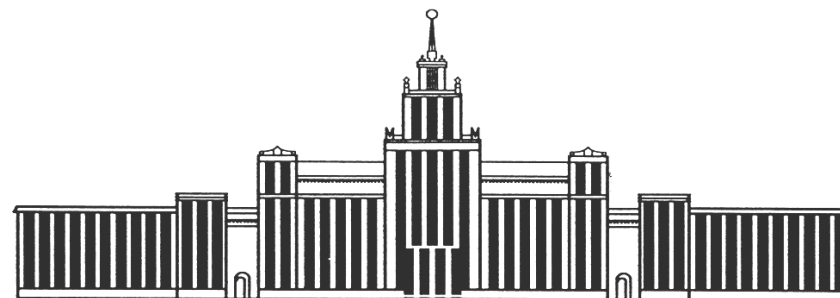

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

549.07
Б435

ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛОВ

Методические указания по выполнению
лабораторных работ

Челябинск
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Филиал в г. Миассе
Кафедра минералогии и геохимии

ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛОВ

Методические указания по выполнению
лабораторных работ

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2016

УДК 549.9(075.8)
Б435

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

*Рецензент:
Н.Р. Аюпова*

Б435 **Диагностика минералов:** методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. Е.В. Белогуб, Е.Е. Паленова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 24 с.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Минералогия» и рекомендуются для работы со студентами технических вузов, осуществляющих подготовку бакалавров по направлению «Геология». Содержат характеристику важнейших свойств минералов и описание трех лабораторных работ, которые необходимо выполнить студентам при освоении методов и подходов к диагностике минералов.

УДК 549.9(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Физические свойства минералов.....	4
1.1. Цвет минерала	
1.1.1. Физическая природа цвета.....	5
1.1.2. Типы окраски минералов.....	8
1.1.3. Прозрачность.....	9
1.1.4. Цвет черты минерала.....	9
1.2. Люминесценция минералов.....	10
1.3. Блеск минералов.....	13
1.4. Механические свойства минералов.....	14
1.5. Спайность и отдельность.....	15
1.6. Излом.....	16
1.7. Плотность.....	16
1.8. Прочие физические свойства минералов.....	17
Глава 2. Лабораторный практикум	
2.1. Лабораторная работа № 1 Изучение окраски и люминесцентных свойств минералов.....	19
2.2. Лабораторная работа № 2 Изучение механических свойств минералов.....	20
2.3. Лабораторная работа № 3 Диагностика минералов с помощью качественных химических реакций.....	21
Библиографический список.....	24

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ и практических занятий по дисциплине «Минералогия» в третьем семестре подготовки бакалавров по направлению «Геология». Целью лабораторных работ является знакомство с основными макроскопическими свойствами минералов, приемами и подходами к их определению, а также с возможностями применения простейших химических реакций для диагностики минералов. Эти навыки являются основополагающими и служат не только для успешного усвоения дисциплины «Минералогия», но и всех последующих курсов геологического цикла, в том числе прохождения учебных и производственных практик и написания выпускной квалификационной работы. Кроме того, они необходимы для работы выпускника по специальности.

Для диагностики минералов применяются различные способы. Современный уровень технологического развития позволяет использовать рентгеноструктурные, рентгенофлуоресцентные, спектроскопические методы для надежного определения минералов, но все они требуют специального, зачастую весьма дорогостоящего, оборудования. Поэтому методы визуальной диагностики с применением простейших доступных приспособлений и химических реактивов не потеряли актуальности.

Методические указания содержат раздел с детальной характеристикой важнейших физических свойств минералов (цвет, блеск, спайность, твердость и др.) и раздел с описанием лабораторных работ. Ввиду многообразия возможных качественных реакций, применяемых для диагностики, специального раздела, посвященного химическим свойствам минералов, в методических указаниях нет, однако, в описании соответствующей лабораторной работы помещены примеры простейших реакций, не требующих специального лабораторного оборудования. Более подробную информацию можно почерпнуть из справочной и учебной литературы.

Для освоения приемов макроскопической диагностики физических свойств минералов необходимо освоение курсов «Кристаллография» и «Химия».

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Физические свойства минералов полностью определяются их конституцией, т.е. совокупностью характеристик кристаллической структуры и химического состава. Эта зависимость на интуитивном уровне известна давно, а первые попытки вывести формулу функциональной зависимости между структурными и химическими параметрами минералов предпринимались еще в конце XIX века. Гладстон и Дейл в 1863 г. предложили эмпирическую формулу, связывающую плотность минерала и его показатели преломления: $(n - 1) / d = K$, где n – показатель преломления, d – плотность, а K – удельная преломляющая способность. Они также показали, что удельная преломляющая способность растворов определяется путем сложения удельных преломляющих способностей компонентов:

$[(n_1 - 1) / d_1] w_1 + [(n_2 - 1) / d_2] w_2 + \dots [(n_i - 1) / d_i] w_i = (n - 1) / d$, где w_1 и w_2 – доля компонентов в смеси, или $K_1 + K_2 + \dots + K_i = K$, где K_i – соответственно удельные преломляющие способности компонентов смеси.

Переход жидкости в твердое состояние весьма слабо влияет на удельную преломляющую способность вещества. Удельная преломляющая способность определялась опытным путем по стеклам соответствующего состава либо по кристаллам чистых соединений, и впоследствии неоднократно уточнялась. К настоящему времени определены удельные преломляющие способности ряда стандартных молекул, входящих в состав минералов, соответствующие величины приведены в статьях Дж. Мандарино [5, 6].

Для минералов отношение Гладстона-Дейла было преобразовано Ларсеном в 1921 г. следующим образом:

$$K = (n - 1) / d = K_1 \cdot p_1 / 100 + K_2 \cdot p_2 / 100 + \dots + K_n \cdot p_n / 100,$$

где n – показатель преломления; d – плотность; $K_1 \dots K_n$ – удельные преломляющие способности компонентов (оксидов для кислородных соединений); $p_1 \dots p_n$ вес. % компонентов; $n = (2 \cdot N_p + N_g) / 3$ для одноосных кристаллов $n = (N_p + N_m + N_g) / 3$ для двуосных.

Другое соотношение, предложенное Дж. Мандарино, связывает физические константы минерала с объемом элементарной ячейки и «массой» формулы минерала: $d \cdot V_0 = 1.66020 \cdot Z \cdot M$, где d плотность минерала, V_0 – объем элементарной ячейки, Z – число формульных единиц в элементарной ячейке, M – вес формулы.

Обычно между плотностью и показателем преломления существует практически прямая зависимость, которая нарушается вхождением в решетку атомов металлов, таких как железо, титан, марганец.

Вариации свойств в пределах минерального вида зависят от особенностей химического состава и степени совершенства (дефектности) структуры. Поэтому достаточно часто табличные значения не совпадают со значениями, полученными для конкретных минеральных индивидов.

