



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов
и технологий**

В. В. СЕРГЕЕВА

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Учебно-методическое пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. В. Сергеева

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся по направлениям
подготовки бакалавриата 12.03.02 «Оптотехника»,
18.03.01 «Химическая технология»,
22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»,
22.03.02 «Металлургия»,
18.05.02 «Химическая технология
материалов современной энергетики»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2017

УДК 548/549 (075.8)
ББК 22.37я73+26.31я73
С32

Рецензенты:

экспертная комиссия Уральского геологического музея УГГУ (директор, канд. геол.-минерал. наук Д. А. Клейменов);
ведущий геолог ОАО «Уральская геолого-съёмочная экспедиция», канд. геол.-минерал. наук Ю. Н. Кошевой

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. Ф.Л. Капустин

Сергеева, В. В.

С32 Кристаллография и минералогия : учеб.-метод. пособие / В. В. Сергеева. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 152 с.

ISBN 978-5-7996-1987-9

В пособии рассмотрены вопросы и основные законы кристаллографии и минералогии. В главе «Геометрическая кристаллография» содержится описание кристаллов, их общих свойств, элементов и видов симметрии, сингоний, простых форм кристаллов низшей, средней и высшей категорий.

В главе «Минералогия» дается классификация минералов, характеристика их свойств и схема описания. Рассматриваются также методика и порядок выполнения студентами контрольных мероприятий (контрольная работа, домашнее задание, расчетно-графическая работа), даны варианты заданий.

Библиогр.: 9 назв. Табл. 12. Рис. 28. Прил. 3.

УДК 548/549 (075.8)
ББК 22.37я73+26.31я73

ISBN 978-5-7996-1987-9

© Уральский федеральный
университет, 2017

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 5 |
| Часть 1. | |
| ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ | 6 |
| 1. Симметрия в кристаллах..... | 6 |
| 2. Элементы симметрии..... | 7 |
| 3. Виды симметрии, сингонии, категории..... | 8 |
| 4. Простые формы кристаллов | 12 |
| 4.1. Простые формы кристаллов низшей категории | 13 |
| 4.2. Простые формы кристаллов средней категории..... | 14 |
| 4.3. Простые формы кристаллов высшей категории..... | 16 |
| 5. Установка кристаллов..... | 18 |
| 6. Построение стереографической проекции кристалла..... | 21 |
| 6.1. Сферические координаты..... | 24 |
| 6.2. Решение кристаллографических задач по сетке Вульфа | 27 |
| 7. Определение символов граней, ребер и простых форм | 36 |
| Закон рациональных отношений..... | 36 |
| 8. Расчетно-графическая работа..... | 40 |
| 8.1. Примеры выполнения расчетно-графической работы для моделей низшей категории | 41 |
| 8.2. Примеры выполнения расчетно-графической работы для моделей средней категории..... | 56 |
| 8.3. Пример выполнения расчетно-графической работы для моделей высшей категории | 59 |
| 8.4. Пример оформления расчетно-графической работы | 61 |
| 8.5. Варианты заданий расчетно-графической работы | 63 |
| 9. Выполнение контрольной работы по кристаллографии | 72 |
| 9.1. Примеры описания моделей кристаллов | 73 |
| 9.2. Варианты заданий к контрольной работе по кристаллографии..... | 78 |
| Часть 2. | |
| МИНЕРАЛОГИЯ | 88 |
| 1. Физические свойства минералов..... | 89 |
| 1.1. Формы минералов и агрегатов..... | 89 |
| 1.2. Механические свойства минералов..... | 92 |
| 1.3. Оптические свойства минералов | 95 |

| | |
|---|---------|
| 1.4. Цвета минералов, цвет черты..... | 96 |
| 1.5. Магнитные свойства | 98 |
| 1.6. Удельный вес и плотность | 98 |
| 2. Классификация минералов | 99 |
| 2.1. Описание минералов..... | 102 |
| 2.2. Перечень практических (лабораторных) занятий..... | 120 |
| 2.3. Контрольная работа по описанию и диагностике минералов..... | 124 |
| 2.4. Пример выполнения контрольной работы по минералогии..... | 125 |
| Библиографический список | 127 |
| Приложение 1 | 128 |
| Приложение 2 | 129 |
| Приложение 3 | 130 |

Введение

При изучении дисциплин «Основы кристаллографии и минералогии», «Кристаллография и минералогия» и «Кристаллография» рассматриваются вопросы геометрической кристаллографии (закон симметрии и закон рациональности двойных отношений параметров), простые и комбинационные формы кристаллов, а также кристаллографическая система координат и дается определение математического обозначения граней, ребер, простых форм. Изучается влияние структуры на внешнюю форму и физические свойства кристаллов, основные мотивы построения структур — каркасные, листовые, ленточные, цепочечные, с изолированными группами атомов. Также рассматриваются принципы кристаллохимической классификации минералов и дана характеристика минералов на ее основе по классам сульфидов, оксидов, карбонатов, сульфатов и силикатов.

В результате изучения указанных дисциплин студент должен:

— знать основные понятия и законы кристаллографии; классификацию кристаллов на основе их симметрии; зависимость физических свойств от симметрии кристаллов; условия происхождения и нахождения минералов в природе; основные группы минералов, их состав, физические свойства и практическое применение, процессы минералообразования и соответствующие им минеральные парагенезисы; основные законы кристаллической структуры, внешние формы, химический состав, физические свойства и условия образования кристаллов во взаимосвязи;

— уметь осуществлять выбор сырья, основных и вспомогательных материалов; определять симметрию кристаллов; использовать практические методы, применяемые для диагностики минералов; пользоваться геолого-минералогической информацией о месторождениях полезных ископаемых; определять главнейшие виды минералов, магматических и метаморфических горных пород макроскопически по комплексу физических свойств и текстурных особенностей;

— владеть навыками определения наиболее распространенных минералов.

Часть 1.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

1. Симметрия в кристаллах

Кристаллическое состояние — наиболее распространенное состояние вещества на Земле и в космосе.

Кристаллическим называется такое состояние вещества, при котором в его строении наблюдается закономерное расположение частиц — молекул, атомов, ионов, — образующих ряды, плоские сетки, пространственную решетку. В веществе, находящемся в аморфном состоянии, закономерного расположения частиц в полной мере не обнаруживается. Другими словами, в строении вещества, находящегося в кристаллическом состоянии, обнаруживается ближний и дальний порядок. Вещество в аморфном состоянии имеет в строении только ближний порядок и не имеет дальнего порядка.

Кристаллическое строение имеют горные породы, минералы, технические камни (цемент, огнеупоры, металлы). В аморфном состоянии находятся стекла: природные (обсидиан) и технические — смолы, гудрон, парафин, воск, стекло.

Кристалл — это физическое тело, частицы которого образуют кристаллическую решетку, имеют определенную геометрическую форму.

В идеальном кристалле вершина соответствует узлу (атому, молекуле, иону); ребро — ряду узлов; грань — плоской сетке. В реальных кристаллах при большом увеличении можно увидеть, что вершина состоит из многих узлов (частиц), ребро — из многих рядов, грань — из многих плоских сеток, расположенных параллельно.

2. Элементы симметрии

.....

Закономерное расположение частиц обуславливает внутреннюю и внешнюю симметрию. Греческое слово «симметрия» в переводе на русский язык означает «соразмерность». Симметричная фигура должна состоять из закономерно повторяющихся равных частей. Вспомогательные геометрические образы — точки, прямые, плоскости, позволяющие установить симметрию кристалла, называются **элементами симметрии**.

Плоскостью симметрии кристаллического многогранника называется воображаемая плоскость, которая делит модель на две равные и зеркально симметричные части.

Плоскость симметрии обладает свойством зеркальности: каждая из частей кристалла, рассеянного плоскостью симметрии, совмещается с другой, т. е. является ее зеркальным изображением. Для конечных многогранников плоскость симметрии обозначается латинской буквой *P* — начальной от слова «plane». Коэффициент, стоящий перед ней, показывает количество плоскостей симметрии в многограннике. В различных кристаллах можно провести разное количество плоскостей симметрии. Например, в кубе имеется девять плоскостей симметрии, в гексагональной призме — семь плоскостей симметрии.

Центром инверсии (симметрии) кристаллического многогранника называется мнимая точка, лежащая внутри кристалла, в диаметрально противоположных направлениях от которой располагаются одинаковые расстояния.

Для конечных многогранников центр инверсии обозначается буквой *C* латинского алфавита. При наличии центра симметрии в кристалле каждой грани отвечает другая грань, равная и параллельная (обратно параллельная) первой. В кристалле не может быть более одного центра симметрии, и любая линия, проходящая через центр симметрии, делится пополам.

Осью симметрии называется прямая линия, при вращении вокруг которой кристалл (или кристаллический многогранник) совмещается столько раз, каков порядок оси. Наименьший угол поворота, при котором достигается совмещение, называется **элементарным углом α** . Количество совмещений при повороте на 360° называется **порядком**

оси и обозначается значком n . Порядок оси и элементарный угол связаны соотношением $n = 360^\circ/\alpha$.

Ось симметрии обозначается буквой L_n , где нижний индекс обозначает порядок оси:

- L_1 — ось первого порядка с элементарным углом 360° : таким элементом симметрии обладают самые бесформенные тела, которые совмещаются при полном повороте на 360° ; это своеобразный ноль в кристаллографии, т. е. отсутствие симметрии;
- L_2 — ось второго порядка — совмещение достигается при повороте на 180° ;
- L_3 — ось третьего порядка — совмещение достигается при повороте на 120° ;
- L_4 — ось четвертого порядка — совмещение достигается при повороте на 90° ;
- L_6 — ось шестого порядка — совмещение достигается при повороте через 60° . Осей пятого порядка и выше шестого в кристаллах не существует.

Инверсионной осью симметрии называется линия, при вращении вокруг которой на некоторый определенный угол и при последующем отражении в центральной точке многогранника (как в центре симметрии) совмещаются одинаковые элементы ограничения.

Инверсионные оси симметрии обозначаются также буквой L с нижним индексом i . Существуют инверсионные оси следующих порядков: первого L_{i1} , второго L_{i2} , третьего L_{i3} , четвертого L_{i4} , шестого L_{i6} . На практике приходится иметь дело лишь с инверсионными осями четвертого и шестого порядков.

3. Виды симметрии, сингонии, категории

.....

В кристаллических многогранниках присутствуют неповторяющиеся направления, которые называются **единичными**. Повторяющиеся в кристалле направления, связанные элементами симметрии, называются **симметрично-равными**. Присутствие единичных и симметрично-равных направлений определяется совокупностью элементов симметрии. В кристаллах элементы симметрии находятся во взаимосвязи. Благодаря зависимости одних элементов симметрии от других, вза-

имные сочетания их ограничены. Установлено, что возможны только 32 комбинации различных элементов симметрии, или 32 кристаллографических класса, или вида симметрии (табл. 1). Виды симметрии, в которых имеются только главные оси, названы примитивными. Если в видах симметрии присутствует и центр симметрии, они называются центральными. При наличии плоскости говорят о планальном виде симметрии (греч. «планум» — плоскость), если имеются только оси — аксиальный вид симметрии (греч. «аксон» — ось). Максимальное количество возможных осей и плоскостей дает наименование планаксиального вида симметрии. В случае присутствия инверсионных осей говорят об инверсионно-примитивном или инверсионно-планальном видах симметрии.

При определении кристаллов или их моделей следует иметь в виду, что найденная комбинация элементов симметрии должна соответствовать определенному виду симметрии из приводимых 32 классов (табл. 1).

Данные 32 вида симметрии были выведены русским академиком А. В. Гадолиным в 1867 году.

Точечные группы, обладающие сходными элементами симметрии, составляют сингонии, которые по числу единичных направлений объединены в категории. Кристаллографические классы, или виды симметрии, объединяются в более крупные группировки, называемые системами или сингониями. Таких сингоний семь: кубическая — высшая категория; гексагональная, тетрагональная, тригональная — средняя категория; ромбическая, моноклинная, триклинная — низшая категория. В каждую сингонию входят кристаллы, у которых отмечается одинаковое расположение кристаллографических осей и одинаковые элементы симметрии.

Сингонией называется группа видов симметрии, обладающих одним или несколькими одинаковыми элементами симметрии и имеющих одинаковое расположение кристаллографических осей.

Охарактеризуем каждую сингонию.

