	
Нисбит	<i>R</i>	575	1,8	587	2,1	Н	
Овихиит	$R'g$	497	2,1	476	1,0	НЗ	
	$R'p$	494	1,7	473	0,9	НЗ	
Онофрит	<i>R</i>	484	0,9	440	0,1	НГ	
Пентландит	<i>R</i>	585	21,0	577	22,0	ЖР	
Петцит	<i>R</i>	486	0,9	445	0,2	Н	
Парагуанахуатит	R_g	см. гуанахуатит				Н	
	R_p					Н	
Пиаргирит	R_g	491	4,7	478	4,0	НГ	
	$R'p$	490	4,3	476	3,7	НГ	
Пирит	<i>R</i>	582	17,5	574	18,0	Ж	
Пирротин ²	$R'g$	586	14,5	579	14,0	ЖР	
	R_p	589	16,0	583	14,0	ЖР	
Пирсейт	$R'g$	494	2,1	476	1,2	НЗ	
	$R'p$	488	1,6	467	1,0	НЗ	
Плагионит	$R'g$	494	1,7	476	1,0	НЖ	
	$R'p$	508	1,8	490	0,5	Н	
Полибазит ²	$R'g$	494	1,7	470	0,7	НЗ	
	$R'p$	486	1,1	450	0,4	НЗ	
Прустит	R_g	488	3,0	474	2,7	НГ	
	$R'p$	487	3,0	470	2,5	НГ	
Реальгар	$R'g$	487	2,5	472	2,0	НГ	
	$R'p$	486	1,7	463	1,1	НГ	
Ренъерит ²	$R'g$	589	36	582	32,0	ЖР	
	R_p	591	30,2	585	26,5	ЖР	
Риккардит ²	R_g	481	4,0	468	4,5	П	
	$R'p$	552'	12,3	552'	7,5	П	
Рокезит	<i>R</i>	480	0,6	400	0,0	Н	
Саффлорит	$R'g$	580	1,0	592	1,2	Н	
	$R'p$	492	1,7	474	1,0	Н	

Продолжение табл. 14

Минерал	R	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	p, %	λ , нм	p, %		
Свинец	R	700	0,0	500'	0,8	Н	
Селен металл.	$R'g$	482	0,5	563'	0,3	Н	
	R_p	515'	1,2	513'	1,4	Н	
Сера	$R'g$	580	2,1	581	2,5	Н	
	R'_p	583	3,0	583	2,8	Н	
Серебро	R	583	5,0	580	5,6	НЖ	
Сильванит	$R'g$	582	6,0	578	6,2	Ж	
	R'_p	584	10,0	578	11,0	ЖР	
Станнин	R	581	9,3	575	10,2	НЖЗ	
Станноидит	$R'g$	586	13,0	581	12,5	НЖР	
	R'_p	592	17,0	586	15,0	НЖР	
Стефанит	$R'g$	492	2,2	476	1,7	НЖ	
	R'_p	485	1,5	467	1,3	НЖ	
Сульванит	R	583	15,0	574	15,0	НЖЗ	
Сурьма	R_g	512	1,1	400	0,0	Н	
	R'_p	503	1,6	490	0,5	НЗ	
Сфалерит-Fe	R	489	1,2	460	0,5	Н	
Сфалерит	R	491	1,2	466	0,8	Н	
Талнахит ²	R	584	40,7	576	41,0	Ж	
Теллур	$R'g$	535	1,2	~620	0,2	НЖ	
	R_p	535	1,2	576	0,7	НЖ	
Теллуроисмутит	$R'g$	588	3,0	587	3,1	НП	
	R'_p	593	1,5	615	1,2	НП	
Теннантит	R	503	1,6	476	0,4	НЗ	
Теннантит-Hg	R	545	2,2	573	2,0	НЖ	
Тетраэдрит	R	525	1,7	574	0,8	НКР	
Тетрадимит	$R'g$	578	3,1	578	3,0	НЖЗ	
	R_p	582	4,5	582	4,2	НЖЗ	
Тиманнит	R	488	2,1	470	1,7	Н	
Тиманнит-S	R	487	1,7	468	1,5	Н	
Тунгстенит	R_g	483	0,9	462	0,8	Н	
	R'_p	565	1,4	576	1,7	Н	
Ульманит	R	492	1,5	466	0,8	НП	
Умангит ²	$R'g$	485	2,5	467	2,2	Г	
	R_p	571'	3,7	563'	2,2	П	
Ураннит	R	488	1,0	455	0,4	Н	
Ферроселит	$R'g$	589	14,7	584	13,0	НЖ	
	R'_p	591	7,0	588	6,0	НЖ	
Ферберит ²	$R'g$	510	0,7	508'	0,2	Н	
	R'_p	493	0,4	520'	0,3	Н	

Продолжение табл. 14

Минерал	<i>R</i>	Источники белого света				Цвет в белом свете (визуально)	
		A		C			
		λ , нм	<i>p</i> , %	λ , нм	<i>p</i> , %		
Фрейбергит	<i>R</i>	510	1,1	400	0,0	Н	
Фробергит	<i>R'g</i>	620	0,1	498'	1,0	НП	
	<i>R'p</i>	563'	0,3	520'	0,8	НП	
Халькозин ²	<i>R'g</i>	492	3,2	476	2,3	НГ	
Халькопирит	<i>R</i>	582	32,0	573	32,5	Ж	
Халькостибит	<i>R'g</i>	497	3,4	485	2,9	НЗ	
	<i>R'p</i>	496	3,0	482	2,2	НЗ	
Халькоталлит	<i>R'g</i>	493	3,1	478	2,3	Н	
	<i>R'p</i>	573'	0,2	550'	0,7	Н	
Цинкенит	<i>R'g</i>	494	2,4	479	1,5	НЗ	
	<i>R'p</i>	494	2,1	477	1,2	НЗ	
Швацит	<i>R</i>	575	1,8	594	1,8	НКр	
Шеелит	<i>R</i>	578	1,0	497'	0,5	Н	
Штернбергит	<i>R'g</i>	586	11,0	580	12,0	Кр	
	<i>R'p</i>	587	17,5	580	17,0	Кр	
Штромейерит	<i>R'g</i>	484	2,3	465	1,9	НГ	
	<i>R'p</i>	483	1,2	455	0,7	НГ	
Эмплектит ²	<i>R'g</i>	580	12,2	576	7,6	НЖ	
	<i>R'p</i>	583	9,3	578	9,3	НЖ	
Энаргит ²	<i>R'g</i>	480	0,2	552'	0,5	НП	
	<i>R'p</i>	575'	0,1	552'	0,5	НП	
Эскеборнит	<i>R'g</i>	582	11,5	575	12,0	НКр	
	<i>R'p</i>	584	16,0	576	16,0	НКр	

Примечания. 1. В таблице сохранены обозначения, принятые авторами в книге (Определение рудных минералов... 1973): для анизотропных двутрахающих минералов приведены значения R_g и R_p ; полужирным шрифтом выделены значения R минералов изотропных и постоянных значений R минералов одноосных; визуальная оценка цвета в белом свете дана буквенными обозначениями: Г — голубой, З — зеленый, Ж — желтый (кремовый), Р — розовый, Кр — коричневый, П — пурпурный (сиреневый, фиолетово-розовый), РЖ — кремово-розоватый, ЖЗ — кремово-зеленоватый; минералы бесцветные с чистотой цвета *p*, близкой к 0, показаны буквой Н (нейтральные, белые или серые); НГ, НЗ, НЖ, НКр, НП — минералы с очень слабыми, не всегда проявляющими оттенками.

2. Минералы, для расчета цветовых характеристик которых были использованы материалы измерения R других исследователей: галенит, галлит, германит, гринокит, идант, ильвант, клаусталит, ковеллин, люсонит, медь, моусонит, реньерьит, талнахит, энагрит (Л. А. Логинова); галенобисмутит, догначкант, кобеллит, козалит, лилланит, эмплектит (Л. Н. Соболева); балканит, халькозин (В. А. Атанасов); пирротин, полибазит (Л. И. Бочек); ферберит (И. Е. Максимюк); каркардит (Л. Н. Вяльсов).

3. Для расчетов цвета был использован образец парагуанахуатита, сведения о котором в таблице-вкладке отсутствуют; диагностировал рентгенометрически Е. Н. Завьялов.

Перечень минералов в последовательности возрастающих значений цветового тона¹

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	p, %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
<i>Минералы фиолетово-синего участка спектра ($\lambda=400-470$ нм)</i>					
Сурьма	R_g	400	0,0	74,9	Н
	R'_p	490	0,5	71,2	НЗ
Висмутин	R'_p	400	0,0	41,9	НЖ
	R'_g	490	0,5	50,3	НЖ)
Фрейбергит	R	400	0,0	30,9	Н
Акташит	R	400	0,0	30,0	НЗ
Рокезит	R	400	0,0	22,3	Н
Маггемит	R	400	0,3	18,2	НП
Онофрит	R	440	0,1	25,4	НЖ
Петцит	R	445	0,2	39,1	Н
Метациннабарит	R	445	0,2	24,4	НЖ
Купростибит	R'_g	450	0,8	47,1	ЖР
	R_p	562'	1,4	40,6	П
Козалит	R'_g	450	0,5	48,1	Н
	R'_p	450	0,5	39,2	Н)
Галенит	R	450	0,4	43,2	Н
Лаутит	R	450	0,4	31,0	НП
Полибазит	R'_p	450	0,4	28,5	НЗ
	R'_g	470	0,7	30,6	НЗ
Кан菲尔дит	R	450	0,4	24,5	НП
Уранинит	R	455	0,4	16,1	Н
Штромейерит	R'_p	455	0,7	25,7	НП
	R'_g	465	1,9	29,4	НП
Мышьяк	R'_p	455	0,6	46,4	Н
	R_g	520'	0,3	57,9	Н
Алабандин	R	460	1,0	22,6	Н
Сфалерит с Fe	R	460	0,5	17,4	Н
Тунгстенит	R_g	462	0,8	38,8	Н
	R'_p	576	1,7	19,0	Н
Реальгар	R'_p	463	1,1	18,7	НГ
	R'_g	472	2,0	20,8	НГ

¹ См. примечания к табл. 14.

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	p, %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Аурипигмент	$R'g$	465	2,0	19,0	H
	$R'p$	465	1,4	28,3	H
Штромейерит	$R'g$	465	1,9	29,4	HП
	$R'p$	455	0,7	25,7	HП
Молибденит	R_g	465	1,5	45,4	H
	$R'p$	475	3,0	21,8	H
Вакабаяшилит	$R'g$	465	1,6	21,3	H
	$R'p$	465	1,2	24,3	H
Лиллианит	$R'g$	465	0,9	47,0	H
	$R'p$	465	0,9	38,5	H
Галенобисмутит	$R'p$	465	0,5	46,4	H
	$R'g$	476	1,2	49,2	H
Ульманит	R	466	0,8	46,2	HП
Сфалерит	R	466	0,8	16,0	H
Умангит	$R'g$	467	2,2	16,4	G
	R_p	563'	2,2	13,3	P
Степанит	$R'p$	467	1,3	27,6	HЖ
	$R'g$	476	1,7	31,0	HЖ
Пирсент	$R'p$	467	1,0	27,9	HЗ
	$R'g$	476	1,2	34,9	HЗ
Киноварь	R_p	467	1,0	24,8	HГ
	$R'g$	476	1,5	29,6	HГ
Геокронит	$R'g$	467	0,9	40,8	HЗ
	$R'p$	470	0,7	38,6	HЗ
Лёлленгит—Co	$R'p$	466	0,8	53,7	HГ
	$R'g$	587	3,0	54,1	HЖ
Киноварь	R_p	467	1,0	24,8	HГ
	$R'g$	476	1,5	29,6	HГ
Иорданит	$R'p$	467	0,7	37,4	HЗ
	$R'g$	476	1,0	39,4	HЗ
Риккардит	R_g	468	4,5	20,4	P
	$R'p$	552	7,5	14,8	P
Тиманнит с S	R	468	1,5	27,3	H
Тиманнит	R	470	1,7	30,0	H
Полибазит	$R'g$	470	0,7	30,6	HЗ
	$R'p$	450	0,4	28,5	HЗ

Минерал	R	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
<i>Минералы голубого — зеленого участка спектра ($\lambda = 470$—530 нм)</i>					
Прустит	R'_p	470	2,5	24,2	НГ
	R_g	474	2,7	27,7	НГ
Бертьерит	R'_g	470	1,0	42,4	Н
	R'_p	498'	1,2	30,6	НП
Геокронит	R'_p	470	0,7	38,6	НЗ
	R'_g	467	0,9	40,8	НЗ
Вулканит	R'_p	472	5,5	16,7	Г
	R'_g	578	4,6	42,2	Ж
Реальгар	R'_g	472	2,0	20,8	НГ
	R'_p	463	1,1	18,7	НГ
Кобеллит	R'_g	472	1,0	45,0	Н
	R'_p	472	1,2	40,2	Н
Овиххит	R'_p	473	0,9	39,4	НЗ
	R'_g	476	1,0	42,1	НЗ
Зелигманнит	R'_p	473	0,9	31,3	НЗ
	R'_g	480	0,8	34,2	НЗ
Прустит	R_g	474	2,7	27,7	НГ
	R'_p	470	2,5	24,2	НГ
Клаусталит	R	474	2,2	51,3	Н
Макинстрийт	R'_p	474	1,4	27,7	Н
	R'_g	475	2,2	31,4	Н
Саффлорит	R'_p	474	1,0	52,1	Н
	R'_g	592	1,2	54,3	Н
Бурнонит	R'_p	474	1,0	33,9	НЗ
	R'_g	479	1,1	36,1	НЗ
Молибденит	R'_p	475	3,0	21,8	Н
	R_g	465	1,5	45,4	Н
Пираргирит	R_p	476	3,7	27,9	НГ
	R'_g	478	4,0	30,5	НГ
Халькозин	R'_g	476	2,3	32,5	НГ
Стефанит	R'_g	476	1,7	31,0	НЖ
	R'_p	467	1,3	27,6	НЖ
Лёллингит	R'_p	476	1,5	53,2	НГ
	R'_g	580	4,6	54,6	НЖ

Продолжение табл. 15

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	<i>p</i> , %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Буланжерит	<i>R'g</i>	476	1,5	43,3	НЗ
	<i>R'p</i>	479	1,2	35,9	НЗ
Киноварь	<i>R'g</i>	476	1,5	29,6	НГ
	<i>R_p</i>	467	1,0	24,8	НГ
Пирсент	<i>R'g</i>	476	1,2	34,9	НЗ
	<i>R'p</i>	467	1,0	27,9	НЗ
Галенобисмутит	<i>R'g</i>	476	1,2	49,2	Н
	<i>R'p</i>	465	0,5	46,4	Н
Балканит	<i>R'g</i>	476	1,2	33,5	Н
	<i>R'p</i>	479	2,8	27,5	Н
Овихиит	<i>R'g</i>	476	1,0	42,1	НЗ
	<i>R'p</i>	473	0,9	39,4	НЗ
Плагионит	<i>R'g</i>	476	1,0	41,5	НЖ
	<i>R'p</i>	490	0,5	33,0	Н
Иорданит	<i>R'g</i>	476	1,0	39,4	НЗ
	<i>R'p</i>	467	0,7	37,4	НЗ
Нагиагит	<i>R'p</i>	476	1,0	38,6	Н
	<i>R'g</i>	477	2,0	40,5	Н
Индит	<i>R</i>	476	1,0	25,3	Н
Галлит	<i>R</i>	476	1,0	24,0	Н
Менегинит	<i>R'p</i>	476	0,4	35,8	НЗ
	<i>R'g</i>	480	1,0	43,3	НЗ
Теннантит	<i>R</i>	476	0,4	29,0	НЗ
Ковеллин	<i>R'g</i>	477	4,7	23,1	Г
	<i>R_p</i>	481	32,5	6,1	Г
Гетчелит	<i>R'g</i>	477	3,0	30,6	НГ
	<i>R'p</i>	478	3,2	27,5	НГ
Лорандит	<i>R'g</i>	477	2,7	32,2	НГ
	<i>R'p</i>	484	2,1	27,6	НГ
Нагиагит	<i>R'g</i>	477	2,0	40,5	Н
	<i>R'p</i>	476	1,0	38,5	Н
Ливингстонит	<i>R'p</i>	477	1,3	29,9	НЗ
	<i>R'g</i>	481	2,6	39,5	НЗ
Цинкенит	<i>R'p</i>	477	1,2	37,6	НЗ
	<i>R'g</i>	479	1,5	42,7	НЗ

Продолжение табл. 15

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	<i>p</i> , %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Джемсонит	$R'p$	477	1,0	38,2	НЗ
	$R'g$	480	1,7	43,9	НЗ
Пирааргирит	R_g	478	4,0	30,5	НГ
	R'_p	476	3,6	28,0	НГ
Куприт	R	478	3,7	26,4	НГ
Гетчелит	R'_p	478	3,2	27,5	НГ
	R'_g	477	3,0	30,6	НГ
Галхант	R	478	3,1	24,3	Н
Халькоталлит	R'_g	478	2,3	31,0	Н
	R'_p	550'	0,7	27,5	Н
Бетехтинит	R'_g	478	0,7	28,2	НЖР
	R'_p	553'	0,3	27,4	НЖР
Балканит	R'_p	479	2,8	27,5	Н
	R'_g	476	1,2	33,5	Н
Науманнит	R	479	2,5	36,1	НЗ
Цинкенит	R'_g	479	1,5	42,7	НЗ
	R'_p	477	1,2	37,6	НЗ
Гетероморфит	R'_g	479	1,2	43,1	Н
	R'_p	484	0,3	33,6	Н
Буланжерит	R'_p	479	1,2	35,9	НЗ
	R'_g	476	1,5	43,3	НЗ
Буронит	R'_g	479	1,1	36,1	НЗ
	R'_p	474	1,0	33,9	НЗ
Антимонит	R'_g	480	3,0	46,7	Н
	R'_p	490	0,9	30,6	НЗ
Гематит	R'_p	480	2,4	26,3	НГ
	R_g	483	3,0	29,8	НГ
Джемсонит	R'_g	480	1,7	43,9	НЗ
	R'_p	477	1,0	38,2	НЗ
Менегинит	R'_g	480	1,0	43,3	НЗ
	R'_p	476	0,4	35,8	НЗ
Гудмундит	R'_g	480	0,8	56,7	НГ
	R'_p	604	2,0	52,3	НЖР
Зелигманнит	R'_g	480	0,8	34,2	НЗ
	R'_p	473	0,9	31,3	НЗ

Продолжение табл. 15

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	<i>p</i> , %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Ковеллин	R_p	481	32,5	6,1	Г
	R'_g	477	4,7	23,1	Г
Левингстонит	R'_g	481	2,6	39,5	НЗ
	R'_p	477	1,3	29,9	НЗ
Аканти	<i>R</i>	481	1,5	34,1	НЗ
Ильвант	R'_p	482	4,8	7,5	НГ
	R'_g	490	0,5	9,7	НП
Клокманнит	R'_g	482	2,7	36,2	Г
	R_p	489	4,5	14,5	НЖЗ
Халькостибит	R'_p	482	2,2	36,9	НЗ
	R'_g	485	2,9	41,4	НЗ
Гематит	R_g	483	3,0	29,8	НГ
	R'_p	480	2,4	26,3	НГ
Лорандит	R'_p	484	2,1	27,6	НГ
	R'_g	477	2,7	32,2	НГ
Гетероморфит	R'_p	484	0,7	33,6	Н
	R'_g	479	1,2	43,1	Н
Берцелианит	<i>R</i>	487	7,0	26,2	НГ
Агвиларит	<i>R</i>	487	1,7	34,9	НЗ
Клокманнит	R_p	489	4,5	14,5	НЖЗ
	R'_g	482	2,7	36,2	Г
Гринокит	<i>R</i>	489	2,7	19,8	НГ
Антимонит	R'_p	490	0,9	30,6	НЗ
	R'_g	480	3,0	46,7	Н
Сурьма	R'_p	490	0,5	71,2	НЗ
	R_g	400	0,0	74,9	Н
Висмутин	R'_g	490	0,5	50,3	НЖ
	R'_p	400	0,0	41,9	НЖ
Плагионит	R'_p	490	0,5	33,0	Н
	R'_g	476	1,0	41,5	НЖ
Ильвант	R'_g	490	0,5	9,7	НП
	R'_p	482	4,8	7,5	НГ
Свинец	<i>R</i>	500	0,8	55,5	Н
Алтант	<i>R</i>	502	1,4	69,8	Н

Минерал	R	λ , нм	p , %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
<i>Минералы желто-оранжевого участка спектра</i>					
($\lambda = 530 - 620$ нм)					
Марказит	R'_g	570	12,0	56,2	ЖЗ
	R'_p	576	9,1	49,3	Ж
Халькопирит	R	573	32,5	47,9	Ж
Теннантит — Hg	R	573	2,0	30,3	НЖ
Кёстерит	R	573	2,0	24,8	Н
Пирит	R	574	18,0	53,7	Ж
Сульванит	R	574	15,0	28,8	НЖЗ
Айкинит	R'_p	574	0,9	39,3	НЖ
	R'_g	576	2,3	47,3	НЖ
Тетраэдрит	R	574	0,8	31,4	НКр
Миллерит	R_g	575	33,5	55,3	Ж
	R'_p	576	22,0	50,3	Ж
Кубанит	R'_g	575	20,0	39,9	ЖР
	R'_p	578	26,0	35,3	ЖР
Эскеборнит	R'_g	575	12,0	32,7	НКр
	R'_p	576	16,0	29,6	НКр
Станнин	R	575	10,2	27,4	НЖЗ
Талнахит	R	576	41,0	36,4	Ж
Марказит	R'_p	576	9,1	49,3	Ж
	R'_g	570	12,0	56,2	ЖЗ
Эмпелектит	R'_g	576	7,6	42,0	НЖ
	R'_p	578	9,3	38,4	НЖ
Айкинит	R'_g	576	2,3	47,3	НЖ
	R'_p	574	0,9	39,3	НЖ
Тунгстенит	R'_p	576	1,7	19,0	Н
	R_g	462	0,8	38,8	Н
Теллур металл.	R_p	576	0,7	57,7	НЖ
	R'_g	620	0,2	66,0	НЖ
Золото	R	577	48,0	74,6	Ж
Пентландит	R	577	22,0	46,5	ЖР
Арсеносульванит	R	577	16,5	31,0	НКр
Вулканит	R'_g	578	46,0	42,2	Ж
	R'_p	472	5,5	16,7	Г

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	<i>p</i> , %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Кубанит	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	578	26,0	35,3	ЖР
	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	575	20,0	39,9	ЖР
Макинавит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	578	14,0	45,8	НЖР
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	586	6,0	17,9	Н
Креннерит	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	578	13,0	54,8	НЖ
	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	578	10,2	61,5	НЖ
Сильванит	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	578	11,0	49,7	НЖР
	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	578	6,2	59,7	Ж
Монтбрейит	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	578	10,2	56,7	НЖ
	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	580	9,5	67,7	НЖ
Эмплектит	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	578	9,3	39,1	НЖ
	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	576	7,6	42,0	НЖ
Калаверит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	578	8,6	56,7	НЖ
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	579	9,0	53,6	НЖ
Тетрадимит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	578	3,0	60,4	НЖЗ
	<i>R</i> _{<i>p</i>}	582	4,2	51,7	НЖЗ
Валлернит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	579	35,0	19,2	НКр
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	592	1,2	12,0	Н
Джерфишерит	<i>R</i>	579	22,0	22,6	НКр
Пирротин	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	579	14,0	40,2	ЖР
	<i>R</i> _{<i>p</i>}	583	14,0	34,4	ЖР
Штернбергит	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	580	17,0	24,8	Кр
	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	580	12,0	36,0	Кр
Кюстеллит	<i>R</i>	580	12,0	81,3	НЖ
Монтбрейит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	580	9,5	67,7	НЖ
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	578	10,2	56,7	НЖ
Серебро	<i>R</i>	580	5,6	88,6	НЖ
Лёллингит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	580	4,6	54,6	НЖ
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	476	1,5	53,2	НГ
Колусит	<i>R</i>	581	14,5	27,3	НКр
Станноидит	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	581	12,5	25,7	НЖР
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	586	15,0	22,3	НЖР
Арсенопирит, торец	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	581	6,0	52,8	НЖР
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	553'	0,1	51,8	НГ
Арсечопирит, призма	<i>R'</i> _{<i>g</i>}	581	6,0	52,0	НЖР
	<i>R'</i> _{<i>p</i>}	581	3,2	52,4	НГ

Продолжение табл. 15

Минерал	R	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Делафоссит	R_{\max}	581	3,2	22,4	НКр
Сера	R'_g	581	2,5	14,8	Н
	R'_p	583	2,8	10,5	Н
Графит	R'_p	581	2,5	7,0	Н
	R_g	583	8,5	21,4	НКр
Реньерит	R'_g	582	32,0	26,9	ЖР
	R_p	585	26,5	25,0	ЖР
Мелонит	R_g	582	12,0	62,8	П
	R'_p	595	5,8	57,7	П
Тетрадимит	R_p	582	4,2	51,7	НЖЗ
	R'_g	578	3,0	60,4	НЖЗ
Жозеит А	R'_g	582	1,9	54,8	НЖ
	R'_p	584	2,8	50,2	НЖ
Моусонит	R'_g	583	30,0	26,5	ЖР
	R_p	586	16,5	24,0	ЖР
Пирротин	R_p	583	14,0	34,5	ЖР
	R'_g	579	14,0	40,2	ЖР
Виоларит	R	583	8,5	38,1	НКр
Графит	R_g	583	8,5	21,4	НКр
	R'_p	581	2,5	7,0	Н
Грейгит	R	583	8,4	34,8	НКр
Сера	R'_p	583	2,8	14,8	Н
	R'_g	581	2,5	10,5	Н
Парагуанахуатит	R'_p	584	16,0	36,1	Н
	R'_g	584	6,5	48,4	Н
Ферроселит	R'_g	584	13,0	48,4	НЖ
	R'_p	588	6,0	44,4	НЖ
Жозеит А	R'_p	584	2,8	50,2	НЖ
	R'_g	582	1,9	54,8	НЖ
Реньерит	R_p	585	26,5	25,0	ЖР
	R'_g	582	32,1	26,9	ЖР
Никелин	R_g	585	14,0	51,9	ЖР
	R'_p	587	19,0	46,6	ЖР
Висмут	R_g	585	8,7	66,6	НЖР
	R'_p	592	5,9	58,8	НЖР

Продолжение табл. 15

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	p, %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Жозеит Б	<i>R'g</i>	585	3,8	63,0	НЖ
	<i>R'p</i>	587	3,0	53,8	НЖ
Золото — Cu	R	586	28,0	63,5	ЖР
	<i>R_p</i>	586	16,5	24,0	ЖР
Моусонит	<i>R'g</i>	583	30,0	26,5	ЖР
	<i>R'p</i>	586	15,0	22,3	НЖР
Станноидит	<i>R'g</i>	581	12,5	25,7	НЖР
	<i>R</i>	586	8,0	49,8	НП
Маухерит	<i>R'p</i>	586	6,0	17,9	Н
	<i>R'g</i>	578	14,0	45,8	НЖР
Гессит	<i>R'g</i>	586	4,8	40,1	НКр
	<i>R'p</i>	520'	0,3	38,8	НКр
Никелин	<i>R'p</i>	587	19,0	46,6	ЖР
	<i>R_g</i>	585	14,0	51,9	ЖР
Теллуровисмутит	<i>R'g</i>	587	3,1	65,0	НП
	<i>R'p</i>	615	1,2	60,6	НП
Ауростибит	R	587	3,0	61,3	Н
Лёлленгит — Co	<i>R'g</i>	587	3,0	54,1	НЖ
	<i>R'p</i>	466	0,8	53,7	НГ
Жозеит Б	<i>R'p</i>	587	3,0	53,8	НЖ
	<i>R'g</i>	585	3,8	63,0	НЖ
Нисбит	<i>R</i>	587	2,1	61,8	Н
Ферроселит	<i>R'p</i>	588	6,0	44,4	НЖ
	<i>R'g</i>	584	13,0	48,4	НЖ
Медь	R	589	28,0	67,7	Р
Борнит	R	589	18,0	21,7	ЖР
Люценит	<i>R'g</i>	590	7,8	28,3	НП
	<i>R_p</i>	603	4,2	25,6	НП
Верлит	<i>R'p</i>	590	3,2	61,6	НЖ
	<i>R'g</i>	591	3,7	64,6	НЖ
Колорадоит	R	591	3,7	37,8	НКр
Кобальтин — Ni	R	591	4,5	50,2	Р
Идант	<i>R_p</i>	592	27,0	16,0	ЖР
	<i>R'g</i>	510'	0,3	23,9	ЖР
Висмут	<i>R'p</i>	592	5,9	58,8	НЖР
	<i>R_g</i>	585	8,7	66,6	НЖР

Продолжение табл. 15

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	p, %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Кобальтин	R	592	5,9	50,7	P
Валлерит	R'_p	592	1,2	12,0	H
	R'_g	579	35,0	19,2	HKr
Саффлорит	R'_g	592	1,2	54,3	H
	R'_p	474	1,0	52,0	H
Швацит	R	594	1,8	32,2	HKr
Мелонит	R'_p	595	5,8	57,6	P
	R_g	582	12,0	62,8	P
Люсонит	R_p	603	4,2	25,6	HП
	R'_g	590	7,8	28,3	HП
Гудмундит	R'_p	604	2,0	52,3	HЖР
	R'_g	480	0,8	56,7	HГ
Брейтгауптит	R_g	605	7,0	51,5	P
	R'_p	497'	5,0	40,7	P
Догначкант	R'_g	610	0,2	48,7	HЖ
	R'_p	553'	0,1	40,7	HЖ
Крукесит	R'_p	615	1,2	32,8	HП
	R'_g	558'	0,3	34,4	HП
Теллуровисмутит	R'_p	615	1,2	60,6	HП
	R'_g	587	3,1	65,0	HП

Минералы красного участка спектра ($\lambda=620-700$ нм)

Теллур металл.	R'_g	620	0,2	66,0	HЖ
	R_p	576	0,7	57,6	HЖ
Германит	R	640	3,9	22,2	HЖР

Минералы с цветностью в области пурпурных цветов

Волынскит	R	496'	0,7	53,4	HП
Магнетит	R	496'	0,7	20,7	HKr
Брейтгауптит	R'_p	497'	5,0	40,7	P
	R_g	605	7,0	51,5	P
Шеелит	R	497'	0,5	9,7	H
Бертьерит	R'_p	498'	1,2	30,6	HП
	R'_g	470	1,0	42,4	H
Фробергит	R'_g	498'	1,0	50,8	HП
	R'_p	520'	0,8	49,6	HП
Свинец	R	500'	0,8	55,5	H

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	p, %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Железо	<i>R</i>	506'	0,2	59,8	Н
Ферберит	<i>R'g</i>	508'	0,2	18,5	Н
	<i>R'p</i>	520'	0,3	16,7	Н
Идаит	<i>R'g</i>	510'	0,3	23,9	ЖР
	<i>R_p</i>	592	27,0	28,0	ЖР
Селен металл.	<i>R_p</i>	513'	1,4	26,4	Н
	<i>R_g</i>	563	0,3	35,6	Н
Фробергит	<i>R'p</i>	520'	0,8	49,6	НП
	<i>R'g</i>	498'	1,0	50,8	НП
Джезказганит	<i>R</i>	520'	0,8	28,2	НЖР
Мышьяк	<i>R_g</i>	520'	0,3	57,9	Н
	<i>R'p</i>	455	0,6	46,5	Н
Гессит	<i>R'p</i>	520'	0,3	38,8	НКр
	<i>R'g</i>	586	4,8	40,1	НКр
Ферберит	<i>R'p</i>	520'	0,3	16,7	Н
	<i>R'g</i>	508'	0,2	18,5	Н
Халькоталлит	<i>R'p</i>	550'	0,7	27,5	Н
	<i>R'g</i>	478	2,3	31,0	Н
Риккардит	<i>R'p</i>	552'	7,5	14,8	П
	<i>R_g</i>	468	4,5	20,4	П
Энаргит	<i>R'g</i>	552'	0,5	28,4	НП
	<i>R'p</i>	552'	0,5	25,4	НП
Гердсдорфит	<i>R</i>	553'	0,3	45,8	Н
Бетехтинит	<i>R'p</i>	553'	0,3	27,4	НЖР
	<i>R'g</i>	478	0,7	28,2	НЖР
Зиннерит	<i>R</i>	553'	0,2	28,9	НКр
Коффинит	<i>R</i>	553'	0,2	9,0	Н
Арсенопирит	<i>R'p</i>	553'	0,1	51,8	НГ
	<i>R'g</i>	581	6,0	52,8	НЖР
Догначкант	<i>R'p</i>	553'	0,1	40,7	НЖ
	<i>R'g</i>	610	0,2	48,7	НЖ
Алмаз	<i>R</i>	553'	0,1	17,3	Н
Крукесит	<i>R'g</i>	558'	0,3	34,4	НП
	<i>R'p</i>	615	1,2	60,6	НП

Продолжение табл. 15

Минерал	<i>R</i>	λ , нм	<i>p</i> , %	\bar{y}	Цвет в белом свете (визуально)
Купростибит	R_p	562'	1,4	40,6	П
	$R'g$	450	0,8	47,1	ЖР
Настурит	R	562'	0,2	15,1	Н
	R_p	563'	2,2	13,3	П
Умангит	$R'g$	467	2,2	16,4	Г
	R_g	563'	0,3	35,6	Н
Селен металл.	R_p	513'	1,4	26,4	Н
	R	560'	0,3	24,4	НП
Аргиродит					

спектра имеют, как правило, очень низкую насыщенность цвета.