1.1. Цвет минерала

1.1.1. Физическая природа цвета

Цвет – одно из самых легко определяемых свойств минералов. Восприятие цвета человеком субъективно и зависит от уровня освещенности, длительности воздействия источника света. Цвет также может зависеть от состояния измельченности объекта. Объективная и субъективная характеристика цвета могут отличаться. Наиболее объективными являются спектры оптического пропускания или отражения (рис. 1.1). Для того, чтобы уметь их «читать», необходимо вспомнить, что воспринимаемые человеческим глазом длины оптических волн лежат в диапазоне 770 (красный) – 400 (фиолетовый) нм, этим параметрам соответствуют величины энергии (в эВ) от 1.6 до 3.09. Спектр представляет собой кривую линию, отражающую соотношение интенсивностей прошедшего (отраженного) пучка света к падающему. Цвет, отражаемый минералом, может не совпадать с тем спектром, который он пропускает.

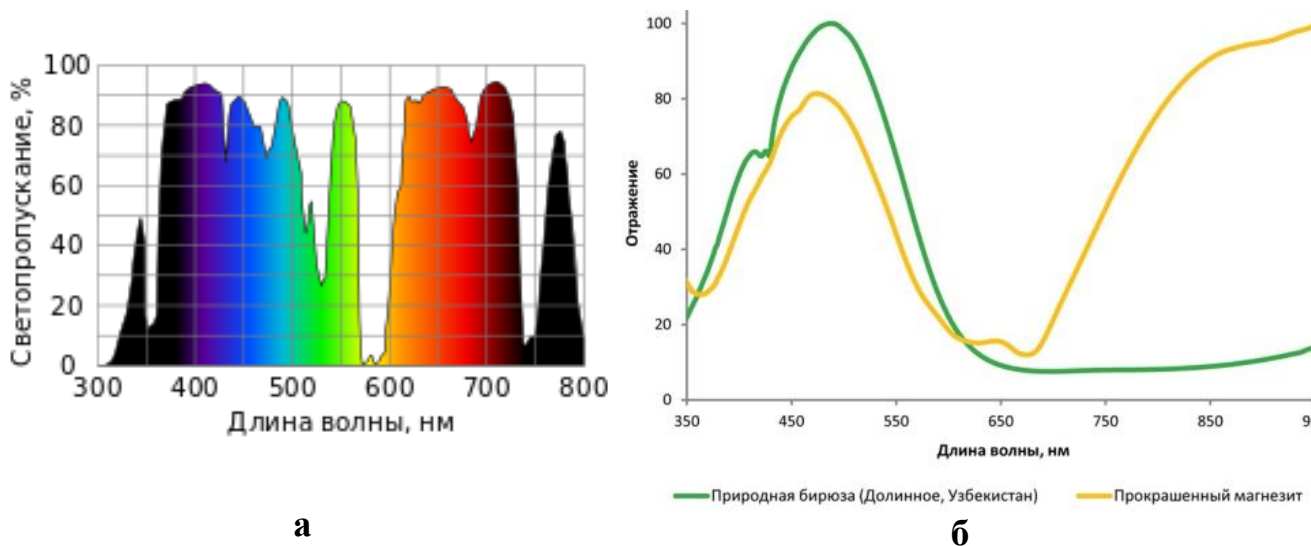
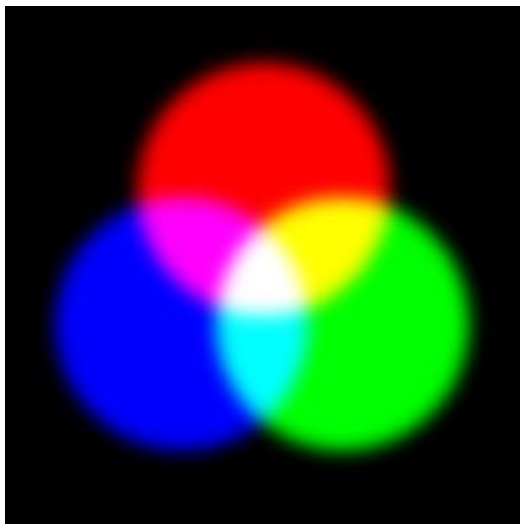


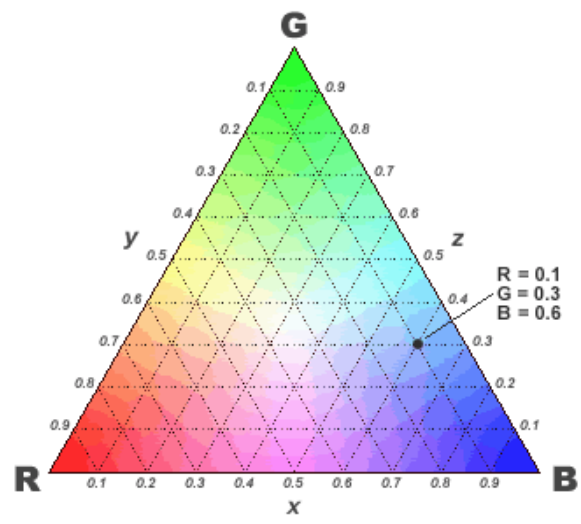
Рис. 1.1. Оптические спектры: а – спектр пропускания ниодимового стекла, б – спектр отражения природной бирюзы и ее имитации [15, 16]

Для объективизации характеристики окраски применяют таблицы цветности и цветовой треугольник Максвелла, которые можно сопоставить с разбивкой цвета на три составляющих. Это примерно соответствует rgb-формату, применяемому в современных компьютерах. Для построения цветowego треугольника необходимо измерить пропускание (отражение) минерала в трех основных монохроматических длинах волн (нм) – 650 (красная), 530 (зеленая) и 430 (синяя) (рис. 1.2).

Если суммировать интенсивность пропускания (отражения) для каждой из трех стандартных длин волн и привести к 100 %, то получатся цветные координаты, которые можно представить в виде треугольной диаграммы (см. рис. 1.2б). Путем аддитивного смешивания этих цветов можно получить любой цвет видимой части спектра, на чем и основывается цифровая цветопередача.



а



б

Рис. 1.2. Смешение стандартных цветов (rgb) (а) и треугольник Максвелла с RGB координатами цветности (б) [15, 16]

Измерение цвета можно проводить в разных, но обязательно трех основных монохроматических лучах. Данные, полученные для разных наборов монохроматического излучения, можно сопоставлять, пересчитывая координаты при помощи специальных уравнений.

Первоначально координаты цветности по измеренным величинам для разных длин волн задавались в объемных координатах XYZ (рис. 1.3 (1)). Международная комиссия по освещению решила ориентировать треугольник XYZ таким образом, что равные количества гипотетических основных цветов XYZ давали в сумме белый цвет. В центре треугольника находится опорный белый цвет – точка равных энергий с координатами $x = y = 0.33$.

Но работа с объемной фигурой затруднена, поэтому для удобства использования был разработан плоскостной аналог xYz . В нем введены нормированные к единице значения цветовых координат:

$$\begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z), \\ y &= Y / (X + Y + Z), \\ z &= Z / (X + Y + Z), \end{aligned}$$

где $x + y + z = 1$ (100%).

Итоговый треугольник представляет собой проекцию области, охватываемой спектральным диапазоном, на одну из плоскостей объемной системы координат. На рис. 1.3 показана область видимого спектрального диапазона стандартного наблюдателя (локус) и ее проекция на плоскость.