Сингонии высшей категории

В кубической сингонии кристаллизуются наиболее симметричные кристаллы. В кубической сингонии присутствует более одной оси симметрии выше второго порядка, т. е. L_3 или L_4 . Кристаллы кубической сингонии обязательно должны иметь четыре оси третьего порядка $4L_3$

Таблица 1

Тридцать два вида симметрии кристаллов [А. В. Гадолин; 1867 г.]

| Категории | Сингонии | Виды симметрии | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------|---|--|---|---|--|---|---|--|--|--|--|
| | | примитивный | центральный | планальный | аксиальный | планаксиальный | инверсионно-примитивный | инверсионно-планальный | | | | |
| Низшая | Триклинная | 1 — | 2 <i>C</i> | | | | | | | | | |
| | Моноклинная | | 3 <i>P</i> | 4 <i>L₂</i> | 5 <i>L₂PC</i> | | | | | | | |
| | Ромбическая | | 6 <i>L₂2P</i> | 7 <i>3L₂</i> | 8 <i>3L₂3PC</i> | | | | | | | |
| Средняя | Тригональная | 9 <i>L₃</i> | 10 <i>L₃C</i> | 11 <i>L₃3L₂</i> | 12 <i>L₃3L₂</i> | 13 <i>L₃3L₂3PC</i> | | | | | | |
| | Тетрагональная | 14 <i>L₄</i> | 15 <i>L₄PC</i> | 16 <i>L₄4P</i> | 17 <i>L₄4L₂</i> | 18 <i>L₄4L₂5PC</i> | 19 <i>Li₄(=L₂)</i> | 20 <i>Li₄(=L₂)3L₂2P</i> | | | | |
| | Гексагональная | 21 <i>L₆</i> | 22 <i>L₆PC</i> | 23 <i>L₆6P</i> | 24 <i>L₆6L₂</i> | 25 <i>L₆6L₂7PC</i> | 26 <i>Li₆=L₃P</i> | 27 <i>Li₆3L₂3P = L₃3L₂4P</i> | | | | |
| Высшая | Кубическая | 28 <i>4L₃3L₂</i> | 29 <i>4L₃3L₂3PC</i> | 30 <i>4L₃3L₂6P</i> | 31 <i>3L₄4L₃6L₂</i> | 32 <i>3L₄4L₃6L₂9PC</i> | | | | | | |

и либо три взаимно перпендикулярные оси четвертого порядка $3L_4$, либо три оси второго порядка $3L_2$. Максимальное количество элементов симметрии в кубической сингонии может быть выражено формулой $3L_4 4L_3 6L_2 9PC$. В кубической сингонии кристаллизуются следующие минералы: каменная соль (галит), пирит, галенит, флюорит и др.

Сингонии средней категории

Данная группа объединяет кристаллы, обладающие только одной осью симметрии выше второго порядка. К средней категории относятся гексагональная, тетрагональная и тригональная сингонии.

Гексагональная сингония характеризуется наличием одной оси симметрии шестого порядка L_6 . Максимальное количество элементов симметрии может быть следующим: $L_6 6L_2 7PC$. Кристаллы гексагональной сингонии образуют призмы, пирамиды, дипирамиды и др. В гексагональной сингонии кристаллизуются апатит, нефелин, берилл и другие минералы.

Тетрагональная сингония имеет одну ось четвертого порядка L_4 . Максимальная симметрия для этой сингонии характеризуется формулой $L_4 4L_2 5PC$. К тетрагональной сингонии относятся касситерит (оловянный камень), халькопирит (медный колчедан), циркон и другие минералы.

Тригональная сингония характеризуется одной осью третьего порядка L_3 . Наибольшее количество элементов симметрии выражается формулой $L_3 3L_2 3PC$. В данной сингонии кристаллизуются кварц, кальцит, корунд и др.

Сингонии низшей категории

Кристаллы, в которых совсем отсутствуют оси симметрии высшего наименования и могут присутствовать только оси второго порядка L_2 , относятся к сингониям низшей категории. К ним относятся ромбическая, моноклиновая и триклинная сингонии.

Ромбическая сингония имеет несколько осей второго порядка L_2 или несколько плоскостей симметрии P . Максимальная формула $3L_2 3PC$. В ромбической сингонии кристаллизуются барит, топаз, марказит, антимонит и др.

Кристаллы моноклиновой сингонии характеризуются наличием одной оси второго порядка L_2 , или одной плоскостью симметрии P , или максимально: $L_2 PC$. Характерные минералы моноклиновой сингонии: ортоклаз, слюды, гипс, роговая обманка, пироксены и другие минералы.

К триклинной сингонии относятся наиболее несимметричные кристаллы, лишенные совсем элементов симметрии или имеющие лишь центр симметрии *C*. В триклинной сингонии кристаллизуются плагиоклазы, кианит (дистен), медный купорос и другие минералы.

4. Простые формы кристаллов

.....

Природные многогранники — кристаллы — могут образовывать простые формы либо их комбинации.

Простой формой кристалла называется совокупность тождественных граней, связанных элементами симметрии. Грани такой простой формы должны быть одинаковыми по своим физическим и химическим свойствам, а в идеально развитых многогранниках — и по своим очертаниям и величине. Если кристалл образован несколькими видами граней, то это комбинация нескольких простых форм.

Комбинацией называется сочетание двух или нескольких простых форм, объединенных элементами симметрии. Насчитывается 47 простых форм кристаллов. Простые формы образуют великое множество комбинаций. Различаются несколько типов простых форм.

Открытые формы — такие формы, грани которых не полностью ограничивают пространство. Примерами таких форм являются моноэдр, диэдр, пинакоид, призмы и пирамиды.

Закрытые формы (замкнутые) — такие формы, грани которых полностью ограничивают пространство. Примерами таких форм являются дипирамиды, трапецоэдры, скаленоэдры, тетраэдры, все простые формы кубической сингонии.

Конгруэнтные формы — это совместимые формы. Примеры: гексаэдр, октаэдр, призмы, пирамиды.

Энантиоморфные формы — зеркально совместимые формы правые и левые. Примеры: ромбический тетраэдр, трапецоэдры, пентагонтриоктаэдр, тетрагонтриоктаэдр.

Постоянными формами называются такие формы, грани которых образуют постоянные углы и постоянные символы. Пример: гексаэдр, октаэдр, кубический тетраэдр.

Переменными формами называются формы, грани которых образуют переменные углы и переменные символы. Примерами могут быть

пирамиды, ромбоэдр, тетраэдр. Открытые формы могут существовать в кристалле только в сочетании с другими простыми формами, образуя комбинации простых форм. Например, кристалл в форме тригональной пирамиды представляет сочетание двух простых форм — пирамиды и одной грани, моноэдра.

4.1. Простые формы кристаллов низшей категории

В низшей категории насчитывается 7 простых форм: из них 5 открытых и 2 замкнутые — тетраэдр и дипирамида ромбическая (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

Определение простых форм низшей категории

| | Взаимное расположение граней | Названия простых форм |
|---|--|------------------------|
| 1 | — | Моноэдр |
| 2 | Параллельны | Пинакоид |
| 2 | Пересекаются | Диэдр |
| 4 | Пересекаются в параллельных ребрах, в сечении ромб | Призма ромбическая |
| 4 | Пересекаются в одной точке, в сечении ромб | Пирамида ромбическая |
| 4 | Пересекаются в 4 точках по три, грань — косоугольный треугольник | Тетраэдр ромбический |
| 8 | Пересекаются в 2 точках с общим ромбическим сечением | Дипирамида ромбическая |

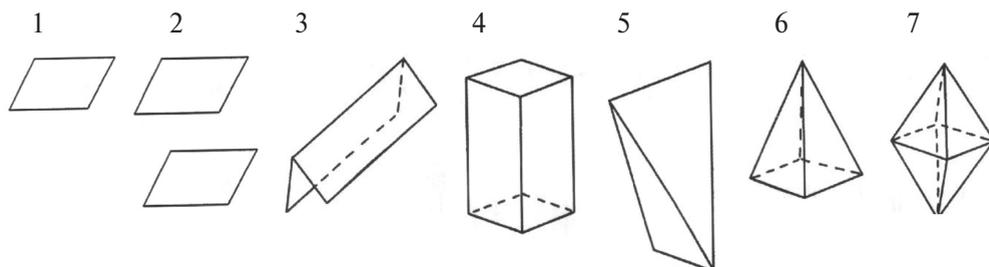


Рис. 1. Простые формы кристаллов низшей категории:

1 — моноэдр; 2 — пинакоид; 3 — диэдр; 4 — ромбическая призма; 5 — ромбический тетраэдр; 6 — ромбическая пирамида; 7 — ромбическая дипирамида

4.2. Простые формы кристаллов средней категории

Из низшей категории в среднюю категорию переходят две простые формы: моноэдр и пинакоид. Они переходят как частные формы, т. е. перпендикулярные главной оси. Другие формы — шесть призм, шесть пирамид, шесть дипирамид, три трапецоэдра, два скаленоэдра, тетраэдр, ромбоэдр. Таким образом, в средней категории своих форм 25 и две — переходящие из низшей категории (табл. 3, рис. 2).

К открытым формам относятся призмы и пирамиды, чтобы образовать из них замкнутые многогранники, требуется моноэдр или пинакоид. Остальные формы — трапецоэдры, скаленоэдры, тетраэдр и ромбоэдр — являются замкнутыми и переменными.

Таблица 3

Определение простых форм средней категории

| Пересечение с главной осью | Расположение граней относительно главной оси | Название простых форм | Кол-во граней | | |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|----------------|----------------|---|
| Не пересекают главную ось | Параллельные главной оси | Тригональная | Призмы | 3 | |
| | | Тетрагональная | | 4 | |
| | | Гексагональная | | 6 | |
| | | Дитригональная | | 6 | |
| | | Дитетрагональная | | 8 | |
| | | Дигексагональная | | 12 | |
| Пересекают главную ось | Пересекают главную ось | Моноэдр | Пирамиды | 1 | |
| | | Пинакоид | | 2 | |
| | Пересекают главную ось в одной точке | Пересекают главную ось в одной точке | | Тригональная | 3 |
| | | | | Тетрагональная | 4 |
| | | | | Гексагональная | 6 |
| | | | | Дитригональная | 6 |
| | | Дитетрагональная | 8 | | |
| | | Дигексагональная | 12 | | |
| Пересекают главную ось в двух точках | А. Нижние грани точно под верхними | Тригональная | Дипирамиды | 6 | |
| | | Тетрагональная | | 8 | |
| | | Гексагональная | | 12 | |
| | | Дитригональная | | 12 | |
| | | Дитетрагональная | | 16 | |
| | | Дигексагональная | | 24 | |
| | Б. Нижние грани несимметричны верхним | | Тригональный | Трапецоэдры | 6 |
| | | | Тетрагональный | | 8 |
| | | Гексагональный | 12 | | |

Окончание табл. 3

| Пересечение с главной осью | Расположение граней относительно главной оси | Название простых форм | Кол-во граней |
|--------------------------------------|--|---|---------------|
| Пересекают главную ось в двух точках | В. Нижняя грань симметрична двум верхним | Тетраэдр Ромбоэдр | 4 6 |
| | Г. Нижняя пара граней симметрична двум парам верхних | Тетрагональный Дитригональный Скаленоэдры | 8 12 |

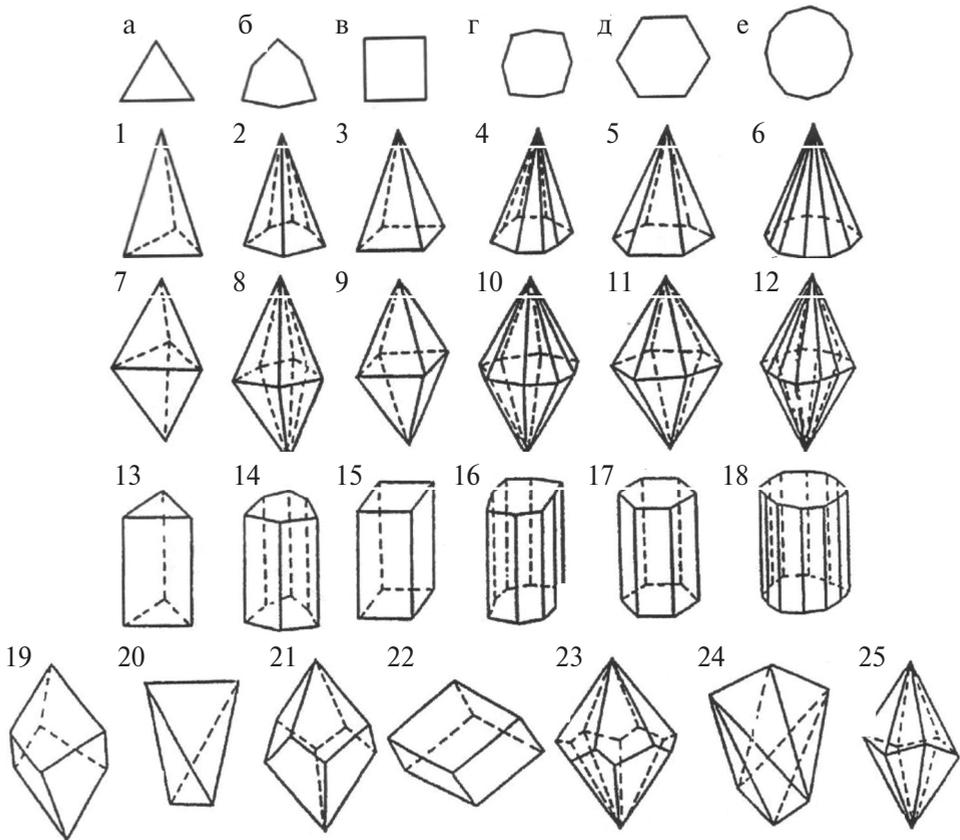


Рис. 2. Простые формы кристаллов средней категории:

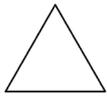
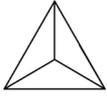
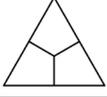
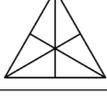
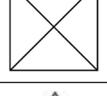
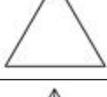
1–6 пирамиды: 1 — тригональная; 2 — дитригональная; 3 — тетрагональная; 4 — дитетрагональная; 5 — гексагональная; 6 — дигексагональная; **7–12 дипирамиды:** 7 — тригональная; 8 — дитригональная; 9 — тетрагональная; 10 — дитетрагональная; 11 — гексагональная; 12 — дигексагональная; **13–25 призмы:** 13 — тригональная; 14 — дитригональная; 15 — тетрагональная; 16 — дитетрагональная; 17 — гексагональная; 18 — дигексагональная; 19 — тригональный трапецоэдр; 20 — тетраэдр; 21 — тетрагональный трапецоэдр; 22 — ромбоэдр; 23 — гексагональный трапецоэдр; 24 — тетрагональный скаленоэдр; 25 — тригональный скаленоэдр

4.3. Простые формы кристаллов высшей категории

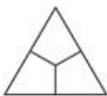
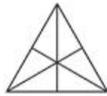
В высшей категории — кубической сингонии — насчитывается 15 простых форм (табл. 4, рис. 3). Ни одна простая форма из низшей и средней категорий не переходит в высшую. Некоторое исключение составляет тетраэдр. В низшей категории его грани — косоугольные треугольники, в средней категории — равнобедренные треугольники, в высшей категории — равносторонние треугольники.