3) сравнение значений λ и p , полученных для одних и тех же минералов с разными стандартами белого света (рис. 34, 35) показывает, что насыщенность цвета у минералов сине-зеленой тональности, как правило, выше с источником *A*; цветовой тон этих минералов (λ), рассчитанный по источнику *A*, находится в более длинноволновой области, чем относительно источника *C* — для большинства этих минералов λ с источником *A* на 15—25 нм больше, чем со стандартом *C* (см. табл. 14). Такое закономерное изменение параметров λ и p определяется различиями в спектральном составе излучений этих источников (рис. 36). Спектр излучения источника *A* почти не содержит синих и фиолетовых лучей, но очень богат красными и оранжевыми, в то время как источник *C* имеет максимум энергии в синем участке спектра. Таким образом, для цветов с низкой чистотой цвета цветовой тон, получаемый при расчетах, в очень большой степени зависит от выбора источника белого света.

Количественная характеристика цветности решена в колориметрии в известной мере формально; условия, при которых будет визуально оцениваться рассчитанный (или измеренный) цвет, всегда будут отличаться от тех, строго стандартизованных условий, при которых производится измерение цвета и которые косвенным образом входят в процедуру расчета. Цветовые соотношения изучаются в колориметрии, прежде всего, при определенном уровне освещенности объекта, характерном для дневного зрения, когда палочковый аппарат ослеплен и выключен из работы, и при нулевой яркости окружающего фона. Изучение цвета основано на уравнивании цветов двух излучений при одновременном наблюдении их в непосредственном контакте и при полной изоляции от других цветных объектов. Полученные при таких условиях координаты цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} будут

означать, что исследуемый цвет, помещенный в поле зрения колориметра, будет одинаковым со всяким другим цветом, имеющим те же значения координат и помещенным в поле зрения колориметра рядом с ним. Однако количественная колориметрическая характеристика не решает другого, очень важного

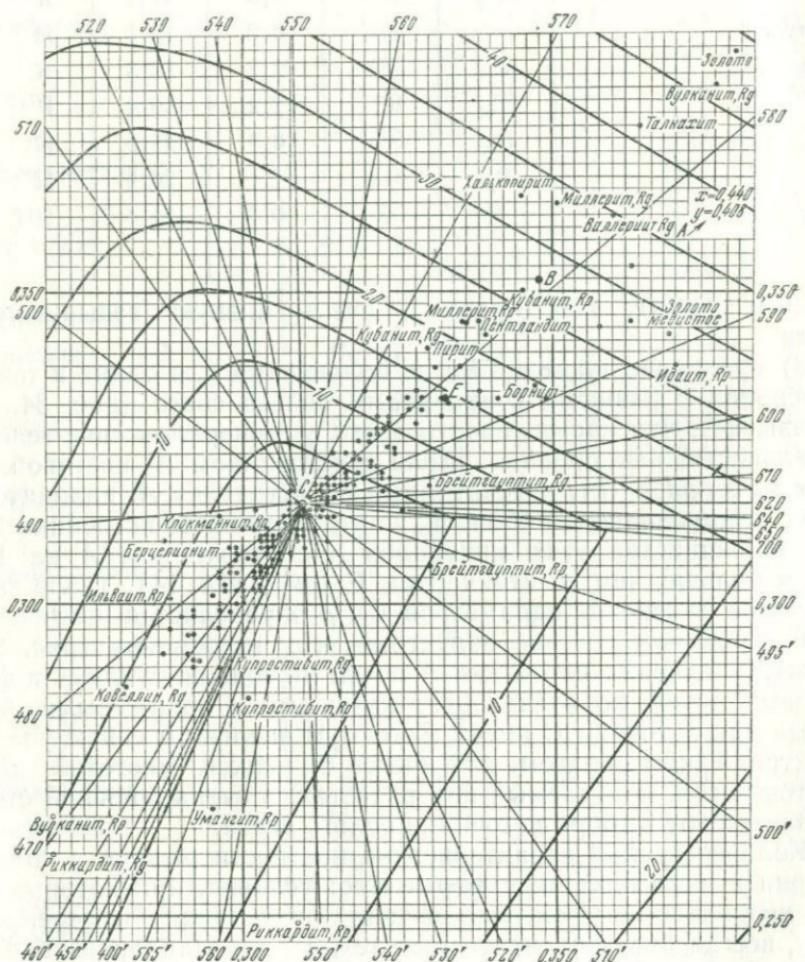


Рис. 34. Центральная часть рабочего графика рис. 11. Точками показаны цветности изученных авторами минералов относительно источника белого света С

для практики вопроса — каким этот цвет будет казаться наблюдателю, рассматривающему и оценивающему его в различных ситуациях, среди других, тоже цветных объектов. Из практики изучения цвета известно, что условия наблюдения оказывают на его восприятие очень большое влияние. Эти явления не изу-

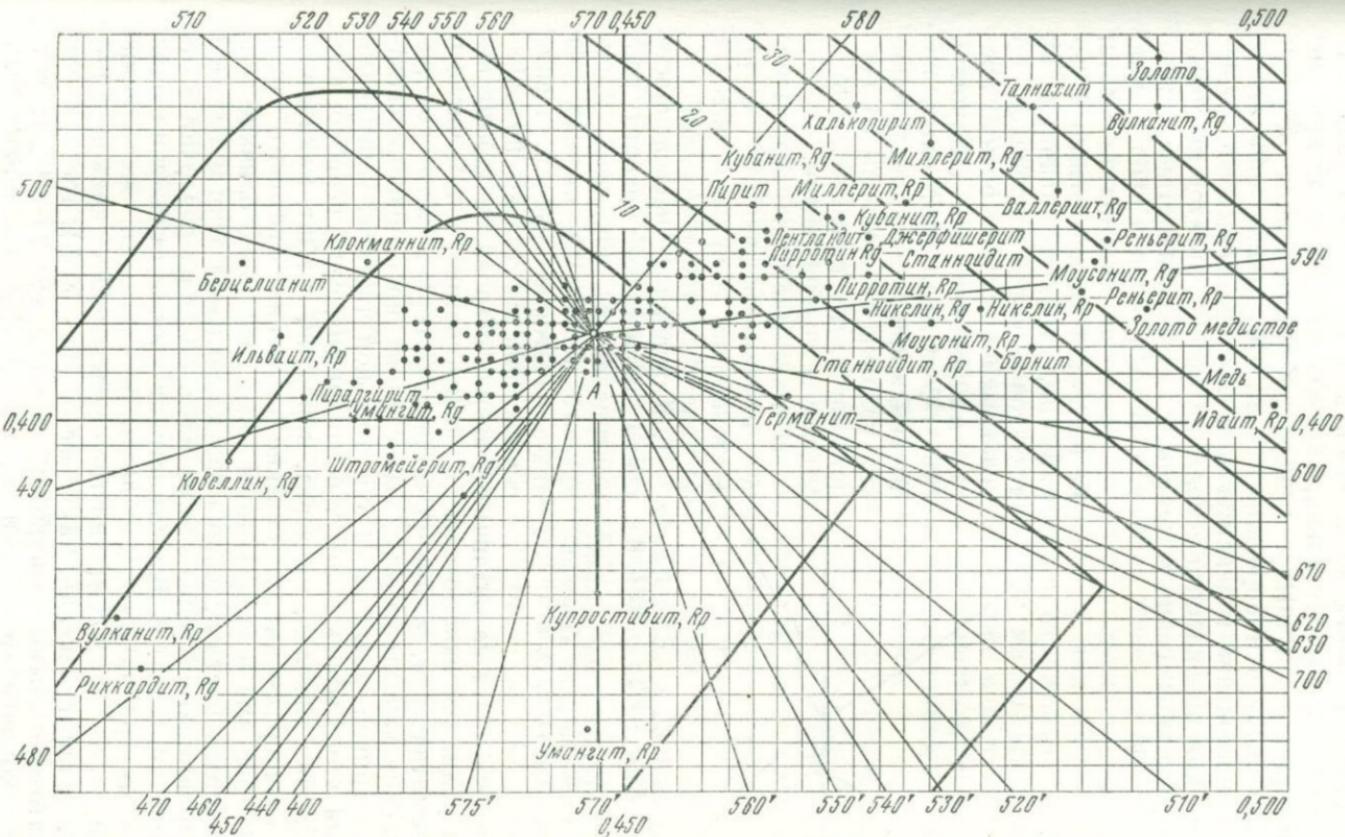


Рис. 35. Центральная часть рабочего графика рис. 9. Точкиами показаны цветности изученных авторами минералов относительно источника белого света А

чены количественно, и колориметрия не располагает надежными методами для определения «каждущихся» цветовых параметров. Именно в таких ситуациях, нарушающих основной принцип колориметрии и обычных в минерографии, минералог должен визуально оценить и определить цвет. Понимание конкретных условий наблюдений и действующих здесь закономерностей необходимо для правильного использования результатов цветовых расчетов и для внесения поправок в них на конкретные ситуации.

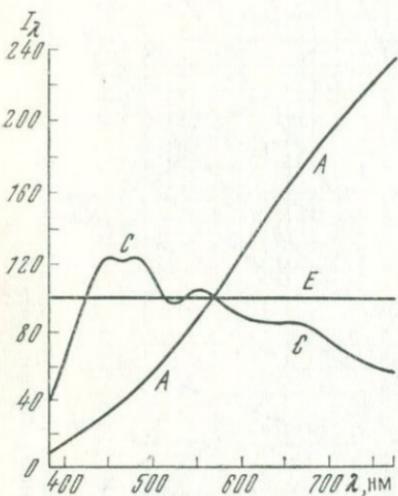
И хотя условия наблюдения, влияющие на восприятие цвета, не получили количественного выражения, характер влияния их достаточно четко определен на основании опыта по оценке цвета макрообъектов (Шаронов, 1961). Учитывая этот опыт, попытаемся проанализировать влияние условий наблюдения на восприятие цвета применительно к объектам минерографии.

В зависимости от условий могут изменяться чистота цвета, цветовой тон и яркость объекта (в нашем случае минерала).

1. Каждущаяся насыщенность цвета зависит от яркости рассматриваемых объектов. Если яркость панорамы оказывается ниже некоторого уровня, зрение осуществляется только палочками.

Рис. 36. Кривые спектрального распределения энергии излучений источников A, C, E

ми, которые цвета не различают; зрение становится ахроматичным, и радиация любого спектрального состава, в том числе и монохроматическая, воспринимается как серая, хотя колориметрические характеристики, вычисленные на основании спектральной кривой, дают цвета значительной чистоты. Примерами действия этого эффекта могут быть графит, сера, серебро, висмут, мелонит, никелин, маухерит, пирротин, графит, макинавит. Все эти минералы имеют близкие значения цветового тона ($\lambda=580-586$ нм) и умеренные и тоже достаточно близкие значения чистоты цвета p ; однако визуально цвета этих минералов не воспринимаются одинаковыми из-за больших различий в отражении (яркости). В зависимости от уровня отражения одни из этих минералов выглядят почти бесцветными, очень яркими — серебро ($\bar{y} \sim 90\%$); другие — насыщенно кремовыми — висмут, мелонит, никелин, маухерит ($\bar{y}=60-50\%$); третья — коричневато-кремовыми — пирротин, греййт ($\bar{y} \sim 35-40\%$); четвертые — коричневато-серыми — графит, R_g , макинавит, R_p ($\bar{y} \sim 20\%$).



Таким образом, при снижении яркости объектов цвет начинает распознаваться хуже, он как бы сереет, становится блеклым и кажущаяся насыщенность его снижается.

2. На восприятие цвета оказывает влияние также и возрастание яркости выше некоторого предела. Опыт показывает, что значительное усиление света влечет за собой изменение и цветового тона, и насыщенности, причем последняя снижается. Примерами этого влияния могут быть серебро, а также все минералы с низкой чистотой цвета. Серебро имеет $\lambda=580$ нм и заметную насыщенность (чистота $p=5,6\%$), однако визуально воспринимается не как кремовый минерал, а как яркий бесцветный, из-за очень сильного собственного отражения ($\bar{y}=90\%$), действующего ослепляюще; цветовой тон минералов с низкой насыщенностью цвета плохо различим и даже может быть вовсе не замечен, если дать много света на поверхность шлифа; ослепляющее действие избыточного света хорошо знакомо всем минералогам, работающим с рудным микроскопом.

3. Визуальное восприятие цвета зависит не только от абсолютной, но и от относительной яркости объекта. Если яркость объекта, достаточная по абсолютной величине, значительно ниже яркости окружающих объектов, цвет кажется сероватым, блеклым и воспринимается плохо. Примерами влияния этого эффекта могут быть широко распространенные и всем хорошо знакомые минералы — халькопирит и галенит; халькопирит ($\bar{y}=48\%$) в ассоциации с галенитом ($\bar{y}=43\%$), блеклой рудой ($\bar{y}=30\%$), сфалеритом ($\bar{y}=16\%$), воспринимается как светло-желтый с высокой насыщенностью цвета минерал; в то же время рядом с самородным золотом ($\bar{y}=75\%$) цвет халькопирита кажется темным, серовато-зеленовато-желтым слабой насыщенности. Галенит в контакте со сфалеритом — светлый, ярко-белый минерал, в ассоциации с алтaitом ($\bar{y}=70\%$) воспринимается как очень темный, серый с легким сиреневатым оттенком; в этой ассоциации сфалерит выглядит почти как кварц. В перечне минералов табл. 15 читатель без труда найдет много других, подобных примеров.

4. Визуальное восприятие цвета в очень большой степени определяется эффектом одновременного цветового контраста; на цвет определяемого объекта большое влияние оказывает цвет рудных объектов, которые наблюдатель видит одновременно с исследуемым цветом, или на которые он смотрел непосредственно перед этим. Действие этого эффекта состоит в следующем: объект серого (ахроматического) цвета на цветном фоне приобретает цвет, приблизительно соответствующий дополнительному к цвету фона. Например, если на стол, покрытый красным сукном или бумагой, положить бумажку серого цвета, она будет казаться зеленоватой; эта же бумажка на зеленом фоне будет казаться розоватой, на желтом — синеватой, на синем — желтоватой. Если же на красный фон положить зе-

леную бумажку, она будет казаться еще зеленее, чем на фоне серого цвета; красная бумажка на зеленом фоне станет еще краснее. Явление одновременного цветового контраста действует тем сильнее, чем выше насыщенность цвета фона и чем ближе друг к другу светлота объекта и фона. Своей предельной силы эффект достигает в том случае, если наблюдатель не видит ничего, кроме двух сравниваемых цветов. При действии одновременного цветового контраста происходит повышение кажущейся насыщенности каждого цвета, благодаря чему цветоразличительная способность зрения становится более высокой.

Этот очень интересный оптический эффект практически постоянно осуществляется в рудном микроскопе. Минералог определяет цвет минерала не изолированно от других цветных объектов, а всегда старается увидеть исследуемый минерал в контакте с другими, контрастными по цвету. Наличие такого контакта особенно важно при определении минералов со слабой насыщенностью цвета, которые в изолированных выделениях могут быть очень легко приняты за бесцветные. Вот некоторые примеры цветового контраста из практики минерографии. Теллуровисмутит и тетрадимит, минералы высокоотражающие и очень близкие по величине R , встреченные в изолированных выделениях, могут быть легко приняты за бесцветные; в контакте отчетливо проявляется нежный розоватый цвет теллуровисмутита и тоже слабый, но отчетливо кремово-зеленоватый цвет у тетрадимита. Алтант воспринимается как бесцветный в изолированных выделениях, а с золотом, теллуровисмутитом, галенитом — зеленоватым. Пурпурно-розовый цвет бертьерита становится лучше заметным в контакте с антимонитом, сам же антимонит рядом с бертьеритом воспринимается слегка зеленоватым; бурнонит, буланжерит и другие сульфоантимониты свинца, в изолированных выделениях практически бесцветные, в контакте с галенитом приобретают нежный голубовато-зеленоватый тон; еще более очевиден голубовато-зеленоватый тон этих минералов в контакте с пиритом, пирротином и в особенности, с золотом; швацит в контакте с киноварью имеет отчетливо кремовый цвет, киноварь рядом с кремовым швацитом кажется голубоватой. Читатель сам без труда продолжит список подобных примеров, обратясь к таблицам 14 и 15 и используя собственный опыт наблюдения рудных минералов под микроскопом.

Описанные выше явления обычно проявляются в совокупности и составляют те конкретные условия, при которых осуществляется наблюдение минералов под микроскопом. Под влиянием этих условий, резко отличающихся от «стерильных» условий колориметрирования, некоторые цвета воспринимаются не совсем такими, какими их дает расчет. Влияние новых условий выражается прежде всего в изменении цветового тона и чистоты цвета.

Изменение цвета под влиянием условий визуального восприятия принято называть трансформацией цвета. Трансформация цвета в колориметрии не получила количественного выражения. В этом и состоит сложность проблемы оценки визуальных восприятий. Особенно сложной эта проблема оказывается для рудной микроскопии. Разнообразие минеральных ассоциаций, в которых может находиться один и тот же минерал, создает широкий диапазон условий, различным образом влияющих на цвет, различным образом трансформирующих цвет одного и того же минерала. Отсутствие очевидных закономерностей в наблюдающихся оптических явлениях и невозможность осуществлять количественный контроль этих явлений осложняют визуальную оценку цвета минералов в отраженном свете. Эти обстоятельства способствовали появлению мнения о субъективности визуальных цветовых восприятий в минерографии. Такое мнение до сих пор разделяют рудные минералоги как отечественные, так и зарубежные (Платонов, Вяльсов, 1974; Шумская, 1975; Галопен, Генри, 1975). В значительной степени этому способствует также неидентичность условий наблюдения, возникающая из-за несовершенства оптических систем микроскопов, и в первую очередь из-за нестандартности поляризаторов и источников света.

Расчет цвета большого числа минералов с двумя источниками белого света (*A* и *C*), анализ условий процедуры колориметрических измерений и расчетов, сопоставление результатов расчета с визуальным восприятием цвета в конкретных ассоциациях, проделанные авторами, помогли объяснить несоответствия цветовых впечатлений с результатами расчета и подтвердили, что мнения о субъективности визуальных цветовых восприятий несостоятельны.

Приведенные выше примеры с минералами подтверждают опыт установленные закономерности, наблюдающиеся и при визуальном восприятии цвета макрообъектов. Все эти факты показывают особенности цветового зрения, присущие каждому человеку и одинаково проявляющиеся в реальных, конкретных условиях. Анализируя результаты расчета и сопоставляя их со зрительным впечатлением, авторы убедились, что наблюдаемые в микроскопе явления строго закономерны и могут быть предугаданы, направление действия их совершенно определенное и не зависит от наблюдателя.

Результаты расчета и сопоставления их с визуальными образами цвета позволяют сделать следующие выводы.

Расчет цвета выполнен авторами относительно двух источников света — *A* и *C*. Эти источники белого света, показанные на рис. 36, характеризуются наибольшими различиями в спектральном распределении энергии в излучениях. Наблюдения минералов под микроскопом в отраженном свете при параллельных николях всегда производятся с синим светофильтром. Эти

условия освещения ближе всего соответствуют источнику белого света C ; поэтому и результаты расчета цвета, полученные относительно этого источника, в общем близки с визуальным восприятием. Но есть значительная часть минералов — это минералы сине-зеленой тональности с очень низкой насыщенностью (чистотой), цвета, которые при наблюдении с синим светофильтром выглядят так, как их дает расчет относительно источника A . Это и есть результат трансформации цвета под влиянием условий наблюдения, главным образом, под влиянием одновременного цветового контраста, который создается присутствующими в поле зрения микроскопа насыщенно-желтыми минералами высокой яркости. При этом явление одновременного цветового контраста на минералы сине-зеленой тональности с низкой насыщенностью цвета оказывает действие таким образом, как если бы эти минералы были освещены источником A .

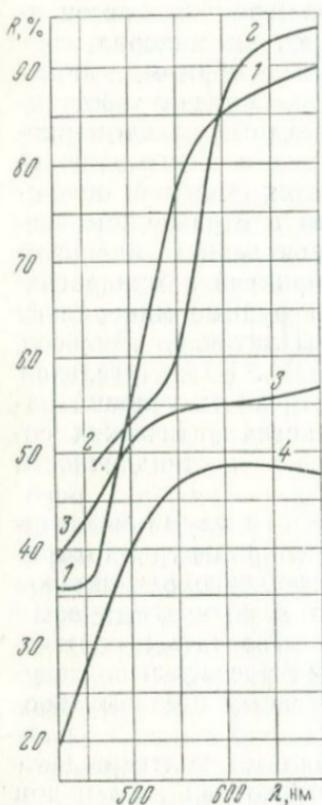


Рис. 37. Спектры отражения золота (1), меди (2), пирита (3) и халькопирита (4) в видимой области ($\lambda=420—700 \text{ нм}$)

трансформирует цвет этих минералов и делает его таким, каким дает его расчет с источником A . У этих минералов в контакте с желтым более отчетливо проявляется сине-зеленый тон, приобретающий и большую насыщенность; в то же время сами минералы сине-зеленого цвета, имея слишком малую насыщенность и умеренную яркость, не оказывают никакого влияния на цвет кремово-желтых минералов. Выполнение желтыми минералами роли источника A станет еще более понятным, если принять во внимание, что все они отражают более половины упавшего на них света (около 80% золото, около 70% — медь, 55% — пирит, 50% — халькопирит).

Таким образом, различия в характеристиках цвета (цветовом тоне λ и чистоте цвета p), полученные относительно двух источников A и C , представляют количественное выражение

оптических эффектов, возникающих при визуальных наблюдениях; принимая во внимание, что в спектральном распределении энергии в излучениях источников *A* и *C* наблюдаются наибольшие различия из имеющихся для стандартов белого света *A*, *B*, *C* и *E* (см. рис. 36), можно считать, что это есть предельное выражение контрастов, которые возможны в рудном микроскопе.

Таким образом, для строго количественного выражения цвета рудных минералов в отраженном свете, цветовые расчеты следует выполнять относительно двух источников белого света *A* и *C*, чтобы скорректировать результаты расчета на условия визуального восприятия.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛОВЫХ ЦВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МИНЕРАЛОВ

Как показал опыт расчета численных значений цветовых величин 159 минералов (см. табл. 14, 15, прил. 3), полученные таким образом характеристики цвета достаточно индивидуальны для каждого минерального вида, поэтому могут служить хорошей основой для табличного определителя минералов. Табл. 16 представляет вариант ключа определителя, который авторы предлагают для обсуждения и который может использоваться для машинной обработки материалов по оптическим свойствам светопоглощающих минералов.

В табл. 16 сведены все основные оптические признаки, которые поддаются в настоящее время количественному учету: отражение, двоутражение и плеохроизм, координаты цвета, цветовой тон, чистота цвета. В дальнейшем следует дополнить эту таблицу аналогичными величинами, полученными по данным измерений *R* в иммерсионных средах, результатами расчетов *n* и *k*, а также сведениями о твердости минералов по микроравливанию.

Минералы систематизированы в табл. 16 по тому же, что и в таблице-систематике (см. вкладку), принципу убывающих значений яркости (отражения); в таблице-систематике использованы значения *R* при $\lambda=590$ нм, в табл. 16 — интегральный коэффициент отражения (\bar{y}). Так же, как в табл. 14, 15 и вкладке, для анизотропных двоутражающих минералов приведены значения R_g и R_p , полужирным шрифтом выделены значения *R* минералов изотропных и постоянные значения минералов одноосных. В третьей и четвертой колонках сообщаются координаты \bar{x} и \bar{z} . Для двоутражающих минералов приведены значения двоутражения — абсолютные (колонка 6) и относительные (колонка 7) и плеохроизма отражения (колонка 8). Термин плеохроизм отражения был предложен Пиллером для характеристики различий в цветности сечения анизотропного

Таблица 16

Сводная таблица цветовых характеристик (относительно источника С),
используемых при диагностике минералов*

Минерал	R	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Серебро	R	88,56	87,36	98,54				580	5,6	A-3
Кюстелит	R	81,30	80,24	83,96				580	12,0	A-5
Сурьма	R_g	74,94	73,56	88,54	3,69	0,05	1,0	400	0,0	A-10
	R_p'	71,25	69,66	84,80				490	0,5	
Золото	R	74,64	73,17	45,20				577	48,0	A-4
Алтант	R	69,84	67,64	82,27				502	1,4	A-14
Монтбреййт	R_g'	67,71	66,79	72,10	10,97	0,16	1,4	580	9,5	A-13
	R_p'	56,74	56,02	59,94				578	10,2	
Медь	R	67,67	72,87	57,04				589	28,0	A-6
Висмут	R_g	66,60	66,45	71,56	7,78	0,12	4,5	585	8,7	
	R_p	58,82	59,28	65,20				592	5,9	A-12
Теллур металл.	R_g'	65,97	64,84	77,85	8,32	0,13	1,0	~620	0,2	B-5
	R_p	57,65	56,64	67,71				576	0,7	
Теллуро-висмутит	R_g'	64,96	64,37	74,46	4,36	0,07	3,6	587	3,1	B-3
	R_p'	60,61	60,26	71,02				615	1,2	
Верлит	R_g'	64,58	64,20	73,36	3,01	0,05	1,0	591	3,7	A-17
	R_p'	61,57	61,27	70,19				590	3,2	
Золото междистое	R	63,49	66,79	53,57				586	28,0	A-9
Жозеит Б	R_g'	62,95	62,34	71,13	9,14	0,14	1,4	585	3,8	B-7
	R_p'	53,79	53,33	61,75				587	3,0	
Мелонит	R_g	62,78	62,64	65,33	5,13	0,08	10,0	582	12,0	B-4
	R_p'	57,65	58,30	63,92				595	5,8	
Нисбит	R	61,79	61,03	71,76				587	2,1	B-11
Креннерит	R_g'	61,49	60,58	65,09	6,74	0,11	5,0	578	10,2	B-9
	R_p'	54,75	53,78	55,73				578	13,0	
Ауростибит	R	61,27	60,76	69,99				587	3,0	B-8
Тетрадимит	R_g'	60,44	59,36	69,00	8,72	0,14	3,2	578	3,0	B-14
	R_p	51,72	50,95	58,23				582	4,2	
Железо	R	59,79	59,05	71,07				506'	0,2	B-3

* Минералы систематизированы в последовательности убывающих значений яркости \bar{y} .