Треугольник содержит чистые спектральные цвета на самой кривой стороне и смешанные – в центральной части. Чем ближе к центру, тем ближе окраска к белому цвету. На цветовом треугольнике стандартный белый свет может быть представлен как треугольник с координатами rgb (см. рис. 1.2 б и 1.4 (2)) или как одна точка в декартовых координатах (см. рис. 1.3 (1)). На рис. 1.4 показаны координаты точек, соответствующих стандартным осветителям, применяемым в микроскопии, – вольфрамовым лампам накаливания (2850 К), галогеновым

лампам (3200 К) и др. Указанная в скобках «цветовая температура» соответствует температуре абсолютно черного тела, испускающего световое излучение соответствующего цветового тона.

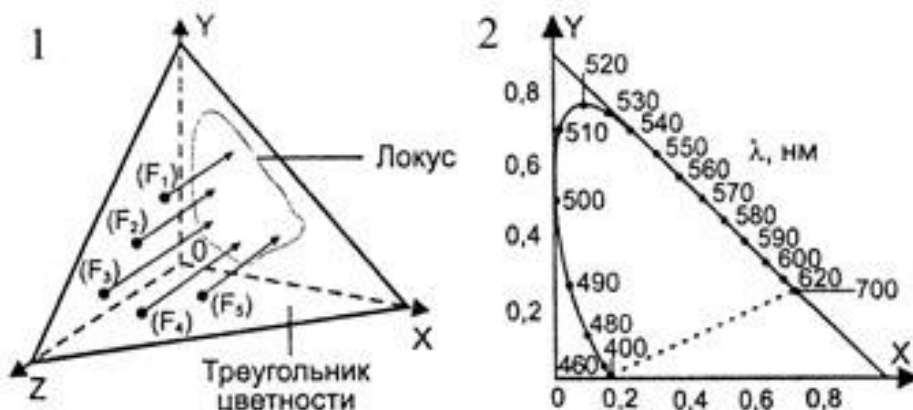
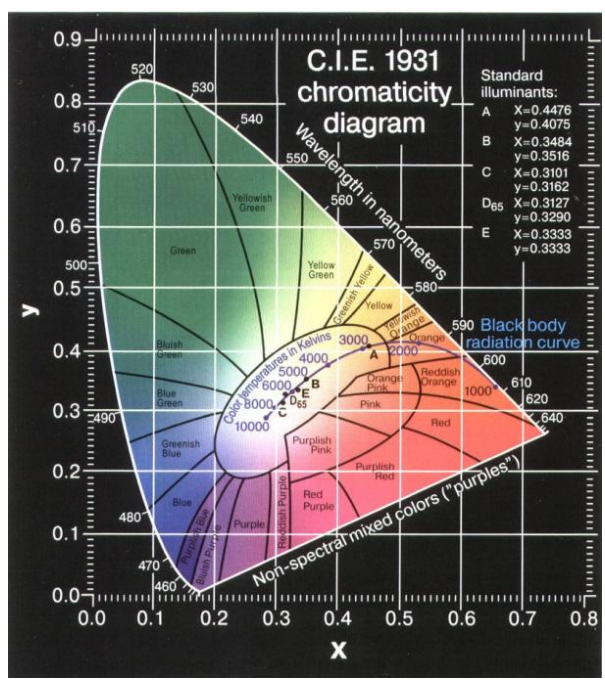


Рис. 1.3. Схема преобразования трехмерной цветовой системы XYZ в двухмерное нормированное цветовое пространство xy . F_n точки цветности и соответствующие проекции на плоскость [15, 16]

Пурпурная сторона треугольника – расчетно-гипотетическая и никаких реальных цветов ей не соответствует. Физически координаты x и y сопоставляются с «содержанием» красного и зеленого цвета. Положение точки на треугольнике позволяет формально и объективно оценить цвет минерала.



а



б

Рис. 1.4. Световой треугольник Максвелла. Треугольником показаны координаты стандартного белого цвета. Кривая в центре треугольника соответствует «цветовым» температурам стандартных световых источников (пояснения в тексте) [15, 16]

1.1.2. Типы окраски минералов

С позиций генетической минералогии окраска минералов разделяется на идиохроматическую (собственную), аллохроматическую (чужеродную) и псевдохроматическую.

Идиохроматическая, т.е. собственная, обусловлена фундаментальными свойствами химизма и структуры минерала: присутствием в структуре центров окраски: парамагнитных ионов, радиационных центров, примесных парамагнитных атомов или неорганических радикалов. Некоторые исследователи склонны цвета, связанные с примесными ионами, рассматривать как аллохроматические. Мы окраску, вызванную присутствием изоморфных примесей, относим к идиохроматической, а неструктурными – аллохроматической.

Причины возникновения окраски разнообразны. Для того чтобы минерал избирательно поглощал часть спектра, необходимо резонансное поглощение какой-то часть падающего излучения. Такое поглощение может происходить при перескоке электрона с различных подуровней своей орбиты под воздействием энергии падающего света. Возникновение подуровней, разница между которыми соответствует длине волны оптического излучения, характерно для т.н. ионов-хромофоров, размещенных в кристаллическом поле различной конфигурации (различных кристаллохимических полиэдрах). Для примера на рис. 1.5 показано расщепление электронов d-уровня в поле различной полиэдрической структуры. Такое же расщепление может происходить в так называемых электронно-дырочных центрах – дефектах структуры, которые характеризуются отсутствием атомного ядра – его место занимает электрон.

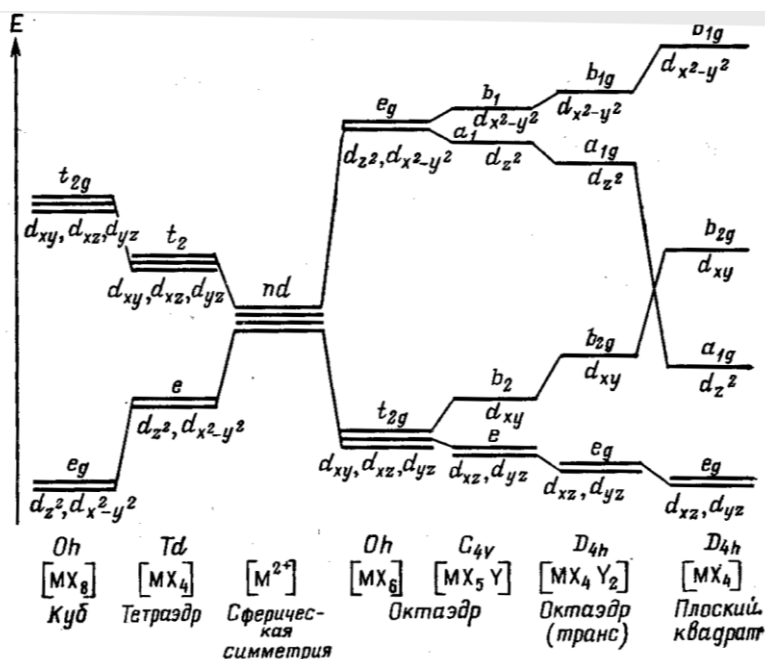


Рис. 1.5. Схема расщепления энергетических уровней d-электрона в кристаллических полях различной симметрии [15, 16]

Типичные ионы хромофоры – марганец (розовые, красные окраски), железо (зеленые и синие для двухвалентного и желтые, оранжевые, бурые – для трехвалентного), хром (розовый, изумрудно-зеленый), медь (синий, зеленый), титан (синий), ванадий (черный, красный, желтый) и некоторые другие.