Таблица 4

Определение простых замкнутых форм высшей категории

| № п/п | Названия простых форм | Количество граней | Форма граней |
|-------|-----------------------|-------------------|--|
| 1 | Тетраэдр | 4 |  |
| 2 | Тригонритетраэдр | 12 |  |
| 3 | Тетрагонритетраэдр | 12 |  |
| 4 | Пентагонритетраэдр | 12 |  |
| 5 | Тригонгексатетраэдр | 24 |  |
| 6 | Гексаэдр | 6 |  |
| 7 | Тригонтетрагексаэдр | 24 |  |
| 8 | Октаэдр | 8 |  |
| 9 | Тригонтриоктаэдр | 24 |  |

Окончание табл. 4

| № п/п | Названия простых форм | Количество граней | Форма граней |
|-------|-----------------------|-------------------|--|
| 10 | Тетрагонтриоктаэдр | 24 |  |
| 11 | Пентагонтриоктаэдр | 24 |  |
| 12 | Тригонгексаоктаэдр | 48 |  |
| 13 | Ромбододекаэдр | 12 |  |
| 14 | Пентагондодокаэдр | 12 |  |
| 15 | Дидодекаэдр | 24 |  |

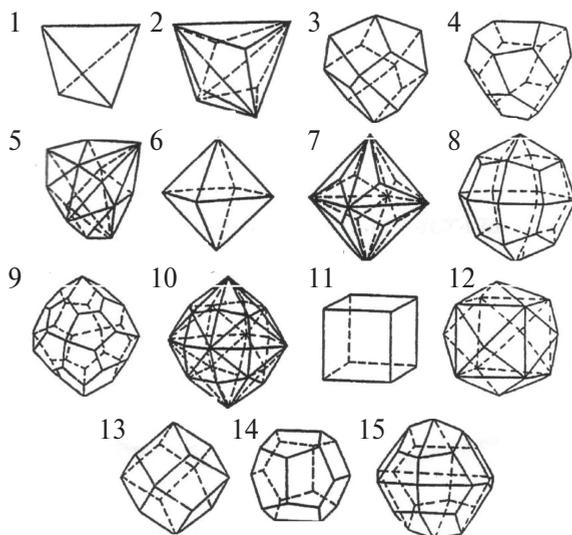


Рис. 3. Простые формы кристаллов высшей категории:

1 — тетраэдр; 2 — тригонритетраэдр; 3 — тетрагонритетраэдр; 4 — пентагонритетраэдр; 5 — гексатетраэдр; 6 — октаэдр; 7 — тригонтриоктаэдр; 8 — тетрагонтриоктаэдр; 9 — пентагонтриоктаэдр; 10 — гексагонооктаэдр; 11 — гексаэдр; 12 — тетрагексаэдр; 13 — ромбододекаэдр; 14 — пентагондодокаэдр; 15 — дидодекаэдр

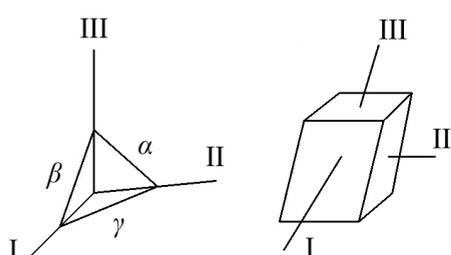
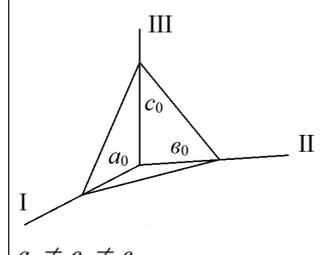
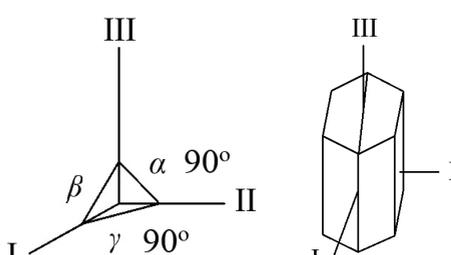
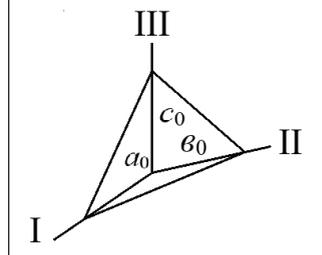
5. Установка кристаллов

.....

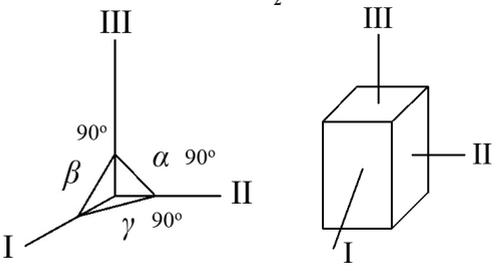
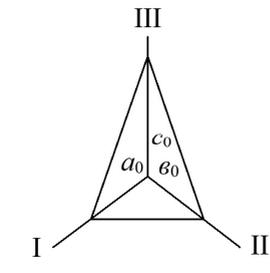
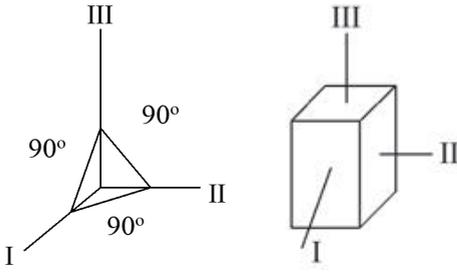
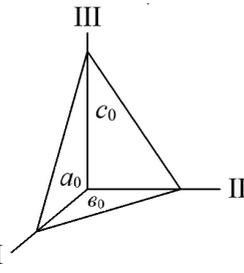
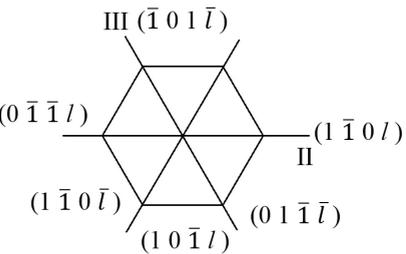
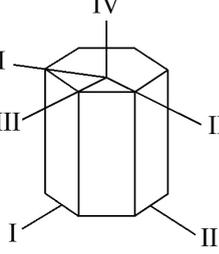
Установка кристалла — это выбор координатных или кристаллографических осей. В отличие от кристаллофизической системы координат, которая является прямоугольной, кристаллографическая система в общем виде является косоугольной, а в тригональной и гексагональной сингонии принята даже четырехосная система (табл. 5).

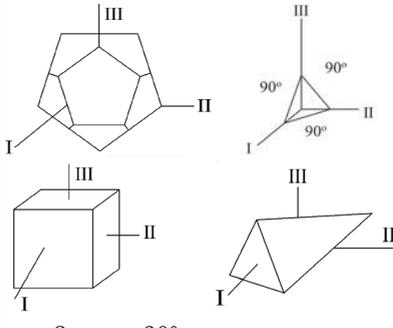
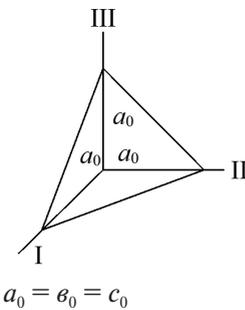
Таблица 5

Схемы установки кристаллов в различных сингониях

| Сингония | Кристаллографические оси | Единичная грань | Константы кристаллических решеток |
|------------|--|---|-----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Триклинная | <p>Оси параллельны действительным или возможным ребрам кристалла, Z параллельна оси наиболее развитого пояса</p>  <p style="text-align: center;">$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$</p> | <p>Отсекает на осях неравные отрезки</p>  <p style="text-align: center;">$a_0 \neq b_0 \neq c_0$</p> | $a : b : c$ |
| Моноклиная | <p>Y совмещается с L_2 или $\perp P$. X и Z в плоскости $\perp Y$, параллельно ребрам кристалла. Z — вертикальна.</p>  <p style="text-align: center;">$\beta \neq \alpha = \gamma = 90^\circ$</p> | <p>Отсекает на осях неравные отрезки</p>  <p style="text-align: center;">$a_0 \neq b_0 \neq c_0$</p> | $b : a : c$ |

Продолжение табл. 5

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------|---|---|-----------------|
| Ромбическая | <p>Оси совмещаются с единичными направлениями — с L_2 или с L_2 и перпендикуляром к $2P$</p> <p style="text-align: center;">$3L_2 3PC$</p>  <p>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p> | <p>Отсекает на осях неравные отрезки</p>  <p>$a_0 \neq b_0 \neq c_0$</p> | $a : 1 : c$ |
| Тетрагональная | <p>Z вертикальна и совмещается с L_4 или L_{i4}. X и $Y \perp Z$ или по двойным осям, или их \perp к плоскостям симметрии, ребрам</p>  <p>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p> | <p>На осях X и Y — равные отрезки и неравные им по оси Z</p>  <p>$a_0 = b_0 \neq c_0$</p> | $1 : 1 : c$ |
| Тригональная, гексагональная | <p>Гексагональная установка: IV ось совмещается с L_3 или L_6, $I, II, III \perp$ по двойным осям, $\perp P$, ребрам IV</p>  <p>$\gamma = 120^\circ$ $\alpha \neq \beta \neq \sigma \neq 90^\circ$</p> | <p>На двух осях равные отрезки, на одной — неравный</p>  <p>$a_0 = b_0 = d_0 \neq c_0$</p> | $1 : 1 : 1 : c$ |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--|--|-----------|
| Кубическая | <p>Оси совмещаются с $3L_4$, или $3L_{i4}$, или $3L_2$</p>  <p>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p> | <p>Отсекает равные отрезки</p>  <p>$a_0 = b_0 = c_0$</p> | 1 : 1 : 1 |

Существует две теоремы.

1. Оси симметрии $L_2, L_3, L_4, L_6, L_{i4}, L_{i6}$ совпадают с рядами пространственной решетки и, следовательно, являются действительными или возможными ребрами кристалла. Следствие из первой теоремы: кристаллографические оси можно совмещать с осями симметрии, так как они являются действительными или возможными ребрами кристалла. Ребро многогранника — это ряд пространственной решетки.

2. Нормали к плоскостям симметрии совпадают с рядами пространственной решетки и, следовательно, являются действительными или возможными ребрами кристалла. Следствие из второй теоремы: кристаллографические оси можно совмещать с нормальными к плоскостям симметрии, так как они являются действительными или возможными ребрами кристалла.

При установке кристаллов следует руководствоваться следующими условиями:

- 1) координатные оси можно совмещать с осями симметрии $L_2, L_3, L_4, L_6, L_{i4}, L_{i6}$;
- 2) координатные оси можно совмещать, когда нет или мало осей симметрии, с нормальными к плоскостям симметрии;
- 3) координатные оси при отсутствии элементов симметрии или их недостаточном количестве, а это характерно для триклинной и моноклинной сингоний, можно совмещать с осями наиболее развитых зон или, что то же самое, параллельно ребрам кристаллов.

6. Построение стереографической проекции кристалла

.....