Продолжение табл. 16

Минерал	<i>R</i>	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Сильванит	R_g'	59,74	58,59	65,89	10,00	0,17	8,7	578	6,2	Б—17
	R_p'	49,74	48,79	52,06				578	11,0	
Мышьяк	R_g	57,87	57,26	69,16	11,42	0,20	13,0	520'	0,3	Б—10
	R_p'	46,45	46,25	60,02				455	0,6	
Гудмундит	R_g'	56,68	55,52	68,50	4,37	0,08	3,5	480	0,8	Б—14
	R_p'	52,31	52,04	60,77				604	2,0	
Калаверит	R_g'	56,65	55,67	61,12	3,07	0,05	1,0	578	8,6	Б—6
	R_p'	53,58	52,74	57,34				579	9,0	
Марказит	R_g'	56,19	53,76	58,24	6,93	0,12	6,0	570	12,0	Б—15
	R_p'	49,26	48,11	52,66				576	9,1	
Свинец	R	55,49	55,37	66,09				500'	0,8	Б—13
Миллерит	R_g	55,31	53,31	43,37	5,00	0,09	24,0	575	33,5	Б—5
	R_p'	50,31	49,08	46,53				576	22,0	
Жозеит А	R_g'	54,75	53,92	63,38	4,57	0,08	2,2	582'	1,9	Г—3
	R_p'	50,18	49,54	57,37				584	2,8	
Лёллингит	R_g'	54,63	53,77	61,01	1,41	0,03	20,6	580	4,6	Г—5
	R_p'	53,22	52,20	67,35				476	1,5	
Саффорит	R_g'	54,27	53,59	63,19	2,23	0,04	12,0	592	1,2	Г—6
	R_p'	52,04	51,26	65,20				474	1,0	
Лёллингит-Со	R_g'	54,09	53,55	61,79	0,42	0,008	11,0	587	3,0	
	R_p'	53,67	53,01	67,20				466	0,8	
Пирит	R	53,68	51,91	51,62				574	18,0	Б—16
Волынскит	R	53,45	53,11	63,37				496'	0,7	Г—12
Арсенопирит торец	R_g'	52,77	52,06	58,56	0,97	0,018	12,0	581	6,0	Г—10
	R_p'	51,80	51,05	61,58				553'	0,1	
Арсенопирит призма	R_g'	52,01	51,32	57,68				581	6,0	
	R_p'	52,35	51,57	59,88	0,34	0,007	5,0	581	3,2	
Никелин	R_g	51,89	52,76	52,22	5,27	0,10	11,0	585	14,0	Г—4
	R_p'	46,62	48,27	44,47				587	19,0	
Брейтгауптит	R_g	51,51	53,24	56,51	10,84	0,21	13,0	605	7,0	Г—7
	R_p'	40,67	43,75	48,35				497'	5,0	
Клаусталит	R	51,33	50,75	69,18				474	2,2	Д—4
Кобальтин-Ni	R	50,19	50,19	56,68				591	4,5	

Продолжение табл. 16

Минерал	R	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Фробергит	R_g'	50,75	50,72	60,23	1,13	0,02	2,8	498'	1,0	Г—16
	R_p'	49,63	49,56	59,88				520'	0,8	
Кобальтин	R	50,74	51,05	56,16				592	5,9	Г—11
	R_g'	50,28	49,11	59,58	8,42	0,17	3,0	490	0,5	Д—3
Висмутин	R_p'	41,86	41,34	50,69				400	0,0	
	R	49,76	49,96	54,00				586	8,0	Г—15
Маухерит	R_g'	49,21	48,31	61,28	2,76	0,06	2,0	476	1,2	Д—12
	R_p'	46,45	45,81	57,52				465	0,5	
Догначкант	R_g'	48,67	47,82	57,35	7,97	0,17	1,4	610	0,2	Е—2
	R_p'	40,70	39,95	48,32				553'	0,1	
Ферроселит	R_g'	48,42	48,63	49,63	3,98	0,08	12,8	584	13,0	Г—17
	R_p'	44,44	44,48	49,03				588	6,0	
Козалит	R_g'	48,40	48,08	61,60	9,25	0,18	2,2	450	0,5	Е—3
	R_p'	39,15	38,95	50,47				450	0,5	
Параагуана-хуватит	R_g'	48,35	48,00	53,26	12,21	0,25	20,5	584	6,5	Д—6
	R_p'	36,14	36,57	35,48				584	16,0	
Халькопи-рит	R	47,88	45,28	38,03				573	32,5	Д—10
	R_g'	47,32	46,31	54,53	8,01	0,17	2,8	576	2,3	Е—4
Айкинит	R_p'	39,31	38,63	46,25				574	0,9	
	R_g'	47,10	48,02	67,29	6,46	0,14	7,1	450	0,8	Ж—1
Купрости-бит	R_p	40,64	42,88	58,85				562'	1,4	
	R_g'	47,00	46,52	60,07	8,52	0,18	0,0	465	0,9	Е—14
Лиллианит	R_p'	38,48	38,22	49,26				465	0,9	
	R_g'	46,68	45,38	61,02	16,03	0,34	16,3	480	3,0	Ж—2
Антимонит	R_p'	30,65	29,92	36,48				490	0,9	
	R	46,51	45,66	42,75				577	22,0	В—17
Ульманит	R	46,15	45,55	57,77				466	0,8	Е—11
Макинавит	R_g'	45,81	44,98	46,48	27,92	0,60	13,9	578	14,0	Е—5
	R_p'	17,89	17,85	19,86				586	6,0	
Герслорфит	R	45,79	45,56	55,62				533'	0,3	Е—9
Молибденит	R_g	45,39	45,28	62,45	23,55	0,5	5,1	465	1,5	Ж—7
	R_p'	21,84	21,50	30,60				475	3,0	

Продолжение табл. 16

Минерал	R	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}_g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Кобеллит	R_g'	44,96	44,26	56,30	4,72	0,11	1,4	472	1,0	E—12
	R_p'	40,24	39,67	50,84						
Джемсонит	R_g'	43,91	42,77	54,30	5,67	0,13	2,0	480	1,7	Ж—5
	R_p'	38,24	37,46	47,23						
Буланжерит	R_g'	43,30	42,36	54,73	7,98	0,10	3,6	476	1,5	Ж—10
	R_p'	35,92	35,13	44,56						
Менегинит	R_g'	43,29	42,40	52,76	7,44	0,17	2,2	480	1,0	Ж—6
	R_p'	35,85	35,18	43,08						
Галенит	R	43,20	43,05	55,34				450	0,4	Ж—3
Гетероморфит	R_g'	43,10	42,08	53,36	9,46	0,22	5,6	479	1,2	Ж—11
	R_p'	33,64	32,93	40,35						
Цинкенинит	R_g'	42,70	41,74	53,48	5,10	0,12	1,0	479	1,5	3—1
	R_p'	37,60	36,82	46,82						
Бертьерит	R_g'	42,42	41,79	53,38	11,80	0,28	12,5	470	1,0	Ж—13
	R_p'	30,62	30,70	36,20						
Вулканит	R_g'	42,21	41,59	26,79	25,48	0,60	157	578	46,0	E—8
	R_p'	16,73	16,93	29,28						
Овихнит	R_g'	42,07	41,19	51,81	2,64	0,06	1,0	476	1,0	Ж—15
	R_p'	39,43	38,76	48,94						
Эмплектит	R_g'	42,00	41,01	45,67	2,87	0,07	3,6	576	7,6	Ж—4
	R_p'	39,13	38,38	41,69						
Плагионит	R_g'	41,49	40,72	51,21	8,49	0,20	6,4	476	1,0	Ж—17
	R_p'	33,00	32,26	39,26						
Халькостибит	R_g'	41,37	39,83	51,40	4,49	0,11	2,2	485	2,9	3—5
	R_p'	36,88	35,81	46,11						
Геокронит	R_g'	40,76	40,18	51,37	2,21	0,06	3,5	467	0,9	Ж—8
	R_p'	38,55	37,98	47,51						
Нагиагит	R_g'	40,48	39,70	52,53	1,94	0,05	8,5	477	2,0	3—9
	R_p'	38,54	37,79	47,75						
Пирротин	R_g'	40,22	39,75	40,95	5,77	0,17	4,1	579	14,0	E—16
	R_p	34,45	34,59	34,74						
Гессит	R_g'	40,08	39,81	44,91	1,26	0,03	10,6	586	4,8	Ж—16
	R_p'	38,82	38,49	46,30						

Минерал	<i>R</i>	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячеек в цветной табл.-вкладке
Кубанит	R_g'	39,88	38,67	37,67	4,61	0,11	13,9	575	20,0	3—2
	R_p'	35,27	34,70	30,72				578	26,0	
Ливингстонит	R_g'	39,46	38,28	50,29	9,52	0,24	4,1	481	2,6	3—14
	R_p'	29,94	29,35	37,44				477	1,3	
Иорданит	R_g'	39,36	38,70	48,63	1,95	0,05	1,0	476	1,0	3—10
	R_p'	37,41	36,85	46,18				467	0,7	
Петцит	R	39,14	38,88	48,91				445	0,2	3—8
Тунгstenит	R_g	38,82	38,55	49,78	19,78	0,51	15,8	462	0,8	3—17
	R_p'	19,05	18,70	22,08				576	1,7	
Виоларит	R	38,07	37,95	41,08				583	8,5	3—11
Колорадоит	R	37,82	37,70	43,21				591	3,7	3—7
Талинхит	R	36,38	35,16	25,12				576	41,0	B—3
Клокманнит	R_g'	36,17	34,99	45,90	21,72	0,6	6,0	482	2,7	I—6
	R_p	14,45	13,65	17,95				489	4,5	
Науманит	R	36,13	35,17	46,75				479	2,5	I—4
Буронит	R_g'	36,09	35,31	44,43	2,23	0,06	3,2	479	1,1	I—5
	R_p'	33,86	33,27	42,30				474	1,0	
Штернбергит	R_g'	36,03	35,59	37,50	11,28	0,31	11,4	580	12,0	3—16
	R_p'	24,75	24,61	24,14				580	17,0	
Селен металл.	R_g'	35,58	35,50	44,32	9,15	0,26	6,3	563'	0,3	I—3
	R_p	26,43	26,84	32,10				513'	1,4	
Пирсент	R_g'	34,93	34,26	43,57	6,99	0,20	5,4	476	1,2	I—13
	R_p'	27,94	27,71	36,03				467	1,0	
Агвиларит	R	34,91	33,82	42,70				484	1,7	I—8
Греййт	R	34,81	34,67	37,62				583	8,4	I—1
Крукасит	R_g'	34,37	34,09	41,89	1,58	0,05	7,1	558'	0,3	I—10
	R_p'	32,79	32,59	38,41				615	1,2	
Зелигманнит	R_g'	34,21	33,50	41,34	2,95	0,09	4,5	480	0,8	I—11
	R_p'	31,26	30,76	38,95				473	0,9	
Акантит	R	34,15	33,34	42,04				481	1,5	I—9
Балканит	R_g'	33,47	32,77	41,72	5,97	0,18	10,0	476	1,2	K—4
	R_p'	27,50	26,80	36,20				479	2,8	
Эскеборнит	R_g'	32,73	31,82	33,72	3,09	0,09	7,8	576	16,0	I—17
	R_p'	29,64	28,94	29,11				575	12,0	

Продолжение табл. 16

Минерал	<i>R</i>	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Халькозин	R_g'	32,46	31,76	42,87				476	2,3	K-10
Швацит	R	32,23	31,90	37,56				594	1,8	K-1
Лорандит	R_g'	32,17	31,50	43,10	4,62	0,14	13,5	477	2,7	K-9
	R_p'	27,55	26,62	34,04				484	2,1	
Макинстри- ит	R_g'	31,39	30,94	41,75	3,68	0,12	7,1	475	2,2	K-17
	R_p'	27,71	27,27	35,34				474	1,4	
Тетраэдрит	R	31,36	30,68	36,74				574	0,8	K-1
Лаутит	R	31,03	31,03	40,23				450	0,4	K-11
Халькотал- лит	R_g'	31,01	30,24	40,26	3,50	0,11	12,6	478	2,3	K-13
	R_p'	27,51	27,56	33,82				550'	0,7	
Арсеносуль- ванит	R	30,96	30,33	30,44				577	16,5	K-6
Стефанит	R_g'	30,96	30,39	30,59	3,32	0,11	5,1	476	1,7	L-1
	R_p'	27,65	27,48	36,39				467	1,3	
Фрейбергит	R	30,90	30,32	36,57				400	0,0	K-1
Полибазит	R_g'	30,64	30,10	37,75	2,10	0,07	6,1	470	0,7	K-14
	R_p'	28,54	28,42	36,58				450	0,4	
Гетчелит	R_g'	30,58	29,91	42,11	3,09	0,10	1,0	477	3,0	L-9
	R_p'	27,48	26,76	37,53				478	3,2	
Пираргирит	R_g	30,51	29,74	42,88	2,56	0,08	4,1	478	4,0	L-16
	R_p'	27,95	27,52	40,36				476	3,7	
Теннантит- Hg	R	30,32	29,64	35,07				573	2,0	
Тиманнит	R	30,00	29,71	39,73				470	1,7	L-5
Гематит	R_g	29,85	28,85	37,96	3,58	0,12	2,2	483	3,0	L-10
	R_p'	26,27	25,58	33,82				480	2,4	
Киноварь	R_g'	29,62	29,08	37,53	4,79	0,16	3,0	476	1,5	L-12
	R_p	24,83	24,60	31,94				467	1,0	
Акташит	R	29,50	29,00	35,41				400	0,0	L-6
Штромейе- рит	R_g'	29,44	29,57	42,07	3,78	0,13	14,2	465	1,9	L-17
	R_p'	25,66	25,59	33,58				455	0,7	
Теннантит	R	29,04	28,43	34,90				476	0,4	K-1
Зиннерит	R	28,86	28,47	34,54				553'	0,2	L-7
Сульванит	R	28,78	27,89	28,78				574	15,0	K-12

Продолжение табл. 16

Минерал	<i>R</i>	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	Δy	$\frac{\Delta y}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Энаргит	R_g'	28,46	28,36	34,64	3,06	0,18	0,0	552'	0,5	M-1
	R_p'	25,38	25,27	30,98				552'	0,5	
Аурипигмент	R_g'	28,33	28,22	38,18	9,31	0,33	10,8	465	1,4	M-7
	R_p'	19,02	19,17	27,35				465	2,0	
Люценит	R_g'	28,28	28,61	30,78	2,65	0,09	5,8	590	7,8	L-2
	R_p	25,65	26,06	28,96				603	4,2	
Джезказгагнит	R	28,19	28,19	34,04				520'	0,8	L-13
	R_g'	28,15	27,69	34,24	0,78	0,03	3,2	478	0,7	L-15
Бетехтинит	R_p'	27,37	27,24	33,25				553'	0,3	
Прустит	R_g	27,72	27,48	38,88	3,56	0,13	3,2	474	2,7	M-9
	R_p'	24,16	24,07	34,54				470	2,5	
Станнин	R	27,41	26,74	28,99				575	10,2	L-14
Колусит	R	27,30	27,25	27,53				581	14,5	L-8
Тиманинит-S	R	27,30	27,11	35,83				468	1,5	
Реньерит	R_g'	26,90	27,60	21,47	1,86	0,06	11,2	582	32,0	K-15
	R_p	25,04	26,06	21,73				585	26,5	
Моусонит	R_g'	26,48	27,23	21,83	2,48	0,10	26,2	583	30,0	L-13
	R_p	24,00	24,53	23,44				586	16,5	
Куприт	R	26,36	25,60	36,36				478	3,7	M-12
Берцелианит	R	26,21	24,28	33,99				487	7,0	M-16
Станноидит	R_g'	25,75	25,53	26,44	3,42	0,13	9,1	581	12,5	M-6
	R_p'	22,32	22,70	22,23				586	15,0	
Онофрит	R	25,37	25,28	32,16				440	0,1	M-13
Индит	R	25,26	24,78	31,27				476	1,0	M-14
Кёстерит	R	24,84	24,37	28,78				573	2,0	M-15
Кан菲尔дит	R	24,54	24,46	31,55				450	0,4	H-2
Метациннабарит	R	24,38	24,21	30,60				445	0,2	M-17
Аргиродит	R	24,36	24,29	29,96				560'	0,3	H-3
Галхант	R	24,35	23,84	33,09				478	3,1	H-7
Вакабаяшилит	R_g'	24,33	24,29	32,58	3,05	0,12	5,0	465	1,2	H-6
	R_p'	21,28	21,25	29,28				465	1,6	
Галлит	R	24,00	23,52	29,65				476	1,0	H-8

Продолжение табл. 16

Минерал	<i>R</i>	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Иданит	R_g'	23,93	23,67	28,45	7,88	0,33	63,4	510'	0,3	Л—11
	R_p	16,05	17,60	13,89				592	27,0	
Ковеллин	R_g'	23,15	22,69	34,91	17,07	0,74	88,4	477	4,7	О—8
	R_p	6,08	5,78	14,92				481	32,5	
Джерфишерит	R	22,57	22,35	20,98				579	22,0	Н—5
Алабандин	R	22,57	22,44	29,23				460	1,0	Н—12
Делафоссит	R_g'	22,43	22,02	25,54				581	3,2	О—2
Рокезит	R	22,30	22,21	28,07				400	0,0	О—1
Германит	R	22,20	22,95	25,31				640	3,9	Н—9
Борнит	R	21,71	22,78	20,78	.			589	18,0	Н—1
Графит	R_g	21,41	21,35	23,13	14,42	0,67	11,7	583	8,5	О—4
	R_p'	6,99	6,88	8,06				581	2,5	
Реальгар	R_g'	20,76	20,49	28,08	2,09	0,10	4,5	472	2,0	О—9
	R_p'	18,67	18,58	24,76				463	1,1	
Магнетит	R	20,68	20,58	24,45				496'	0,7	О—6
Риккардит	R_g	20,45	21,17	36,99	5,63	0,27	41,5	468	4,5	П—12
	R_p'	14,81	18,41	26,28				552'	7,5	
Гринокит	R	19,77	18,96	23,99				489	2,7	О—11
Валлериит	R_g'	19,19	19,12	14,68	7,20	0,38	66,0	579	35,0	О—7
	R_p'	11,99	11,84	14,02				592	1,2	
Ферберит	R_g'	18,53	18,29	21,99	1,82	0,09	1,0	508'	0,2	О—12
	R_p'	16,71	16,53	19,94				520'	0,3	
Маггемит	R	18,24	18,28	23,86				440	0,3	О—10
Сфалерит-Fe	R	17,39	17,26	22,13				460	0,5	П—7
Алмаз	R	17,26	17,05	20,63				553'	0,1	П—8
Умангит	R_g'	16,41	16,44	23,50	3,15	0,19	24,1	467	2,2	Р—2
	R_p	13,25	14,67	21,74				563'	2,2	
Уранинит	R	16,14	16,01	20,35				455	0,4	П—11
Сфалерит	R	16,04	15,86	20,02				466	0,8	П—7
Настуран	R	15,06	14,95	18,30				562'	0,2	П—12
Сера	R_g'	14,80	14,59	17,04	4,28	0,29	1,0	581	2,5	Р—3
	R_p'	10,52	10,42	12,09				583	2,8	

Минерал	R	\bar{y}	\bar{x}	\bar{z}	$\Delta \bar{y}$	$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y} g}$	$d \cdot 10^3$	$\lambda, \text{ нм}$	$p, \%$	Номер ячейки в цветной табл.-вкладке
Шеелит	R_g	9,80	9,70	11,56				497'	0,5	P-8
Ильванит	R_p'	9,74	9,52	11,57	2,20	0,23	25,7	490	0,5	P-9
	R	7,54	7,20	10,29				482	4,8	
Коффинит	R	8,97	8,87	10,76				553'	0,2	P-10

минерала, подобно тому как различие в яркости характеризуется двуотражением. Количественно плеохроизм отражения Хтейн и Филлипс рекомендуют выражать величиной

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

где $\Delta x = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$, $\Delta y = \bar{y}_1 - \bar{y}_2$.

\bar{x}_1 , \bar{y}_1 и \bar{x}_2 , \bar{y}_2 — значения координат цветности двух положений главного сечения анизотропного минерала R_g и R_p .

В колонке 8 табл. 16 приведены значения $d \cdot 10^3$. В колонках 9, 10 табл. 16 приведены значения цветового тона (λ) и чистоты цвета (p), определенные по цветовому графику источника С (см. рис. 11). В последней колонке (11) показано место (ячейка) минерала в основной таблице-систематике минералов по отражению (см. вкладку).

Результаты расчета цвета для 13 минералов, имеющиеся в опубликованной зарубежной литературе, приведены в табл. 17 и показаны на рис. 38, 39. В приложении 3 сообщаются коэффициенты $S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)$, $S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)$, $S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda)$, использованные при этих расчетах. Полученные нами параметры цвета близки к результатам Х. Пиллера. Расхождения в значениях чистоты цвета ($p, \%$) объясняются тем, что в нашей отечественной колориметрии система типа «полярной» на цветовых графиках (см. рис. 9, 10, 11) отличается от принятой за рубежом (Htein, Phillips, 1973).

В предложенном нами варианте табл. 16 (ключ) имеет подобное значение и используется на первом этапе приближенного исследования для перехода к более развернутым сведениям, которые сообщаются в таблице-систематике (вкладка), определителях (Рамдор, 1962; Кэмерон, 1966; Галопин, Генри, 1975; Определение рудных минералов... 1973), в статьях и справочниках с полной характеристикой спектральных кривых отражения (Безсмертная, Чвилёва, 1976; Вяльсов, 1973 и др.).

Вопрос о том, какова принципиальная разрешающая возможность определителя, основанного на координатах цвета, пока остается открытым. Каждой кривой дисперсии отражения отвечает один определенный цвет, т. е. одни координаты цвета. Но один и тот же цвет, т. е. одни и те же координаты цвета могут быть получены по бесчисленному множеству кривых. Однако реально из 159 исследованных минералов примеров совпадения координат цвета встречено не было, следовательно, мож-

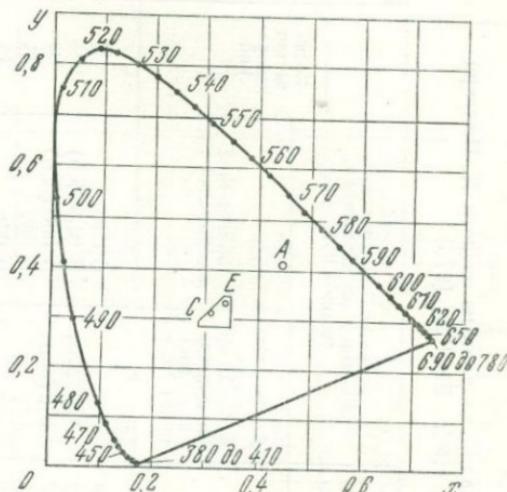


Рис. 38. Цветовая диаграмма. A , E , C — точки цветности источников белого света

но полагать, что и в случае более расширенного списка использование ключа приведет если не к однозначному решению, то во всяком случае к очень ограниченному числу минералов.

Наличие для каждого минерала числовых цветовых характеристик и возможность рассчитывать их по спектрам отражения позволяют использовать современную вычислительную технику для расчетов, а в перспективе и для автоматизации определения минералов.

Такую возможность предоставляет соединение микроскопо-фотометра с цифровой электронной вычислительной машиной. Использование таких комплексов для целей определения цветовых характеристик практикуется за рубежом, но в основном для макрообъектов. Так, фирма «Оптон» выпускает фильтрофотометр для измерения цветов RFC3. В комплект прибора входит сам фотометр, электронная вычислительная машина PDP8/E и телетайп. Прибор может быть использован и без вычислительной машины с записью данных на перфоленту для дальнейшей обработки. Вывод координат цветности и координат цвета происходит через ~ 90 с после начала измерений. Фирма выпускает и более сложные комплексы, например RFC3/24 для составления рецептов, используемых в текстильных красильных цехах. Этот прибор также состоит из фильтрофотометра и вычислительной машины HP2100A.

Характеристика цветности минералов по данным расчета Х. Пиллера
(Piller, 1966, 1974, Htein, Phillip, 1973)

Минерал	Условия измерений, направление колебаний	Яркость Y или визуальное отражение	Трехцветные коэффициенты ICI (относительно источника равной энергии E)		Единицы Гельмгольца, рассчитано для источника C системы ICI ⁴		Количество измерений	Авторы измерений R
			x	y	Доминантная длина волны λf или дополнительная длина волны λk , нм	Чистота типа возбуждения Pe		
Антимонит	Воздух a	41,35	0,3018	0,3088	479	0,040	9	Simpson (1966)
	Воздух b	30,81	0,3064	0,3167	494 (490)	0,013 (0,9)	9	
	Воздух c	47,44	0,2965	0,3067	481 (480)	0,060 (3,0)	9	
	Воздух a	41,22	0,2988	0,3057	479	0,052	35	
	Воздух c	47,42	0,2930	0,3020	480	0,078	35	
	Масло a	25,72	0,2954	0,3026	479	0,068	35	
	Масло c	31,74	0,2843	0,2942	480	0,119	35	
Арсенопирит	Воздух a (c)	52,82	0,3089	0,3171	501 (553)	0,003 (0,1)	9	Simpson ¹ (1966)
	Воздух (a)	53,30	0,3146	0,3226	574 (581)	0,030 (6,0)	9	
	Воздух c ()	52,73	0,3167	0,3257	574	0,041	9	
Галенит	Воздух	44,24	0,2987	0,3009	470 (450)	0,060 (0,4)	35	Knosp ^{2, 3}
	Масло	28,85	0,2949	0,2957	469	0,082	35	Piller ^{2, 3}
Буронит	Воздух a	46,29	0,3029	0,3118	482	0,030	9	Simpson (1966)
	Воздух b	34,28	0,3017	0,3090	480 (479)	0,040 (1,1)	9	
	Воздух c	35,96	0,2989	0,3056	478 (474)	0,053 (1,0)	9	
Халькофанит	Воздух ω	26,15	0,2868	0,2916	476	0,146	37	Gehlen ² (in press)
	Воздух ε	10,59	0,3005	0,3068	478	0,046	37	
	Масло ω	11,97	0,2709	0,2760	477	0,188	37	
	Масло ε	1,84	0,2934	0,2998	478	0,081	37	
Халькозин	Воздух a	32,84	0,2958	0,3044	479,5	0,064	9	Simpson (1966)
	Воздух b	32,58	0,2957	0,3039	479,5	0,064	9	
	Воздух c	32,61	0,2967	0,3040	479 (476)	0,064 (2,3)	9	
Ковеллин	Воздух ω	6,79	0,2288	0,2424	479 (481)	0,377 (32,5)	14	Gehlen, Piller (1964) ²
	Воздух ε	23,87	0,2706	0,2796	479 (477)	0,185 (4,7)	4	
	Масло ω	1,60	0,3073	0,2066	553	0,436	14	
	Масло ε	10,21	0,2382	0,2759	484	0,304	4	
	Воздух ω	6,70	0,2202	0,2276	475,5	0,388	9	Simpson (1966)
	Воздух ε	22,54	0,2838	0,2867	474,5	0,129	9	
Гематит	Воздух ω	29,59	0,2991	0,3093	484 (483)	0,046 (3,0)	6	Gehlen, Piller (1965) ²
	Воздух ε	25,89	0,2977	0,3073	482 (480)	0,055 (2,4)	6	
	Масло ω	14,90	0,2916	0,3012	481	0,084	6	
	Масло ε	11,83	0,2899	0,2987	480	0,093	6	
Ильменит	Воздух ω	20,19	0,3083	0,3121	—567	0,013	6	Gehlen, Piller (1965) ²
	Воздух ε	17,24	0,3138	0,3153	—495	0,010	6	
	Масло ω	7,55	0,3089	0,3107	—591	0,020	6	
	Масло ε	7,57	0,3173	0,3131	—498	0,028	6	
Пирротин	Воздух ω	34,47	0,3272	0,3300	581 (579)	0,081 (14,0)	6	Gehlen, Piller (1965) ²
	Воздух ε	39,54	0,3232	0,3284	580 (583)	0,068 (14,0)	6	
	Масло ω	22,02	0,3388	0,3423	579	0,148	6	
	Масло ε	22,46	0,3320	0,3372	578	0,114	6	
	Воздух ω	34,96	0,3271	0,3306	580	0,083	9	Simpson (1966)
	Воздух ε	39,66	0,3238	0,3296	578	0,072	9	

Продолжение табл. 17

Минерал	Условия измерений, направление колебаний	Яркость Y или визуальное отражение	Трехцветные коэффициенты ICI (относительно источника равной энергии E)		Единицы Гельмгольца, рассчитано для источника С системы ICI		Количество измерений	Авторы измерений R
			x	y	Доминантная длина волны λf или дополнительная длина волны λk , нм	Чистота типа возбуждения Pe		
Пирит	Воздух Масло	53,36 41,10	0,3310 0,3382	0,3430 0,3469	573,5 (574) 576,5	0,130 (18,0) 0,158	12 12	Schorer ^{2, 3}
Ti-Гематит	Воздух ω Воздух ε Масло ω Масло ε	28,01 24,34 13,58 10,56	0,2996 0,2986 0,2909 0,2885	0,3089 0,3080 0,3007 0,2985	482 482 481 481	0,047 0,050 0,088 0,098	6 6 6 6	Gehlen, Piller (1965) ²
Умангит	Воздух ω Воздух ε Масло ω Масло ε	13,69 16,45 5,21 5,60	0,2954 0,2867 0,2957 0,2855	0,2717 0,2966 0,2828 0,2793	-564 (563') 486 (467) 420 466	0,1500 (2,2) 0,257 (2,2) 0,100 0,137	37 37 37 37	Gehlen (1966 in press) ²

¹ Simpson, вероятно, использовал старую кристаллографическую ориентировку. В скобках дана ориентировка, которая приведена у П. Рамдора (1960).

² Спектральное отражение R_λ измерено с помощью микроспектрофотометра, разработанного при участии Пиллер. Прибор выпускается серийно.

³ Измерения отражения проводились в лаборатории Пиллер, ранее не публиковались.

* В скобках приведены данные авторов книги (см. табл. 14).

Приборы для цветовых измерений выпускают и японские фирмы. Прибор ND—101DC состоит из фотометра, настольной вычислительной машины и цифропечатающего устройства. Время, непосредственно затрачиваемое на подсчет координат цвета, составляет 5—7 с.