Аллохроматическая окраска вызывается посторонними примесями: белая окраска молочно-кварца вызвана наличием в нем большого количества газовой-жидких включений, зеленоватая окраска празема обязана механическим включениям хлорита, кошачий глаз окрашен тончайшими иголочками амфибола.

Псевдохроматическая окраска вызывается эффектами, связанными с явлениями интерференции (иризация полевых шпатов), дифракции (эффект «звездчатости» в корундах) и рассеяния света (опалесценция). Это могут быть также поверхностные эффекты (побежалость на поверхности многих сульфидов, обусловленная тонкой пленкой вторичного минерала) или закономерное распределение в структуре минерала субмикроскопических примесей другого минерала – эффект «солнечности» в полевых шпатах.

Цвет следует наблюдать на свежем сколе или на поверхности неизмененного кристалла.

1.1.3. Прозрачность

Прозрачность – способность минерала пропускать свет, зависит от типа (типов) связи в минерале и наличии посторонних включений. Прозрачность выше у кислородных соединений, отсутствует (практически всегда) у сульфидов, самородных элементов (исключая алмаз и серу). Многие минералы, непрозрачные в массе, бывают прозрачными в тонких сколах.

Для оптических свойств минералов характерны полярность и анизотропия в соответствующих группах симметрии. Окраска может распределяться зонально и секториально, быть неоднородной.

1.1.4. Цвет черты минерала

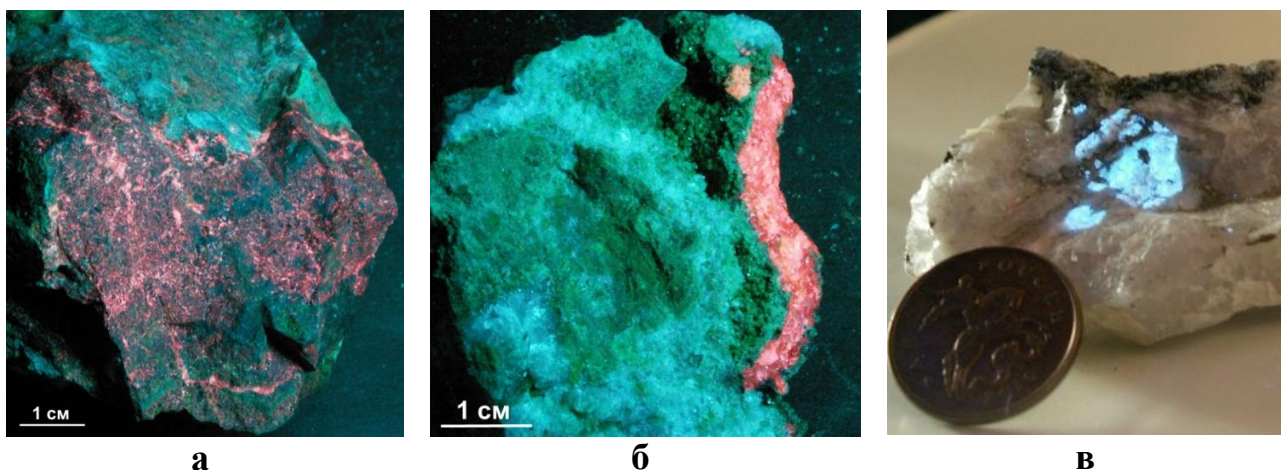
Цвет порошка (цвет черты) – цвет тонко измельченного минерала, или его черты на белой поверхности, например, на поверхности скола фарфора, может отличаться от цвета его агрегатов или кристаллов. В основном это характерно для густоокрашенных минералов и минералов с высокой отражательной способностью. Пример – черта гематита (черного минерала) имеет вишневый оттенок, эта особенность минерала лежит в основе его названия: гема – кровь; пирит и халькопирит имеют черную черту с желтыми, зелеными тонами, большинство окрашенных силикатов имеют белую черту.

1.2. Люминесценция минералов

Некоторые минералы обладают свойством светиться при воздействии ультрафиолетового, инфракрасного (теплого), рентгеновского излучения, а также при ударе. **Люминесценция** (от латинского *lumen* – свет и *-escent* – суффикс, означающий слабое действие) – нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения. Впервые люминесценция была описана в XVIII веке. Физическая природа люминесценции состоит в переходах электронов атомов или молекул из возбуждённого состояния в основное с излучением энергии. При этом причиной первоначального их возбуждения могут служить различные факторы: внешнее излучение, температура, химические реакции и др. Первоначально понятие люминесценция относилось только к видимому свету. В настоящее время оно применяется к излучению в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Люминесцентное свечение тел принято делить на следующие виды:

- *Фотолюминесценция* – свечение под действием света (видимый диапазон: длина волны $\lambda = 780\text{--}380$ нм; ультрафиолетовое излучение: $\lambda = 380\text{--}10$ нм; рентгеновское излучение: $\lambda < 10$ нм). Она, в свою очередь, делится на *флуоресценцию* (время жизни $10^{-9}\text{--}10^{-6}$ с) и *фосфоресценцию* ($10^{-3}\text{--}10$ с). Примеры люминесценции на рис. 1.6.
- *Хемилюминесценция* – свечение, использующее энергию химических реакций.
- *Катодолюминесценция* – вызвана облучением быстрыми электронами (катодными лучами). На практике применяются пучки электронов с энергией от 100 эВ до 25 кэВ (рис. 1.7).
- *Сонолюминесценция* – люминесценция, вызванная звуком высокой частоты.
- *Триболлюминесценция* – люминесценция, возникающая при растирании, раздавливании или раскалывании люминофоров. Триболлюминесценция вызывается электрическими разрядами, происходящими между образовавшимися наэлектризованными частями – свет разряда вызывает фотолюминесценцию люминофора.
- *Биолюминесценция* – способность живых организмов светиться, достигаемая самостоятельно или с помощью симбионтов.
- *Электролюминесценция* – возникает при пропускании электрического тока через определенные типы люминофоров.
- *Термолюминесценция* – люминесцентное свечение, возникающее в процессе нагревания вещества. В научной литературе часто используется термин *термостимулированная люминесценция*, сокращенно ТСЛ, что одно и то же.