Графическое изображение кристалла на плоскости производится построением стереографической проекции. Кристалл помещают внутрь сферы, ко всем его граням проводят нормали до пересечения со сферой. Для нанесения проекций граней верхней половины кристалла выбирается точка зрения на южном полюсе сферы. Точки пересечения нормалей верхней половины сферы соединяются с южным полюсом. Точки пересечения линий соединения концов нормалей с экваториальной плоскостью — это проекции граней верхней половины кристаллов. Следует отметить, что горизонтальные грани, перпендикулярные оси Z , будут иметь нормали, пересекающие сферу на северном полюсе, и проекции в центре круга проекции. Вертикальные грани будут иметь нормали, лежащие в плоскости экватора, и их проекции будут лежать на круге проекций. Наклонные грани будут иметь проекции между центром и кругом проекции.

Для нанесения проекций граней нижней половины кристалла точка зрения переносится с южного полюса на северный. Концы нормалей, пересекающие сферу, соединяются с полюсом, и точки пересечения линий с плоскостью проекции будут проекцией граней нижней половины кристалла. В отличие от проекций граней верхней половины кристалла, которые отмечаются кружочками, проекции нижней половины граней кристалла отмечаются крестиками. Это принцип построения стереографической проекции.

Согласно закону постоянства двугранных углов характерными константами кристаллов являются их угловые величины. Поэтому из множества методов проектирования в кристаллографии преимущественно применяются те, которые дают точное понятие об углах на кристаллах. В этом отношении особенно удобны стереографические проекции. «Стереос» (греч.) — пространственный. Примем некоторую точку O за центр проекций (рис. 4).

Произвольным радиусом опишем вокруг точки (центра) O шар, называемый **шаром проекций**. Через ту же точку O проведем горизонтальную плоскость Q . Эта плоскость является **плоскостью проекций**. В результате пересечения сферической поверхности с Q имеем большой круг (линии пересечения поверхности шара с плоскостями, проходящими через его центр), отвечающий экватору шара проекций и представляющий **круг**

проекций. Вертикальный диаметр шара NS , перпендикулярный к Q , называется **осью проекций**. Такая ось пересекает шар проекций в двух точках — N и S . Одна из этих точек (южный полюс шара проекций S) является **точкой зрения**. Если требуется изобразить стереографическую проекцию какого-либо направления или плоскости, переносим их параллельно самим себе так, чтобы они прошли через центр O .

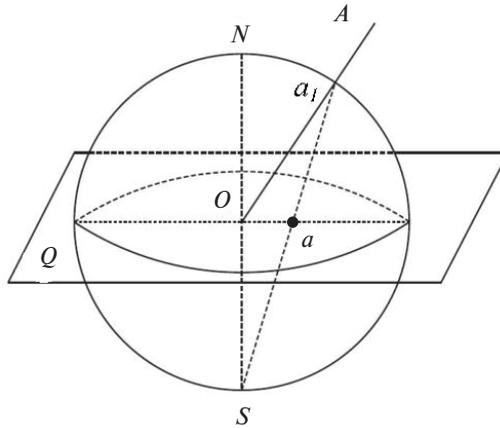


Рис. 4. Стереографическая проекция a направления OA

Рассмотрим получение стереографической проекции некоторого направления OA (рис. 4). Для этого продолжим данное направление до пересечения с поверхностью шара проекций. Пусть точка a_1 представляет собой результат пересечения OA с шаровой поверхностью. Соединим точку a_1 с точкой зрения S лучом зрения Sa_1 . Точка a — точка пересечения Sa_1 с плоскостью Q — является стереографической проекцией направления OA . Таким образом, стереографические проекции направлений изображаются точками.

Перейдем к проектированию кристаллов методом стереографических проекций.

Пусть задан некоторый кристаллический многогранник. Примем какую-либо точку O внутри него, например центр тяжести, за центр проекций (рис. 5). Из этой точки произвольным радиусом опишем сферическую поверхность — шар проекций. Через центр проведем горизонтальную плоскость проекций Q и условимся весь чертеж изображать на ней. Опустим из центра O на все грани кристалла перпендикуляры и продолжим их до пересечения с поверхностью сферы.

В результате пересечений на сферической поверхности возникнет ряд точек. Например, на рис. 5, a нормаль к грани A дает на шаровой поверхности точку a_1 .

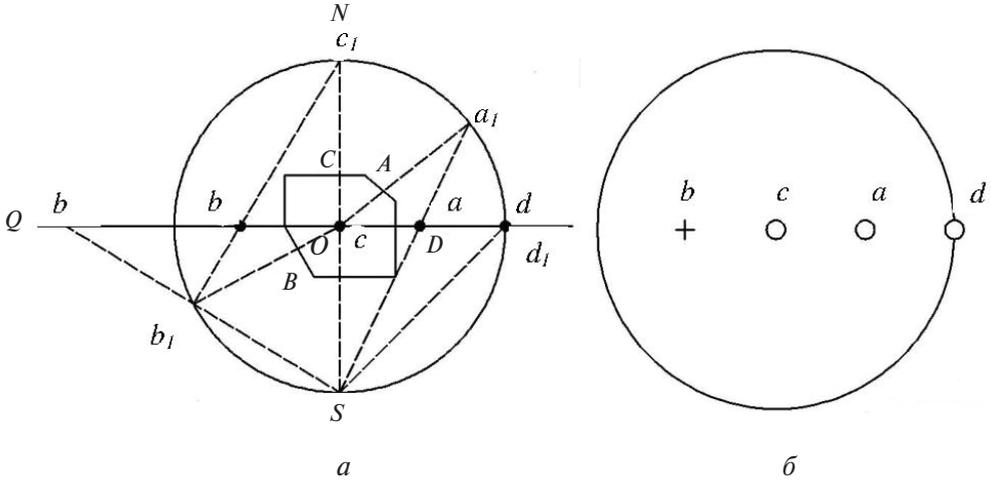


Рис. 5. Проектирование кристалла методом стереографических проекций (a); изображение проекций граней A , B , C и D на плоскости Q (b)

Все найденные точки следует перенести на горизонтальную плоскость проекций Q . С этой целью южный полюс шара S принимаем за точку зрения и соединяем с ней лучами зрения точки, расположенные на сфере. В результате пересечения лучей зрения с плоскостью чертежа получим новые точки, отвечающие стереографическим проекциям нормалей к граням. Таким образом, грани на данной проекции изображаются точками (точка a — стереографическая проекция нормали к грани A (рис. 5)).

Нормали к граням, пересекающие шар проекций в верхней полусфере, проектируются внутри круга проекций (например, нормаль OA на рис. 5). Наоборот, нормали, пересекающие шар проекций в нижней полусфере, проектируются вне этого круга (например, нормаль OB на рис. 5). Неудобство последнего построения заставляет переносить для таких нормалей точку зрения S в северный полюс сферы N . В этом случае и проекции нижних граней окажутся внутри круга проекций. Чтобы отличить друг от друга проекции нормалей к верхним и нижним граням, первые обозначаются кружками, а вторые — крестиками. Необходимо запомнить следующее:

- 1) горизонтальные грани проектируются в центре круга проекций (например, грань *C*, на рис. 5);
- 2) вертикальные грани проектируются на самом круге проекций (например, грань *D* на рис. 5);
- 3) косые грани проектируются внутри круга проекций (например, грани *A* и *B*). Чем круче наклон грани (т. е. чем меньше угол между гранью и осью проекций), тем ближе проектирующая ее точка располагается к кругу проекций. И чем более пологая грань (чем больше указанный угол), тем ближе соответственная точка к центру круга.

6.1. Сферические координаты

В результате гониометрического измерения кристалла для каждой его грани получаются две сферические координаты φ и ρ . При проектировании методом стереографических проекций все направления в кристалле (нормали к граням, ребра и др.) продолжают до пересечения со сферой. В географии и астрономии расположение любой точки на глобусе фиксируется сферическими координатами — **широтой** и **долготой**. С этой целью поверхность глобуса покрывается сетью дуг — меридианов и параллелей, с помощью которых можно сосчитать градусы, соответствующие широтам и долготам (приложение 1). Этот же прием применяется в кристаллографии. На поверхность шара проекций наносится сеть вспомогательных меридианов и параллелей. Пользуясь такой сетью, для каждой точки на сфере находим две координаты (рис. 6).

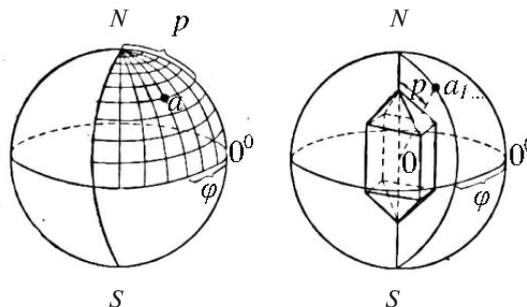


Рис. 6. Определение сферических координат φ и ρ грани *A*

Одна из них (φ) соответствует графической долготе. Для ее измерения один из меридианов на шаре принимается за нулевой. Долготу определяет угол между плоскостями нулевого меридиана и меридиана, проходящего через заданную точку. Отсчеты долгот φ берутся по вертикальному лимбу гониометра. Вторая координата (ρ) соответствует угловому расстоянию (числу градусов), заключенному между полюсом шара и заданной точкой. Эта координата отсчитывается по дуге большого круга (меридиану), проходящего через полюс и упомянутую точку. На кристалле координата для некоторой грани является углом между характерным направлением, совмещенным с горизонтальной осью ρ гониометра, и нормалью к данной грани (приложение 2). Относительно географической широты полярное расстояние является дополнительным углом до 90° . Отсчеты полярных расстояний ρ берутся по горизонтальному лимбу гониометра. Найденные при помощи гониометра сферические координаты φ и ρ для каждой грани наносятся на специальные сетки.

Поместив точку зрения на экваторе и проектируя дуги меридианов и параллелей на плоскость меридиана, перпендикулярную к прямой, соединяющей точку зрения с центром проекций, получим *сетку Вульфа* (приложение 1).

На рис. 7 угол между вертикальной осью проекций NS и проектируемым направлением OA соответствует полярному расстоянию ρ . Следовательно, угол $OSa = \rho/2$ (a – стереографическая проекция направления OA на плоскости проекций Q). Отсюда, приняв радиус шара проекций за единицу, находим, что расстояние точки a от центра проекций O составляет: $Oa = \operatorname{tg} \rho/2$.

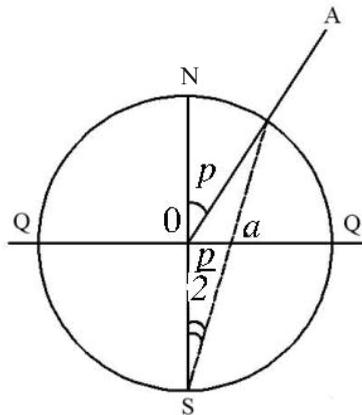


Рис. 7. Стереографическая проекция направления OA на плоскости проекций Q

Вычерчиваем окружность радиусом 10 см и проводим два взаимно перпендикулярных диаметра — горизонтальный и вертикальный (рис. 8). Далее делим внешний круг на равные части (на рисунке деления проведены через 30° ; на подлинной сетке Вульфа — через 2°). Деление двух диаметров на необходимые интервалы может быть осуществлено путем следующего построения. Соединим прямыми нижнюю точку вертикального диаметра с точками внешнего круга 180° , 210° , 240° , 270° , 300° , 330° и 0° . При этом горизонтальный диаметр в точках 90° , 60° , 30° , 0° и 90° разделится проведенными прямыми на неравные части. Затем через оба конца вертикального диаметра проводим точки 90° и 270° , которыми будут изображаться полюсы сетки Вульфа, и точки на горизонтальном диаметре 90° , 60° , 30° , 0° , 30° , 60° и 90° — круговые дуги (построение окружностей по трем точкам).

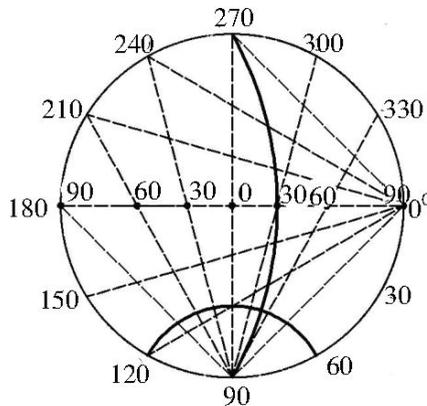


Рис. 8. Построение сетки Вульфа

Найденные дуги и являются искомыми стереографическими проекциями меридианов сетки Вульфа. Таким же образом строятся и проекции параллелей. С этой целью точку 0° соединяем прямыми с точками внешнего круга 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° и 270° . В результате вертикальный диаметр также разделится этими прямыми на неравные части. Круговые дуги, проведенные через найденные таким путем на вертикальном диаметре точки и соответственные точки, лежащие на круге проекций, являются искомыми стереографическими проекциями параллелей (одна из них показана на рис. 8). Удачно выбранный размер сетки (радиус 10 см) и цена делений (2°) обеспечили ей широкое распространение во всем мире при решении кристаллографических задач.