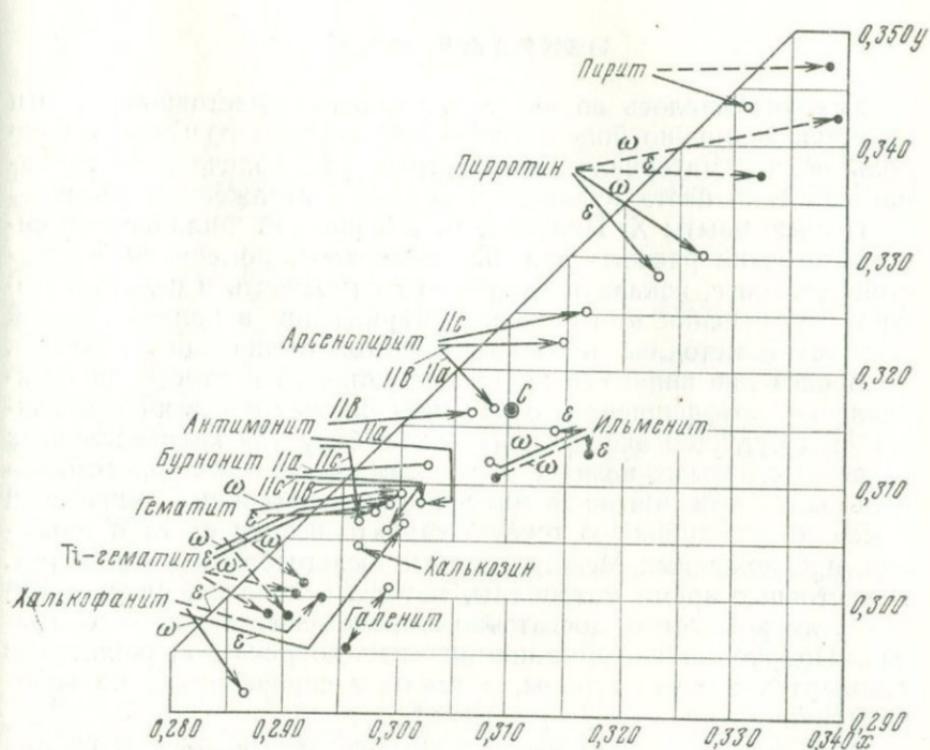


Рис. 39. Увеличенная часть цветовой диаграммы (рис. 38). Точками показаны цветности рудных минералов: белыми кружочками — в воздухе, черными — в иммерсии. Для анизотропных минералов указаны сечения (ω , ε , $\parallel a$, $\parallel b$, $\parallel c$)

Таким образом, нет принципиальных трудностей для создания комплекса (микроскоп-фотометр — вычислительная машина), с помощью которого можно не больше чем за 1 мин измерять коэффициенты отражения минерала и вычислять по ним координаты цвета. Получая координаты цвета и используя табл. 16 и большую цветную таблицу (вкладка), можно оперативно производить диагностику минералов.

Наличие комплекса микроскоп-фотометр и вычислительная машина дают возможность не только рассчитывать координаты цвета минералов, но и определять минералы по координатам цвета. Для этого в память вычислительной машины должны быть предварительно заложены координаты цвета большого числа рудных минералов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как указывалось во введении, задачей настоящей книги является возможно более полная информация по вопросам использования материалов фотометрии для количественной характеристики цвета рудных минералов в отраженном свете.

Первые опыты Х. Пиллера, В. Хтейна, Р. Филлипса и систематические расчеты для 159 минералов, помещенные в настоящей книге, показали реальную возможность и целесообразность применения этого нового направления в количественной оптической методике диагностики светопоглощающих объектов.

Вовлечение широкого круга специалистов в измерения спектральных коэффициентов отражения сможет обеспечить в ближайшем будущем экспериментальную базу для количественных расчетов цветовых величин и тем самым даст возможность использовать при описании минералов специальный «цветовой язык» и общепринятую точную характеристику цвета в терминах, предложенных Международным осветительным комитетом. В настоящее время материалы, методы и понятия, разработанные этим комитетом, достаточно широко известны во всех странах. Подробная информация по этим вопросам приводится в стандартах каждой страны, а также в справочниках по колориметрии.

Если числовые цветовые характеристики используются для каталогизации или машинной обработки, то принципиального значения нет, данными какого источника, A , B или C , пользоваться. Зрительному восприятию цвета при визуальном наблюдении в рудный микроскоп ближе всего отвечают условия освещения источником C , поэтому при сопоставлениях числовых данных со зрительной оценкой цвета лучше всего пользоваться материалами этого источника, принимая во внимание в каждом конкретном случае реальные ситуации, отличающие условия визуального восприятия от колориметрических процедур измерения и расчета цвета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроскин Л. С., Королев Н. В. Фотометрическая насадка к микроскопу. — «Приборы и техника эксперимента», 1960, № 1, с. 140—141.
- Агроскин Л. С., Папаян Г. В., Раутян Л. П. Абсолютный регистрирующий микроспектрограф. — «Геология рудных месторождений», 1972, № 3, с. 81—90.
- Аграскин Л. С., Папаян Г. В. Цифротометрия. Л., «Наука», 320 с.
- Анисимова И. И., Глуховский В. М. Фотоэлектронные умножители. — «Советское радио», 1974, 25 с.
- Безсмертная М. С., Чувилёва Т. Н. Определитель рудных минералов в отраженном свете. М., «Недра», 1976, 71 с.
- Бурэ Г. Н., Клейнбок Б. Е. К вопросу измерения отражательной способности минералов и углей. — В кн.: Геофизическая аппаратура. Л., «Недра», 1965, с. 119—124.
- Бурэ Г. Н., Клейнбок Б. Е. Микрофотометрическая установка ПООС-1 и условия точных измерений. — В кн.: Новые методы и аппаратура для минералого-петрографических измерений. М., изд. ВИМС, ВИЭМС, 1968, с. 31—40.
- Вавилов С. И. Глаз и солнце. М., изд-во АН СССР, 1950. 115 с.
- Волосов Д. С., Цивкин М. В. Теория и расчет светотехнических систем. М., «Искусство», 1960. 526 с.
- Волынский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом. М., Госгеолиздат, 1949, т. I, II, III, 267 с., 100 с., 338 с.
- Волынский И. С. О взаимозависимости оптических свойств рудных минералов. — В кн.: Исследование минерального сырья. М., Госгеолтехиздат, 1955, с. 30—45.
- Волынский И. С. К методике измерения оптических постоянных рудных минералов. — В кн.: Вопросы минералогии, геохимии и генезиса месторождений редких элементов. М., «Наука», 1959, вып. 3, с. 135—226.
- Волынский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом. М., «Недра», 1966, т. 1. 348 с.
- Вяльсов Л. Н. Спектры отражения рудных минералов. Ротапринт ИГЕМ АН СССР, 1973. 67 с.
- Вяльсов Л. Н. Оптические методы диагностики рудных минералов. М., «Недра», 1976. 375 с.
- Галопен Р., Генри Н. Исследование непрозрачных минералов под микроскопом. М., «Мир», 1975. 363 с.
- Гелен К., Пиллер Х. Об ошибках определений отражательной способности и расчетов значений показателя преломления (n) и коэффициента поглощения (κ). Перевод с англ. — «Новое в зарубежных исследованиях по рудной микроскопии», 1966, № 1, с. 19—37.
- Гуревич М. М. Цвет и его измерение. М., Изд-во АН СССР, 1950. 268 с.
- Гуревич М. М. Введение в фотометрию. М., «Энергия», 1968. 244 с.
- Ильин Р. С., Федотов Г. И., Федин Л. А. Лабораторные оптические приборы. М., «Машиностроение», 1966. 496 с.
- Клейнбок Б. Е. О современном методе измерения отражательной способности минералов. — В кн.: Методические минералогические исследования. М., «Наука», 1971, с. 3—16.

Колориметрические стандарты международной осветительной комиссии (МКО) и их применение (перевод и дополнение Н. Т. Федорова). М., Госиздат, Стандартизация и рационализация, 1934. 115 с.

Кэмерон Ю. Рудная микроскопия. М., «Мир», 1966. 307 с.

Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости. М., «Недра», 1973. 219 с. Авт.: М. С. Безсмертная, Т. Н. Чвилюва, Л. С. Агронкин и др.

Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. М., «Машиностроение», 1970. 280 с.

Рамдор П. Рудные минералы и их срастания. М., изд-во иностр. лит., 1962. 1132 с.

Редкие минералы сурьмы и их парагенезисы в рудах месторождения Южного.— В кн.: Новые данные о минералах СССР. М., «Наука», 1975, с. 3—13. Авт.: Н. С. Бортников, Ю. С. Бородаев, Л. Н. Вяльсов, Н. Н. Мозгова.

Ринне Ф., Берек М. Оптические исследования при помощи поляризационного микроскопа. М., «ОНТИ», 1937. 332 с.

Татарский Б. В. Кристаллооптика и иммерсионный метод. М., «Недра», 1965. 306 с.

Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. I. Общая часть М., изд-во АН СССР, 1948. 661 с.

Федин Л. А., Барский И. Я. Микрофотография. М., «Наука», 1972. 220 с.

Шаронов В. В. Свет и цвет. М., Физматгиз, 1961. 312 с.

Шкурин Г. П. Справочник по электро- и электронно-измерительным приборам. М., Воениздат, 1972. 448 с.

Шумская Н. И., Клейнбок В. Е., Александрова Н. П. Изучение отражающей способности рудных минералов. Л., изд-во ВСЕГЕИ, 1971. 128 с.

Шумская Н. И. Цветовые коэффициенты в диагностике рудных минералов.— «Зап. Всесоюз. минер. об-ва», 1976, ч. 105, вып. 3, с. 387—392.

Эпштейн М. И. Измерение оптического излучения. М., «Энергия», 1975. 248 с.

Колориметрический атлас. М., изд-во стандартов, 1966. 150 с. Авт.: Е. Н. Юстова, И. Н. Панова, Г. В. Покровская и др.

Berek M. Optische Messmethoden in inpolarierten Licht, insonderheit zur Bestimmung von Erzmineralien mit einer Theorie der Optik der absorbierenden Kristalle. Fortschr. d. Min. 1937, N 22, 332 s.

Cameron E. N. Ore Microscopy Wiley, New York, 1961 (см. русский перевод Кэмерон, 1966).

Cervelle B. Contribution à l'étude des propriétés optiques des minéraux fortement absorbants. Bull. Bur. rech. géol. et minières, 1971, sec. 2, N 5, p. 9—34.

Cissarz A. Reflexionsmessungen an absorbierenden Kristallen mit besonderer Berücksichtigung der Erzmineralien. Zeits. Krist., Bd. 82, 438, 1932.

Committee on Colorimetry, Optical Society of America. The Science of Color 1968. New York: T. X. Crowell Co et S. Wyszecki, 1953, 395 p.

Ehrendberg H. Reflexionsmessungen in der Erzmikroskopie. Eine Übersicht über die Methoden und neueren Instrumente. Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und mikroskopische Technik. Heft 1, Band 66, 1964, s. 10—15.

Frick H. Reflexionsmessungen in Erz und Metallanschlägen mit Hilfe eines Reflexionsphotometrographen. Neues Jahrbuch f. Min. Beil. Bd. 61 A, 1930.

Galopin R., Henry N. F. M. Microscopic study of opaque Minerals. Cambridge 1972 (Опубликовано в русском переводе см. Галопен, Генри, 1975).

Hardy, A. C. Handbook of Colorimetry. Cambridge, The Technology Press, Massachusetts Institute of Technology 1936.

Höfert, H. J. XYZ im Reich der Farben. English edition: XYZ in the Realm of Colors. ZEISS — Werkzeitschrift N 24 1957.

Htein W., Phillips R. Quantitative specification of the colours of opaque minerals. Mineral. and Mater. News Bull., 1973, N 1, p. 2—3.

Judd, D. B. Color in Business, Sciences, and Industry. New York. J. Wiley, 1952. 500 p.

Mac Adam D. L. Visual Sensitivities to Colour Differences in Daylight.
J. Opt. Soc. Am. 32, 1942, 247—274.

Orcel J. Sur l'emploi de la pile photoélectrique pour la mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques, Comptes Rendus Acad. Sci. Paris, 185, 1055, 1927.

Orcel J. La mesure du pouvoir réflecteur des minéraux opaques à l'aide de la cellule photoélectrique, et ses applications. Bull. de la Société Française de Minéralogie, v. 53, N 1—6, 1930, c. 301—349 (Русский перевод опубликован в сборнике «Методические работы по микроскопическому исследованию руд в отраженном свете». Изд. ОНТИ — НКТП — СССР Главная редакция литературы по цветной металлургии, 1936).

Pamphlet 60—669/1—e, Messers. Carl Zeiss, The principles of colour measurement, 1962.

Piller H. Color Measurements in Ore — Microscopy. Mineralium Deposita vol. 1, N 3, 1966, c. 175—192.

Piller H. Modern techniques in reflectance measurements. J. Microscopy 1974, v. 100, pt. 1, p. 35—48.

Piller H., Prager H. Use of a computer in the measurement of spectral reflectances. In: Mineralogy and Materials News Bulletin of Quantitative Microscopic Methods, 1972, pp. 14 and 15. Polyhedron Printers, Cambridge.

Schultze W. Farbenlehre und Farbenmessung; 2nd edition. Berlin, Heidelberg, New York: Springer — Verlag, 1966.

Standard Specification, published by the «Deutscher Normenausschuß» DIN 5033. Farbmessung (Measurement of Colour) 1962/64.

Uytenbogaardt W., Burke E. A. J. Tables for microscopic identification of ore minerals, Elsevier, Amsterdam. 1971.

Wright W. D. The measurement of colour 1969 (Adam Hilger Ltd., London).

Wyszecki G., Stiles W. S. Color Science 1967 (Wiley, Inc., New York).

Сокращенная таблица для расчета цвета с интервалом 10 нм

Длины волн, нм	Источник А			Источник В			Источник С		
	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_B$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_B$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_B$	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_C$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_C$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_C$
380	0,0010	0,0000	0,0048	0,0025	0,0000	0,0113	0,0036	0,0000	0,0164
390	0,0046	0,0001	0,0219	0,0123	0,0003	0,0585	0,0183	0,0004	0,0870
400	0,0193	0,0005	0,0916	0,0558	0,0014	0,2650	0,0841	0,0021	0,3992
410	0,0688	0,0019	0,3281	0,2091	0,0057	0,9970	0,3180	0,0087	1,5159
420	0,2666	0,0080	1,2811	0,8274	0,0248	3,9750	1,2623	0,0378	6,0646
430	0,6479	0,0265	3,1626	1,9793	0,0810	9,6617	2,9913	0,1225	14,6019
440	0,9263	0,0609	4,6469	2,6889	0,1768	13,4883	3,9741	0,2613	19,9357
450	1,0320	0,1167	5,4391	2,7460	0,3105	14,4729	3,9191	0,4432	20,6551
460	1,0207	0,2098	5,8584	2,4571	0,5050	14,1020	3,3668	0,6920	19,3235
470	0,7817	0,3624	5,1445	1,7297	0,8018	11,3825	2,2878	1,0605	15,0550
480	0,4242	0,6198	3,6207	0,8629	1,2609	7,3655	1,1038	1,6129	9,4220
490	0,1604	1,0398	2,3266	0,2960	1,9190	4,2939	0,3639	2,3591	5,2789
500	0,0269	1,7956	1,5132	0,0437	2,9133	2,4552	0,0511	3,4077	2,8717
510	0,0572	3,0849	0,9674	0,0810	4,3669	1,3694	0,0898	4,8412	1,5181
520	0,4247	4,7614	0,5271	0,5405	6,0602	0,6709	0,5752	6,4491	0,7140
530	1,2116	6,3230	0,3084	1,4555	7,5959	0,3705	1,5206	7,9357	0,3871
540	2,3142	7,5985	0,1625	2,6899	8,8322	0,1889	2,7858	9,1470	0,1956
550	3,7329	8,5707	0,0749	4,1838	9,6060	0,0840	4,2833	9,8343	0,0860
560	5,5086	9,2201	0,0357	5,8385	9,7722	0,0378	5,8782	9,8387	0,0381
570	7,5710	9,4574	0,0209	7,4723	9,3341	0,0206	7,3230	9,1476	0,0202
580	9,7157	9,2257	0,0170	8,8406	8,3947	0,0154	8,4141	7,9897	0,0147
590	11,5841	8,5430	0,0130	9,7329	7,1777	0,0109	8,9878	6,6283	0,0101
600	12,7103	7,5460	0,0096	9,9523	5,9086	0,0075	8,9536	5,3157	0,0067
610	12,6768	6,3599	0,0044	9,4425	4,7373	0,0033	8,3294	4,1788	0,0029
620	11,3577	5,0649	0,0020	8,1290	3,6251	0,0014	7,0604	3,1485	0,0012
630	8,9999	3,7122	0,0000	6,2135	2,5629	0,0000	5,3212	2,1948	0,0000
640	6,5487	2,5587	0,0000	4,3678	1,7066	0,0000	3,6882	1,4411	0,0000
650	4,3447	1,6389	0,0000	2,8202	1,0638	0,0000	2,3531	0,8876	0,0000
660	2,6234	0,9706	0,0000	1,6515	0,6110	0,0000	1,3589	0,5028	0,0000
670	1,4539	0,5327	0,0000	0,8796	0,3223	0,0000	0,7113	0,2606	0,0000
680	0,7966	0,2896	0,0000	0,4602	0,1673	0,0000	0,3657	0,1329	0,0000
690	0,4065	0,1467	0,0000	0,2218	0,0801	0,0000	0,1721	0,0621	0,0000
700	0,2067	0,0744	0,0000	0,1065	0,0384	0,0000	0,0806	0,0290	0,0000
710	0,1108	0,0398	0,0000	0,0538	0,0193	0,0000	0,0398	0,0143	0,0000
720	0,0556	0,0195	0,0000	0,0253	0,0089	0,0000	0,0183	0,0064	0,0000
730	0,0280	0,0100	0,0000	0,0120	0,0043	0,0000	0,0085	0,0030	0,0000
740	0,0144	0,0062	0,0000	0,0058	0,0025	0,0000	0,0040	0,0017	0,0000
750	0,0063	0,0021	0,0000	0,0024	0,0008	0,0000	0,0017	0,0006	0,0000
760	0,0032	0,0011	0,0000	0,0012	0,0004	0,0000	0,0008	0,0003	0,0000
770	0,0011	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000
Суммы	109,8450	100,0000	35,5824	99,0915	100,0000	85,3094	98,0699	100,0000	118,2216

Сокращенная таблица для расчета цвета с интервалом 20 нм

Длина волн, λ , нм	Источник А			Источник В			Источник С		
	$x(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_A$	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_B$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_B$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_B$	$\bar{x}(\lambda) \cdot I_C$	$\bar{y}(\lambda) \cdot I_C$	$\bar{z}(\lambda) \cdot I_C$
420	0,53	0,02	2,58	1,66	0,05	8,02	2,53	0,08	12,24
440	1,85	0,12	9,35	5,39	0,35	27,20	7,97	0,52	40,23
460	2,04	0,42	11,79	4,92	1,01	28,44	6,75	1,38	38,99
480	0,85	1,24	7,29	1,73	2,52	14,85	2,21	3,23	19,01
500	0,05	3,59	3,05	0,09	5,83	4,95	0,10	6,81	5,79
520	0,85	9,52	1,06	1,08	12,12	1,35	1,15	12,90	1,44
540	4,63	15,20	0,33	5,39	17,67	0,38	5,58	18,29	0,39
560	11,03	18,44	0,07	11,69	19,55	0,08	11,79	19,67	0,08
580	19,45	18,45	0,03	17,71	16,79	0,03	16,87	15,98	0,03
600	25,47	15,08	0,02	19,93	11,82	0,01	17,95	10,63	0,00
620	22,74	10,13	0,00	16,28	7,25	0,00	14,16	6,30	0,00
640	13,11	5,12	0,00	8,75	3,41	0,00	7,39	2,88	0,00
660	5,25	1,94	0,00	3,31	1,22	0,00	2,72	1,01	0,00
680	1,59	0,58	0,00	0,92	0,33	0,00	0,73	0,27	0,00
700	0,41	0,15	0,00	0,21	0,08	0,00	0,16	0,06	0,00
	109,85	100,00	35,57	99,06	100,00	85,31	98,06	100,00	118,20

Коэффициенты для расчета цвета относительно источника С
(Piller, 1974)

λ , нм	$S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda)$	λ , нм	$S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)$	$S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda)$	$S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda)$
400	0,00108	0,00002	0,00513	60	0,05880	0,09841	0,00039
10	0,00329	0,00009	0,01570	70	0,07322	0,09147	0,00020
20	0,01238	0,00037	0,05949	80	0,08417	0,07992	0,00016
30	0,02997	0,00122	0,14628	90	0,08984	0,06627	0,00010
40	0,03975	0,00262	0,19938	600	0,08949	0,05316	0,00007
50	0,03915	0,00443	0,20638	10	0,08325	0,04176	0,00002
60	0,03362	0,00694	0,19299	20	0,08325	0,04176	0,00002
70	0,02272	0,01058	0,14972	30	0,05309	0,02190	—
80	0,01112	0,01618	0,09461	40	0,03693	0,01443	—
90	0,00363	0,02358	0,05274	50	0,02349	0,00886	—
500	0,00052	0,03401	0,02864	60	0,01361	0,00504	—
10	0,00089	0,04833	0,01520	70	0,00708	0,00259	—
20	0,00576	0,06462	0,09712	80	0,00369	0,00134	—
30	0,01523	0,07934	0,00388	90	0,00171	0,00062	—
40	0,02785	0,09149	0,00195	700	0,00156	0,00056	—
50	0,04282	0,09832	0,00086				

Характеристика цвета рудных минералов
 (фактический материал расчета цвета по спектральным коэффициентам отражения)

λ , нм	Агвиларит	Айкинит		Аканит	Акташит	Алабандин	Алмаз	Алтант	Антимонит		Аргиродит	Арсенопирит, призма	
	R	$R'g$	$R'p$	R	R	R	R	R	$R'g$	$R'p$	R	R_1	R_2
420	0,360	0,456	0,387	0,346	0,298	0,262	0,176	0,687	0,516	0,308	0,262	0,473	0,498
440	0,360	0,459	0,390	0,354	0,299	0,252	0,175	0,692	0,520	0,308	0,257	0,482	0,503
460	0,362	0,462	0,393	0,360	0,301	0,246	0,175	0,699	0,519	0,309	0,252	0,492	0,509
480	0,365	0,468	0,396	0,361	0,302	0,240	0,174	0,707	0,515	0,310	0,248	0,500	0,515
500	0,366	0,474	0,399	0,358	0,302	0,234	0,174	0,712	0,506	0,314	0,246	0,507	0,519
520	0,364	0,476	0,397	0,353	0,299	0,230	0,174	0,715	0,493	0,314	0,245	0,513	0,521
540	0,358	0,478	0,395	0,344	0,297	0,227	0,173	0,713	0,478	0,312	0,243	0,519	0,524
560	0,349	0,476	0,393	0,340	0,294	0,224	0,172	0,705	0,463	0,307	0,242	0,523	0,526
580	0,340	0,473	0,390	0,337	0,292	0,222	0,172	0,692	0,450	0,302	0,242	0,526	0,527
600	0,335	0,470	0,390	0,332	0,291	0,220	0,172	0,680	0,440	0,298	0,243	0,528	0,526
620	0,328	0,467	0,390	0,327	0,290	0,220	0,171	0,666	0,430	0,296	0,244	0,531	0,525
640	0,324	0,464	0,389	0,322	0,289	0,219	0,171	0,652	0,424	0,296	0,245	0,533	0,524
660	0,322	0,461	0,388	0,317	0,288	0,218	0,171	0,640	0,417	0,300	0,246	0,534	0,523
680	0,320	0,457	0,388	0,316	0,287	0,217	0,170	0,627	0,412	0,303	0,247	0,534	0,522
700	0,318	0,454	0,386	0,316	0,286	0,217	0,170	0,617	0,406	0,301	0,248	0,535	0,520

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

\bar{x}	36,86	51,40	42,78	36,42	31,96	24,35	18,83	74,31	48,70	32,93	26,75	57,67	57,49
\bar{y}	34,46	47,21	39,20	33,78	29,35	22,37	17,22	69,23	45,78	30,44	24,33	52,27	52,42
\bar{z}	12,85	16,44	13,93	12,66	10,65	8,71	6,19	24,80	18,28	10,98	8,95	17,43	18,06

10 Зак. 243

m	84,16	115,05	95,90	82,86	71,96	55,43	42,25	168,33	112,76	74,35	60,03	127,37	127,96
x	0,438	0,447	0,446	0,439	0,444	0,439	0,446	0,441	0,432	0,443	0,446	0,453	0,449
y	0,409	0,410	0,410	0,408	0,408	0,404	0,408	0,411	0,406	0,409	0,405	0,410	0,410
z	0,153	0,143	0,145	0,153	0,148	0,157	0,147	0,147	0,162	0,148	0,149	0,137	0,141
λ , нм	496	568	540	497	500	488	504	508	494	503	400	585	578
p , %	2,8	2,0	1,2	2,1	1,1	1,6	0,7	2,5	3,5	1,6	0,0	5,8	3,1

Источник В

\bar{x}	33,66	46,39	38,64	33,20	28,96	22,27	17,04	67,54	44,91	29,87	24,24	51,61	51,72
\bar{y}	34,79	47,30	39,28	34,05	29,46	22,51	17,25	69,69	46,42	30,60	24,35	52,09	52,38
\bar{z}	30,75	39,29	33,31	30,28	25,50	21,00	14,85	59,27	43,90	26,27	21,53	41,58	43,14
m	99,20	132,97	111,24	97,53	83,92	65,78	49,14	196,50	135,23	86,73	70,12	145,28	147,24
x	0,339	0,349	0,347	0,340	0,345	0,339	0,347	0,344	0,332	0,344	0,346	0,355	0,351
y	0,351	0,356	0,353	0,349	0,351	0,342	0,351	0,355	0,343	0,353	0,347	0,359	0,356
z	0,310	0,295	0,299	0,311	0,304	0,319	0,302	0,302	0,325	0,303	0,307	0,286	0,293

Источник С

\bar{x}	33,82	46,31	38,63	33,34	29,00	22,44	17,05	67,64	45,38	29,92	24,29	51,32	51,57
\bar{y}	34,91	47,32	39,31	34,15	29,50	22,57	17,26	69,84	46,68	30,65	24,36	52,01	52,35
\bar{z}	42,70	54,53	46,25	42,04	35,41	29,23	20,63	82,27	61,02	36,48	29,96	57,68	59,88
m	111,43	148,16	124,18	109,53	93,91	74,24	54,94	219,75	153,07	97,05	78,61	161,00	163,80
x	0,304	0,313	0,311	0,304	0,309	0,302	0,310	0,308	0,296	0,308	0,309	0,319	0,315
y	0,313	0,319	0,317	0,312	0,314	0,304	0,314	0,318	0,305	0,316	0,310	0,323	0,320
z	0,383	0,368	0,372	0,384	0,377	0,394	0,376	0,374	0,399	0,376	0,381	0,358	0,366
λ	484	576	574	481	400	460	553'	502	480	490	560'	581	581
p , %	1,7	2,3	0,9	1,5	0,0	1,0	0,1	1,4	3,0	0,9	0,3	6,0	3,2

λ , нм	Арсенопирит, торец		Арсено-сульфанит		Аурипигмент		Ауростабит		Балканит		Бертьерит		Берцелианит		Бетехтинит		Борнит	
	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R
420	0,480	0,519	0,240	0,349	0,259	0,592	0,350	0,300	0,459	0,313	0,268	0,292	0,288	0,184				
440	0,489	0,521	0,250	0,333	0,242	0,592	0,354	0,306	0,456	0,308	0,280	0,292	0,284	0,177				
460	0,499	0,523	0,260	0,319	0,228	0,592	0,356	0,310	0,452	0,306	0,295	0,290	0,281	0,173				
480	0,508	0,524	0,271	0,309	0,214	0,596	0,354	0,310	0,447	0,304	0,302	0,288	0,278	0,173				
500	0,515	0,524	0,282	0,300	0,205	0,600	0,350	0,302	0,440	0,301	0,302	0,286	0,276	0,177				
520	0,521	0,523	0,295	0,291	0,197	0,608	0,344	0,289	0,433	0,300	0,295	0,286	0,275	0,189				
540	0,526	0,520	0,309	0,286	0,192	0,609	0,340	0,280	0,428	0,302	0,280	0,285	0,274	0,203				
560	0,530	0,518	0,318	0,281	0,187	0,613	0,334	0,272	0,423	0,306	0,260	0,282	0,272	0,217				
580	0,534	0,515	0,323	0,276	0,184	0,619	0,328	0,265	0,418	0,309	0,245	0,279	0,271	0,232				
600	0,536	0,514	0,323	0,273	0,182	0,621	0,324	0,260	0,413	0,312	0,230	0,276	0,273	0,247				
620	0,539	0,514	0,321	0,272	0,181	0,624	0,321	0,256	0,409	0,315	0,218	0,274	0,276	0,262				
640	0,540	0,513	0,319	0,270	0,180	0,629	0,318	0,251	0,406	0,318	0,207	0,273	0,278	0,277				
660	0,540	0,512	0,316	0,270	0,180	0,631	0,315	0,249	0,404	0,320	0,197	0,272	0,280	0,292				
680	0,540	0,511	0,315	0,270	0,180	0,631	0,315	0,247	0,401	0,320	0,187	0,272	0,280	0,305				
700	0,540	0,511	0,316	0,270	0,180	0,631	0,315	0,246	0,400	0,319	0,177	0,271	0,282	0,318				

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	58,49	56,43	34,74	30,32	20,30	67,95	35,72	28,78	45,52	34,20	25,59	30,38	30,10	26,92				
\bar{y}	53,03	51,65	31,39	27,97	18,72	61,53	33,11	26,97	42,03	30,78	25,22	27,98	27,34	22,69				
\bar{z}	17,70	18,52	9,28	11,34	8,06	21,07	12,53	10,87	15,98	10,85	10,30	10,27	9,96	6,25				

m	129,23	126,60	75,42	69,62	47,08	150,54	81,36	66,61	103,53	75,82	61,11	68,63	67,40	55,86				
x	0,453	0,446	0,461	0,435	0,431	0,451	0,439	0,432	0,440	0,451	0,419	0,443	0,447	0,482				
y	0,410	0,408	0,416	0,402	0,398	0,409	0,407	0,405	0,406	0,406	0,413	0,408	0,406	0,406				
z	0,137	0,146	0,123	0,163	0,171	0,140	0,154	0,163	0,154	0,143	0,169	0,150	0,148	0,112				
λ , нм	585	504	583	488	485	585	494	492	492	604	498	498	573	594				
p , %	5,8	0,7	16,8	2,2	2,5	3,5	2,1	3,3	1,7	1,3	7,7	1,3	0,1	22,0				

Источник В

\bar{x}	52,36	51,03	30,74	27,91	18,85	60,98	32,61	26,52	41,56	30,75	23,93	27,61	27,21	23,27				
\bar{y}	52,86	51,76	31,10	28,22	18,93	61,35	33,37	27,35	42,51	30,66	25,95	28,11	27,36	21,98				
\bar{z}	42,22	44,34	21,99	27,40	19,59	50,40	30,03	26,06	38,39	26,05	24,53	24,64	23,91	14,95				
m	147,43	147,13	83,84	83,53	57,37	172,74	96,01	79,93	122,26	87,46	74,40	80,35	78,49	60,20				
x	0,355	0,347	0,367	0,334	0,329	0,353	0,340	0,332	0,340	0,352	0,322	0,344	0,347	0,387				
y	0,359	0,352	0,371	0,338	0,330	0,355	0,348	0,342	0,346	0,351	0,349	0,350	0,349	0,365				
z	0,286	0,301	0,262	0,328	0,342	0,292	0,313	0,326	0,314	0,298	0,330	0,307	0,305	0,248				