а

б

в

Рис. 1.6. Люминесценция марганцовистого смитсонита (а, б) и шеелита (в) в ультрафиолетовом излучении

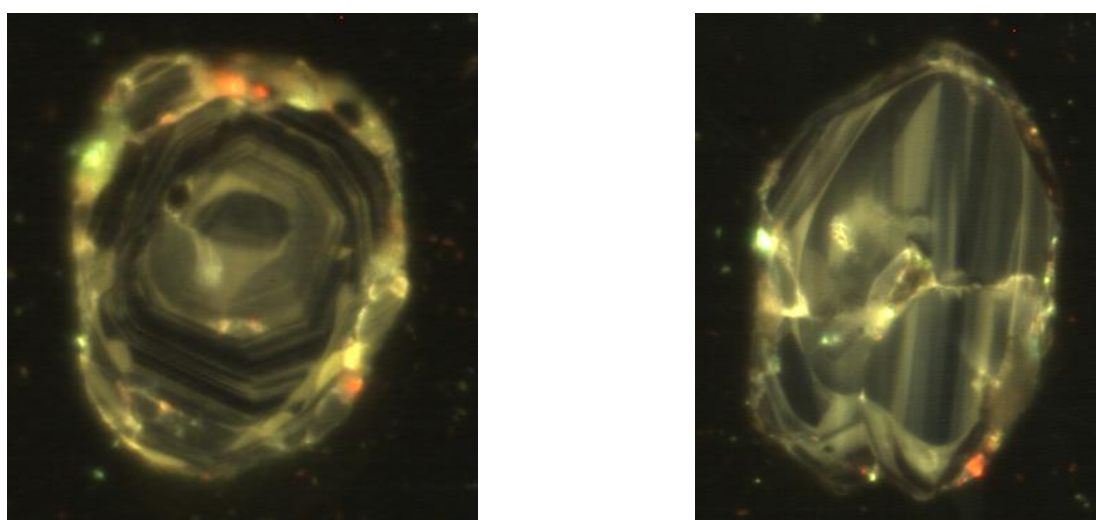


Рис. 1.7. Катодолюминесценция циркона

Излучение света люминесценции осуществляется центром люминесценции (центром свечения, активатором люминесценции), в качестве которых в минералах обычно выступают примесные (реже собственные) ионы, атомы, молекулы, радикалы, иногда вакансии и другие дефекты структуры минерала. Центры свечения, получая энергию возбуждения, оказываются в возбужденном (неравновесном) состоянии. Их стремление перейти в невозбужденное (равновесное) состояние с минимальной энергией вызывает квантовый переход электрона с излучательного уровня энергии центра свечения на нижележащий с минимальной энергией уровень основного состояния центра. Этот переход сопровождается излучением световых квантов $h\nu$ с энергией, определяемой разностью энергий уровней возбужденного излучательного (E_1) и основного (E_0) состояний центра свечения, то есть $h\nu = E_1 - E_0$.

Цвет люминесценции зависит с одной стороны от центра люминесценции, а с другой – от координационного числа люминесцирующих катионов и длины связей с соседними ионами. Например, катион Mn^{2+} может, в зависимости от

координационного числа, проявлять то зеленую (КЧ = 4), то красную (КЧ = 6) люминесценцию. На цвет люминесценции иттрия, лантаноидов, катионов Cr^{3+} или Mn^{4+} локальная кристаллическая структура не оказывает существенного влияния. У некоторых минералов центрами люминесценции служат не отдельные ионы, а комплексные анионные радикалы (например, у вольфраматов, титанатов, ниобатов, ванадатов).

Наиболее интенсивно люминесцируют минералы, которые содержат ионы-сенситизаторы, поглощающие (запасающие) энергию и передающие ее через кристаллическую решетку к ионам-активаторам (центрам люминесценции), излучающим фотоны. Наоборот, люминесценция минералов гасится в присутствии катионов Fe^{2+} или Ni^{2+} (в повышенных концентрациях).

Люминесценцией обладает целый ряд минералов (табл. 1).

Таблица 1

Люминесцирующие минералы
(данные из [3, 4, 15, 16])

Минерал	Люминесценция		
	УФ излучение	Катодное излучение	Рентгеновское излучение
Алмаз	Зеленый, голубой, фиолетовый	Голубой, зеленый	Голубой
Апатит	Розовый, фиолетовый, красный	Желтый, бледно-зеленый, рябиновый, сиреневый	Желтый, голубой, зеленый
Арагонит	Белый, зеленый, желтый, красный, оранжевый	–	–
Астрофиллит	Пурпурный	–	–
Барит	Фиолетовый, розовый, желтый	Фиолетовый	Зеленый
Берилл	Фиолетовый	Голубой	Желтый
Виллемит	Зеленый	–	–
Галит	Оранжевый	–	–
Гипс	Голубой	–	–
Датолит	Синий	–	–
Кальцит	Фиолетовый, красный, желтый	Красный	Красный
Кварц	–	Синий, розовый, фиолетовый	–
Кианит	Красный	Малиново-красный	–
Корунд	Малиново-красный	Красный, голубой	–

Минерал	Люминесценция		
	УФ излучение	Катодное излучение	Рентгеновское излучение
Молибденит	–	Зеленоватый	–
Полевые шпаты	Различные цвета	Различные цвета	–
Сфалерит	Желтый, оранжевый	–	
Сфен	–	Голубоватый	–
Топаз	Зеленовато-голубой	Синий, голубой	–
Турмалин	–	Красный	–
Урановые слюдки	Яркий желтый, яркий зеленый	–	–
Флюорит	Фиолетовый	Фиолетовый, зеленый	Зеленый
Циркон	Желтый	Желтый	Зеленый, желтый
Шеелит	Голубой	Голубой	Голубой
Шпинель	Красный, зеленый, голубой	–	–

Фосфоресценцией обладают очень немногие минералы, в их числе сфалерит ZnS, активированный ионами других тяжелых металлов: Bi, Ag, Cu, Pb, Cd и др.; он светится также под воздействием гамма- и УФ-излучения. Тот же сфалерит проявляет и триболоминесценцию, а кальцит, флюорит и ряд других минералов — термолюминесценцию.

Свойство люминесценции используется при количественном минералогическом анализе шлихов, а также экспрессной диагностике рудных минералов (например, шеелита) при полевой документации керна скважин и горных выработок. Наиболее широко применяют ультрафиолетовые лампы с излучением в двух стандартных диапазонах: 254 нм («коротковолновый ультрафиолет», КВ УФ) и 366 нм («длинноволновый ультрафиолет», ДВ УФ). В некоторые лампы встроено одновременно два разных светофильтра. Такая стандартизация дает возможность применять лампы различных производителей и получать сопоставимые результаты, что особенно важно при использовании литературных источников.

1.3. Блеск минералов

Блеск – важнейшее и традиционное свойство, используемое для полевой диагностики. Блеск зависит от отражательной способности минерала и его показателя преломления, обычно прозрачные минералы блестят меньше, а непрозрачные – больше.

Показатель преломления соответствует отношению скорости света в вакууме к скорости света в веществе или отношению синусов падающего луча к преломленному, угол отсчитывается от перпендикуляра.

Связь показателя преломления и отражательной способности вычисляется

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

по формуле (1) для прозрачных минералов и по формуле (2) для непрозрачных, где K – показатель поглощения.

Выделяется металлический блеск, свойственный большинству сульфидов, самородным металлам, интерметаллидам. Полуметаллический – несколько более слабый, свойственен некоторым сульфидам и оксидам – киновари, марматиту, гематиту. Алмазным блеском характеризуются минералы с высоким двупреломлением – алмаз, циркон, клейофан, касситерит. Стекланный характерен для большинства прозрачных минералов – силикатов, сульфатов, карбонатов и пр.: кварц, берилл, кальцит и т.д (табл. 2). Следует разделять блеск, свойственный минералам в свежих плоских сколах по поверхностям спайности или на гранях кристаллов, блеск на поверхности излома, который может быть жирным (кварц) или смолистым (непрозрачные минералы). Выделяется блеск минеральных агрегатов – восковой или матовый. Минералы могут также иметь отлив – перламутровый, шелковистый, обусловленный строением минеральных агрегатов или весьма совершенной спайностью.