6.2. Решение кристаллографических задач по сетке Вульфа

Положим перед собой сетку Вульфа (приложение 1) и будем иметь в виду, что никакие построения на самой сетке не производятся — задачи целиком решаются на листке кальки, наложенном на сетку. Чтобы иметь возможность всегда приводить кальку относительно сетки в одно и то же исходное положение, отмечаем на кальке центр сетки точкой с четырьмя черточками в виде креста, не доходящими до самой точки. Кроме того, у правого конца горизонтального диаметра сетки ставится небольшая черточка, проведенная вне круга проекций (рис. 9).

Черточка справа будет служить нулевым индексом для долгот 0ϕ , а центральная точка рисунка — местом нуля для полярных расстояний 0ρ . Первая сферическая координата — долгота ϕ — отсчитывается по кругу проекций от нулевого индекса по часовой стрелке (на сетке каждое деление соответствует 2° , каждый десятый градус выделен жирной линией). Вторая сферическая координата — полярное расстояние ρ — отсчитывается от центра сетки (приложение 2).

Необходимо условиться, что в дальнейшем изображенные на сетке дуги меридианов и параллелей будут служить вспомогательными линиями. Истинный полюс сетки находится в ее центре 0ρ , истинный экватор совпадает с кругом проекций, а из истинных меридианов на сетке изображены только два — вертикальный и горизонтальный диаметры сетки. При работе с сеткой Вульфа необходимо мысленно представлять себе совмещенную с ней простейшую стереографическую сетку (рис. 9). Отсчет полярных расстояний ρ должен производиться при этом от центра сетки как от полюса.

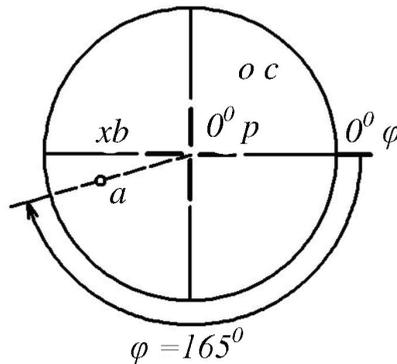


Рис. 9. Построение на кальке по сетке Вульфа к задачам 1 и 2

Задача 1

Построить стереографическую проекцию направления, заданного сферическими координатами ρ и φ .

Пусть некоторое направление A задано сферическими координатами $\varphi = 165^\circ$ и $\rho = 68^\circ$: $A(165^\circ, 68^\circ)$.

Требуется найти стереографическую проекцию этого направления.

Решение

1. Накладывают кальку на сетку Вульфа, совмещают центр кальки с центром сетки, а нулевую риску ($0^\circ \varphi$) — с правым концом горизонтального диаметра сетки Вульфа.

2. От нулевой риски отсчитывают по часовой стрелке по кругу проециций 165° и отмечают вспомогательной черточкой (рис. 10).

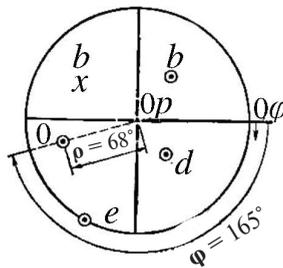


Рис. 10. Построение стереографической проекции направлений A с координатами $\varphi = 165^\circ$ и $\rho = 68^\circ$

3. Вращением кальки совмещают найденную риску с концом ближайшего диаметра сетки (центр кальки придерживают остро заточенным карандашом в совмещенном положении с центром сетки).

4. По данному диаметру от центра сетки в сторону вспомогательной черточки отсчитывают полярное расстояние 68° и отмечают найденную точку кружком.

5. Возвращают кальку в исходное положение и обозначают кружок буквой a . Найденная точка является искомой стереографической проекцией направления A .

Такое построение используют при нанесении стереографической проекции нормали к грани, или гномостереографической проекции грани. Аналогичный метод применяется при построении ребра или оси симметрии кристалла. В случае если полярное расстояние какого-либо направления больше 90° , стереографическая проекция будет расположена в нижней полусфере. Отсчет полярного расстояния, как отме-

чалось, будет производиться от центра проекций в направлении круга и обратно — от круга к центру. Такая проекция обозначается крестиком (рис. 10, точка b с координатами $\varphi = 205^\circ$ и $\rho = 124^\circ$).

Задача 2 (обратная)

Определить сферические координаты направления, заданного стереографической проекцией.

Решение

1. Вращением кальки совмещают заданную точку (стереографическую проекцию направления) с ближайшим диаметром сетки. От центра сетки по данному диаметру отсчитывают в направлении точки сферическую координату ρ . Вспомогательной черточкой на круге проекций отмечают в данном положении конец диаметра, на котором лежит определяемая точка.

2. Возвращают кальку в исходное положение и по кругу проекций от нулевой риски до вспомогательной черточки отсчитывают длину φ . Таким образом, для точки c определены сферические координаты: $\varphi = 309^\circ$ и $\rho = 55^\circ$ (рис. 10).

Задача 3

Провести дугу большого круга через заданные стереографические проекции двух направлений.

Допустим, что требуется провести дугу большого круга через стереографические проекции a и c направлений A ($165^\circ, 68^\circ$) и C ($309^\circ, 55^\circ$).

Решение

1. Вращением кальки совмещают обе точки a и c с одним из вспомогательных меридианов сетки.

2. Простым карандашом обводят меридиональную дугу, соединяющую точки a и c , и возвращают кальку в исходное положение (рис. 11).

В том случае, если точки будут располагаться на разных полусферах (например, a и b на рис. 10), вращением кальки приводят их на симметрично расположенные по отношению к центру сетки меридиональные дуги и обводят их простым карандашом: через точку a — сплошной линией, через точку b — пунктирной.

Найденная дуга большого круга может изображать гномостереографическую проекцию ребра, лежащего на пересечении двух граней (в этом случае заданные точки являются гномостереографическими проекциями этих граней), или стереографическую проекцию грани,

если точки — стереографические проекции ребер, лежащих в плоскости данной грани.

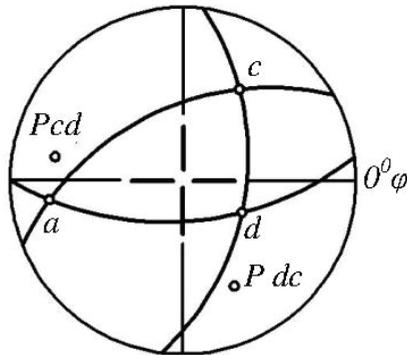


Рис. 11. Построение стереографических проекций к решению задач 3–7

Задача 4

Измерить угол между двумя направлениями, заданными их стереографическими проекциями (например, угол между направлениями *A* и *C* (рис. 11)).

Решение

1. Вращением кальки совмещают данные точки *a* и *c* с одной из меридиональных дуг сетки Вульфа (задача 3).

2. Отсчитывают по этой меридиональной дуге количество градусов, заключенных между точками *a* и *c* (рис. 11). В результате получается угол $AC = 113^\circ$. Измеренный угол может быть углом между нормальями к граням, если точки *a* и *c* представляют собой их гномостереографические проекции, или углом между ребрами, или данные точки — стереографические проекции ребер.

Задача 5

Найти полюс дуги большого круга, заданной на стереографической проекции (полюсом дуги принимают точку, равноотстоящую от всех точек дуги на 90°).

Например, требуется найти полюс дуги *a c*.

Решение

1. Вращением кальки совмещают заданную дугу *a c* с соответствующей меридиональной дугой сетки Вульфа.

2. Отсчитывают от точки пересечения заданной дуги с горизонтальным диаметром в направлении к центру сетки 90° по диаметру и отмечают кружком найденную точку.

3. Возвращают кальку в исходное положение и надписывают точку — P_{ac} . Для найденного полюса можно найти сферические координаты: $\varphi = 62^\circ$ и $\rho = 61^\circ$ (задача 2). Данный полюс может представлять собой стереографическую проекцию ребра кристалла, если дуга является гномостереографической проекцией этого ребра. Полюс может быть гномостереографической проекцией грани, если данная дуга — стереографическая проекция этой грани.

Аналогичным способом находится полюс дуги cd . Его координаты: $\varphi = 194^\circ$ и $\rho = 59^\circ$.

Задача 6 (обратная)

По заданному полюсу найти дугу большого круга, отвечающую его экватору.

Решение

1. Вращением кальки приводят заданный полюс на горизонтальный диаметр сетки.

2. Отсчитывают по горизонтальному диаметру в направлении центра сетки 90° (перейдя за него) и обводят проходящую здесь меридиональную дугу. Эта последняя будет искомой экваториальной дугой относительно заданного полюса.

Если заданный полюс выражает гномостереографическую проекцию грани, то найденная экваториальная дуга соответствует стереографической проекции той же грани. Если заданный полюс представляет стереографическую проекцию ребра, то найденная дуга отвечает его гномостереографической проекции. Обратите внимание на решение задач 5 и 6, так как они содержат механизм переходов от стереографической проекции к гномостереографической и обратно.

Задача 7

Измерить угол между двумя дугами больших кругов.

Например, требуется измерить угол между дугами ac и ad (рис. 11).

Решение

1. Вращением кальки совмещают точку пересечения дуг — a (вершину измеряемого угла) с горизонтальным диаметром сетки.

2. Приняв эту вершину за полюс, приводят отвечающую ему экваториальную дугу (задача 6).

3. Измеряют отрезок дуги между точками пересечения данной дуги с заданными дугами. Измеренная величина дуги составит величину искомого угла.

Если заданные дуги больших кругов являются стереографическими проекциями граней, то измеренный угол представляет собой угол между гранями, при вершине a он равен 65° , при вершине b — 75° и при вершине d — 116° .

Измеренные углы представляют собой углы между соответствующими гранями при условии, что заданные дуги больших кругов — стереографические проекции этих граней.

Задача 8

Построить геометрическое место точек, образующих с заданной на проекции точкой одно и то же угловое расстояние α (задача на построение малого круга).

Вокруг некоторого направления, стереографическая проекция которого отвечает заданной на проекции точке, имеется множество направлений, отклоненных от первого на один и тот же угол α и образующих в совокупности конус с углом 2α . Пересечение этого конуса с поверхностью сферы дает малый круг, в центре которого находится точка пересечения заданного направления со сферой. Стереографическая проекция исходного направления является только стереографическим, а не геометрическим центром (геометрический центр совпадает со стереографическим только в том частном случае, когда это направление совмещено с осью проекций). В этом основная трудность задачи (рис. 12). Пусть заданная точка лежит внутри круга проекций (например, точка b ($309^\circ, 55^\circ$)). Требуется построить вокруг нее как стереографического центра малый круг заданного радиуса (на рис. 12 $\alpha = 30^\circ$).

Решение

Совмещаем заданную точку с какой-либо параллелью, изображенной на сетке Вульфа, отсчитываем по меридиональной дуге сетки, проходящей через исходную точку, вверх и вниз угловое расстояние α и отмечаем полученные при этом две точки. Вращением кальки приводим заданную точку на какую-либо другую параллель сетки и снова аналогичным путем получаем пару новых точек. Повторяем такой прием до тех пор, пока полученные точки не начнут совершенно от-

четливо обрисовывать окружность. Эта последняя может быть вычерчена с помощью одной из параллелей сетки Вульфа, кривизна которой соответствует искомому кругу. Для этого центр кальки сдвигается с центра сетки, и часть построенных точек совмещается путем наложения с параллелью, с помощью этих приемов вычерчивается требуемый малый круг. Решение задачи упрощается при наличии циркуля.

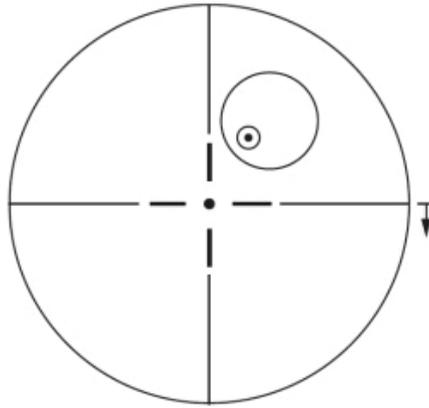


Рис. 12. Пример построения вокруг стереографического центра малого круга заданного радиуса к задаче 8

Поворотом кальки приводим заданную точку на горизонтальный диаметр сетки и отсчитываем вправо и влево от нее требуемый угол α . Взяв геометрическую середину найденного отрезка, принимаем ее за центр и вычерчиваем требуемый круг. Если исходная точка лежит слишком близко к кругу проекций — задача решается по трем точкам, из которых две берутся по соответствующему меридиану сетки. В частном случае, когда заданная точка лежит на внешнем круге проекций ($\rho = 90^\circ$), достаточно привести ее поворотом кальки на один из полюсов, изображенных на сетке Вульфа, отсчитать в любую сторону по кругу (или по любой вспомогательной меридиональной дуге сетки) требуемый угол и прочертить соответствующую параллель сетки. В случае совпадения заданной точки с центром проекций отсчитываем по обоим диаметрам сетки угловые расстояния α и по четырем найденным точкам строим искомую окружность. Построение малых кругов широко используется при решении задач, когда по двум заданным точкам и по углам между ними и третьей искомой точкой требуется изобразить эту последнюю (задача 10).