Источник С

\bar{x}	52,06	51,05	30,33	28,22	19,17	60,76	32,78	26,80	41,79	30,70	24,28	27,69	27,24	22,78				
\bar{y}	52,77	51,80	30,96	28,33	19,03	61,27	33,47	27,50	42,42	30,62	26,21	28,15	27,37	21,71				
\bar{z}	58,56	61,58	30,44	38,18	27,35	69,99	41,72	36,20	53,38	36,20	33,99	34,24	33,25	20,78				
m	163,39	164,43	91,73	94,73	65,54	192,03	107,97	90,50	137,60	97,52	84,49	90,08	87,86	65,26				
x	0,319	0,310	0,331	0,298	0,292	0,316	0,304	0,296	0,304	0,315	0,287	0,307	0,310	0,349				
y	0,320	0,315	0,338	0,299	0,290	0,319	0,310	0,304	0,308	0,314	0,310	0,313	0,312	0,333				
z	0,358	0,375	0,332	0,403	0,417	0,364	0,386	0,400	0,388	0,371	0,402	0,380	0,378	0,318				
λ	581	553'	577	465	465	587	476	479	470	498'	487	478	553'	589				
p , %	6,0	0,1	16,5	1,4	2,0	3,0	1,2	2,8	1,0	1,2	7,0	0,7	0,3	18,0				

λ , нм	Брейтгауптит		Буланжерит		Буронит		Вакабаяшилит		Валлернит		Верлит		Виоларит
	Rg	R'p	R'g	R'p	R'g	R'p	R'g	R'p	R'g	R'p	R'g	R'p	
420	0,513	0,445	0,474	0,381	0,374	0,361	0,298	0,268	0,102	0,117	0,614	0,588	0,332
440	0,488	0,425	0,468	0,380	0,377	0,361	0,285	0,256	0,113	0,119	0,619	0,592	0,342
460	0,470	0,405	0,463	0,377	0,378	0,359	0,272	0,245	0,127	0,119	0,623	0,596	0,351
480	0,461	0,384	0,456	0,376	0,376	0,355	0,262	0,235	0,142	0,119	0,628	0,600	0,358
500	0,460	0,368	0,451	0,373	0,374	0,351	0,255	0,226	0,159	0,120	0,631	0,602	0,366
520	0,471	0,359	0,447	0,370	0,370	0,347	0,249	0,220	0,173	0,120	0,637	0,608	0,371
540	0,491	0,369	0,441	0,365	0,366	0,342	0,244	0,214	0,185	0,120	0,640	0,610	0,376
560	0,517	0,395	0,434	0,360	0,361	0,338	0,242	0,211	0,196	0,120	0,645	0,615	0,379
580	0,544	0,429	0,425	0,353	0,356	0,334	0,238	0,207	0,205	0,120	0,653	0,622	0,386
600	0,561	0,460	0,418	0,348	0,352	0,330	0,236	0,205	0,213	0,120	0,660	0,629	0,393
620	0,577	0,488	0,410	0,342	0,347	0,326	0,235	0,203	0,223	0,120	0,662	0,633	0,403
640	0,593	0,509	0,401	0,340	0,341	0,322	0,233	0,201	0,232	0,120	0,670	0,640	0,414
660	0,602	0,524	0,395	0,337	0,334	0,319	0,232	0,200	0,240	0,120	0,674	0,645	0,424
680	0,611	0,537	0,390	0,334	0,328	0,316	0,232	0,199	0,246	0,120	0,679	0,651	0,433
700	0,618	0,544	0,383	0,330	0,322	0,312	0,231	0,198	0,253	0,120	0,685	0,658	0,444

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	60,87	50,08	45,89	38,28	38,56	36,27	26,14	22,72	23,05	13,14	71,98	68,68	43,15
\bar{y}	52,86	42,10	42,75	35,54	35,74	33,54	24,06	20,98	19,97	11,99	64,95	61,93	38,52
\bar{z}	16,87	14,32	16,38	13,36	13,34	12,68	9,67	8,68	4,59	4,22	22,10	21,14	12,44

m	130,60	106,49	105,02	87,18	87,64	82,48	59,87	52,37	47,61	29,35	159,04	151,75	94,12
x	0,466	0,470	0,437	0,439	0,440	0,440	0,437	0,434	0,434	0,484	0,448	0,453	0,458
y	0,405	0,395	0,407	0,408	0,408	0,407	0,407	0,402	0,402	0,419	0,408	0,408	0,409
z	0,129	0,134	0,156	0,153	0,152	0,152	0,154	0,161	0,166	0,096	0,144	0,139	0,132
λ , нм	596	700	494	497	497	494	486	487	587	580	590	590	589
p , %	10,0	5,2	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7	2,2	36,2	1,0	4,2	4,2	8,2

Источник В

\bar{x}	53,79	44,14	42,06	34,95	35,16	33,10	24,04	20,98	19,72	11,85	64,49	61,53	38,30
\bar{y}	51,88	41,03	43,15	35,81	36,00	33,77	24,25	21,19	19,42	11,99	64,69	61,67	38,20
\bar{z}	40,60	34,67	39,36	32,06	31,98	30,43	23,37	21,00	10,67	10,10	52,84	50,56	29,63
m	146,27	119,84	124,57	102,83	103,14	97,30	71,66	63,18	49,81	33,94	182,02	173,76	106,13
x	0,368	0,368	0,338	0,340	0,341	0,340	0,335	0,332	0,396	0,349	0,354	0,354	0,361
y	0,355	0,342	0,346	0,348	0,349	0,347	0,338	0,335	0,390	0,353	0,355	0,355	0,360
z	0,278	0,289	0,316	0,312	0,310	0,313	0,326	0,332	0,214	0,298	0,290	0,291	0,279

Источник С

\bar{x}	53,24	43,75	42,36	35,13	35,31	33,27	24,29	21,25	19,12	11,84	64,20	61,27	37,95
\bar{y}	51,51	40,67	43,30	35,92	36,09	33,86	24,33	21,28	19,19	11,99	64,58	61,57	38,07
\bar{z}	56,51	48,35	54,73	44,56	44,43	42,30	32,58	29,28	14,68	14,02	73,36	70,19	41,08
m	161,27	132,77	140,38	115,61	115,83	109,43	81,19	71,81	52,99	37,85	202,15	193,03	117,10
x	0,330	0,330	0,302	0,304	0,305	0,304	0,299	0,296	0,361	0,313	0,318	0,317	0,324
y	0,319	0,306	0,308	0,311	0,312	0,309	0,300	0,296	0,362	0,317	0,319	0,319	0,325
z	0,350	0,364	0,390	0,385	0,384	0,387	0,401	0,408	0,277	0,370	0,363	0,364	0,351
λ	605	497	476	479	479	474	465	465	579	592	591	590	583
p , %	7,0	5,0	1,5	1,2	1,1	1,0	1,2	1,6	35,0	1,2	3,7	3,2	8,5

λ , нм	Висмут		Висмутин		Ферберит		Волынскит	Вулканит		Галенит	Галенобисмутит		Галлит
	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$		R	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	
420	0,597	0,552	0,502	0,432	0,187	0,170	0,531	0,172	0,282	0,488	0,547	0,521	0,252
440	0,600	0,552	0,503	0,431	0,187	0,169	0,537	0,199	0,260	0,478	0,546	0,520	0,252
460	0,606	0,552	0,505	0,430	0,186	0,169	0,538	0,226	0,241	0,465	0,543	0,517	0,252
480	0,616	0,553	0,509	0,428	0,186	0,168	0,539	0,276	0,230	0,455	0,538	0,512	0,250
500	0,628	0,557	0,510	0,425	0,186	0,168	0,538	0,329	0,220	0,446	0,530	0,505	0,248
520	0,642	0,564	0,511	0,421	0,186	0,168	0,534	0,373	0,195	0,439	0,520	0,496	0,246
540	0,656	0,574	0,510	0,420	0,186	0,168	0,532	0,409	0,165	0,432	0,510	0,486	0,244
560	0,670	0,588	0,505	0,419	0,185	0,167	0,531	0,437	0,153	0,429	0,499	0,475	0,240
580	0,682	0,603	0,500	0,417	0,185	0,166	0,533	0,463	0,148	0,426	0,487	0,465	0,236
600	0,694	0,616	0,495	0,416	0,185	0,166	0,536	0,481	0,143	0,424	0,478	0,459	0,233
620	0,703	0,629	0,488	0,412	0,184	0,167	0,541	0,496	0,143	0,424	0,473	0,456	0,230
640	0,712	0,639	0,481	0,410	0,184	0,167	0,548	0,510	0,152	0,426	0,472	0,455	0,230
660	0,719	0,646	0,477	0,410	0,184	0,168	0,552	0,523	0,175	0,427	0,472	0,455	0,229
680	0,723	0,648	0,471	0,409	0,184	0,168	0,557	0,533	0,202	0,428	0,472	0,455	0,229
700	0,726	0,649	0,467	0,409	0,184	0,169	0,560	0,542	0,217	0,427	0,472	0,455	0,229

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	75,48	67,16	54,09	45,51	20,24	18,28	59,01	51,09	16,99	46,91	52,70	50,16	25,69
\bar{y}	67,46	59,64	49,98	41,70	18,50	16,68	53,50	44,24	15,98	42,91	48,74	46,12	23,78
\bar{z}	21,61	19,62	17,93	15,21	6,60	5,99	19,05	8,54	8,60	16,50	18,38	17,25	8,90

m	164,56	146,42	122,00	102,42	45,34	40,95	131,60	103,87	41,58	106,32	119,82	113,52	58,36
x	0,459	0,459	0,443	0,444	0,446	0,447	0,449	0,492	0,409	0,441	0,440	0,442	0,440
y	0,410	0,407	0,410	0,407	0,408	0,408	0,407	0,426	0,384	0,404	0,407	0,406	0,407
z	0,131	0,134	0,147	0,149	0,146	0,146	0,145	0,082	0,207	0,155	0,153	0,152	0,152
λ , нм	588	593	508	494	510	493	593	586	584	486	494	491	494
p , %	9,5	7,2	1,8	0,9	0,7	0,4	1,0	47,0	5,0	1,1	1,9	1,2	1,9

Источник В

\bar{x}	67,06	59,74	49,06	41,27	18,29	16,52	53,16	43,26	16,28	42,78	48,07	45,63	23,41
\bar{y}	66,85	59,04	50,20	41,82	18,52	16,70	53,46	42,82	16,49	43,11	49,08	46,36	23,94
\bar{z}	51,58	46,95	42,91	36,48	15,83	14,35	45,62	19,57	20,96	39,76	44,09	41,39	21,34
m	185,49	165,74	142,17	119,56	52,64	47,57	152,25	105,64	53,74	125,65	141,25	133,38	68,69
x	0,362	0,360	0,345	0,345	0,348	0,347	0,349	0,409	0,303	0,340	0,340	0,342	0,341
y	0,360	0,356	0,353	0,350	0,352	0,351	0,351	0,405	0,307	0,343	0,347	0,348	0,348
z	0,278	0,283	0,302	0,305	0,301	0,302	0,300	0,185	0,390	0,316	0,312	0,310	0,311

Источник С

\bar{x}	66,45	59,28	49,12	41,34	18,29	16,53	53,11	41,59	16,93	43,05	48,31	45,81	23,52
\bar{y}	66,60	58,82	50,28	41,86	18,53	16,71	53,45	42,21	16,73	43,20	49,21	46,45	24,00
\bar{z}	71,56	65,20	59,58	50,69	21,99	19,94	63,37	26,79	29,28	55,34	61,28	57,52	29,65
m	204,61	183,30	158,97	133,90	58,81	53,17	169,94	110,59	62,94	141,58	158,80	149,78	77,17
x	0,325	0,323	0,309	0,309	0,311	0,311	0,313	0,376	0,269	0,304	0,304	0,306	0,305
y	0,325	0,321	0,316	0,313	0,315	0,314	0,315	0,382	0,266	0,305	0,310	0,310	0,311
z	0,350	0,356	0,375	0,379	0,374	0,375	0,373	0,242	0,465	0,391	0,386	0,384	0,384
λ	585	592	490	400	508'	520'	496'	578	472	450	476	465	476
p , %	8,7	5,9	0,5	0,0	0,2	0,3	0,7	46,0	5,5	0,4	1,2	0,5	1,0

Продолжение прилож. 4

λ , нм	R	Галхант		Гематит		Геокронит		R	R	Гессит		Гетероморфит		Гетчелит		Rg
		Rg	R'p	R'g	R'p	R	R			R'g	R'p	R'g	R'p	R'g	R'p	
420	0,285	0,320	0,292	0,446	0,410	0,216	0,474	0,374	0,396	0,456	0,342	0,365	0,322	0,191	0,191	
440	0,284	0,326	0,294	0,440	0,405	0,217	0,473	0,378	0,393	0,454	0,342	0,363	0,321	0,194	0,194	
460	0,280	0,323	0,286	0,434	0,401	0,215	0,472	0,382	0,392	0,452	0,342	0,357	0,318	0,196	0,196	
480	0,277	0,316	0,276	0,427	0,398	0,210	0,469	0,384	0,390	0,450	0,342	0,349	0,316	0,200	0,200	
500	0,269	0,312	0,274	0,423	0,395	0,207	0,464	0,388	0,390	0,447	0,342	0,339	0,307	0,204	0,204	
520	0,259	0,308	0,271	0,417	0,392	0,207	0,460	0,393	0,388	0,443	0,341	0,328	0,295	0,208	0,208	
540	0,249	0,308	0,270	0,412	0,389	0,210	0,456	0,398	0,388	0,438	0,340	0,313	0,282	0,211	0,211	
560	0,239	0,306	0,267	0,406	0,385	0,220	0,455	0,402	0,388	0,432	0,338	0,300	0,270	0,214	0,214	
580	0,232	0,293	0,259	0,401	0,381	0,230	0,454	0,406	0,388	0,426	0,336	0,290	0,260	0,218	0,218	
600	0,227	0,280	0,249	0,398	0,379	0,238	0,456	0,410	0,388	0,418	0,331	0,284	0,254	0,222	0,222	
620	0,225	0,270	0,241	0,394	0,377	0,248	0,400	0,413	0,389	0,410	0,327	0,280	0,250	0,225	0,225	
640	0,224	0,262	0,234	0,390	0,371	0,258	0,465	0,416	0,390	0,402	0,320	0,278	0,249	0,230	0,230	
660	0,222	0,259	0,231	0,386	0,366	0,263	0,471	0,418	0,391	0,393	0,314	0,276	0,248	0,235	0,235	
680	0,222	0,254	0,227	0,382	0,363	0,270	0,477	0,420	0,392	0,384	0,306	0,274	0,246	0,238	0,238	
700	0,222	0,250	0,225	0,378	0,357	0,277	0,483	0,418	0,392	0,375	0,300	0,273	0,246	0,242	0,242	

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

\bar{x}	25,41	30,98	27,47	43,75	41,58	26,12	50,34	44,75	42,60	45,82	36,17	31,75	28,43	24,24
\bar{y}	23,83	29,31	25,84	40,39	38,29	22,69	45,73	40,36	38,80	42,63	33,42	29,86	26,82	21,67
\bar{z}	9,88	11,36	10,09	15,36	14,24	7,58	16,68	13,54	13,90	16,01	12,12	12,56	11,22	6,99

m	59,13	71,65	63,40	99,50	94,11	56,39	112,75	98,64	95,30	104,46	81,72	74,18	66,47	52,91
x	0,430	0,432	0,433	0,440	0,442	0,463	0,446	0,454	0,447	0,439	0,443	0,428	0,428	0,458
y	0,403	0,409	0,408	0,405	0,407	0,402	0,406	0,409	0,407	0,408	0,409	0,403	0,403	0,410
z	0,167	0,159	0,159	0,154	0,151	0,134	0,148	0,137	0,146	0,153	0,148	0,169	0,169	0,132
λ , нм	491	497	496	492	494	607	480	588	495	497	503	491	491	588
p , %	3,5	4,0	3,7	1,7	1,4	6,0	0,1	5,7	0,1	2,3	1,6	3,9	3,9	9,0

Источник В

\bar{x}	23,52	28,58	25,33	39,95	37,84	23,14	45,51	40,03	38,48	41,87	32,87	29,47	26,38	21,54
\bar{y}	24,20	29,70	26,16	40,65	38,48	22,33	45,76	40,16	38,82	42,98	33,58	30,37	27,29	21,49
\bar{z}	23,79	27,30	24,30	36,94	34,18	18,21	40,02	32,35	33,32	38,40	29,04	30,27	26,99	16,67
m	71,51	85,59	75,79	117,55	110,51	63,67	131,29	112,55	110,62	123,25	95,49	90,11	80,66	59,70
x	0,329	0,334	0,334	0,340	0,342	0,363	0,347	0,356	0,348	0,340	0,344	0,327	0,338	0,361
y	0,338	0,347	0,345	0,346	0,348	0,351	0,349	0,357	0,351	0,349	0,352	0,337	0,338	0,360
z	0,333	0,319	0,321	0,314	0,309	0,286	0,305	0,287	0,301	0,312	0,304	0,336	0,335	0,279

Источник С

\bar{x}	23,84	28,85	25,58	40,18	37,98	22,95	45,56	39,81	38,49	42,08	32,93	29,91	26,76	21,35
\bar{y}	24,35	29,85	26,27	40,76	38,55	22,20	45,78	40,08	38,82	43,10	33,64	30,58	27,48	21,41
\bar{z}	33,09	37,96	33,82	51,37	47,51	25,31	55,62	44,91	46,30	53,36	40,34	42,12	37,53	23,13
m	81,28	96,66	85,67	132,31	124,05	70,46	146,97	124,80	123,61	138,55	106,91	102,60	91,78	65,89
x	0,293	0,298	0,299	0,304	0,306	0,326	0,310	0,319	0,311	0,304	0,308	0,292	0,292	0,324
y	0,300	0,309	0,307	0,308	0,311	0,315	0,312	0,321	0,314	0,311	0,315	0,298	0,299	0,325
z	0,407	0,393	0,395	0,388	0,383	0,359	0,378	0,360	0,375	0,385	0,377	0,410	0,409	0,351
λ	478	483	480	467	470	640	553'	586	520'	479	484	477	478	583
p , %	3,1	3,0	2,4	0,9	0,7	3,9	0,3	4,8	0,3	1,2	0,7	3,0	3,2	8,5

	Графит	Грейгит	Гринокит	Гудмуилит		Дела-фоссит	Джезказганит	Джемсонит		Джерфишерит	Догначкант		Железо
λ , нм	$R'p$	R	R	$R'g$	$R'p$	$R'g$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R
420	0,069	0,307	0,203	0,578	0,515	0,214	0,296	0,458	0,403	0,158	0,468	0,429	0,598
440	0,068	0,315	0,201	0,580	0,515	0,214	0,292	0,460	0,401	0,169	0,476	0,430	0,602
460	0,068	0,321	0,200	0,582	0,515	0,216	0,286	0,462	0,400	0,180	0,479	0,430	0,603
480	0,069	0,325	0,209	0,582	0,515	0,221	0,284	0,461	0,399	0,192	0,481	0,428	0,604
500	0,070	0,331	0,222	0,580	0,515	0,224	0,281	0,459	0,397	0,203	0,480	0,426	0,604
520	0,070	0,336	0,211	0,577	0,517	0,226	0,280	0,454	0,392	0,213	0,480	0,423	0,603
540	0,070	0,344	0,201	0,573	0,521	0,226	0,280	0,447	0,388	0,221	0,477	0,419	0,600
560	0,070	0,349	0,195	0,568	0,523	0,225	0,281	0,439	0,382	0,229	0,471	0,414	0,596
580	0,070	0,354	0,190	0,563	0,526	0,223	0,282	0,430	0,376	0,235	0,467	0,405	0,594
600	0,070	0,360	0,187	0,555	0,530	0,224	0,284	0,423	0,372	0,241	0,463	0,399	0,594
620	0,070	0,368	0,185	0,548	0,533	0,224	0,287	0,417	0,368	0,246	0,462	0,395	0,596
640	0,070	0,377	0,183	0,543	0,537	0,226	0,289	0,410	0,364	0,251	0,460	0,394	0,598
660	0,070	0,385	0,181	0,539	0,543	0,228	0,290	0,405	0,360	0,254	0,460	0,393	0,602
680	0,070	0,394	0,180	0,535	0,548	0,232	0,292	0,398	0,357	0,258	0,459	0,392	0,607
700	0,070	0,402	0,179	0,532	0,554	0,235	0,293	0,392	0,352	0,260	0,459	0,392	0,612

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

\bar{x}	7,66	39,49	20,68	60,92	58,05	24,57	31,22	46,58	40,91	26,05	52,88	44,10	65,37
\bar{y}	6,99	35,25	19,44	56,28	52,50	22,43	28,23	43,39	37,88	23,09	48,52	40,51	59,68
\bar{z}	2,43	11,37	7,25	20,59	18,27	7,71	10,19	16,31	14,17	6,44	17,26	14,54	21,37

m	17,08	86,11	47,37	137,79	128,82	54,71	69,64	106,28	92,96	55,58	118,66	99,15	146,42
x	0,449	0,459	0,437	0,442	0,451	0,449	0,448	0,438	0,440	0,469	0,446	0,445	0,446
y	0,409	0,409	0,410	0,408	0,408	0,410	0,405	0,408	0,407	0,415	0,409	0,409	0,408
z	0,142	0,132	0,153	0,149	0,142	0,141	0,146	0,153	0,152	0,116	0,145	0,147	0,146
λ , нм	580	590	500	498	588	578	562'	497	494	586	530	515	504
p , %	2,1	9,0	3,1	1,7	3,0	3,1	0,2	2,5	1,9	21,0	1,2	1,0	0,7

Источник В

\bar{x}	6,90	35,07	18,87	55,38	52,17	22,08	28,18	42,56	37,30	22,78	47,82	39,92	59,05
\bar{y}	6,99	34,93	19,68	56,58	52,37	22,43	28,20	43,77	38,14	22,72	48,63	40,63	59,76
\bar{z}	5,80	27,12	17,29	49,31	43,75	18,41	24,48	39,09	33,99	15,18	41,31	34,80	51,17
m	19,69	97,12	55,85	161,27	148,28	62,92	80,86	125,42	109,43	60,68	137,76	115,35	169,98
x	0,350	0,361	0,338	0,343	0,352	0,351	0,349	0,339	0,341	0,375	0,347	0,346	0,347
y	0,355	0,360	0,352	0,351	0,353	0,357	0,349	0,349	0,349	0,374	0,353	0,352	0,352
z	0,295	0,279	0,310	0,306	0,295	0,293	0,303	0,312	0,311	0,250	0,300	0,302	0,301

Источник С

\bar{x}	6,88	34,76	18,96	55,52	52,04	22,02	28,19	42,77	37,46	22,35	47,82	39,95	59,05
\bar{y}	6,99	34,81	19,77	56,68	52,31	22,43	28,19	43,91	38,24	22,57	48,67	40,67	59,79
\bar{z}	8,06	37,62	23,99	68,50	60,77	25,54	34,04	54,30	47,23	20,98	57,35	48,32	71,07
m	21,93	107,18	62,72	180,70	165,12	69,99	90,42	140,99	122,93	65,90	153,84	128,94	189,91
x	0,314	0,324	0,302	0,307	0,315	0,315	0,312	0,303	0,305	0,339	0,311	0,310	0,311
y	0,319	0,325	0,315	0,314	0,317	0,320	0,312	0,311	0,311	0,343	0,316	0,315	0,315
z	0,367	0,351	0,383	0,379	0,368	0,365	0,377	0,385	0,384	0,318	0,373	0,375	0,374
λ	581	583	489	480	604	581	520'	480	477	579	610	553'	506'
p , %	2,5	8,4	2,7	0,8	2,0	3,2	0,8	1,7	1,0	22,0	0,2	0,1	0,2

Продолжение прилож. 4

λ , нм	Жозеит А		Жозеит Б		Зелигманнит		Зиннерит	Золото	Золото меди- стое	Идаит		Ильвант		Индит	Иордан- нит
	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	R	R	R	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$
420	0,528	0,475	0,599	0,524	0,352	0,334	0,293	0,344	0,410	0,232	0,117	0,098	0,088	0,264	0,420
440	0,533	0,482	0,600	0,523	0,351	0,333	0,293	0,352	0,439	0,238	0,117	0,098	0,088	0,265	0,414
460	0,539	0,488	0,602	0,522	0,350	0,330	0,293	0,370	0,461	0,244	0,117	0,098	0,087	0,266	0,411
480	0,544	0,494	0,607	0,524	0,349	0,326	0,292	0,422	0,479	0,246	0,119	0,098	0,086	0,266	0,408
500	0,546	0,498	0,612	0,527	0,348	0,323	0,292	0,539	0,500	0,246	0,120	0,099	0,085	0,264	0,405
520	0,548	0,500	0,620	0,531	0,347	0,319	0,290	0,665	0,524	0,244	0,128	0,100	0,082	0,259	0,402
540	0,549	0,500	0,627	0,536	0,346	0,315	0,290	0,737	0,568	0,241	0,139	0,099	0,079	0,255	0,398
560	0,548	0,502	0,633	0,540	0,344	0,312	0,289	0,791	0,640	0,237	0,157	0,098	0,075	0,251	0,393
580	0,549	0,504	0,638	0,543	0,341	0,310	0,287	0,826	0,710	0,232	0,178	0,096	0,071	0,249	0,389
600	0,549	0,507	0,641	0,545	0,336	0,306	0,286	0,848	0,756	0,233	0,199	0,095	0,068	0,247	0,385
620	0,548	0,507	0,642	0,546	0,330	0,302	0,285	0,865	0,801	0,238	0,218	0,095	0,065	0,244	0,382
640	0,546	0,508	0,640	0,547	0,324	0,298	0,285	0,881	0,828	0,253	0,237	0,094	0,063	0,240	0,377
660	0,544	0,508	0,638	0,548	0,318	0,293	0,286	0,894	0,842	0,269	0,255	0,094	0,061	0,240	0,372
680	0,541	0,510	0,635	0,548	0,313	0,289	0,287	0,901	0,854	0,285	0,270	0,095	0,061	0,239	0,370
700	0,540	0,512	0,630	0,548	0,308	0,286	0,287	0,906	0,865	0,300	0,282	0,096	0,061	0,238	0,366

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

\bar{x}	59,96	55,32	69,79	59,53	36,72	33,56	31,43	89,78	80,57	26,32	21,49	10,48	7,56	27,08	42,30
\bar{y}	54,74	50,29	63,25	53,98	33,97	31,00	28,77	78,33	67,10	23,89	17,23	9,68	7,30	25,03	39,05
\bar{z}	19,10	17,31	21,42	18,57	12,41	11,67	10,37	14,25	16,37	8,58	4,20	3,48	3,08	9,39	14,57

m	138,80	122,92	154,46	132,09	83,10	76,22	70,58	182,36	164,05	58,80	42,91	23,64	17,94	61,49	95,92
x	0,448	0,450	0,452	0,451	0,442	0,440	0,445	0,492	0,491	0,448	0,501	0,443	0,422	0,440	0,441
y	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,407	0,408	0,429	0,409	0,406	0,401	0,409	0,407	0,407	0,407
z	0,143	0,141	0,139	0,141	0,149	0,153	0,147	0,078	0,100	0,146	0,098	0,148	0,172	0,153	0,152
$\lambda, \text{ нм}$	575	583	586	585	501	494	502	585	592	555'	596	503	495	494	494
$p, \%$	1,8	3,0	4,2	3,5	1,8	1,9	0,9	50,0	32,0	0,2	33,0	1,6	6,0	1,9	1,7

Источник В

\bar{x}	54,03	49,71	62,61	53,50	33,41	30,62	28,45	76,12	68,83	23,67	18,16	9,51	7,07	24,67	38,54
\bar{y}	54,75	50,21	63,04	53,85	34,15	31,19	28,84	75,77	64,49	23,92	16,36	9,72	7,47	25,19	39,28
\bar{z}	45,66	41,34	51,23	44,46	29,75	28,02	24,86	32,90	38,73	20,51	10,01	8,33	7,40	22,51	34,99
m	154,44	141,26	176,88	151,80	97,31	89,83	82,15	184,79	172,05	68,10	44,54	27,56	21,95	72,37	112,80
x	0,350	0,352	0,354	0,352	0,343	0,341	0,346	0,412	0,400	0,348	0,408	0,345	0,322	0,341	0,342
y	0,355	0,355	0,356	0,355	0,351	0,347	0,351	0,410	0,375	0,351	0,367	0,353	0,340	0,348	0,348
z	0,296	0,293	0,290	0,293	0,306	0,312	0,303	0,178	0,225	0,301	0,225	0,302	0,337	0,311	0,310

Источник С

\bar{x}	53,92	49,54	62,34	53,33	33,50	30,76	28,47	73,17	66,79	23,67	17,69	9,52	7,20	24,78	38,70
\bar{y}	54,75	50,18	62,95	53,79	34,21	31,26	28,86	74,64	63,49	23,93	16,05	9,74	7,54	25,26	39,36
\bar{z}	63,38	57,37	71,13	61,75	41,34	38,95	34,54	45,20	53,57	28,45	13,89	11,57	10,29	31,27	48,63
m	172,04	157,09	196,42	168,87	109,05	100,98	91,88	193,01	183,85	76,06	47,54	30,83	25,03	81,30	126,69
x	0,313	0,315	0,317	0,316	0,307	0,305	0,310	0,379	0,363	0,311	0,370	0,309	0,288	0,305	0,305
y	0,318	0,319	0,320	0,319	0,314	0,310	0,314	0,387	0,345	0,315	0,338	0,316	0,301	0,311	0,311
z	0,368	0,365	0,362	0,366	0,379	0,386	0,376	0,234	0,291	0,374	0,292	0,376	0,411	0,385	0,384
λ	582	584	585	587	480	473	553'	577	586	510'	592	490	482	476	476
$p, \%$	1,9	2,8	3,8	3,0	0,8	0,9	0,2	48,0	28,0	0,3	27,0	0,5	4,8	1,0	1,0