Таблица 2

Соотношение показателей преломления и отражения, соответствующие различным категориям блеска

Блеск	n	$R, \%$	Примеры
Стекланный	1.3–1.9	2–10	Кварц, силикаты
Алмазный	1.9–2.5	10–19	Циркон, алмаз
Полуметаллический	2.5–3.0	19–25	Ильменит, магнетит
Металлический	>3	>25	Пирит, золото

1.4. Механические свойства минералов

Твердость – способность минералов сопротивляться внешнему давлению, при полевом изучении – способность одних минералов царапать поверхность других. Это неотъемлемое свойство минералов, которое может варьировать в пределах одного минерального вида. Твердость зависит от сил связи между атомами в структуре и ее совершенства. Удобная шкала для определения твердости была предложена немецким минералогом Ф. Моосом. В качестве эталонов твердости были выбраны десять минералов: тальк (1), гипс (2), кальцит (3), флюорит (4), апатит (5), ортоклаз (6), кварц (7), топаз (8), корунд (9), алмаз (10). В полевых условиях можно пользоваться в качестве эталонов некоторыми бытовыми предметами: ноготь имеет твердость 2–2.5, медь – 3,

обычный перочинный нож – 5–6, оконное стекло – 5. Твердость определяется царапаньем одного минерала о другой. Различают пассивные и активные к царапанью вещества: активные способны царапать самих себя, а пассивные – нет. Минералы с более высокой твердостью и имеющие спайность обычно сами себя царапают.

Объективно твердость измеряется по величине отпечатка груза определенной массы, воздействующего на минерал в заданных условиях. Для этого сконструировано несколько приборов. Один из них: на базе микроскопа измеряется диаметр алмазной пирамидки, которая вдавливается под нагрузкой в кристаллическую грань или в полированную поверхность. При этом измеряется диагональ алмазной пирамидки. Это – твердость по Виккерсу. Для сравнения приведу величины твердости по Виккерсу минералов шкалы Мооса: тальк (2.4), гипс (36), кальцит (109), флюорит (189), апатит (536), ортоклаз (795), кварц (1120), топаз (1427), корунд (2060), алмаз (10060).

Хрупкость и ковкость. Хрупкость – способность минералов легко раскалываться при механических воздействиях, обычно минералы с хорошей спайностью в нескольких направлениях – хрупкие. Ковкость – свойство противоположное хрупкости, ковкие минералы расплющиваются при надавливании, к таким минералам относятся многие самородные металлы, некоторые сульфиды. Для минералов со спайностью в одном направлении иногда характерна пластичность. Например, чешуйки хлорита пластичные, а биотита – хрупкие. Хрупкость минерала с объективной точки зрения – минимальная нагрузка, при которой появляются трещины. Именно эта величина называется числом хрупкости. Хрупкость связана с твердостью, но не напрямую. Например, присутствие спайности увеличивает хрупкость, в то время как ее отсутствие может сделать мягкий минерал не хрупким, но даже ковким.

1.5. Спайность и отдельность

Спайность – способность минерала при ударе раскалываться по определенным направлениям, спайность показывает те направления в структуре, перпендикулярно которым сила химической связи значительно меньше, чем параллельно. В зависимости от степени выраженности спайность имеет градации. Весьма совершенная – минерал невозможно расколоть в направлении, не соответствующем спайному, поверхность блестящая, без неровностей, наблюдается у слюд. Совершенная – очень трудно получить при раскалывании не соответствующие спайности направления, но поверхность более неровная, наблюдается у галенита, флюорита, минералов группы полевых шпатов, барита, излом в произвольном направлении при этом всегда отчетливо ступенчатый. Ясная или средняя – в обломках встречаются направления как спайные, так и произвольные, можно наблюдать как ступенчатый, так и неровный излом, например, в пироксенах, ярозите. Несовершенная – наблюдается с трудом, при наличии опыта, да и то не во всех образцах, например – у пирита.

Отдельность – более грубая, чем спайность, трещиноватость минерала, обычно трещины проходят через весь кристалл. В отличие от спайности, отдельность вызывается закономерно ориентированными по определенным кристаллографическим направлениям включениями микровостков минералов-примесей или дефектов структуры. Отдельность наблюдается у бериллов, корундов.

1.6. Излом

Излом – характер поверхности случайного направления, наблюдается у минералов с несовершенной спайностью. Обычно – раковистый (кварц), может быть неровный – апатит, ровный, ступенчатый (минералы с хорошей спайностью – полевые шпаты), занозистый у минералов, образующих волокнистые, шестоватые агрегаты. Излом различается у монокристаллов и у кристаллических агрегатов.

1.7. Плотность

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Плотность – удельная масса, в минералогии принято измерять в г/см³.

Плотность зависит от плотности упаковки атомов в структуре.

Обычно плотность выше у минералов, содержащих металлы (оксиды и сульфиды металлов, интерметаллиды) или с компактной структурой (алмаз). Основные породообразующие силикаты и карбонаты имеют плотность в пределах 2.5–2.8. Тяжелыми считаются минералы с плотностью выше 3 г/см³. У самородных металлов и интерметаллических соединений плотность выше 10 (табл. 3). Важно, что более плотные минералы можно выделить гравитационными методами; например – промывкой в лотке, а затем определять их, пользуясь специальными методами. Это свойство используется промышленностью для сепарации золота, платины, алмазов из россыпей. В полевых условиях высокая плотность используется для идентификации барита – белого тяжелого минерала со спайностью в двух направлениях, который легко спутать с полевыми шпатами, обладающими близкой твердостью, цветом и спайностью, но легкими.

Таблица 3

Сравнительная характеристика плотности разных минералов

Характеристика	Значения	Примеры
Очень низкая	<1	Лед, озокерит
Низкая	1–4	Силикаты, карбонаты
Средняя	4–7	Сульфиды: пирит, барит, ангидрит
Высокая	7–10	Галенит, петцит
Очень высокая	>10	Сперрилит (10.6), осмий-иридий (19–22)

1.8. Прочие физические свойства минералов

Термические свойства минералов выражаются в характере поведения при нагревании. Поглощение энергии при нагревании происходит неравномерно. Некоторые структурные и химические изменения сопровождаются поглощением энергии (эндотермические), другие – выделением (экзотермические). Эндотермические эффекты сопровождают фазовые переходы, полиморфные переходы, реакции дегидратации, декарбонатизации, плавления и кипения – т.е. все, что приводит к нарушениям кристаллической решетки. Экзотермические эффекты связаны с окислением некоторых элементов (например, железа), образованием новых минеральных фаз.

Температуры плавления и диссоциации для некоторых минералов являются диагностическими. Так, весьма легкоплавкие минералы плавятся при температуре 100–400 °С – это лед, сера, олово. Легкоплавкие – 400–700 °С (пираргирит, айкинит, джемсонит), плавкие – 700–1000 °С (некоторые соли, аргентит, никелин), тугоплавкие 1000–1600 (гранаты, некоторые оксиды, серебро) и весьма тугоплавкие (> 1600) – кварц (1710), периклаз (2800), углерод (3600). Минерал может плавиться инконгруэнтно – т.е. из него сначала выплавляется какая-то определенная часть, остаток – твердый, и только по достижению некоторой температуры вещество переплавляется полностью.