Задача 9

Даны измеренные на гониометре сферические координаты граней кристалла (табл. 6).

Таблица 6

Сферические координаты граней кристалла

| Грани | φ , град. | ρ , град. |
|-------|-------------------|----------------|
| 1 | - | 0 |
| 2 | 11 | 42 |
| 3 | 101 | 42 |
| 4 | 191 | 42 |
| 5 | 281 | 42 |
| 6 | 56 | 90 |
| 7 | 146 | 90 |
| 8 | 236 | 90 |
| 9 | 326 | 90 |

Требуется:

- изобразить гномостереографические и стереографические проекции всех граней (задачи 1 и 6);
- измерить углы между гранями (задачи 4 и 7);
- изобразить гномостереографические и стереографические проекции ребер (задачи 3 и 5);
- найти сферические координаты ребер и измерить углы между ребрами (задачи 2, 4 и 7).

Задача 10

Построить гномостереографическую проекцию кристалла по углам между нормальными к граням (именно такие углы измеряются на отражательном гониометре). Они легко находятся с помощью прикладного гониометра.

Даны углы между нормальными к граням (рис. 13):

$B : C = 83^\circ$, $B : P = 42^\circ$, $P : C = 72^\circ$, $P : Q = 54^\circ$, $B' : O = 58^\circ$, $B : B' = 180^\circ$, $C : O = 54^\circ$.

Решение

Для проектирования данного кристалла придаем ему такую пространственную ориентировку, при которой грани B , P , Q и B' становятся вертикальными и изобразятся на внешнем круге проекций. Проекцию одной из этих граней, например грани B , совместим с нулевым

индексом для ϕ . В соответствии с рисунком кристалла отсчитываем по часовой стрелке углы между нормальными к граням $B : P = 42^\circ$, $P : Q = 54^\circ$ и $B : B' = 180^\circ$.

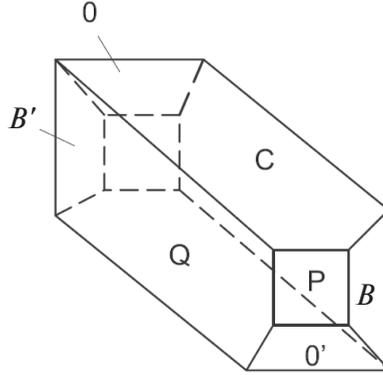


Рис. 13. Построение гномостереографической проекции кристалла по углам между нормальными к граням (к задаче 10)

Найденные на внешнем круге точки и будут проекциями этих вертикальных граней. Далее по углам $B : C = 83^\circ$ и $P : C = 72^\circ$ находим точку C . Для этого приводим сначала точку B в один из полюсов сетки Вульфа, отсчитываем по кругу проекций в любую сторону 83° и прочерчиваем соответствующую параллель сетки. Затем совмещаем с полюсом сетки точку P , отсчитываем 72° и снова прочерчиваем параллель сетки. На пересечении двух полученных параллелей и находится проекция грани C (задача 8). Для нахождения проекции грани O совмещаем точку B' с одним из изображенных полюсов сетки, отсчитываем 58° и рисуем параллель. Далее принимаем за стереографический центр точку C и строим малый круг, радиусом в 54° (задача 8). Этот круг пересекает параллель, вычерченную вокруг B' , в двух точках. В соответствии с рисунком принимаем за проекцию грани O , которая соответствует расположению грани на рисунке. Дополнительно необходимо:

- определить сферические координаты граней B, P, Q, B', C, O (задача 2);
- измерить угол между нормальными к граням C и O (задача 4);
- найти стереографические проекции ребер CB и CP и определить их сферические координаты (задачи 3, 5, 2);
- построить стереографическую проекцию грани O (задача 6).

7. Определение символов граней, ребер и простых форм

Закон рациональных отношений

Определение вида симметрии или даже наличие стереографической проекции кристалла не всегда дает нам однозначное представление о внешнем облике кристалла.

Для более точной характеристики кристалла определяют взаимное расположение его граней в пространстве по отношению к определенным координатным осям и некоторой исходной грани. Для определения грани применяются *кристаллографические символы*. Понятие о кристаллографических символах вытекает из *второго закона кристаллографии*, открытого в 1784 г. французским исследователем Р. Ж. Гаюи. Этот закон называется *законом рациональных отношений* или *законом параметров*, именуемым также *законом целых чисел*.

Закон рациональных отношений гласит: положение всякой грани может быть определено тремя целыми числами, если за оси координат выбраны направления трех ребер кристалла и за единицы измерения взяты отрезки, отсекаемые на этих осях одной из граней кристалла.

Нередко дается и другая формулировка данного закона: «двойные отношения параметров (отрезков), отсекаемых двумя любыми гранями кристалла на трех пересекающихся его ребрах, равны отношениям целых и сравнительно малых чисел» (Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1973. с. 249.).

Возьмем три непараллельных ребра кристалла, пересекающихся в точке O , и обозначим их OX , OY , OZ . Выбранные три ребра примем за координатные оси (рис. 14). Покажем три грани кристалла, пересекающие координатные оси: $k_1m_1n_1$, $k_2m_2n_2$ и $k_3m_3n_3$. Отрезки, отсекаемые этими гранями на осях, называются параметрами граней. Например, для грани $k_1m_1n_1$ параметрами являются Ok_1 , Om_1 и On_1 . Примем параметры этой грани за единицы измерения по соответствующим осям (Ok_1 — по оси X , Om_1 — по оси Y , On_1 — по оси Z). В этом случае параметры остальных граней кристалла будут *рациональными числами*. Выбранная грань называется *единичной гранью*, а ее параметры — *осевыми единицами*. Эти осевые единицы взяты за единицы измерения — единичные отрезки.

Следует иметь в виду, что эти параметры могут быть не равны друг другу (например, на рис. 14 у грани $k_1m_1n_1$ параметры $Ok_1 \neq Om_1 \neq On_1$).

Положение данной грани обозначается символом (111). Символ обозначает, что *грань отсекает по каждой оси по одной осевой единице*.

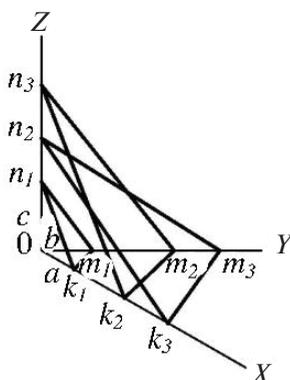


Рис. 14. Схема координатных осей, пересекаемых гранями кристалла

В кристаллографии принято так располагать кристаллографические оси: X на себя — положительное значение, от себя — отрицательное; Y вправо — положительное значение, налево — отрицательное; Z вверх — положительное значение, вниз — отрицательное. Осевые единицы обозначают по X — a , по Y — b , по Z — c .

Выбор единичной грани задаст масштаб по каждой оси. В нашем случае при выбранной единичной грани $k_1 m_1 n_1$ ее параметрами будут a, b, c . Положение грани $k_2 m_2 n_3$ определится параметрами $2a, 2b, 3c$, для грани $k_3 m_3 n_2$ — $3a, 3b, 2c$. Чтобы представить положение каждой грани в пространстве, следует знать (помимо направления осей), как параметры, задающие масштабы по разным осям, относятся друг к другу.

В общей форме отношение параметров любой грани можно выразить как $pa : gb : rc$, где p, g и r — целые числа.

Для каждого определяемого кристалла необходимо выбрать направление кристаллографических осей и одну из наклонных к ним граней в качестве единичной грани. Эту операцию называют *установкой кристалла*. Иногда при установке кристалла некоторые грани оказываются параллельными одной или двум координатным осям. В этом случае их параметры по данным осям будут равны бесконечности (∞).

Разобранный способ обозначения граней при помощи параметров предложен немецким ученым Х. Вейссом (1818). В 1839 г. английским ученым У. Миллером была рекомендована более удобная система обозначений. Вместо величин p, g и r он предложил брать обратные вели-

чины $1/p$, $1/g$, $1/r$. Отношение этих правильных дробей можно выразить и целыми числами $1/p : 1/g : 1/r = gr : pr : pg$. Эти три числа принято называть *индексами грани* и обозначать буквами латинского алфавита h , k , l . Заключенные в круглые скобки индексы составляют символ грани ($h k l$).

В большинстве случаев индексы граней представлены числами меньше 10. Индексы в круглых скобках не разделяются знаками препинания. Исключение делается, когда один из индексов равен или больше 10. При этом индексы отделяются точками, например $(10 \cdot 3 \cdot 2)$. Над индексами ставят знак $(-)$ минус в том случае, если грань отсекает соответствующий отрезок по отрицательному направлению оси. Принято следующее расположение индексов: по оси $X - h$, по оси $Y - k$, по оси $Z - l$. В таком порядке индексы пишутся в круглых скобках для обозначения символа грани.

Как перейти от параметров к индексам? Для единичной грани $k_1 m_1 n_1$ (рис. 14) индексы h , k , l равны единице, так как величины p , g , r равны единице (каждая). Следовательно, отношения $1/p$, $1/g$, $1/r$ также составляют единицу. Таким образом, символ грани $k_1 m_1 n_1$ будет (111) . Для грани $k_2 m_2 n_3$ (рис. 14) параметры составляют 2, 2 и 3. Индексы грани $k_2 m_2 n_3$ $1/2 : 1/2 : 1/3 = 3 : 3 : 2$. Отсюда символ этой грани (332) . Грань $k_3 m_3 n_2$ имеет индексы $1/3 : 1/3 : 1/2 = 2 : 2 : 3$ и символ ее (223) .

Если грань параллельна какой-либо кристаллографической оси, то индекс ее по этой оси будет равен нулю, так как $a/\infty = 0$. Если в кристалле у грани два индекса равны нулю, то третий всегда равен единице. Например, грань параллельна осям X и Y , а по оси Z отсекает две осевые единицы. Следовательно, параметры грани $\infty : \infty : 2$, а индексы $1/\infty : 1/\infty : 1/2 = 0 : 0 : 2$. Сократив на общий множитель (на 2), получим отношение индексов $0 : 0 : 1$. Символ грани будет (001) .

При описании кристаллов и определении символов получают для каждой простой формы или комбинации простых форм совокупность символов многих граней. Например, для куба символы всех его шести граней: (100) , (010) , (001) , $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$, $(00\bar{1})$. Принято для обозначения каждой простой формы брать символ одной из ее граней, для которой характерно наибольшее количество положительных индексов. Такие символы, условно относящиеся к той или иной простой форме, принято заключать в фигурные скобки. В нашем случае для куба, являющегося простой формой, вместо приведенных выше шести символов употребляют лишь один символ $\{100\}$.

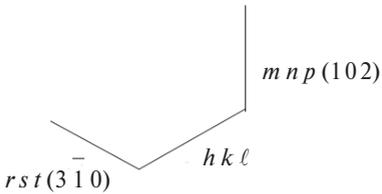
Для переменных форм: углы между гранями, которые мы не измеряли и пока не можем рассчитать, обозначаются буквами. Для постоянных форм: углы между гранями постоянные, символы выглядят следующим образом: грань ромбододекаэдра — $\{1\ 1\ 0\}$, грань кубического тетраэдра — $\{1\ 1\ 1\}$.

Для переменных форм: ромбическая призма — $\{h\ k\ 0\}$, ромбическая пирамида — $\{h\ k\ \ell\}$, ромбический тетраэдр — $\{h\ k\ \ell\}$. Символы ребер, в отличие от символов граней, определяются прямыми отношениями. Так, например, символ первой координатной оси или ребра, параллельного этой оси, определяется как $[1\ 0\ 0]$. Символ ребра, лежащего в плоскости первой и второй оси, но перпендикулярно третьей — $[1\ 1\ 0]$. Символ диагонали куба тогда определится как $[1\ 1\ 1]$. Символы ребер заключаются в квадратные скобки.

Если по теореме косинусов Г. В. Вульфа рассчитаны символы граней, то можно при помощи определенных методов определить символы других граней и ребер.

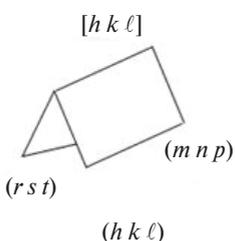
По закону Гольдшмидта: при наличии символов двух граней можно определить символ третьей грани, притупляющей ребро этих граней, принадлежащих одной зоне.