Продолжение прилож. 4

	Иорданит	Калаверит		Кан菲尔дит	Кестерит	Киноварь		Клаусталит	Клокманнит		Кобальтин	Кобальтин Ni	Кобеллит
λ , нм	$R'p$	$R'g$	$R'p$	R	R	$R'g$	Rp	R	$R'g$	Rp	R	R	$R'g$
420	0,400	0,482	0,453	0,278	0,234	0,332	0,284	0,606	0,377	0,147	0,477	0,481	0,479
440	0,394	0,505	0,474	0,272	0,241	0,323	0,275	0,597	0,389	0,150	0,475	0,480	0,480
460	0,391	0,525	0,492	0,266	0,246	0,315	0,269	0,585	0,393	0,154	0,475	0,479	0,478
480	0,386	0,540	0,507	0,259	0,249	0,310	0,262	0,570	0,391	0,155	0,476	0,482	0,474
500	0,384	0,550	0,519	0,254	0,251	0,307	0,257	0,551	0,387	0,156	0,481	0,485	0,468
520	0,381	0,558	0,526	0,249	0,250	0,306	0,254	0,535	0,379	0,155	0,488	0,490	0,459
540	0,377	0,564	0,533	0,246	0,250	0,302	0,250	0,520	0,371	0,152	0,497	0,495	0,454
560	0,373	0,570	0,539	0,243	0,249	0,296	0,247	0,507	0,362	0,147	0,507	0,502	0,448
580	0,370	0,575	0,543	0,242	0,247	0,290	0,245	0,497	0,352	0,139	0,518	0,509	0,442
600	0,368	0,578	0,548	0,241	0,246	0,286	0,242	0,489	0,343	0,130	0,530	0,516	0,438
620	0,365	0,580	0,552	0,241	0,246	0,282	0,240	0,485	0,335	0,124	0,541	0,523	0,435
640	0,360	0,581	0,555	0,242	0,248	0,278	0,238	0,482	0,326	0,123	0,550	0,530	0,433
660	0,356	0,582	0,559	0,243	0,249	0,276	0,237	0,479	0,318	0,128	0,554	0,535	0,430
680	0,352	0,584	0,563	0,244	0,250	0,275	0,236	0,477	0,310	0,138	0,555	0,540	0,428
700	0,348	0,584	0,567	0,245	0,250	0,275	0,235	0,476	0,300	0,159	0,556	0,540	0,428

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

\bar{x}	40,32	62,88	59,71	26,64	27,08	31,54	26,70	54,40	37,75	14,63	57,82	56,46	48,28
\bar{y}	37,14	57,00	53,99	24,37	24,79	29,28	24,60	50,51	35,53	14,09	51,42	50,63	44,55
\bar{z}	13,83	18,56	17,41	9,41	8,69	11,21	9,53	20,61	13,79	5,41	16,90	17,05	16,87

m	91,30	138,43	131,11	60,42	60,56	72,03	60,82	125,52	87,07	34,14	126,14	124,15	109,71
x	0,442	0,454	0,455	0,441	0,447	0,438	0,439	0,434	0,434	0,429	0,458	0,455	0,440
y	0,407	0,412	0,412	0,403	0,409	0,406	0,404	0,402	0,408	0,413	0,408	0,408	0,406
z	0,152	0,134	0,133	0,156	0,143	0,156	0,157	0,164	0,158	0,159	0,184	0,137	0,154
λ , нм	494	583	584	483	562	493	488	489	496	500	591	590	492
p , %	1,4	8,0	8,6	1,0	1,5	2,2	1,6	3,7	3,5	5,5	7,5	5,5	1,7

Источник В

\bar{x}	36,71	56,10	53,18	24,31	24,41	28,88	24,43	50,16	34,71	13,51	51,44	50,46	44,04
\bar{y}	37,33	56,76	53,70	24,48	24,83	29,52	24,76	51,09	35,99	14,36	50,93	50,31	44,84
\bar{z}	33,22	44,12	41,39	22,67	20,74	26,98	22,95	49,70	33,05	12,93	40,44	40,81	40,50
m	107,26	156,98	148,28	71,46	69,98	85,38	72,14	150,95	103,75	40,80	142,81	141,59	129,38
x	0,342	0,357	0,359	0,340	0,349	0,338	0,339	0,332	0,335	0,331	0,360	0,356	0,340
y	0,348	0,362	0,362	0,343	0,355	0,346	0,343	0,338	0,347	0,352	0,357	0,355	0,347
z	0,310	0,281	0,279	0,317	0,296	0,316	0,318	0,329	0,319	0,317	0,283	0,288	0,313

Источник С

\bar{x}	36,85	55,67	52,74	24,46	24,37	29,08	24,60	50,75	34,99	13,65	51,05	50,19	44,26
\bar{y}	37,41	56,65	53,58	24,54	24,84	29,62	24,83	51,33	36,17	14,45	50,74	50,19	44,96
\bar{z}	46,18	61,12	57,34	31,55	28,78	37,53	31,94	69,18	45,90	17,95	56,16	56,68	56,30
m	120,44	173,44	163,66	80,54	77,99	96,23	81,38	171,26	117,06	46,04	157,95	157,06	145,52
x	0,306	0,321	0,322	0,304	0,312	0,302	0,302	0,296	0,299	0,296	0,323	0,320	0,304
y	0,311	0,327	0,327	0,305	0,319	0,308	0,305	0,300	0,309	0,314	0,321	0,320	0,309
z	0,383	0,352	0,350	0,392	0,369	0,390	0,393	0,404	0,392	0,390	0,356	0,361	0,387
λ	467	578	579	450	573	476	467	474	482	489	592	591	472
p , %	0,7	8,6	9,0	0,4	2,0	1,5	1,0	2,2	2,7	4,5	5,9	4,5	1,0

λ , нм	Кобеллит		Ковеллин		Козалит		Колорадоит		Колосит		Коффинит		Кранцерит		Крукасит		Кубанит	
	$R' p$	$R' g$	R_p	$R' g$	$R' p$	R	R	R	R	R	$R' g$	$R' p$	$R' g$	$R' p$	$R' g$	$R' p$	$R' g$	
420	0,438	0,310	0,136	0,536	0,469	0,342	0,218	0,093	0,518	0,432	0,352	0,328	0,249					
440	0,435	0,304	0,134	0,531	0,452	0,364	0,228	0,092	0,538	0,456	0,355	0,328	0,297					
460	0,430	0,295	0,127	0,525	0,437	0,374	0,236	0,091	0,557	0,478	0,357	0,324	0,332					
480	0,425	0,284	0,117	0,513	0,424	0,372	0,242	0,090	0,575	0,501	0,355	0,322	0,360					
500	0,419	0,273	0,103	0,503	0,415	0,368	0,250	0,090	0,590	0,520	0,353	0,323	0,379					
520	0,412	0,257	0,087	0,493	0,407	0,368	0,259	0,090	0,602	0,534	0,348	0,326	0,391					
540	0,406	0,241	0,069	0,484	0,401	0,370	0,267	0,090	0,611	0,544	0,344	0,328	0,397					
560	0,401	0,225	0,055	0,476	0,396	0,377	0,275	0,090	0,619	0,552	0,340	0,328	0,402					
580	0,396	0,210	0,040	0,471	0,393	0,390	0,282	0,089	0,627	0,560	0,338	0,329	0,407					
600	0,392	0,200	0,030	0,468	0,390	0,395	0,291	0,089	0,632	0,566	0,340	0,330	0,411					
620	0,389	0,205	0,025	0,467	0,388	0,390	0,295	0,089	0,636	0,571	0,343	0,332	0,418					
640	0,386	0,210	0,030	0,466	0,387	0,380	0,300	0,089	0,641	0,576	0,350	0,336	0,424					
660	0,383	0,216	0,055	0,466	0,387	0,374	0,300	0,089	0,643	0,580	0,352	0,336	0,428					
680	0,382	0,222	0,109	0,466	0,387	0,371	0,300	0,090	0,648	0,585	0,354	0,336	0,433					
700	0,380	0,228	0,179	0,466	0,387	0,366	0,299	0,090	0,650	0,589	0,356	0,336	0,434					

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	43,19	23,50	4,70	52,43	42,34	42,21	31,36	9,79	68,75	61,47	37,62	36,25	44,75
\bar{y}	39,86	22,34	5,26	48,05	38,83	38,06	27,83	8,95	62,05	55,38	34,26	32,87	40,39
\bar{z}	15,21	10,36	4,36	18,41	15,05	13,03	8,37	3,23	19,77	17,00	12,58	11,52	11,67

Зак.	m	98,26	56,21	14,32	118,90	96,22	93,31	67,56	21,96	150,57	133,86	84,47	80,65	96,81
243	x	0,440	0,418	0,328	0,441	0,440	0,452	0,464	0,446	0,457	0,459	0,445	0,450	0,462
	y	0,406	0,397	0,367	0,404	0,404	0,404	0,408	0,412	0,407	0,412	0,414	0,406	0,408
	z	0,155	0,184	0,305	0,155	0,156	0,156	0,140	0,124	0,147	0,131	0,127	0,149	0,143
	λ , нм	492	489	489	486	487	589	587	490	585	584	485	587	583
	p , %	1,7	5,0	22,0	1,1	1,3	3,3	15,5	0,3	9,8	13,5	0,4	2,0	18,2

Источник В

\bar{x}	39,44	22,13	5,18	47,81	38,68	37,88	27,64	8,86	61,15	54,43	34,03	32,64	39,33
\bar{y}	40,13	22,91	5,84	48,30	39,05	37,88	27,45	8,96	61,66	54,94	34,33	32,81	40,04
\bar{z}	36,56	25,06	10,67	44,28	36,26	31,14	19,88	7,74	46,99	40,27	30,15	27,63	27,34
m	116,13	70,11	21,69	140,39	114,00	106,90	74,97	25,56	169,80	149,65	98,52	93,09	106,71
x	0,340	0,316	0,239	0,341	0,339	0,354	0,369	0,347	0,360	0,364	0,345	0,351	0,369
y	0,346	0,327	0,269	0,344	0,343	0,354	0,366	0,351	0,363	0,367	0,349	0,352	0,375
z	0,315	0,357	0,492	0,315	0,318	0,291	0,265	0,303	0,277	0,269	0,306	0,297	0,256

Источник С

\bar{x}	39,67	22,69	5,78	48,08	38,95	37,70	27,25	8,87	60,58	53,78	34,09	32,59	38,67
\bar{y}	40,24	23,15	6,08	48,40	39,15	37,82	27,30	8,97	61,49	54,75	34,37	32,79	39,88
\bar{z}	50,84	34,91	14,92	61,60	50,47	43,21	27,53	10,76	65,09	55,73	41,89	38,40	37,67
m	130,75	80,75	26,78	158,08	128,57	118,72	82,08	28,60	187,16	164,26	110,34	103,78	116,23
x	0,303	0,281	0,216	0,304	0,303	0,318	0,332	0,310	0,324	0,327	0,309	0,314	0,333
y	0,308	0,287	0,227	0,306	0,304	0,319	0,333	0,314	0,329	0,333	0,311	0,316	0,343
z	0,389	0,432	0,557	0,390	0,393	0,364	0,335	0,376	0,348	0,339	0,380	0,370	0,324
λ	472	477	481	450	450	591	581	553'	578	578	558'	615	575
p , %	1,2	4,7	32,5	0,5	0,5	3,7	14,5	0,2	10,2	13,0	0,3	1,2	20,0

λ , нм	Kубанит	Куприт	Купростит		Кюстеллит	Лаутит	Леллингит		Леллингит-Со		Ливингстонит		Lиллианит
	$R' p$	R	$R' g$	R_p	R	R	$R' g$	$R' p$	$R' g$	$R' p$	$R' g$	$R' p$	$R' g$
420	0,204	0,295	0,593	0,511	0,663	0,357	0,500	0,568	0,518	0,580	0,418	0,320	0,527
440	0,239	0,306	0,587	0,516	0,692	0,348	0,510	0,575	0,520	0,574	0,425	0,319	0,515
460	0,270	0,315	0,570	0,498	0,719	0,338	0,520	0,573	0,524	0,568	0,430	0,318	0,504
480	0,295	0,314	0,544	0,478	0,745	0,329	0,530	0,566	0,530	0,562	0,430	0,315	0,495
500	0,316	0,301	0,525	0,460	0,769	0,322	0,535	0,558	0,533	0,555	0,423	0,311	0,486
520	0,332	0,283	0,501	0,430	0,789	0,316	0,540	0,550	0,536	0,547	0,413	0,306	0,477
540	0,345	0,268	0,468	0,389	0,806	0,311	0,546	0,541	0,538	0,540	0,402	0,303	0,469
560	0,357	0,258	0,443	0,364	0,820	0,307	0,550	0,529	0,541	0,534	0,393	0,300	0,461
580	0,368	0,249	0,436	0,365	0,833	0,303	0,552	0,520	0,546	0,530	0,384	0,296	0,454
600	0,378	0,244	0,448	0,400	0,843	0,303	0,553	0,513	0,549	0,526	0,376	0,292	0,449
620	0,388	0,238	0,477	0,455	0,852	0,306	0,553	0,509	0,550	0,522	0,367	0,287	0,444
640	0,399	0,235	0,511	0,512	0,860	0,312	0,552	0,505	0,550	0,519	0,357	0,280	0,442
660	0,408	0,232	0,537	0,560	0,867	0,317	0,550	0,502	0,550	0,517	0,350	0,274	0,442
680	0,415	0,230	0,558	0,595	0,874	0,319	0,549	0,501	0,550	0,514	0,343	0,269	0,442
700	0,418	0,228	0,568	0,620	0,880	0,319	0,546	0,500	0,550	0,512	0,339	0,266	0,442

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

x	40,91	27,14	51,76	47,12	91,58	33,79	60,25	56,72	59,84	57,88	41,31	31,94	50,58
y	36,17	25,66	46,57	40,69	82,30	30,82	54,81	52,60	54,28	53,26	38,78	29,62	46,57
z	9,55	10,92	19,98	17,47	25,54	11,98	18,44	20,19	18,62	20,12	15,11	11,22	17,95

m	86,63	63,72	118,30	105,27	199,42	76,60	133,50	129,50	132,74	131,26	95,21	72,78	115,10
x	0,472	0,426	0,437	0,448	0,459	0,441	0,451	0,438	0,451	0,441	0,434	0,439	0,439
y	0,418	0,403	0,394	0,386	0,413	0,402	0,411	0,406	0,409	0,406	0,407	0,407	0,405
z	0,110	0,171	0,169	0,166	0,128	0,156	0,138	0,156	0,140	0,153	0,159	0,154	0,156
λ , нм	585	492	455	570'	585	479	581	493	585	492	495	494	490
p , %	26,0	4,3	0,5	2,5	12,5	0,7	5,0	2,2	3,5	1,5	3,3	2,1	1,8

Источник В

x	35,52	25,22	47,40	42,49	81,16	30,82	54,03	51,87	53,74	52,75	37,98	29,20	46,22
y	35,53	26,16	46,91	40,58	81,60	30,96	54,69	53,05	54,15	53,56	39,27	29,85	46,87
z	22,31	26,18	48,30	42,24	60,63	28,90	43,99	48,46	44,51	48,33	36,21	26,94	43,19
m	93,36	77,56	142,60	125,31	223,39	90,68	152,70	153,37	152,40	154,64	113,45	85,98	136,28
x	0,380	0,325	0,332	0,339	0,363	0,340	0,354	0,338	0,353	0,341	0,335	0,340	0,339
y	0,381	0,337	0,329	0,324	0,365	0,341	0,358	0,346	0,355	0,346	0,346	0,347	0,344
z	0,239	0,338	0,339	0,337	0,271	0,319	0,288	0,316	0,292	0,313	0,319	0,313	0,317

Источник С

x	34,70	25,60	48,02	42,88	80,24	31,03	53,77	52,20	53,55	53,01	38,28	29,35	46,52
y	35,27	26,36	47,10	40,64	81,30	31,03	54,62	53,22	54,09	53,67	39,46	29,94	47,00
z	30,72	36,36	67,29	58,84	83,96	40,23	61,01	67,35	61,79	67,20	50,29	37,44	60,07
m	100,69	88,33	162,41	142,37	245,51	102,29	169,41	172,77	169,43	173,88	128,03	96,73	153,59
x	0,345	0,290	0,296	0,301	0,327	0,303	0,317	0,302	0,316	0,305	0,299	0,303	0,303
y	0,350	0,298	0,290	0,285	0,331	0,303	0,322	0,308	0,319	0,309	0,308	0,309	0,306
z	0,305	0,412	0,414	0,413	0,342	0,393	0,360	0,390	0,365	0,386	0,393	0,387	0,391
λ	578	478	450	562'	580	450	580	476	587	466	481	477	465
p , %	26,0	3,7	0,8	1,4	12,0	0,4	4,6	1,5	3,0	0,8	2,6	1,3	0,9

	Лиллианит	Лорандит		Люценонит		Маггемит	Магнетит	Макинавит		Макинстрит		Марказит		Маухерит	Медь	Мелонит
λ , нм	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	R_p	R	R	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	R	R	R_g
420	0,432	0,377	0,286	0,282	0,258	0,208	0,209	0,357	0,164	0,362	0,295	0,451	0,414	0,439	0,450	0,526
440	0,422	0,372	0,289	0,265	0,249	0,206	0,208	0,381	0,167	0,360	0,300	0,468	0,436	0,451	0,467	0,542
460	0,413	0,364	0,289	0,254	0,242	0,202	0,207	0,400	0,169	0,354	0,302	0,502	0,454	0,461	0,486	0,558
480	0,406	0,355	0,289	0,252	0,239	0,197	0,206	0,416	0,170	0,345	0,300	0,532	0,463	0,469	0,510	0,573
500	0,399	0,347	0,288	0,257	0,242	0,192	0,205	0,432	0,172	0,335	0,293	0,558	0,475	0,476	0,533	0,588
520	0,393	0,338	0,286	0,267	0,245	0,187	0,205	0,445	0,175	0,326	0,285	0,571	0,484	0,482	0,555	0,602
540	0,388	0,330	0,284	0,278	0,251	0,182	0,206	0,456	0,177	0,319	0,280	0,575	0,495	0,486	0,580	0,616
560	0,382	0,320	0,279	0,285	0,255	0,179	0,207	0,463	0,179	0,311	0,274	0,570	0,501	0,493	0,650	0,630
580	0,377	0,308	0,269	0,293	0,262	0,177	0,207	0,470	0,181	0,305	0,270	0,559	0,501	0,506	0,770	0,645
600	0,376	0,302	0,260	0,299	0,269	0,178	0,208	0,473	0,183	0,301	0,269	0,554	0,499	0,519	0,856	0,659
620	0,376	0,298	0,255	0,305	0,278	0,181	0,209	0,477	0,187	0,296	0,267	0,554	0,497	0,535	0,908	0,672
640	0,376	0,295	0,252	0,309	0,284	0,185	0,211	0,481	0,192	0,290	0,265	0,553	0,494	0,548	0,921	0,684
660	0,376	0,291	0,249	0,312	0,288	0,188	0,213	0,484	0,196	0,288	0,264	0,545	0,489	0,560	0,930	0,695
680	0,376	0,288	0,248	0,314	0,292	0,189	0,215	0,486	0,198	0,285	0,264	0,540	0,485	0,570	0,935	0,702
700	0,376	0,287	0,246	0,314	0,292	0,189	0,214	0,488	0,202	0,282	0,264	0,535	0,483	0,580	0,940	0,705

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	41,60	33,65	28,86	32,48	29,48	19,91	22,86	51,42	20,16	33,22	29,65	60,66	54,23	56,89	88,75	71,70
\bar{y}	38,18	31,54	27,13	28,79	26,05	18,11	20,72	46,35	18,06	30,90	27,40	55,13	49,49	50,47	72,23	63,78
\bar{z}	14,70	12,86	10,23	9,21	8,67	7,12	7,34	14,18	5,99	12,46	10,60	17,83	15,99	16,33	17,42	19,82

m	94,48	78,05	66,22	70,48	64,20	45,14	50,91	111,95	44,21	76,58	67,64	134,62	119,71	123,70	178,39	155,31
x	0,440	0,431	0,436	0,461	0,459	0,441	0,449	0,459	0,456	0,434	0,438	0,451	0,453	0,460	0,497	0,462
y	0,404	0,404	0,410	0,408	0,406	0,401	0,407	0,414	0,409	0,404	0,405	0,417	0,413	0,408	0,405	0,411
z	0,156	0,165	0,154	0,131	0,135	0,158	0,144	0,127	0,135	0,163	0,157	0,132	0,134	0,132	0,098	0,128
λ , нм	487	492	500	591	596	474	593	584	588	491	491	576	581	591	594	588
p , %	1,3	3,4	3,3	9,0	11,6	0,5	1,0	13,5	7,0	2,8	2,0	9,5	8,0	9,0	33,2	12,0

Источник В

\bar{x}	37,98	31,11	26,45	28,86	26,23	18,15	20,60	45,53	17,97	30,62	27,10	54,21	48,47	50,43	75,32	63,39
\bar{y}	38,39	31,99	27,44	28,43	25,76	18,20	20,69	45,98	17,94	31,25	27,62	56,20	49,34	49,96	68,91	63,07
\bar{z}	35,40	30,97	24,50	22,12	20,83	17,15	17,59	33,59	14,31	30,00	25,43	42,13	38,01	38,94	41,22	47,14
m	111,76	94,07	78,40	79,41	72,81	53,50	58,88	125,10	50,22	91,87	80,15	152,54	135,83	139,32	185,44	173,60
x	0,340	0,331	0,337	0,363	0,360	0,339	0,350	0,364	0,358	0,333	0,338	0,355	0,357	0,362	0,406	0,365
y	0,344	0,340	0,350	0,358	0,354	0,340	0,351	0,368	0,357	0,340	0,345	0,368	0,363	0,359	0,372	0,363
z	0,317	0,329	0,313	0,279	0,286	0,321	0,299	0,269	0,285	0,327	0,317	0,276	0,280	0,279	0,222	0,272

Источник С

\bar{x}	38,22	31,50	26,62	28,61	26,06	18,28	20,58	44,98	17,85	30,94	27,27	53,76	48,11	49,96	72,87	62,64
\bar{y}	38,48	32,16	27,55	28,28	25,65	18,24	20,68	45,81	17,89	31,93	27,71	56,19	49,26	49,76	67,67	62,78
\bar{z}	49,26	43,10	34,04	30,78	28,96	23,86	24,45	46,48	19,86	41,75	35,34	58,24	52,66	54,00	57,04	65,33
m	125,96	106,76	88,21	87,68	80,67	60,38	65,70	137,27	55,60	104,08	90,32	168,18	150,03	153,72	197,58	190,76
x	0,303	0,295	0,302	0,326	0,323	0,303	0,313	0,328	0,321	0,297	0,302	0,320	0,321	0,325	0,369	0,328
y	0,306	0,301	0,312	0,323	0,318	0,302	0,315	0,334	0,322	0,307	0,334	0,328	0,324	0,343	0,329	0,342
z	0,391	0,404	0,386	0,351	0,359	0,395	0,372	0,339	0,357	0,401	0,391	0,346	0,351	0,351	0,289	0,342
λ	465	477	484	590	603	440	496'	578	586	475	474	570	576	586	589	582
p , %	0,9	2,7	2,1	7,8	4,2	0,3	0,7	14,0	6,0	2,2	1,4	12,0	9,1	8,0	28,0	12,0

Продолжение прилож. 4

λ , нм	Мелонит			Менегинит			Мета-циннабарит		Миллерит			Молибденит			Монтбреййт			Моусонит			Мышьяк самородный		
	$R' p$	$R' g$	$R' p$	R	$R' g$	$R' p$	R_g	$R' p$	$R' g$	$R' p$	R_g	$R' p$	$R' g$	$R' p$	R_g	$R' p$	R_g	$R' p$	R_g	$R' p$			
420	0,548	0,452	0,364	0,269	0,244	0,317	0,519	0,245	0,576	0,480	0,177	0,188	0,592	0,538									
440	0,543	0,449	0,366	0,263	0,320	0,367	0,527	0,260	0,597	0,496	0,178	0,194	0,588	0,519									
460	0,540	0,446	0,365	0,258	0,389	0,409	0,541	0,268	0,617	0,512	0,184	0,200	0,585	0,504									
480	0,539	0,444	0,364	0,253	0,448	0,445	0,528	0,258	0,635	0,528	0,194	0,206	0,583	0,490									
500	0,544	0,443	0,365	0,250	0,494	0,470	0,505	0,244	0,650	0,542	0,210	0,213	0,582	0,482									
520	0,550	0,441	0,364	0,247	0,524	0,485	0,475	0,231	0,664	0,553	0,229	0,220	0,581	0,474									
540	0,562	0,439	0,362	0,245	0,548	0,498	0,453	0,221	0,674	0,564	0,249	0,227	0,580	0,467									
560	0,576	0,435	0,360	0,242	0,564	0,508	0,437	0,214	0,681	0,573	0,269	0,238	0,579	0,460									
580	0,592	0,429	0,356	0,241	0,580	0,517	0,429	0,208	0,688	0,578	0,288	0,251	0,577	0,456									
600	0,606	0,423	0,353	0,240	0,593	0,527	0,435	0,204	0,695	0,584	0,305	0,264	0,576	0,455									
620	0,620	0,418	0,350	0,240	0,603	0,538	0,449	0,202	0,703	0,590	0,319	0,276	0,577	0,454									
640	0,632	0,411	0,347	0,240	0,610	0,545	0,442	0,201	0,708	0,596	0,333	0,289	0,577	0,454									
660	0,641	0,406	0,343	0,239	0,616	0,550	0,443	0,199	0,712	0,601	0,344	0,299	0,577	0,452									
680	0,649	0,401	0,341	0,239	0,621	0,556	0,465	0,199	0,715	0,605	0,354	0,308	0,577	0,452									
700	0,652	0,397	0,339	0,239	0,626	0,561	0,450	0,199	0,718	0,611	0,362	0,316	0,577	0,453									

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	66,12	46,41	38,69	26,47	63,51	57,12	48,72	22,82	75,75	63,64	32,71	28,70	60,9	50,25
\bar{y}	58,54	42,95	35,65	24,24	56,70	51,17	44,69	21,34	68,32	57,32	27,77	24,74	51	46,08
\bar{z}	19,21	15,83	12,94	9,14	13,74	14,41	18,69	9,16	21,89	18,19	6,68	7,12	20,76	17,88

m	143,86	105,18	87,29	59,85	133,94	122,70	112,10	53,33	166,96	139,15	67,17	60,56	141,82	114,21
x	0,460	0,441	0,443	0,442	0,474	0,465	0,435	0,428	0,456	0,457	0,487	0,474	0,446	0,440
y	0,407	0,408	0,408	0,405	0,423	0,417	0,399	0,400	0,412	0,412	0,413	0,408	0,407	0,403
z	0,134	0,150	0,148	0,153	0,103	0,117	0,167	0,172	0,132	0,131	0,100	0,118	0,146	0,156
$\lambda, \text{ нм}$	593	497	498	488	584	584	482	489	584	586	590	592	490	484
$p, \%$	8,0	1,9	1,3	1,1	32,5	20,0	1,8	3,4	9,0	11,0	33,0	19,0	0,4	1,2

Источник В

\bar{x}	58,76	42,26	35,12	24,10	54,84	50,02	44,77	21,18	67,39	56,56	28,03	24,99	57,23	45,92
\bar{y}	57,89	43,20	35,80	24,34	55,74	50,57	45,17	21,69	67,90	56,91	26,85	24,18	57,84	46,34
\bar{z}	46,02	37,96	31,01	21,99	31,66	33,76	44,92	22,02	52,04	43,26	15,78	16,92	49,77	43,11
m	162,66	123,42	101,93	70,43	142,24	134,35	134,86	64,89	187,33	156,73	70,66	66,08	164,84	135,37
x	0,361	0,342	0,345	0,342	0,386	0,372	0,332	0,326	0,360	0,361	0,397	0,378	0,347	0,339
y	0,356	0,350	0,351	0,346	0,392	0,376	0,335	0,334	0,362	0,363	0,380	0,366	0,351	0,342
z	0,283	0,308	0,304	0,312	0,223	0,251	0,333	0,339	0,278	0,276	0,223	0,256	0,302	0,318

Источник С

\bar{x}	58,30	42,40	35,18	24,21	53,31	49,08	45,28	21,50	66,79	56,02	27,23	24,53	57,26	46,25
\bar{y}	57,64	43,29	35,85	24,38	55,31	50,31	45,39	21,84	67,71	56,74	26,48	23,96	57,87	46,45
\bar{z}	63,92	52,76	43,08	30,60	43,37	46,53	62,45	30,60	72,10	59,94	21,83	23,44	69,16	60,02
m	179,86	138,45	114,11	79,18	151,99	145,91	153,12	73,95	206,61	172,69	75,54	71,93	184,28	152,72
x	0,324	0,306	0,308	0,306	0,351	0,336	0,296	0,291	0,323	0,324	0,360	0,341	0,311	0,303
y	0,320	0,313	0,314	0,308	0,364	0,345	0,296	0,295	0,328	0,329	0,351	0,333	0,314	0,304
z	0,355	0,381	0,377	0,386	0,285	0,319	0,408	0,414	0,349	0,347	0,289	0,326	0,375	0,393
λ	595	480	476	445	575	576	465	475	580	578	583	586	520'	455
$p, \%$	5,8	1,0	0,4	0,2	33,5	22,0	1,5	3,0	9,5	10,2	30,0	16,5	0,3	0,6