Магнитные свойства минералов

Все минералы способны намагничиваться в магнитном поле, но в различной степени. Магнитность пропорциональна числу неспаренных электронов и вызывается их способностью ориентироваться в магнитном поле.

Величина магнитной восприимчивости χ равна отношению вектора намагничивания I (магнитного момента единичного объема), который измеряется в А/м, к напряженности магнитного поля H (А/м). Вектор намагничивания обусловлен совокупным действием магнитных моментов атомов, которые в свою очередь связаны с наличием спина (собственного механического момента) электронов.

Все вещества разделяются на ферромагнетики (магнитные моменты атомов однонаправлены), ферримагнетики (магнитные моменты атомов упорядочены, направлены противоположно, но не скомпенсированы), антиферромагнетики (магнитные моменты атомов направлены противоположно и скомпенсированы), парамагнетики (магнитные моменты атомов могут упорядочиваться в сильном магнитном поле) и диамагнетики (в отсутствие внешнего магнитного поля эти вещества немагнитны, в магнитном поле векторы их намагниченности направлены противоположно внешнему полю, соответственно величина магнитной восприимчивости отрицательна и мала).

Сильномагнитные минералы относятся к ферромагнетикам (камасит) и ферримагнетикам (магнетит, магнитный пирротин), слабомагнитные минералы представлены парамагнетиками (ильменит, железистые пироксены, гранаты и другие железосодержащие минералы, проявляющие магнитные свойства только

в сильном магнитном поле), антиферромагнитные (гематит) и диамагнитные (барит, кварц...) минералы практически немагнитны.

Величина χ изменяется от 1.0 до $-0.5 \cdot 10^{-6}$, у слабомагнитных минералов χ составляет $n \cdot 10^{-4}$ – $n \cdot 10^{-6}$, у сильномагнитных -0.15 – -1.02 . Например, $\chi_{\text{магнетит}} = 0.15$, $\chi_{\text{пирротин}} = 1 \cdot 10^{-4}$. В немагнитных минералах $-\chi = n \cdot 10^{-8}$.

Электропроводность

Электропроводностью характеризуются только минералы с металлическим типом связи – самородные металлы, графит, некоторые оксиды. Их удельное сопротивление не превышает 10 Ом/м. Сопротивление зависит от температуры и может изменяться от десятых долей единицы до 10^5 – 10^8 у сверхпроводников при температурах, близких к абсолютному нулю. У пьезоэлектриков электропроводность возникает при приложении внешнего давления.

Для объяснения электропроводности привлекают зонную теорию – проводящими являются те минералы, в строении которых зоны электронных уровней перекрываются, если они не перекрываются, т.е. есть запрещенные для размещения электронов зоны, то минерал не проводит электричество.

Глава 2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

2.1. Лабораторная работа № 1

Изучение окраски и люминесцентных свойств минералов

Цель работы: получение навыков определения идиохроматической, аллохроматической и псевдохроматической окраски минералов, окраски минералов в тонком порошке, диагностики люминесцирующих минералов.

Оборудование: лупа, бинокляр, бисквиты, стекла для истирания минералов, ультрафиолетовая лампа, эталонная коллекция минералов-люминофоров, учебник минералогии.

Необходимые навыки, усвоенные при изучении предшествующих курсов: представления о типах окраски минералов и причинах ее возникновения, а также о физической природе и видах люминесценции, способах ее наблюдения.

Порядок выполнения работы

1. Макроскопическое определение идиохроматической окраски минералов, в том числе минералов, проявляющих разную окраску в зависимости от примеси элементов-люминофоров (кварц, кальцит, корунд и т.п.).
2. Макроскопическое изучение минералов с аллохроматической окраской, вызванной тонкой механической примесью газовой-жидких включений или других минералов.
3. Макроскопическое исследование различных псевдохроматических типов окраски: побежалость, интерференция света на поверхностях спайности и газовой-жидких включениях, иризация и т.п.
4. Определение цвета черты у цветных, черных и белых минералов с помощью бисквита и методом истирания мелких частиц минерала. Сопоставление цвета черты с макроскопической окраской минерала.
5. Изучение люминесцентных свойств минералов с помощью ультрафиолетовой лампы с двумя стандартными длинами волн: 254 нм и 366 нм.
6. Представление результатов в виде отчета: подробная характеристика окраски минералов и возможных причин ее возникновения согласно таблице.

Минерал	Идиохроматическая окраска	Аллохроматическая окраска	Псевдохроматическая окраска	Цвет черты	Цвет люминесценции

Внимание! Изучение люминесцентных свойств минералов проводить с соблюдением техники безопасности: запрещается длительное воздействие УФ излучения на глаза во избежание получения ожогов роговицы.

2.2. Лабораторная работа № 2

Изучение механических свойств минералов

Цель работы: получение навыков определения твердости, спайности, хрупкости и ковкости минералов, определение характера излома.

Оборудование: лупа, бинокляр, бисквиты, стекла для истирания минералов, шкала Мооса, стальные и медные иглы, перочинный нож, учебник минералогии.

Необходимые навыки, усвоенные при изучении предшествующих курсов: знание минералов шкалы Мооса, представления о способах измерения твердости минералов, теоретические представления о спайности и направлениях спайности в минералах, причинах ее возникновения, навыки определения простых форм и кристаллографических направлений на моделях кристаллов и реальных кристаллах.

Порядок выполнения работы

1. Определение твердости минералов с помощью шкалы Мооса, стальных и медных игл, оконного стекла, перочинного ножа, сопоставление полученных результатов.
2. Макроскопическое изучение минералов с весьма совершенной, совершенной, ясной и несовершенной спайностью. Определение направлений спайности, простых форм, по которым развивается спайность.
3. Изучение хрупкости и ковкости минералов с помощью методов истирания на стекле и бисквите. Изучение характера поверхности истертых частиц под бинокляром.
4. Определение характера излома у минералов с разной степенью совершенства спайности.
5. Представление результатов в виде отчета: подробная характеристика механических свойств минералов согласно таблице.

Минерал	Твердость по Моосу	Спайность: наличие, направления, степень совершенства	Излом	Хрупкость	Ковкость

2.3. Лабораторная работа № 3

Диагностика минералов с помощью качественных химических реакций

Цель работы: получение навыков диагностики минералов с помощью качественных химических реакций.

Оборудование: лупа, бинокляр, вытяжной шкаф, лабораторные весы, чашки Петри, капилляры, пипетки, резиновые перчатки, халаты; реактивы: $\text{HCl}_{\text{разб}}$, $\text{HCl}_{\text{конц}}$, NH_4OH , H_2O_2 , порошок ализарина красного, порошок КJ, лакмусовая бумага, фильтровальная бумага; учебник минералогии, справочник-определитель минералов в шлихах.

Необходимые навыки, усвоенные при изучении предшествующих курсов: знание неорганической химии, навыки работы с химическими реактивами.

Теоретическая часть

При диагностике минералов исследователи часто пользуются качественными химическими реакциями, позволяющими определить присутствие конкретных катионов, анионов или группировок в составе минерала. Известно множество экспрессных реакций со стандартным набором реактивов. Их часто применяют при диагностике минералов в шлихах, в том числе полевой диагностике [4].