Символы одной грани $m\ n\ p$ — $(1\ 0\ 2)$, другой грани — $r\ s\ t$ — $(3\ \bar{1}\ 0)$. По закону Гольдшмидта символы неизвестной грани $h\ k\ \ell$ определяются как алгебраическая сумма двух известных граней:



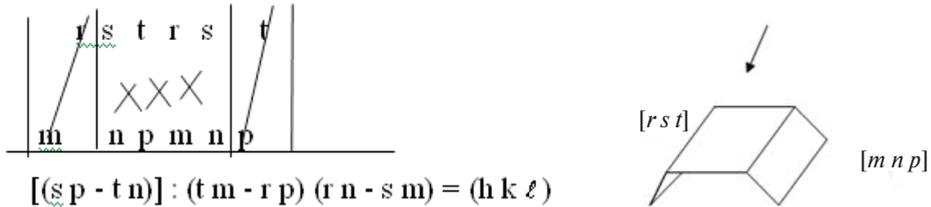
$$\begin{array}{r}
 m\ n\ p\ (102) \\
 +\ r\ s\ t\ (\bar{3}\ 1\ 0) \\
 \hline
 h\ k\ \ell\ (4\bar{1}\ 2)
 \end{array}$$

Способ Х. Вейсса заключается в том, что если имеется символ двух граней, можно определить символ ребра:



$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|}
 \hline
 r & s & t & r & s & t \\
 \hline
 \times & \times & \times & & & \\
 \hline
 m & n & p & m & n & p \\
 \hline
 \hline
 (s\ p - t\ n) : (t\ m - r\ p) : (r\ n - s\ m) = [h\ k\ \ell]
 \end{array}$$

Данный способ применим и к обратному варианту задачи: если известно два ребра, по их значениям можно определить символ граней, вмещающих эти ребра



8. Расчетно-графическая работа

.....

Цель выполнения расчетно-графической работы — научить студента практически проводить вычисление констант кристалла и символов его граней графическим методом. Графическое изображение кристалла на плоскости производится путем построения стереографической проекции. Кристалл помещают внутрь сферы, ко всем его граням проводят нормали до пересечения со сферой. Для нанесения проекций граней верхней половины кристалла выбирается точка зрения на южном полюсе сферы. Точки пересечения нормалей верхней половины сферы соединяют с южным полюсом. Точки пересечения линий соединения концов нормалей с экваториальной плоскостью и есть проекции граней верхней половины кристалла. Следует отметить, что горизонтальные грани, перпендикулярные оси Z , будут иметь нормали, пересекающие сферу на северном полюсе, и проекции в центре круга проекции. Вертикальные грани будут иметь нормали, лежащие в плоскости экватора, и их проекции будут лежать на круге проекций. Наклонные грани будут иметь проекции между центром и кругом проекции.

Для того чтобы нанести проекции граней нижней половины кристалла, необходимо перенести точку зрения с южного полюса на северный. Концы нормалей, пересекающие сферу, соединяются с полюсом, и точки пересечения линий с плоскостью проекции будут проекцией граней нижней половины кристалла. В отличие от проекций граней верхней половины кристалла, которые отмечаются кружочками, про-

екции нижней половины граней кристалла отмечаются на проекции крестиками. Это принцип построения стереографической проекции.

Последовательность построения стереографической проекции кристалла по данным измерений следующая:

- 1) измеряются углы между гранями кристалла на гониометре;
- 2) проекции граней наносятся на кальку, наложенную на сетку Вульфа, с учетом элементов симметрии кристаллов;
- 3) выбирается единичная или масштабная грань;
- 4) недостающие грани определяются методом пересечения зон по закону Х. Вейсса;
- 5) определяются углы между нормальными граней и соответствующими координатными осями;
- 6) по таблице тригонометрических величин определяются косинусы углов;
- 7) значения углов, косинусов искомой и единичной грани заносятся в таблицу, которая строится для каждого отдельного кристалла;
- 8) отношения косинусов искомой грани к косинусам единичной грани заносятся в таблицу, которая строится для каждого заданного кристалла;
- 9) общий знаменатель выносится за скобки и отбрасывается, при этом учитывается, что определение углов на стереографической сетке производится с точностью до 1° ;
- 10) все данные заносятся в таблицу (см. «Расчет символов граней кристалла форстерита», табл. 7.)

8.1. Примеры выполнения расчетно-графической работы для моделей низшей категории

РОМБИЧЕСКАЯ СИНГОНΙΑ

Пример 1. Форстерит Mg_2SiO_4 (рис. 15).

По модели или по рисункам определяем симметрию. Находим три взаимно перпендикулярные оси второго порядка, три плоскости симметрии и центр инверсии: $3L_23PC$.

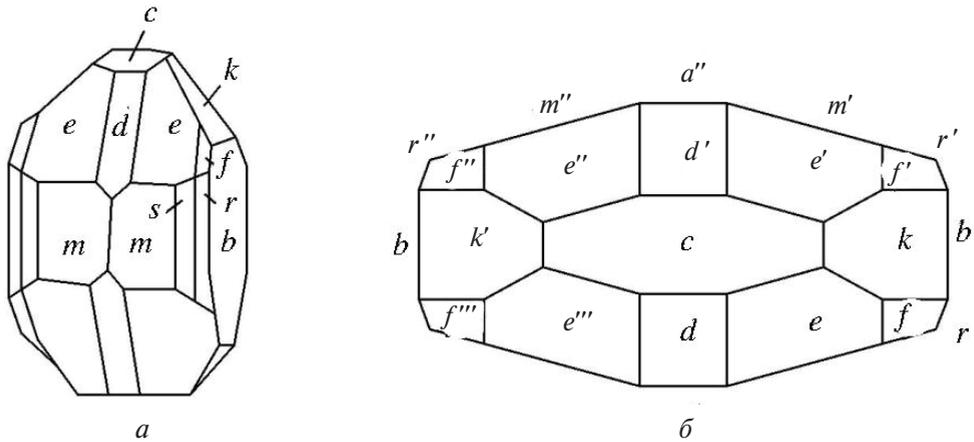


Рис. 15. Кристалл форстерита

Модель кристалла форстерита состоит из десяти простых форм: три пинакоида, пять ромбических призм и две ромбические дипирамиды. Обозначим грани буквами. Грани одной и той же простой формы обозначаются одной и той же буквой. Принято грани юго-восточного сектора обозначать буквами без значков, например m . В северо-восточном секторе над буквой справа ставится значок $'$, например m' ; в северо-западном — два значка и в юго-западном — три, соответственно m'' , m''' .

Выбираем установку кристалла: три оси второго порядка берем за оси координат. За единичную следует брать грань, пересекающую все три оси под косыми углами. Таких граней две: e и f (рис. 15, a). Выбираем e за единичную, так как полюс ее нормали будет лежать ближе к центру, чем полюс грани f .

Какие из осей второго порядка выбрать за X , Y и Z ? Поставим кристалл так, чтобы на основной круг проекции попадало возможно большее число полюсов. Для этого за вертикальную ось выбираем ту, которая перпендикулярна к грани c . За Y возьмем ось, нормальную к граням b и b' , а за X — последнюю ось второго порядка, нормальную к граням a и a' .

Лист кальки размером около 23×24 см кладем на сетку и делаем центральную и боковую отметки (рис. 16).

Вращаем кальку до тех пор, пока точки (отметки) не окажутся на одном и том же меридиане. Вращение надо делать совершенно свободно, не придерживая кальку в центре сетки и не скрепляя их булавкой или кнопкой. Когда точки окажутся приведенными на один мериди-

ан, следует проверить, совпадает ли центральная отметка с центром сетки. Если нет, то меридиан найден неверно; тогда точно совмещают центры, отыскивают истинный меридиан и вновь проверяют центры. Иногда точки не укладываются ни на один из имеющихся на сетке кругов. Надо всегда помнить, что на сетке проведены лишь четные круги и между ними надо представить остальные с расстояниями примерно в $0,5^\circ$. Если точки не попадают на готовый круг, их надо помещать на одинаковые от него угловые расстояния, т. е. на один и тот же воображаемый меридиан.

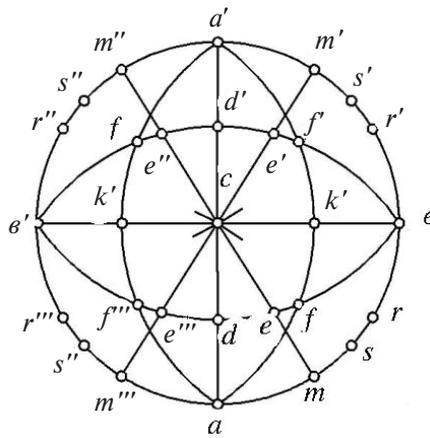


Рис. 16. Проекция граней кристалла форстерита

В первую очередь наносим полюсы тех граней, которые могут быть нанесены без всяких углов — это грани трех пинакоидов: c будет лежать в центре, a и b — на основном круге проекции в точках пересечения с ним вертикального и горизонтального диаметров сетки.

Даны следующие углы: $mm'' = 49^\circ 51'$, $ss' = 94^\circ 11'$, $rr' = 71^\circ 18'$, $ce = 54^\circ 15'$ и $ff'' = 72^\circ 07'$. Угол mm'' нам известен, и вертикальная плоскость симметрии делит этот угол пополам. Теперь можно нанести полюсы всех четырех граней m . Следовательно, разделив $49^\circ 51'$ на 2, получим половинный угол, округляя его до 25° , отложим его от точки a вправо и влево по основному кругу и наметим полюсы mm'' . Так же находим m' и m'' .

Аналогичным построением, используя данные углов $ss' = 94^\circ 11'$, $rr' = 71^\circ 18'$, отсчитываем по основному кругу от точек b и b' половинные углы, т. е. 47° и 35° делим на 2, находим полюсы граней простых форм s и r .

Из рис. 15, б видим, что ребра между гранями m , e , c , e'' , m'' параллельны, следовательно, все эти грани лежат в одном поясе. Полюсы четырех граней m и грани c уже нанесены на проекцию, поэтому мы можем начертить оба пояса: mcm'' и $m'''cm''$. Точно так же мы можем провести пояса $bc'b'$ и aca' , т. к. нам известно по три точки для каждого из этих поясов.

Теперь на поясе mcm'' можно найти проекцию грани e , т. к. нам дан угол $ce = 54^\circ 15'$. Поворачиваем кальку так, чтобы полюсы граней m и m'' совместились соответственно с нижним и верхним концами вертикального диаметра. Точка c должна при этом попасть в центр сетки. Отсчитывая по 54° (1/4 вверх и вниз от точки c), находим полюсы граней e'' и e . Прделав такую же работу с поясом $m'''cm''$, находим проекции граней e''' и e' .

Все данные в задаче углы нами использованы, кроме угла $ff''' = 72^\circ 07'$. Как применить этот угол для нахождения проекций граней простой формы? Рассмотрим рис. 15, б — ортогональную проекцию форстерита: видим, что ребра между гранями b , f , e , d , e'' , f''' , b' параллельны, следовательно, все эти грани лежат в одном поясе. Проводим его, положив кальку так, чтобы точки b и b' совпали с концами вертикального диаметра, и наносим этот пояс, а также пояс $bf'd'e''f'''b'$. Надо помнить, что пояса проектируются в виде больших кругов и чертить их можно только по меридианам, а не по параллельным кругам сетки.

Теперь можем нанести проекции всех четырех граней формы f . Дан угол $ff''' = 72^\circ 07'$. Мы видим, что плоскость симметрии, совпадающая при данном положении кальки с горизонтальным диаметром сетки, делит этот угол пополам. Отложим на проведенных поясах от горизонтального диаметра по половине угла $72^\circ 07'$, т. е. по 36° , найдем все четыре точки f' . Точки пересечения проведенных поясов с горизонтальным диаметром дадут проекции граней d и d' , так как они лежат в точках пересечения поясов $bfede''f'''b'$ и $adcd'a'$.

Нахождение проекций граней при помощи точек пересечения поясов является очень удобным и часто применяемым способом. Таким образом, можем найти проекции граней ромбической призмы k . Из ортогональной проекции видно, что k лежит в точке пересечения $bkck'b'$ и fkf' . Проводим пояс ff' , найдем в точке его пересечения с горизонтальным диаметром (калька повернута в начальное положение) точку k и соответственно с левой стороны k' после проведения пояса $f'''f''$.

Построение проекции форстерита закончено, можем приступить к графическому вычислению констант кристалла и символов его граней. Наметим точки выхода осей координат на проекции. В точках a и a' будет выходить ось X ; в a — ее положительный конец, в a' — отрицательный (соответственно в b и b' будут выходить $+Y$ и $-Y$; в точке c будет выходить $+Z$). Углы между этими точками дадут осевые углы: $+Z - Y = \alpha$, $+Z - X = \beta$, $+X - Y =$ угол γ . В нашем случае все они равны 90° , как и полагается для кристалла ромбической сингонии. Единичная грань e дает возможность вычислить отношение $a : b : c$. Измеряем по дугам больших кругов, т. е. по меридианам сетки углы $e + X$, $e + Y$ и $e + Z$. Для этого ставим в южный полюс сетки $+X$ и, отсчитав дугу до e , получим $42^\circ 30'$. Проводим в южный полюс точку $+Y$, получим $e + Y = 70^\circ$. Для того чтобы измерить угол $e + Z$, приводим e на один из диаметров сетки и по нему отсчитываем $e + Z = 54^\circ 15'$. Этот угол можно было бы и не измерять, т. к. он входит в число данных в задаче. Теперь на основании формулы: $a : b : c = \cos P_{oy} / \cos P_{ox} : 1 : \cos P_{oy} / \cos P_{oz}$ можем написать $a : b : c = 1 / \cos ex : 1 / \cos ey : 1 / \cos ez$.