λ , нм	Нагигит		Насту-ран		Науманнит		Никелин		Нис-бит		Овихинт		Оноф-рит		Парагуана-хуатит		Пент-лан-дит		Петцит		Пирар-гирип	
	$R'g$	$R'p$	R	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R	R	R	R	R_g		
420	0,452	0,400	0,157	0,390	0,443	0,385	0,602	0,439	0,417	0,285	0,450	0,296	0,298	0,428	0,366							
440	0,450	0,404	0,156	0,397	0,438	0,376	0,607	0,440	0,417	0,277	0,449	0,298	0,339	0,420	0,369							
460	0,446	0,407	0,155	0,400	0,440	0,372	0,612	0,440	0,415	0,270	0,450	0,301	0,375	0,412	0,365							
480	0,439	0,407	0,154	0,396	0,447	0,374	0,614	0,438	0,412	0,265	0,454	0,303	0,401	0,405	0,357							
500	0,430	0,402	0,152	0,390	0,462	0,388	0,617	0,436	0,409	0,260	0,461	0,312	0,424	0,401	0,343							
520	0,421	0,397	0,151	0,380	0,480	0,412	0,617	0,431	0,404	0,257	0,472	0,327	0,444	0,396	0,329							
540	0,412	0,390	0,151	0,368	0,500	0,440	0,617	0,426	0,398	0,254	0,480-	0,347	0,459	0,393	0,313							
560	0,402	0,383	0,150	0,359	0,521	0,470	0,618	0,420	0,392	0,252	0,487	0,371	0,471	0,390	0,300							
580	0,394	0,378	0,150	0,348	0,543	0,500	0,620	0,415	0,389	0,251	0,494	0,389	0,482	0,387	0,288							
600	0,388	0,375	0,150	0,342	0,563	0,526	0,621	0,410	0,386	0,250	0,498	0,399	0,492	0,386	0,280							
620	0,382	0,372	0,150	0,335	0,582	0,550	0,621	0,405	0,382	0,250	0,499	0,400	0,502	0,386	0,274							
640	0,378	0,371	0,150	0,333	0,600	0,571	0,621	0,398	0,378	0,250	0,499	0,398	0,510	0,387	0,270							
660	0,372	0,369	0,151	0,330	0,614	0,587	0,621	0,392	0,373	0,251	0,500	0,396	0,518	0,388	0,265							
680	0,366	0,367	0,152	0,328	0,625	0,599	0,621	0,384	0,366	0,251	0,500	0,390	0,525	0,390	0,262							
700	0,359	0,365	0,153	0,324	0,639	0,610	0,621	0,378	0,359	0,251	0,500	0,386	0,534	0,392	0,258							

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	42,83	41,30	16,48	37,89	61,12	56,76	67,90	44,99	42,34	27,60	54,07	42,33	53,24	42,58	31,32					
\bar{y}	39,88	38,17	15,03	35,50	53,30	48,48	61,83	41,67	39,09	25,23	48,76	37,15	47,45	38,95	29,68					
\bar{z}	15,71	14,35	5,49	14,03	15,78	13,41	21,61	15,55	14,68	9,59	16,05	10,72	13,20	14,62	12,80					

m	98,43	93,82	37,00	87,42	130,20	118,65	151,34	102,22	96,10	62,43	118,88	90,21	113,90	96,15	73,80					
x	0,435	0,440	0,445	0,433	0,469	0,487	0,449	0,440	0,441	0,442	0,455	0,469	0,467	0,443	0,424					
y	0,405	0,407	0,406	0,406	0,409	0,409	0,409	0,408	0,407	0,404	0,410	0,412	0,417	0,405	0,402					
z	0,160	0,153	0,148	0,160	0,121	0,113	0,143	0,152	0,153	0,154	0,135	0,119	0,116	0,152	0,173					
λ , нм	492	494	485	494	591	591	575	497	494	484	586	588	585	486	491					
$p, \%$	2,8	1,9	0,4	3,3	16,2	22,0	1,8	2,1	1,7	0,9	7,2	18,7	21,0	0,9	4,7					

Источник В

\bar{x}	39,35	37,63	14,93	34,85	53,58	49,27	61,15	41,02	38,59	25,14	48,31	37,18	46,55	38,72	29,23					
\bar{y}	40,31	38,44	15,05	35,95	52,29	47,13	61,81	41,96	39,33	25,33	48,47	36,44	46,79	39,09	30,27					
\bar{z}	37,78	34,38	13,17	33,64	37,64	32,03	51,69	37,29	35,22	23,11	38,36	25,57	30,99	35,16	30,82					
m	117,44	110,44	43,15	104,45	143,51	128,43	174,64	120,27	113,14	73,58	135,15	99,19	124,34	112,97	90,33					
x	0,335	0,341	0,346	0,334	0,373	0,384	0,350	0,340	0,341	0,342	0,357	0,375	0,374	0,343	0,324					
y	0,343	0,348	0,349	0,344	0,364	0,367	0,354	0,349	0,348	0,344	0,359	0,367	0,376	0,346	0,335					
z	0,322	0,311	0,305	0,322	0,262	0,249	0,296	0,310	0,311	0,314	0,284	0,258	0,249	0,311	0,341					

Источник С

\bar{x}	39,70	37,79	14,95	35,17	52,76	48,27	61,03	41,19	38,76	25,28	48,00	36,57	45,66	38,88	29,74					
\bar{y}	40,48	38,54	15,06	36,13	51,89	46,62	61,79	42,06	39,42	25,37	48,35	36,14	46,51	39,14	30,51					
\bar{z}	52,53	47,75	18,30	46,75	52,22	44,47	71,76	51,81	48,94	32,16	53,26	35,48	42,75	48,91	42,88					
m	132,72	124,08	48,32	118,05	156,87	139,36	194,58	135,07	127,13	82,81	149,61	108,20	134,91	126,94	103,14					
x	0,299	0,305	0,309	0,298	0,336	0,346	0,314	0,305	0,305	0,305	0,321	0,338	0,338	0,306	0,288					
y	0,305	0,311	0,312	0,306	0,331	0,335	0,318	0,311	0,310	0,306	0,323	0,334	0,345	0,308	0,296					
z	0,396	0,385	0,379	0,396	0,333	0,319	0,369	0,384	0,385	0,388	0,356	0,328	0,317	0,385	0,416					
λ	477	476	562	479	585	587	587	476	473	~440	584	584	577	445	478					
$p, \%$	2,0	1,0	0,2	2,5	14,0	19,0	2,1	1,0	0,9	0,1	6,5	16,0	22,0	0,2	4,0					

λ , нм	Pиар- гирит	Пирит	Пирротин		Пирсент		Плагионит		Полибазит		Прустит		Реальгар
	$R'p$	R	$R'g$	R_p	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	R_g	$R'p$	$R'g$
420	0,348	0,386	0,317	0,278	0,369	0,313	0,433	0,329	0,320	0,316	0,342	0,311	0,223
440	0,352	0,410	0,336	0,287	0,371	0,309	0,435	0,332	0,324	0,316	0,337	0,302	0,239
460	0,344	0,443	0,353	0,297	0,370	0,305	0,435	0,334	0,318	0,309	0,329	0,292	0,244
480	0,328	0,484	0,366	0,306	0,368	0,299	0,433	0,334	0,317	0,302	0,318	0,277	0,238
500	0,315	0,510	0,378	0,316	0,363	0,290	0,430	0,334	0,314	0,296	0,304	0,263	0,230
520	0,300	0,528	0,388	0,325	0,358	0,284	0,426	0,334	0,312	0,289	0,292	0,253	0,218
540	0,285	0,538	0,398	0,335	0,353	0,280	0,419	0,334	0,310	0,285	0,280	0,245	0,209
560	0,274	0,545	0,405	0,346	0,349	0,278	0,413	0,333	0,308	0,283	0,272	0,238	0,202
580	0,264	0,549	0,412	0,357	0,343	0,276	0,409	0,330	0,303	0,282	0,266	0,232	0,198
600	0,258	0,551	0,419	0,367	0,340	0,273	0,406	0,326	0,300	0,281	0,262	0,228	0,198
620	0,253	0,552	0,425	0,377	0,336	0,270	0,403	0,320	0,296	0,280	0,259	0,225	0,198
640	0,250	0,555	0,431	0,387	0,330	0,268	0,397	0,314	0,292	0,279	0,256	0,223	0,198
660	0,246	0,559	0,435	0,398	0,326	0,266	0,390	0,306	0,290	0,277	0,253	0,220	0,196
680	0,243	0,563	0,441	0,407	0,322	0,264	0,382	0,300	0,286	0,274	0,251	0,219	0,196
700	0,240	0,568	0,445	0,416	0,319	0,262	0,372	0,294	0,280	0,270	0,248	0,218	0,196

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	28,87	59,69	45,53	39,94	37,33	30,07	44,52	35,47	32,91	30,95	29,16	25,43	22,01
\bar{y}	27,20	54,23	40,78	35,19	34,58	27,68	41,13	32,80	30,40	28,35	27,16	23,67	20,40
\bar{z}	12,00	15,90	12,48	10,56	13,07	10,76	15,37	11,81	11,31	10,92	11,56	10,23	8,42

m	68,07	129,81	98,80	85,68	84,98	68,51	101,03	80,09	74,63	70,22	67,88	59,33	50,83
x	0,424	0,460	0,461	0,466	0,439	0,439	0,441	0,443	0,441	0,441	0,430	0,429	0,433
y	0,400	0,418	0,413	0,411	0,407	0,404	0,407	0,410	0,407	0,404	0,400	0,399	0,401
z	0,176	0,122	0,126	0,123	0,154	0,157	0,152	0,147	0,152	0,156	0,170	0,172	0,166
λ , нм	490	582	586	589	494	488	494	508	494	486	488	487	487
p , %	4,3	17,5	14,5	16,0	2,1	1,6	1,7	1,8	1,7	1,1	3,0	3,0	2,5

Источник В

\bar{x}	27,00	52,69	40,25	35,10	34,09	27,52	40,56	32,21	29,98	28,25	27,06	23,66	20,27
\bar{y}	27,73	53,86	40,38	34,66	34,83	27,86	41,39	32,95	30,58	28,49	27,56	24,01	20,65
\bar{z}	28,98	37,40	29,59	25,08	31,35	25,90	36,86	28,27	27,16	26,29	27,92	24,78	20,21
m	83,71	143,94	110,22	94,84	100,27	81,28	118,81	93,44	87,73	83,03	82,54	72,45	61,13
x	0,323	0,366	0,365	0,370	0,340	0,339	0,341	0,345	0,342	0,340	0,328	0,327	0,332
y	0,331	0,374	0,366	0,365	0,347	0,343	0,348	0,353	0,349	0,343	0,334	0,331	0,338
z	0,346	0,260	0,268	0,264	0,313	0,319	0,310	0,303	0,310	0,317	0,338	0,342	0,331

Источник С

\bar{x}	27,52	51,91	39,75	34,59	34,26	27,71	40,72	32,26	30,11	28,42	27,48	24,07	20,49
\bar{y}	27,95	53,68	40,22	34,45	34,93	27,94	41,49	33,00	30,65	28,55	27,72	24,16	20,76
\bar{z}	40,36	51,62	40,95	34,74	43,57	36,03	51,21	39,26	37,75	36,58	38,88	34,54	28,08
m	95,83	157,21	120,92	103,78	112,76	91,69	133,42	104,52	98,51	93,55	94,08	82,76	69,33
x	0,287	0,330	0,329	0,333	0,304	0,302	0,305	0,309	0,306	0,304	0,292	0,291	0,296
y	0,292	0,341	0,333	0,332	0,310	0,305	0,311	0,316	0,311	0,305	0,295	0,292	0,299
z	0,421	0,328	0,339	0,335	0,386	0,393	0,384	0,376	0,383	0,391	0,413	0,417	0,405
λ	476	574	579	583	476	467	476	490	470	450	474	470	472
p , %	3,7	18,0	14,0	14,0	1,2	1,0	1,0	0,5	0,7	0,4	2,7	2,5	2,0

Продолжение прилож. 4

λ , нм	Реальгар		Реньерит		Риккардит		Роке-зит		Саффлорит		Свинец		Селен металлический		Сера		Серебро		Сильванит	
	$R' p$	$R' g$	R_p	R_g	$R' p$	R	$R' g$	$R' p$	R	$R' g$	R_p	$R' g$	R_p	$R' g$	$R' p$	R	$R' g$	R	$R' g$	
420	0,220	0,183	0,187	0,365	0,267	0,247	0,528	0,559	0,567	0,389	0,288	0,144	0,105	0,798	0,522					
440	0,215	0,178	0,185	0,334	0,242	0,241	0,533	0,557	0,563	0,383	0,278	0,144	0,102	0,823	0,545					
460	0,208	0,177	0,180	0,304	0,217	0,236	0,537	0,552	0,568	0,373	0,269	0,144	0,102	0,843	0,566					
480	0,202	0,186	0,183	0,280	0,192	0,233	0,540	0,547	0,556	0,365	0,262	0,145	0,102	0,856	0,582					
500	0,197	0,207	0,193	0,262	0,168	0,229	0,542	0,539	0,553	0,358	0,257	0,147	0,103	0,869	0,591					
520	0,192	0,229	0,213	0,224	0,141	0,226	0,543	0,532	0,552	0,354	0,255	0,148	0,104	0,877	0,595					
540	0,188	0,255	0,235	0,203	0,120	0,223	0,543	0,526	0,552	0,355	0,259	0,148	0,105	0,882	0,598					
560	0,185	0,276	0,255	0,190	0,113	0,222	0,543	0,519	0,552	0,356	0,263	0,149	0,106	0,888	0,599					
580	0,182	0,295	0,275	0,182	0,128	0,220	0,543	0,512	0,554	0,356	0,268	0,148	0,106	0,894	0,600					
600	0,181	0,310	0,290	0,178	0,159	0,220	0,543	0,507	0,559	0,355	0,272	0,148	0,106	0,900	0,602					
620	0,181	0,325	0,303	0,181	0,219	0,221	0,545	0,502	0,565	0,354	0,277	0,148	0,106	0,904	0,605					
640	0,180	0,335	0,315	0,191	0,273	0,222	0,546	0,501	0,572	0,352	0,280	0,149	0,107	0,907	0,608					
660	0,178	0,344	0,323	0,218	0,344	0,222	0,548	0,501	0,580	0,347	0,280	0,149	0,108	0,909	0,609					
680	0,178	0,354	0,332	0,243	0,403	0,223	0,548	0,500	0,590	0,341	0,277	0,150	0,108	0,912	0,611					
700	0,178	0,356	0,338	0,274	0,449	0,225	0,548	0,500	0,602	0,333	0,270	0,150	0,109	0,914	0,612					

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	20,05	33,23	31,10	21,19	20,74	24,30	59,59	55,91	61,52	38,92	29,84	16,24	11,62	98,14	65,84
\bar{y}	18,46	28,25	26,30	19,63	15,52	22,19	54,29	51,58	55,61	35,48	26,63	14,81	10,55	88,97	59,92
\bar{z}	7,37	6,56	6,57	10,80	7,60	8,38	19,03	19,53	19,82	13,23	9,56	5,13	3,63	29,80	19,99

m	45,88	68,04	63,97	51,62	43,86	54,88	132,90	127,01	136,95	87,63	66,03	36,18	25,81	216,92	145,74
x	0,437	0,488	0,486	0,411	0,472	0,443	0,448	0,440	0,449	0,444	0,452	0,449	0,450	0,452	0,452
y	0,402	0,415	0,411	0,380	0,354	0,404	0,408	0,406	0,406	0,403	0,409	0,409	0,410	0,411	0,411
z	0,161	0,096	0,103	0,209	0,173	0,153	0,143	0,154	0,145	0,151	0,145	0,142	0,141	0,137	0,137
λ , нм	486	589	591	481	552'	480	580	492	700	482	515'	580	583	583	582
p , %	1,7	36,0	30,2	4,0	12,3	0,6	1,0	1,7	0,0	0,5	1,2	2,1	3,0	5,0	6,0

Источник В

\bar{x}	18,41	28,44	26,75	20,34	18,21	22,11	53,68	50,99	55,41	35,37	26,85	14,62	10,45	87,85	58,93
\bar{y}	18,61	27,28	25,40	20,19	14,94	22,27	54,28	51,91	55,52	35,55	26,48	14,80	10,53	88,68	59,80
\bar{z}	17,78	15,51	15,66	26,43	18,74	20,18	45,51	46,90	47,55	31,85	23,05	12,27	8,70	71,06	47,55
m	54,80	71,23	67,80	66,96	51,89	64,55	153,47	149,80	158,48	102,78	76,39	41,70	29,68	247,59	166,28
x	0,336	0,399	0,394	0,304	0,351	0,342	0,350	0,340	0,350	0,344	0,352	0,351	0,352	0,355	0,354
y	0,340	0,383	0,375	0,301	0,288	0,345	0,354	0,347	0,350	0,346	0,347	0,350	0,355	0,358	0,360
z	0,325	0,218	0,231	0,395	0,361	0,313	0,297	0,313	0,300	0,310	0,302	0,294	0,293	0,287	0,286

Источник С

\bar{x}	18,58	27,60	26,06	21,17	18,41	22,21	53,59	51,26	55,37	35,50	26,84	14,59	10,42	87,36	58,59
\bar{y}	18,67	26,89	25,04	20,45	14,81	22,30	54,27	52,04	55,49	35,58	26,43	14,80	10,52	88,56	59,74
\bar{z}	24,76	21,47	21,73	36,99	26,28	28,07	63,19	65,20	66,09	44,32	32,10	17,04	12,09	98,54	65,89
m	62,02	75,96	72,82	78,61	59,50	72,58	171,05	168,50	176,95	115,40	85,36	46,43	33,02	274,46	184,21
x	0,300	0,363	0,358	0,269	0,309	0,306	0,313	0,304	0,313	0,308	0,314	0,314	0,315	0,318	0,318
y	0,301	0,354	0,344	0,260	0,249	0,307	0,317	0,309	0,314	0,308	0,310	0,319	0,319	0,323	0,324
z	0,399	0,283	0,298	0,471	0,442	0,387	0,369	0,387	0,374	0,384	0,376	0,367	0,366	0,359	0,358
λ	463	582	585	468	552'	400	592	474	500'	563'	513'	581	583	580	578
p , %	1,1	32,0	26,5	4,5	7,5	0,0	1,2	1,0	0,8	0,3	1,4	2,5	2,8	5,6	6,2

λ , нм	Sильванит	Станнин	Станноидит		Стефанит		Сульванит	Сурьма самородная		Сфалерит-Fe	Сфалерит	Талнахит	Теллур
	$R' p$	R	$R' g$	$R' p$	$R' g$	$R' p$	R	R_g	$R' p$	R	R	R	$R' g$
420	0,402	0,223	0,208	0,178	0,324	0,308	0,260	0,732	0,700	0,196	0,174	0,139	0,656
440	0,427	0,238	0,217	0,182	0,337	0,312	0,238	0,744	0,713	0,190	0,171	0,179	0,660
460	0,449	0,250	0,226	0,189	0,340	0,311	0,226	0,756	0,724	0,186	0,169	0,224	0,660
480	0,465	0,260	0,236	0,198	0,336	0,303	0,260	0,762	0,730	0,183	0,167	0,268	0,661
500	0,480	0,266	0,245	0,204	0,328	0,294	0,308	0,762	0,730	0,180	0,166	0,306	0,663
520	0,489	0,270	0,249	0,209	0,321	0,285	0,304	0,760	0,727	0,177	0,163	0,334	0,663
540	0,497	0,275	0,253	0,214	0,313	0,277	0,282	0,754	0,720	0,175	0,161	0,358	0,665
560	0,500	0,277	0,259	0,220	0,306	0,272	0,270	0,749	0,713	0,173	0,160	0,375	0,663
580	0,504	0,279	0,263	0,230	0,302	0,269	0,291	0,743	0,705	0,171	0,159	0,390	0,659
600	0,509	0,279	0,267	0,240	0,298	0,268	0,298	0,741	0,700	0,170	0,158	0,401	0,655
620	0,513	0,277	0,273	0,254	0,296	0,268	0,312	0,740	0,695	0,170	0,157	0,408	0,650
640	0,520	0,276	0,280	0,269	0,294	0,270	0,298	0,738	0,690	0,169	0,156	0,414	0,645
660	0,523	0,276	0,286	0,281	0,293	0,272	0,282	0,736	0,683	0,169	0,155	0,417	0,640
680	0,527	0,277	0,294	0,296	0,292	0,274	0,272	0,736	0,677	0,169	0,155	0,419	0,635
700	0,533	0,277	0,301	0,309	0,291	0,276	0,265	0,736	0,672	0,170	0,155	0,420	0,629

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	55,46	30,23	29,26	26,47	32,98	29,77	32,02	81,35	76,76	18,80	17,34	42,60	71,66
\bar{y}	50,16	27,55	26,12	22,94	30,56	27,34	28,99	74,65	70,81	17,26	15,93	37,65	65,78
\bar{z}	15,86	8,83	8,05	6,76	11,88	10,87	8,80	26,69	25,56	6,61	5,99	8,05	23,41

m	121,49	66,61	63,43	56,18	75,43	67,98	69,81	182,69	173,12	42,67	39,27	88,31	160,85
x	0,457	0,454	0,461	0,471	0,437	0,436	0,459	0,445	0,443	0,441	0,442	0,482	0,446
y	0,413	0,414	0,412	0,408	0,405	0,402	0,415	0,409	0,409	0,405	0,406	0,426	0,409
z	0,131	0,133	0,127	0,120	0,158	0,160	0,126	0,146	0,148	0,155	0,153	0,091	0,146
λ , нм	584	581	586	592	492	485	583	512	503	489	491	584	535
p , %	10,0	9,3	13,0	17,0	2,2	1,5	15,0	1,1	1,6	1,2	1,2	40,7	1,2

Источник В

\bar{x}	49,28	26,97	25,84	23,09	30,18	27,25	28,28	73,55	69,58	17,15	15,79	36,41	64,84
\bar{y}	49,87	27,46	25,85	22,48	30,85	27,55	28,85	74,86	71,13	17,35	16,01	36,77	65,93
\bar{z}	37,61	20,94	19,10	16,05	28,50	26,16	20,79	63,79	61,09	15,90	14,40	18,39	56,06
m	136,77	75,37	70,80	61,63	89,53	80,97	77,92	212,21	201,81	50,41	46,20	91,57	186,82
x	0,360	0,358	0,365	0,375	0,337	0,337	0,363	0,347	0,345	0,340	0,342	0,398	0,347
y	0,365	0,364	0,365	0,365	0,345	0,340	0,370	0,353	0,352	0,344	0,347	0,402	0,353
z	0,275	0,278	0,270	0,260	0,318	0,323	0,267	0,301	0,303	0,315	0,312	0,201	0,300

Источник С

\bar{x}	48,79	26,74	25,53	22,70	30,39	27,48	27,89	73,56	69,66	17,26	15,86	35,16	64,84
\bar{y}	49,75	27,41	25,75	22,32	30,96	27,65	28,78	74,94	71,25	17,39	16,04	36,38	65,97
\bar{z}	52,06	28,99	26,44	22,23	39,59	36,39	28,78	88,54	84,80	22,13	20,02	25,12	77,85
m	150,60	83,14	77,71	67,25	100,94	91,52	85,45	237,04	225,71	56,78	51,93	96,67	208,67
x	0,324	0,322	0,329	0,338	0,301	0,300	0,326	0,310	0,309	0,304	0,305	0,364	0,311
y	0,330	0,330	0,331	0,332	0,307	0,302	0,337	0,316	0,316	0,306	0,309	0,376	0,316
z	0,346	0,349	0,340	0,331	0,392	0,398	0,337	0,374	0,376	0,390	0,386	0,260	0,373
λ	578	575	581	586	476	467	574	400	490	460	466	576	~620
p , %	11,0	10,2	12,5	15,0	1,7	1,3	15,0	0,0	0,5	0,5	0,8	41,0	0,2

λ , нм	Tеллур	Теллуровисмутит		Теннантит	Теннантит-Hg	Тетрагидрит	Тетрадимит		Тиманнит	Тиманнит-S	Тунгстенит		Ульманнит	Умангит
	R_p	$R'g$	$R'p$	R	R	R	$R'g$	R_p	R	R	R_g	$R'p$	R	$R'g$
420	0,567	0,622	0,595	0,293	0,299	0,310	0,571	0,487	0,338	0,311	0,407	0,170	0,490	0,218
440	0,573	0,627	0,600	0,295	0,298	0,311	0,579	0,490	0,344	0,310	0,422	0,183	0,492	0,206
460	0,576	0,633	0,604	0,297	0,296	0,311	0,587	0,494	0,338	0,303	0,429	0,193	0,491	0,196
480	0,577	0,638	0,605	0,297	0,296	0,312	0,595	0,499	0,327	0,295	0,423	0,195	0,487	0,187
500	0,579	0,642	0,606	0,296	0,299	0,316	0,600	0,506	0,318	0,287	0,412	0,193	0,480	0,179
520	0,580	0,646	0,604	0,296	0,303	0,317	0,606	0,514	0,309	0,280	0,399	0,191	0,474	0,173
540	0,580	0,648	0,602	0,294	0,307	0,317	0,607	0,519	0,303	0,275	0,390	0,191	0,465	0,166
560	0,579	0,649	0,603	0,291	0,309	0,316	0,607	0,520	0,297	0,270	0,381	0,190	0,458	0,160
580	0,576	0,651	0,606	0,288	0,306	0,313	0,606	0,522	0,292	0,267	0,373	0,190	0,452	0,156
600	0,573	0,655	0,610	0,285	0,303	0,310	0,605	0,522	0,289	0,265	0,375	0,190	0,449	0,154
620	0,569	0,661	0,617	0,281	0,295	0,306	0,604	0,522	0,287	0,264	0,389	0,190	0,450	0,155
640	0,563	0,670	0,625	0,280	0,287	0,303	0,602	0,521	0,285	0,262	0,391	0,189	0,452	0,158
660	0,560	0,676	0,633	0,279	0,281	0,300	0,601	0,521	0,285	0,261	0,391	0,189	0,455	0,162
680	0,554	0,682	0,641	0,277	0,276	0,298	0,601	0,522	0,284	0,260	0,402	0,189	0,458	0,167
700	0,545	0,689	0,647	0,276	0,271	0,296	0,601	0,524	0,284	0,259	0,403	0,189	0,463	0,173

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

x	62,65	71,97	67,15	31,25	32,75	33,89	66,14	56,99	32,03	29,31	42,14	20,79	49,80	17,44
y	57,49	65,18	60,75	28,85	30,23	31,24	60,45	51,88	29,60	27,00	38,49	19,01	45,78	16,11
z	20,39	22,44	21,37	10,49	10,54	11,06	20,82	17,56	11,85	10,68	14,94	6,69	17,32	6,95

m	140,54	159,60	149,27	70,59	73,53	76,19	147,42	126,42	73,49	67,00	95,57	46,50	112,90	40,50
x	0,446	0,451	0,450	0,443	0,445	0,445	0,449	0,451	0,436	0,448	0,441	0,447	0,441	0,431
y	0,409	0,408	0,407	0,409	0,411	0,410	0,410	0,410	0,403	0,403	0,403	0,409	0,406	0,398
z	0,145	0,141	0,143	0,149	0,143	0,145	0,141	0,139	0,161	0,159	0,156	0,144	0,153	0,172
λ , нм	535	588	593	503	545	525	578	582	488	487	483	565	492	485
p , %	1,2	3,0	1,5	1,6	2,2	1,7	3,1	4,5	2,1	1,7	0,9	1,4	1,5	2,5

Источник В

x	56,66	64,59	60,38	28,37	29,66	30,68	59,53	51,16	29,43	26,88	38,35	18,73	45,34	16,17
y	57,61	65,02	60,64	28,99	30,31	31,33	60,46	51,78	29,88	27,21	38,71	19,04	46,05	16,32
z	48,80	53,64	51,14	25,13	25,24	26,46	49,73	41,96	28,55	25,74	35,83	15,93	41,57	16,85
m	163,08	183,25	172,16	82,49	85,21	88,48	169,71	144,89	87,86	79,83	112,89	53,71	132,95	49,34
x	0,347	0,352	0,351	0,344	0,348	0,347	0,351	0,353	0,335	0,337	0,340	0,349	0,341	0,328
y	0,353	0,355	0,352	0,351	0,356	0,354	0,356	0,357	0,340	0,341	0,313	0,354	0,346	0,331
z	0,299	0,293	0,297	0,305	0,296	0,299	0,293	0,290	0,325	0,322	0,317	0,297	0,313	0,342

Источник С

x	56,64	64,37	60,26	28,43	29,64	30,68	59,36	50,95	29,72	27,11	38,55	18,70	45,55	16,44
y	57,65	64,96	60,61	29,04	30,32	31,36	60,44	51,72	30,00	27,30	38,82	19,05	46,15	16,41
z	67,77	74,46	71,02	34,90	35,07	36,74	69,00	58,23	39,73	35,83	49,78	22,08	57,77	23,50
m	182,06	203,79	191,89	92,37	95,02	98,79	188,80	160,91	99,44	90,23	127,15	59,83	149,47	56,36
x	0,311	0,316	0,314	0,308	0,312	0,311	0,314	0,317	0,299	0,300	0,303	0,312	0,305	0,292
y	0,317	0,319	0,316	0,314	0,319	0,317	0,320	0,321	0,302	0,303	0,305	0,318	0,309	0,291
z	0,372	0,365	0,370	0,378	0,369	0,372	0,365	0,362	0,400	0,397	0,391	0,369	0,386	0,417
λ	576	587	615	476	573	574	578	582	470	468	462	576	466	467
p , %	0,7	3,1	1,2	0,4	2,0	0,8	3,0	4,2	1,7	1,5	0,8	1,7	0,8	2,2

Продолжение прилож. 4

	Умангит	Уранинит	Ферроселит		Фрейбергит	Фробергит		Халькоzin	Халькопирит	Халькостибит		Халькоталлит
λ , нм	R_p	R	$R'g$	$R'p$	R	$R'g$	$R'p$	R'_g	R	$R'g$	$R'p$	R'_g
420	0,220	0,176	0,406	0,406	0,308	0,508	0,508	0,370	0,213	0,411	0,388	0,343
440	0,196	0,176	0,412	0,412	0,309	0,511	0,510	0,367	0,279	0,430	0,391	0,343
460	0,179	0,171	0,422	0,417	0,310	0,511	0,508	0,363	0,342	0,441	0,392	0,342
480	0,164	0,168	0,433	0,422	0,311	0,510	0,504	0,358	0,398	0,449	0,391	0,339
500	0,150	0,167	0,446	0,425	0,312	0,509	0,501	0,351	0,438	0,447	0,388	0,334
520	0,137	0,164	0,459	0,429	0,312	0,505	0,495	0,341	0,467	0,438	0,384	0,327
540	0,125	0,162	0,473	0,436	0,312	0,502	0,492	0,331	0,483	0,424	0,378	0,317
560	0,117	0,160	0,485	0,445	0,310	0,502	0,492	0,322	0,491	0,411	0,370	0,307
580	0,117	0,159	0,499	0,454	0,308	0,506	0,493	0,313	0,497	0,400	0,360	0,299
600	0,125	0,159	0,513	0,462	0,306	0,512	0,499	0,307	0,499	0,390	0,351	0,293
620	0,149	0,158	0,530	0,469	0,303	0,521	0,505	0,302	0,500	0,382	0,345	0,290
640	0,182	0,158	0,544	0,475	0,300	0,531	0,511	0,299	0,499	0,380	0,340	0,288
660	0,215	0,158	0,553	0,479	0,298	0,542	0,519	0,296	0,497	0,380	0,338	0,286
680	0,250	0,159	0,558	0,483	0,294	0,553	0,525	0,294	0,494	0,381	0,338	0,286
700	0,285	0,159	0,560	0,486	0,292	0,563	0,530	0,293	0,491	0,381	0,338	0,286