В минералогии чаще всего применяются реакции растворения, замещения и обмена. В качестве реагентов наибольшим распространением пользуются неорганические кислоты (соляная, азотная и серная), перекись водорода, аммиаксодержащие растворы (собственно раствор аммиака, 10 %-ый раствор фосфата аммония, азотнокислый раствор молибдата аммония), некоторые комплексные соединения, различные соли (хлорид бария, нитрат серебра, соли свинца и др.), едкие щелочи натрия и калия (табл. 4). Химические свойства минералов также определяются по реакциям окрашивания (например, окрашивание кальцита в растворе ализарина). К особым качественным реакциям относятся реакции горения и сплавления минералов в пламени паяльной трубки.

Таблица 4

Примеры качественных реакций, применяемых для диагностики минералов

№ п/п	Диагностируемый ион	Реагенты	Описание реакции
1	Mn^{2+} (оксиды и гидроксиды марганца)	H_2S_2	При взаимодействии раствора H_2S_2 и минерала происходит сильное вскипание без существенного изменения минерала.
2	Pb^{2+} (галенит, церуссит, англезит)	$\text{HNO}_3_{\text{конц}}$ $\text{HCl}_{\text{конц}}$ КJ (порошок)	Зерно галенита растворяют в 3–4-х каплях $\text{HNO}_3_{\text{конц}}$ при нагревании, выпаривают. Сухой остаток растворяют в 2–3-х каплях $\text{HCl}_{\text{конц}}$ и снова выпаривают. Сухой остаток растворяют при нагревании в 2–3-х каплях

№ п/п	Диагностируемый ион	Реагенты	Описание реакции
			воды, охлаждают и к холодному раствору прибавляют кристаллик КJ. Присутствие Pb^{2+} вызывает образование желтого чешуйчатого осадка PbJ . Церуссит легко растворяется в $HCl_{конц}$, поэтому не требует предварительного растворения в азотной кислоте.
3	Ag (серебро)	$HNO_{3конц}$ $HCl_{разб}$ NH_4OH	Серебро растворяют в 1–2-х каплях $HNO_{3конц}$, к полученному раствору добавляют 2–3 капли воды и одну каплю $HCl_{разб}$. Присутствие Ag вызывает образование белого творожистого осадка $AgCl$, легко растворяющегося в NH_4OH . $AgCl$ на свету разлагается и темнеет.
4	S^{2-} (основные сульфиды)	$HCl_{разб}$	При взаимодействии сульфидов с разбавленной соляной кислотой выделяется H_2S без существенного изменения сульфида, это определяется по характерному запаху.
5	S^{2-} (основные сульфиды)	$HNO_{3конц}$	При взаимодействии порошка сульфида с азотной кислотой наблюдается образования желтого осадка – серы.
6	$(CO_3)^{2-}$ (карбонаты)	$HCl_{разб}$	При взаимодействии карбонатов с разбавленной соляной кислотой происходит вскипание с выделением углекислого газа. Некоторые карбонаты реагируют с соляной кислотой при нагревании.
7	Карбонаты	Слабокислый раствор ализарина красного	Раствор ализарина красного: 0.61 г $HCl_{конц}$ разводят более 100 мл воды и добавляют 0.1 г порошка ализарина красного. Тщательно перемешивают. Раствор используют для диагностики кальцита и доломита в шлифах, полировках и шлихах. Для этого опускают в раствор образец (например, шлиф) примерно на 30-60 сек. Затем промывают водой. Кальцит окрашивается в розовый цвет, доломит (и другие слаборастворимые карбонаты) не окрашиваются.

Порядок выполнения работы

1. Определение катиона Mn^{2+} в составе гидроксидов марганца реакцией с перекисью водорода.
2. Определение катиона Pb^{2+} в составе церуссита реакцией с KJ.
3. Определение катиона Ag^+ в составе самородного серебра реакцией с азотной и соляной кислотой.
4. Определение сульфидов в порошке реакциями с соляной и азотной кислотой.
5. Определение карбонатов (кальцит, доломит, магнезит, сидерит) по реакции с разбавленной соляной кислотой.
6. Определение карбонатов (кальцит, доломит, магнезит, сидерит) с помощью диагностического окрашивания.
7. Представление результатов в виде отчета: подробная характеристика хода реакций с объяснением причин наблюдаемых эффектов в виде таблицы.

Минерал, тип препарата (порошок, зерна, образец, шлиф)	Ход реакции (поэтапно)	Наблюдаемые эффекты (поэтапно)	Выводы

Внимание! Все опыты проводить в хорошо проветриваемом помещении (опыты с концентрированными кислотами под вытяжкой), в халатах и перчатках с соблюдением правил техники безопасности. Описание реакций см. в разделе «Теоретическая часть».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булах, А.Г. Минералогия: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А.Г. Булах. – М.: Изд. центр «Академия», 2011. – 288 с.
2. Булах, А.Г. Минералогия: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.Г. Булах, В.Г. Кривовичев, А.А. Золотарев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 416 с.
3. Вертушков, Г.Н. Таблицы для определения минералов по физическим и химическим свойствам: Справочник / Г.Н. Вертушков, В.Н. Авдонин. – М.: Недра, 1992. – 489 с.
4. Копченова, Е.В. Минералогический анализ шлихов / Е.В. Копченова. – М.: Гос. изд-во геологической лит-ры, 1951. – 207 с.
5. Mandarino, J.A. The Gladstone-Dale relationship. Part II, Trends among constants / J.A. Mandarino // *Can. Mineral.* – 1978. – V. 16. – P. 169–174.
6. Mandarino, J.A. The Gladstone-Dale relationship. Part III, Some general applications / J.A. Mandarino // *Can. Mineral.* – 1979. – V. 17. – P. 71–76.

Рекомендуемая литература:

7. Берри, Л. Минералогия. Теоретические основы. Описание минералов. Диагностические таблицы / Л. Берри, Б. Мейсон, Р. Дитрих. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
8. Брегг, У.Л. Кристаллические структуры минералов / У.Л. Брегг, Г.Д. Кларингбулл. – М.: Мир, 1967. – 390 с.
9. Булах, А.Г. Расчет формул минералов / А.Г. Булах – 2-е изд. испр. и доп. – М.: Недра, 1967. – 141 с.
10. Булах, А.Г. Формулы минералов. Термодинамический анализ в минералогии и геохимии / А.Г. Булах, В.Г. Кривовичев, А.А. Золотарев. – СПб.: изд-во СПбГУ, 1995. – 260 с.
11. Годовиков, А.А. Минералогия / А.А. Годовиков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1983. – 648с.
12. Григорьев, Д.П. Онтогенез минералов. Индивиды / Д.П. Григорьев, А.Г. Жабин. – М.: Недра, 1975. – 340 с.
13. Пушаровский, Д.Ю. Структура и свойства кристаллов / Д.Ю. Пушаровский, Н.В. Белов. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 106 с.
14. Смольянинов, Н.А. Практическое руководство по минералогии / Н.А. Смольянинов. – 2-е изд. – М.: Недра, 1972. – 357 с.
15. Херлбат, К. Минералогия по системе Дэна / К. Херлбат, К. Клейн. – М.: Недра, 1982. – 450 с.

Ресурсы интернета:

16. www.mindat.org
17. www.webmineral.com