Цветовые характеристики для источников A, B и C

Источник А

x	15,88	17,48	55,97	50,33	33,46	56,51	54,95	34,08	53,48	43,22	38,83	32,58
y	13,32	16,03	49,40	44,95	30,78	59,91	49,68	31,87	48,68	40,65	36,35	30,47
z	6,34	6,08	15,05	14,79	11,00	18,09	17,96	12,82	12,07	15,52	13,85	12,06

m	35,54	39,60	120,42	110,07	75,24	125,52	122,60	78,77	114,23	99,39	89,02	75,12
x	0,447	0,442	0,465	0,457	0,445	0,450	0,448	0,433	0,468	0,435	0,436	0,434
y	0,375	0,405	0,410	0,408	0,409	0,406	0,405	0,405	0,426	0,409	0,408	0,406
z	0,178	0,154	0,125	0,134	0,146	0,144	0,147	0,163	0,106	0,156	0,156	0,161
$k, \text{ нм}$	571'	488	589	591	510	620	563'	492	582	497	496	493
$p, \%$	3,7	1,0	14,7	7,0	1,1	0,1	0,3	3,2	32,0	3,4	3,0	3,1

Источник В

x	14,40	15,93	49,29	44,81	30,30	50,80	49,56	31,42	46,48	39,58	35,57	29,96
y	13,24	16,11	48,70	44,58	30,87	50,79	49,63	32,29	48,15	41,17	36,74	30,86
z	15,53	14,63	35,80	35,33	26,33	43,36	43,09	30,82	27,77	37,05	33,19	28,97
m	43,17	46,67	133,80	124,73	87,51	144,95	142,28	94,53	122,40	117,80	105,50	89,78
x	0,334	0,341	0,368	0,359	0,346	0,350	0,348	0,332	0,380	0,336	0,337	0,334
y	0,307	0,345	0,364	0,357	0,353	0,350	0,349	0,342	0,393	0,350	0,348	0,344
z	0,360	0,314	0,268	0,283	0,301	0,299	0,303	0,326	0,227	0,315	0,315	0,323

Источник С

x	14,67	16,01	48,63	44,48	30,32	50,73	49,56	31,76	45,28	39,83	35,81	30,24
y	13,25	16,14	48,42	44,44	30,90	50,75	49,63	32,46	47,88	41,37	36,88	31,01
z	21,74	20,35	49,63	49,03	36,57	60,23	59,88	42,87	38,03	51,40	46,11	40,26
m	49,66	52,50	146,68	137,95	97,79	161,71	159,07	107,08	131,19	132,60	118,80	101,52
x	0,295	0,305	0,332	0,322	0,310	0,314	0,312	0,297	0,345	0,300	0,301	0,298
y	0,267	0,307	0,330	0,322	0,316	0,314	0,312	0,303	0,365	0,312	0,310	0,305
z	0,438	0,388	0,338	0,355	0,374	0,372	0,376	0,400	0,290	0,388	0,388	0,397
λ	563'	455	584	588	400	498'	520'	476	573	485	482	478
$p, \%$	2,2	0,4	13,0	6,0	0,0	1,0	0,8	2,3	32,5	2,9	2,2	2,3

λ , нм	Халькоталлит		Цинкенит		Швантит		Шеелит		Штернбергит		Штромейерит		Эмпектит		Энаргит		Эскеборнит	
	$R'p$	$R'g$	$R'p$	R	R	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	$R'g$	$R'p$	
420	0,296	0,455	0,398	0,321	0,098	0,297	0,188	0,356	0,294	0,379	0,358	0,304	0,258	0,249	0,192			
440	0,292	0,455	0,398	0,320	0,098	0,309	0,197	0,370	0,290	0,393	0,362	0,297	0,263	0,276	0,238			
460	0,284	0,454	0,397	0,318	0,098	0,322	0,207	0,361	0,283	0,405	0,366	0,292	0,264	0,292	0,256			
480	0,279	0,451	0,395	0,316	0,098	0,332	0,216	0,338	0,276	0,414	0,372	0,287	0,263	0,306	0,269			
500	0,277	0,448	0,392	0,314	0,098	0,342	0,226	0,319	0,269	0,421	0,378	0,285	0,261	0,318	0,280			
520	0,273	0,442	0,387	0,316	0,098	0,350	0,235	0,305	0,262	0,426	0,384	0,285	0,256	0,325	0,289			
540	0,272	0,433	0,381	0,321	0,098	0,356	0,243	0,295	0,257	0,429	0,387	0,284	0,251	0,330	0,300			
560	0,273	0,426	0,375	0,326	0,098	0,363	0,250	0,289	0,254	0,429	0,387	0,284	0,249	0,331	0,302			
580	0,275	0,419	0,370	0,330	0,098	0,368	0,255	0,283	0,251	0,426	0,386	0,285	0,252	0,332	0,306			
600	0,280	0,413	0,365	0,329	0,098	0,374	0,263	0,282	0,251	0,423	0,386	0,285	0,256	0,333	0,310			
620	0,280	0,406	0,360	0,323	0,098	0,378	0,269	0,280	0,251	0,418	0,385	0,285	0,262	0,336	0,314			
640	0,279	0,401	0,355	0,313	0,099	0,381	0,275	0,280	0,250	0,411	0,382	0,286	0,267	0,337	0,317			
660	0,270	0,395	0,351	0,304	0,099	0,382	0,279	0,280	0,250	0,404	0,380	0,288	0,269	0,343	0,323			
680	0,264	0,390	0,347	0,296	0,099	0,383	0,283	0,280	0,251	0,400	0,379	0,289	0,266	0,348	0,328			
700	0,260	0,383	0,340	0,288	0,099	0,383	0,286	0,280	0,253	0,399	0,379	0,291	0,270	0,348	0,328			

Цветовые характеристики для источников А, В и С

Источник А

\bar{x}	30,42	45,38	40,11	35,37	10,75	40,57	28,50	31,40	27,74	46,08	43,37	31,28	27,95	36,18	33,28
\bar{y}	27,52	42,19	37,20	32,28	9,80	36,46	25,26	28,95	25,43	42,11	39,40	28,44	25,34	32,93	30,00
\bar{z}	10,10	16,64	14,04	11,27	3,47	11,40	7,37	12,48	10,01	13,85	12,65	10,36	9,31	10,32	8,95

m	68,05	103,61	91,36	78,93	24,03	88,43	61,13	72,83	63,18	102,03	95,42	70,68	62,60	79,43	72,23
x	0,447	0,438	0,439	0,448	0,448	0,459	0,446	0,431	0,439	0,452	0,455	0,446	0,447	0,456	0,461
y	0,404	0,407	0,407	0,409	0,408	0,412	0,413	0,398	0,402	0,413	0,413	0,406	0,405	0,415	0,415
z	0,149	0,155	0,154	0,143	0,145	0,129	0,121	0,171	0,158	0,136	0,133	0,148	0,149	0,130	0,124
$\lambda, \text{ нм}$	573'	494	494	575	578	586	587	484	483	580	583	480	575'	582	584
$\lambda, \%$	0,2	2,4	2,1	1,8	1,0	11,0	17,5	2,3	1,2	12,2	9,2	0,2	0,1	11,5	16,0

Источник В

\bar{x}	27,53	41,49	36,63	31,95	9,70	35,98	25,01	29,12	25,39	41,27	38,71	28,31	25,24	32,16	29,36
\bar{y}	27,51	42,56	37,49	32,25	9,80	36,16	24,90	29,29	25,59	42,03	39,22	28,45	25,37	32,80	29,75
\bar{z}	24,31	38,49	33,69	27,03	8,32	27,08	17,45	30,20	24,13	32,95	30,09	24,90	22,30	24,39	21,09
m	79,36	122,54	107,81	91,24	27,82	99,22	67,36	88,60	75,10	116,26	108,01	81,67	72,91	89,34	80,20
x	0,347	0,339	0,340	0,350	0,349	0,363	0,371	0,329	0,338	0,355	0,358	0,347	0,346	0,360	0,366
y	0,347	0,347	0,348	0,353	0,352	0,364	0,370	0,331	0,341	0,372	0,363	0,348	0,348	0,367	0,371
z	0,306	0,314	0,313	0,296	0,299	0,273	0,259	0,341	0,321	0,283	0,279	0,305	0,306	0,273	0,263

Источник С

\bar{x}	27,57	41,74	36,82	31,90	9,70	35,59	24,61	29,57	25,59	41,01	38,38	28,36	25,27	31,82	28,94
\bar{y}	27,51	42,70	37,60	32,23	9,80	36,03	24,75	29,44	25,66	41,98	39,13	28,46	25,38	32,73	29,64
\bar{z}	33,83	53,48	46,82	37,56	11,56	37,50	24,14	42,07	33,58	45,67	41,69	34,64	39,98	33,72	29,11
m	88,90	137,92	121,23	101,70	31,06	109,13	73,50	101,09	84,83	128,66	119,20	91,45	81,63	98,28	87,69
x	0,310	0,303	0,304	0,314	0,312	0,326	0,335	0,293	0,302	0,319	0,322	0,310	0,324	0,330	
y	0,309	0,310	0,310	0,317	0,315	0,330	0,337	0,291	0,302	0,326	0,328	0,311	0,311	0,333	0,338
z	0,380	0,388	0,386	0,369	0,372	0,344	0,328	0,416	0,396	0,355	0,359	0,379	0,379	0,334	0,332
λ	550'	479	477	594	497'	580	580	465	455	576	578	552'	552'	575	576
$p, \%$	0,7	1,5	1,2	1,8	0,5	12,0	17,0	1,9	0,7	7,5	9,3	0,5	0,5	12,0	16,0

УКАЗАТЕЛЬ МИНЕРАЛОВ

Название минерала	Ячейка в табл.- вкладке	Стр.
Агвиларит	И-8	93, 106, 126, 144
Айкинит	Е-4	93, 107, 124, 144
Аканит	И-9	93, 106, 126, 144
Акташит	Л-6	93, 101, 127, 144
Алабандин	Н-12	93, 101, 129, 144
Адмаз	П-8	93, 112, 129, 144
Алтант	А-14	93, 106, 122, 144
Антимонит	Ж-2	93, 105, 106, 124, 132, 144
Аргиродит	Н-3	93, 113, 128, 144
Арсенопирит	Г-10	93, 108, 112, 123, 132, 144, 146
Арсеносульфанит	К-6	93, 107, 127, 146
Атабаскант	М-10	
Аурипигмент	М-7	93, 102, 128, 146
Ауростибит	Б-8	93, 110, 122, 146
Балканит	К-4	93, 104, 105, 126, 146
Бенжаминит ?	Е-1	
Берринит	Д-17	
Бертъерит	Ж-13	93, 103, 111, 125, 146
Берцелианит	М-16	93, 106, 128, 146
Бетехтинит	Л-15	93, 10, 112, 128, 146
Блеклые руды гр.	К-1, К-2	
Богдановичит	Г-13	
Борнит	Н-1	93, 110, 129, 146
Бравоит	Г-8	
Брейтгауптит	Г-7	111, 123, 148
Бриартит	М-2	
Буланжерит	Ж-10	93, 104, 105, 125, 148
Бурнонит	И-5	93, 103, 105, 126, 132, 148
Вакабаяшилит	Н-6	94, 102, 128, 146
Валлернит	О-7	94, 108, 111, 129, 148
Берлит	А-17	94, 110, 122, 148
Виоларит	З-11	94, 109, 126, 148
Висмут	А-12	94, 109, 110, 122, 150
Висмутин	Д-3	94, 101, 106, 124, 150
Витнейт	А-8	
Виттит	Г-9	
Виттихенит	И-7	
Вольфрамит гр.	О-12	99, 101
Волынскит	Г-12	94, 111, 123, 150
Брбант	К-16	
Вулканит	Е-8	94, 103, 107, 125, 150
Галенит	Ж-3	94, 101, 125, 132, 150
Галеноисмутит	Д-12	94, 102, 104, 124, 150
Галлит	Н-8	94, 104, 128, 150
Галхант	Н-7	94, 105, 128, 152
Гейкилит	Р-4	
Гематит	Л-10	94, 105, 106, 127, 133, 134, 152
Геокронит	Ж-8	94, 102, 103, 125, 152

Название минерала	Ячейка в табл.-вкладке	Стр.
Германит	Н-9	94, 111, 129, 152
Герсдорфит	Е-9	94, 112, 124, 152
Герцинит	Р-11	
Гессит	Ж-16	94, 110, 112, 125, 152
Гетероморфит	Ж-11	94, 105, 106, 125, 152
Гетчеллит	Л-9	94, 104, 105, 127, 152
Годлевският	Д-1	
Голдфильдит	К-7	
Графит	О-4	94, 109, 129, 152, 154
Грейгит	И-1	95, 109, 126, 154
Гринокит	О-11	95, 106, 129, 154
Гуанахуатит (см. парагуанахуатит)	Д-6	95
Гудмундит	В-14	95, 105, 111, 123, 154
Гутчинсонит	М-4	
Гюнерит	О-12	
Делафоссит	О-2	95, 109, 129, 154
Джезказганит	Л-13	95, 112, 128, 154
Джемсонит	Ж-5	95, 105, 125, 154
Джерфишерит	Н-5	95, 108, 129, 154
Дискразит	Б-6	
Догначкант	Е-2	95, 111, 112, 124, 154
Домейкит		
Железо	Д-8	
Жозеит А	В-3	95, 112, 122, 154
Жозеит Б	Г-3	95, 109, 123, 156
Звягинцевит	Б-7	95, 110, 122, 156
Зелигманнит	А-15	
Зигенит	И-11	95, 103, 105, 126, 156
Зиннерит	Д-16	
Золото	Л-7	95, 112, 127, 156
Золото медистое	А-4	95, 107, 110, 122, 156
	А-9	95, 122, 156
		95, 110, 112, 129, 156
Идаит	Л-11	
Ильвант	Р-9	95, 106, 130, 156
Ильменит	О-5	133
Индит	М-14	95, 104, 128, 156
Инсизвант	Б-12	
Норданит	З-10	95, 102, 104, 126, 156, 158
Ирасит	Д-15	
Калаверит	В-6	95, 108, 123, 158
Кан菲尔дит	Н-2	95, 101, 128, 158
Касситерит	Р-6	
Кестерит	М-15	96, 107, 128, 158
Киноварь	Л-12	96, 102, 104, 127, 158
Киткант	Б-13	
Клаусталит	Д-4	96, 103, 123, 158
Клинопирротин	Е-16	

Название минерала	Ячейка в табл.-вкладке	Стр.
Клокманнит	И-6	96, 106, 126, 158
Кобальтин	Г-11	96, 110, 111, 123, 124, 158
Кобеллит	Е-12	96, 103, 125, 158, 160
Ковеллин	О-8	96, 104, 106, 129, 133, 160
Козалит	Е-3	96, 101, 124, 160
Колорадоит	З-7	96, 110, 126, 160
Колумбит	П-10	
Колосит	Л-8	96, 108, 128, 160
Костовит	В-8	
Костибит	Е-10	
Котульскит	А-16	
Коутекит	Ж-12	
Коффинит	Р-10	96, 112, 130, 160
Креднерит	К-3	
Креннерит	Б-9	96, 108, 122, 160
Круесит	И-10	96, 111, 112, 126, 160
Крутайт	И-14	
Кубанит	З-2	96, 107, 108, 126, 160, 162
Куперит	З-6	
Куприт	М-12	96, 105, 128, 162
Купроаурид	см. табл.	
Купробисмутит	З-4	
Купростибит	Ж-1	96, 101, 113, 124, 162
Кутинант	Ж-14	
Кюстелит	А-5	96, 108, 122, 162
Лазаревичит	И-2	
Лангисит	Д-11	
Лаутит	К-11	96, 101, 127, 162
Лёллингит	Г-5	96, 102, 103, 108, 110, 123, 162
Ливингстонит	З-14	96, 104, 106, 126, 162
Лиллианит	Е-14	97, 102, 124, 162, 164
Линнеит	Д-7	
Лорандит	К-9	97, 104, 106, 127, 164
Люценит	Л-2	97, 110, 111, 128, 164
Магемит	О-10	97, 101, 129, 164
Магнезиоферрит	П-1	
Магнетит	О-6	97, 111, 129, 164
Магнетоплюмбит	Н-10	
Макинавит	Е-5	97, 108, 110, 124, 164
Макинстрит	К-17	97, 103, 127, 164
Марказит	В-15	97, 107, 123, 164
Матильдит	Е-15	
Маухерит	Г-15	97, 110, 124, 164
Майнерит	В-12	
Медь	А-6	97, 110, 122, 164
Мелонит	Б-4	97, 109, 111, 122, 164, 166
Менегинит	Ж-6	97, 104, 105, 125, 166
Мердоцит	П-4	
Метациннабарит	М-17	97, 101, 128, 166
Меренскиит	В-9	

Название минерала	Ячейка в табл.-вкладке	Стр.
Микролит	Р-7	
Миллерит	В-5	97, 107, 123, 166
Молибденит	Ж-7	97, 102, 103, 124, 166
Монтбрейт	А-13	97, 108, 122, 166
Монхеит	В-7	
Моусонит	Л-3	97, 109, 110, 128, 166
Мышьяк	В-10	97, 101, 112, 123, 166
Нагиагит	З-9	97, 104, 125, 168
Настурян	П-12	98, 113, 129, 168
Науманнит	И-4	98, 105, 126, 168
Нафиллит	Е-7	
Нигглиит	Б-10	
Никелин	Г-4	98, 109, 110, 123, 168
Нисбит	Б-11	98, 110, 122, 168
Овихиит	Ж-15	98, 103, 104, 125, 168
Окартил	Н-4	
Онофрит	М-13	98, 101, 128, 168
Остербошит	Д-2	
Парагуанахуатит	Д-6	98, 109, 124, 168
Парадокразит	А-11	
Паракостибит	Д-9	
Паркерит	Д-13	
Пентландит	В-17	98, 107, 124, 168
Пентландит-Со	В-17	
Перминжатит	М-11	
Петцит	З-8	98, 101, 126, 168
Пикополит	К-8	
Пираргирит	Л-16	98, 103, 105, 127, 168, 170
Пирит	В-16	98, 107, 123, 134, 170
Пиротин	Е-16	98, 108, 109, 125, 133, 170
Пирсент	И-13	98, 102, 104, 126, 170
Плагионит	Ж-17	98, 104, 106, 125, 170
Платтерит	П-9	
Плюмбопалладинит	В-11	
Полибазит	К-14	98, 101, 102, 127, 170
Полидимит	Д-14	
Полярит	Б-16	
Прустит	М-9	98, 103, 128, 170
Пьерротит	И-12	
Рагинит	З-13	
Раммельбергит	В-4	
Расвумит	Л-4	
Ратит	З-15	
Реальгар	О-9	98, 101, 103, 129, 170, 172
Ренъерит	К-15	98, 109, 128, 172
Риккардит	П-2	98, 102, 112, 129, 172
Рокезит	О-1	98, 101, 129, 172
Рутил	Н-11	

Название минерала	Ячейка в табл.-вкладке	Стр.
Сакурант	О-3	
Сауковит	Н-8	
Саффлорит	Г-6	98, 103, 111, 172
Свинец	В-13	99, 106, 111, 123, 172
Селен металл.	И-3	99, 112, 113, 126, 172
Сера	Р-3	99, 109, 129, 172
Серебро	А-3	99, 108, 122, 172
Сильванит	Б-17	99, 108, 123, 172, 174
Скуттерудит	Б-15	
Станнин	Л-14	99, 107, 128, 174
Станнондит	М-6	99, 108, 110, 128, 174
Стерринт	З-12	
Стефанит	Л-1	99, 102, 103, 127, 174
Стистант	А-7	
Сульванит	К-12	99, 107, 127, 174
Сурьма	А-10	99, 101, 106, 122, 174
Сфалерит (Fe 27,0%)	П-7	99, 101, 129, 174
Сфалерит (F 0,2%)	П-7	99, 102, 129, 174
Талнахит	З-3	99, 107, 126, 174
Тапиолит	П-3	
Теллур металл.	Б-5	99, 107, 111, 122, 174, 176
Теллуроисмутит	Б-3	99, 110, 111, 122, 176
Теннантит	К-2	99, 104, 127, 176
Теннантит — Hg	см. табл.	99, 107, 127, 176
Тетрадимит	Б-14	99, 108, 109, 122, 176
Тетраэдрит	К-2	99, 107, 127, 176
Тиллит	Д-5	
Тиманинит	Л-5	99, 102, 127, 128, 176
Тинтинант	Ж-9	
Тирреллит	Е-6	
«Титаномагнетит»	П-5	
Троилит	см. табл.	99, 101, 107, 126, 176
Тунгстенит	З-17	
Ульманит	Е-11	99, 102, 124, 176
Умангит	Р-2	99, 102, 113, 129, 134, 176, 178
Уоджинит	Р-1	
Ураннит	П-11	99, 101, 129, 178
Фаматинит	М-5	
Ферберит	О-12	99, 112, 129, 150
Ферроселит	Г-17	99, 109, 110, 124, 178
Фишессерит	К-5	
Франклинит	П-6	
Фрейбергит	К-1	100, 101, 127, 178
Фробергит	Г-16	100, 111, 112, 124, 178
Хакит	И-15	
Халькозин	К-10	100, 103, 127, 133, 178
Халькопирит	Д-10	100, 107, 124, 178

Название минерала	Ячейка в табл.- вкладке	Стр.
Халькостибит	З-5	100, 106, 125, 178
Халькоталлит	К-13	100, 105, 112, 127, 178, 180
Халькофанит	в табл. нет	133
Ходрушит	И-16	
Холингуортит	Г-14	
Хромит	Р-5	
Цинкенит	З-1	100, 104, 105, 125, 180
Шадлунит	М-3	
Швацит	К-1	100, 111, 127, 180
Шеелит	Р-8	100, 111, 130, 180
Ширмерит	Е-17	
Шпинель	Р-12	
Штернбергит	З-16	100, 108, 126, 180
Штромейерит	Л-17	100, 101, 102, 127
Эвкайрит	Е-13	
Эмплектит	Ж-4	100, 107, 108, 125, 180
Энаргит	М-1	100, 112, 128, 180
Эскеборнит	И-17	100, 107, 126, 180

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Г л а в а I. Основные понятия из учения о свете и цвете и способы выражения цвета	
1. Основные понятия фотометрии	5
Оптическое излучение	5
Основные фотометрические величины и единицы их измерения	8
Светотехнические величины	8
Энергетические величины	11
Соотношения между светотехническими и энергетическими величинами	12
Некоторые сведения о строении и физиологии глаза человека	15
2. Некоторые понятия колориметрии	18
Различие цветов	18
Понятия «цвет» и «цветность»	19
Число параметров, определяющих цвет	20
Основные колориметрические системы	22
Система параметров B , λ , p	22
Трехцветная система колориметрии R , G , B	22
Колориметрическая система X , Y , Z	25
Цветовые расчеты	27
Расчет цвета самосветящегося объекта	27
Расчет цвета несамосветящегося объекта	30
Оценка цветовых различий	33
Измерение цвета	34
Колориметры	34
Цветовые атласы	34
Г л а в а II. Цвет рудных минералов в отраженном свете	
1. Краткий обзор исследований по использованию фотометрических методов для количественной оценки цвета рудных (светопоглощающих) минералов	38
2. Приборы для измерения спектральных коэффициентов отражения минералов	40
Аппаратура отечественного производства	41
Поляризационные микроскопы	41
Источники света	44
Стабилизаторы напряжения ламп накаливания	44
Фотоэлектронные умножители	45
Стабилизаторы напряжения питания фотоэлектронных умножителей	46
Усилители фототока и регистрирующие приборы	47
Микроскопы-фотометры	48
Микроскопы-фотометры, выпускаемые за рубежом	51
Микроскопы-фотометры фирмы «Оптон»	51
Микроскопы-фотометры фирмы «Лейтц»	54
Микроскоп-фотометр фирмы «Рейхерт»	57

3. Методика измерения спектральных коэффициентов отражения минералов	60
Подготовка приборов к измерению	60
О степени монохроматичности света	60
Влияние апертуры применяемого объектива	61
«Паразитическая» освещенность	64
Фокусировка микроскопа при измерениях	65
Положение шлифа на столике микроскопа	66
О состоянии рабочей поверхности шлифа при измерениях	68
Регулировка оптических узлов микроскопа	69
Центрировка и выбор размера полевой и апертурной диафрагм осветителя	69
Настройка освещения	69
Ориентировка поляризатора и анализатора	70
Эталоны для измерения коэффициентов отражения	71
Процедура измерения отражения	72
О точности результатов измерения	79
4. Определение параметров цвета рудных минералов по спектральным коэффициентам отражения	79
Определение спектрального диапазона измерений R минералов, достаточного для расчета цвета	81
Приемы расчета цвета	81
Выбор источника «белого» света	82
Примеры расчета цвета минералов	83
Фактический материал, использованный при расчетах	88

**Г л а в а III. Использование результатов расчета
числовых цветовых величин для количественного выражения
и оценки цвета минералов**

1. Таблица-систематика «Главные диагностические свойства рудных минералов в отраженном свете»	89
2. Сопоставление данных расчета числовых цветовых величин с визуальной характеристикой цвета минералов	92
3. Использование числовых цветовых величин для диагностики минералов	121
Заключение	136
Список литературы	137
Приложение 1. Сокращенная таблица для расчета цвета с интервалом 10 нм	140
Приложение 2. Сокращенная таблица для расчета цвета с интервалом 20 нм	142
Приложение 3. Коэффициенты для расчета цвета относительно источника С (Piller, 1974)	143
Приложение 4. Характеристика цвета рудных минералов (фактический материал расчета цвета по спектральным коэффициентам отражения)	144
Указатель минералов	182
Цветная таблица-вкладка «Главные диагностические свойства рудных минералов в отраженном свете»	

ИБ № 988

Татьяна Никифоровна Чвилева,
Владимир Ефимович Клейнбок,
Марианна Сергеевна Безсмертная

ЦВЕТ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ
В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ

Редактор издательства Л. С. Цаплина
Обложка художника Ю. Е. Фомина
Технический редактор Л. Н. Шиманова
Корректор С. С. Борисова

Сдано в набор 4/III 1977 г.
Подписано в печать I/IX 1977 г. Т-12772
Формат 60×90^{1/16}.
Бумага № 1 + картографич.
Печ. л. 14,0 с вкл. Уч.-изд. л. 14,68
Тираж 3400 экз.
Заказ 243/6268—14 Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19
Ленинградская картографическая фабрика
объединения «Аэрогеология»

Уважаемый товарищ!
В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НЕДРА»
ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ НОВЫЕ КНИГИ

ИСАЕНКО М. П., БОРИШАНСКАЯ С. С., АФАНАСЬЕВА Е. Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. Учебное пособие. 20 л. 1 р. 84 к.

В основу учебного пособия положена одноименная работа авторов, изданная в 1972 г. В определителе изложены главнейшие методы диагностики рудных минералов в отраженном свете: по отражению, твердости, цвету, анизотропии, внутренним рефлексам, кристалломорфным особенностям, а также методы микрометрического и парагенетического анализа. Книга содержит определительные и справочные таблицы, в которых сведены данные о диагностических свойствах почти 300 рудных минералов. Таблицы обеспечивают микроскопическую диагностику практически всех наиболее распространенныхрудообразующих минералов.

Определитель предназначен в качестве учебного пособия по рудной микроскопии для студентов геологических вузов, а также будет полезен специалистам, занимающимся изучением руд и диагностикой рудных минералов.

РУДНЫЕ месторождения СССР. В 3-х томах. Том III. Под ред. акад. В. И. Смирнова. Изд. 2, перераб. и доп. (1 изд. — 1974). 44 л. 2 р. 86 к. Авт.: Смирнов В. И., Невский В. А., Щеглов А. Д. и др.

В третьем томе книги охарактеризованы месторождения редких металлов, а также рассеянных элементов. Порядок описания месторождений тот же, что и для первого и второго томов.

Трехтомник рассчитан на широкий круг геологов производственных и научных организаций, занимающихся изучением рудной базы страны, а также на студентов высших и средних геологических и горных учебных заведений.

РУДНЫЕ месторождения СССР. В 3-х томах. Том II. Под ред. акад. В. И. Смирнова. Изд. 2, перераб. и доп. (1 изд. — 1974). 35 л., 2 р. 39 к. Авт.: Смирнов В. И., Крутов Г. А., Горжевский Д. И. и др.

Во втором томе книги охарактеризованы месторождения никеля, кобальта, меди, свинца, цинка, висмута, сурьмы, ртути и урана. Порядок описания месторождения тот же, что и для первого тома.

Трехтомник рассчитан на широкий круг геологов производственных и научных организаций, занимающихся изучением рудной базы страны, а также на студентов высших и средних геологических и горных учебных заведений

РУДНЫЕ месторождения СССР. В 3-х томах. Том I. Под ред. акад.

В. И. Смирнова. Изд. 2 перераб. и доп. (1 изд. — 1974). 31 л. 2 р. 17 к. Авт.: Смирнов В. И., Соколов Г. А., Павлов Н. В. и др.

Книга «Рудные месторождения СССР» составлена группой квалифицированных специалистов страны в области геологии рудных полезных ископаемых. В первом томе содержится описание месторождений железа, марганца, хрома, титана, ванадия и алюминия. Каждому металлу посвящен отдельный раздел. В его вводной части приведены общие сведения о месторождениях данного металла, обоснована их группировка. В основной части раздела содержится описание выделенных групп месторождений, иллюстрированное специально подобранными геологическими планами и разрезами. В качестве типичных примеров выбраны наиболее представительные и важные объекты. По классическим месторождениям страны приведены новейшие данные. Описание новых типов месторождений целиком построено на оригинальных материалах.

Трехтомник рассчитан на широкий круг геологов производственных и научных организаций, занимающихся изучением рудной базы страны, а также на студентов высших и средних геологических и горных учебных заведений.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178. Ленинград, В. О. Средний проспект, 61.

№ 59 — 127412. Москва, Коровинское шоссе, 20.

Издательство «Недра»

1р. 70к.

2312

НЕДРА