Поскольку отношение по оси Y принято приравнять к единице, получим: $a : 1 : c = \cos ey / \cos ex : 1 : \cos ey / \cos ez = \cos 70^\circ / \cos 42^\circ 30' : 1 : \cos 70^\circ / \cos 54^\circ 15'$.

Находим в таблицах Брадиса соответствующие значения косинусов.

Отношения осевых единиц для минералов приводятся до четвертого знака; данные, получаемые при измерении кристаллов на гониометре, не дают возможность получить более точные величины. Расхождения в вышеприведенных цифрах, взятых из надежных справочников, является характерным тому примером.

Геометрические константы форстерита получены, остается вычислить символы граней его простых форм. Для этого измеряем углы между полюсами всех граней и точками выхода осей координат на проекции. Заполняем первые три столбца табл. 8. Для каждой простой формы, входящей в комбинацию, достаточно найти символ одной из ее граней, так как для остальных граней этой простой формы символы будут состоять из тех же индексов. Изменяться будут только знаки и порядок расстановки индексов.

Формула $h : k : l = \cos P_{1x} / \cos P_{0x} : \cos P_{1y} / \cos P_{0y} : \cos P_{1z} / \cos P_{0z}$ показывает, что для определения символа грани надо:

- 1) измерить углы, образуемые ее нормалью с тремя направлениями, выбранными за кристаллографические оси;

2) косинусы этих углов разделить на косинусы соответствующих углов той грани, которая выбрана за единичную.

Индексы символа при обозначении грани или простой формы пишутся подряд и берутся в круглые скобки. При этом на первое место ставится индекс по оси X , на второе — индекс по оси Y и на третье — индекс по оси Z .

Таблица 7

Вычисление символов граней форстерита

| Грани | Углы с осями | | | Косинусы углов | | | Частные $\frac{\cos P}{\cos (111)}$ | | | Символы грани |
|-----------------|--------------|--------|--------|----------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|---------------|
| | + X | + Y | + Z | + X | + Y | + Z | + X | + Y | + Z | |
| <i>a</i> | 0° | 90° | 90° | 1 | 0 | 0 | — | — | — | (100) |
| <i>b</i> | 90° | 0° | 90° | 0 | 1 | 0 | — | — | — | (010) |
| <i>c</i> | 90° | 90° | 0° | 0 | 0 | 1 | — | — | — | (001) |
| <i>m</i> | 25° | 65° | 90° | 0,906 | 0,423 | 0 | 1,1 | 1,2 | 0 | (110) |
| <i>s</i> | 43° | 47° | 90° | 0,731 | 0,682 | 0 | 1 | 2 | 0 | (120) |
| <i>r</i> | 54°30' | 35°30' | 90° | 0,581 | 0,814 | 0 | 0,8 | 2,4 | 0 | (130) |
| <i>d</i> | 39° | 90° | 51° | 0,777 | 0 | 0,629 | 1 | 0 | 1,1 | (101) |
| <i>k</i> | 90° | 40°30' | 49°30' | 0 | 0,760 | 0,649 | 0 | 2,2 | 1,1 | (021) |
| <i>e</i> | 42°30' | 70° | 54°15' | 0,737 | 0,342 | 0,584 | 1 | 1 | 1 | (111) |
| <i>f</i> | 51° | 54°30' | 60° | 0,629 | 0,581 | 0,500 | 0,9 | 1,7 | 0,9 | (121) |

Для нахождения индекса грани по данной оси следует косинус угла, который составляет нормаль к этой грани с этой осью, разделить на косинус такого же угла для единичной грани.

Выписываем косинусы всех измеренных нами углов и составляем 5—7 столбцы в табл. 7. Затем производим указанное в формуле деление и получаем столбцы 8—10. Деление достаточно вести до первого знака, в редких случаях до второго. Отношения полученных дробей (правильных и неправильных) приводим к отношению целых чисел. Так как мы делали вычисление графически, полученные нами цифры являются приближенными, но индексы всегда должны быть целыми числами. Например, для грани ромбической призмы ***m*** мы получили 1,1 : 1,2 : 0; первые две цифры можно считать равными и написать символ (110). Для ромбической дипирамиды ***f*** имеем 0,9 : 1,7 : 0,9; можно считать, что 0,9 в два раза меньше 1,7, и поэтому символ этой формы будет (121).

Для тех граней, у которых в таблице косинусов имеются два нуля, например 1 : 0 : 0, никакого деления на косинус единичной грани де-

лать не надо, а сразу написать символ $\{100\}$. Если произвести указанное деление, то в столбцах 8–10 для формы a получим $1,3 : 0 : 0$. Для того чтобы это отношение привести к отношению целых чисел, все три члена отношения нужно разделить на 1,3 и получить $1 : 0 : 0$. Следовательно, для таких граней, как a , b , c , никакого деления на косинусы единичной грани делать не надо.

Суммируем результаты нашей работы в виде следующей характеристики минерала форстерита (Mg_2SiO_4):

- 1) $3L_23PC$;
- 2) низшая категория, ромбическая сингония, планаксиальный вид;
- 3) отношение осевых единиц $a : b : c = 0,4649 : 1 : 0,5854$;
- 4) простые формы:
 - a*) пинакоид $\{100\}$;
 - b*) пинакоид $\{010\}$;
 - c*) пинакоид $\{001\}$;
 - m*) ромбическая призма $\{110\}$;
 - s*) ромбическая призма $\{120\}$;
 - r*) ромбическая призма $\{130\}$;
 - d*) ромбическая призма $\{101\}$;
 - k*) ромбическая призма $\{021\}$;
 - e*) ромбическая дипирамида $\{111\}$;
 - f*) ромбическая дипирамида $\{121\}$.

Расставляем на стереографической проекции символы всех граней. Все значения заносим в таблицу.

МОНОКЛИННАЯ СИНГОНИЯ

Пример 2. Ортоклаз $KAlSi_3O_8$ (рис. 17)

По модели или рисунку определяем симметрию: плоскость симметрии, ось второго порядка и центр инверсии. Кристалл относится к низшей категории, моноклинной сингонии, планаксиальному виду L_2PC .

Простые формы: b — пинакоид; c — пинакоид; x — пинакоид; y — пинакоид; m — ромбическая призма; n — ромбическая призма; o — ромбическая призма.

Лист кальки кладем на стереографическую сетку. Намечаем центр и обводим по сетке основной круг проекции (рис. 18). Ориентируем

Сделав такой же отсчет влево, найдем m''' . От верхнего полюса строим m' и m'' .

При работе с 10-сантиметровой сеткой для получения более точных отсчетов рекомендуется пользоваться лупой с увеличением в 4–6 раз.

Теперь весь вертикальный пояс нанесен, что дает нам опорные пункты для дальнейшего проектирования. Обычно все грани на кристалле расположены по поясам или зонам. **Поясом** называется совокупность граней, пересекающихся по параллельным ребрам. Направление ребер, проведенное через начало координат, называется **осью пояса**. При этом всегда надо помнить:

- 1) пояс изображается на стереографической проекции в виде большого круга;
- 2) как всякий большой круг на шаре, пояс определяется двумя точками при условии, что эти точки не представляют концов одного и того же диаметра;
- 3) полюсы пояса или выходы его оси являются полюсами большого круга, изображающего этот пояс на проекции;
- 4) если какая-либо грань принадлежит одновременно двум различным поясам, то проекция этой грани определяется точкой пересечения данных поясов.

Какие зоны или пояса наблюдаются на примере ортоклаза? Ищем на рисунках параллельные ребра и находим несколько поясов: $сху$, $bnсn'b'$, $вохо'b'$ и т. д. Выбираем тот из них, который проще всего связывается с нанесенными уже точками. Это будет пояс $сху$; ось его совпадает с осью L_2 , полюсы будут лежать в точках b и b' . Следовательно, нормали к граням данного пояса должны лежать в плоскости симметрии, проекции их попадут на диаметр, изображающий эту плоскость. Этот же диаметр будет проекцией пояса $сху$.

Положение всякой точки на сфере определяется пересечением двух дуг. Одна дуга (изображенная на проекции диаметром) у нас есть. Для построения каждой из точек $сх$ и $у$ нам надо иметь еще одну дугу. Они даны углами mc , $сх$, $су$. Сначала мы должны найти грань $с$. Если дан угол $mc = 67^\circ 47'$, значит точка $с$ лежит на малом круге, проведенном из m , радиус которого равен $67^\circ 47'$.

Построение малых кругов значительно облегчается тем, что точка m лежит на основном круге проекции. Приведем ее в полюс сетки и отсчитав $67^\circ 47'$, обведем часть соответствующей параллели до встречи с диаметром. Точка пересечения будет искомой проекци-

ей грани c . От нее нетрудно найти x и y , так как угловые расстояния их от c нам известны; кроме того, мы знаем, что они лежат на проведенном уже диаметре. Отсчитываем от c вверх 50 и 80° и отмечаем точки x и y . Теперь закончен второй пояс, перпендикулярный первому ($mbm'm'$ и т. д.).

Найденные точки дают возможность провести несколько новых поясов и воспользоваться ими для нанесения оставшихся граней n и o . Проведя большой круг через точки b, c, b' , нанесем пояс, в котором лежит грань n (рис. 18); зная расстояние от n до c из таблицы углов, легко найдем проекции граней n и n' . Проводим b и b' в полюсы сетки и наносим круг bcb' по меридиану. Затем отсчитываем от точки c 45° и отмечаем положение найденной таким образом грани. Симметрично наносим n' . Для нахождения проекции грани o делаем построение, аналогичное предыдущему. Грань o лежит в поясе $boxo'b'$; проводим опять b и b' в полюсы сетки и наносим меридиан, проходящий через точку x . Затем от x отсчитываем вверх и вниз 27° и находим o и o' .

Теперь нанесены все грани и задача проектирования закончена. Остается сделать проверку начерченной проекции. На кристалле имеются пояса, которыми мы не пользовались при построении и поэтому их не нанесли. Если теперь проведем некоторые из этих поясов и увидим, что нанесенные точки расположены на них и в точках их пересечения, то проекция построена верно.

Приводим m и m'' в полюсы сетки. Проекции граней c и o должны оказаться на одном меридиане; равным образом точки n, o, y должны попасть на другой. Наносим эти пояса на проекцию и приводим в полюсы сетки грани m''' и m' . Теперь наносим пояса $m'''n'o'ym'$ и $m'''com'$. Если около точек coo' и y не получается треугольников от пересечения начерченных дуг, то проекция сделана верно; если такие треугольники имеются, то где-нибудь есть ошибки в отсчетах.

Рассмотрим теперь, каким образом можно определить константы элементарного параллелепипеда решетки, исходя из построенной нами стереографической проекции кристалла.

Следует взять три ряда решетки, которые будут служить ребрами параллелепипеда.

Надо найти грань, пересекающую эти три ряда. Отрезки, которые эта грань отсечет на рядах, дадут возможность построить параллелепипед. Это и будет единичная грань.

В данном примере выбираем за оси координат следующие направления: за ось X направление ребер пояса $bncn'b'$, за ось Y — L_2 , т. е. направление ребер пояса cxu , и за ось Z — направление ребер пояса $mbm'm''$.

За ось координат берем направление ребра, т. е. берем направление в решетке, параллельное этому ребру и, следовательно, всем ребрам определенного пояса. Это направление и будет осью пояса, оно будет выходить в полюсе того большого круга, который соответствует данному поясу на проекции.

Таким образом, чтобы найти на проекции направление оси какого-либо пояса (или серии параллельных ребер на кристалле), нужно взять полюс того большого круга, который изображает этот пояс на проекции. В данном случае (в ортоклазе) ось X проектируется в полюсе пояса $bncn'b'$, ось Y — в полюсе пояса cxu и ось Z — в полюсе пояса $mbm'm''$, т. е. в центре основного круга. Положительным направлением считается: для оси X — к наблюдателю, для оси Y — вправо и для оси Z — вверх. Следовательно, на рис. 18 мы имеем $+Z$, $+Y$ и $-X$, положительный конец оси X оказался под плоскостью проекции и попал в нижнее полушарие.

Зная точки выхода осей, можно легко измерить осевые углы, т. е. углы между ребрами параллелепипеда, приводя эти точки на один меридиан. Прюделав это, получим угол $+Z + Y = \alpha = 90^\circ$; угол $+Z - X = 64^\circ$, следовательно, угол $+Z + X = \beta = 180 - 64 = 116^\circ$ и угол $+X + Y = \gamma = 90^\circ$.

Определим относительную величину ребер параллелепипеда. Для этого сначала выберем единичную грань, которая из нанесенных на проекцию граней пересекает все три оси координат под косыми углами — это грань o . Измерив углы между ее проекцией (o) и точками выхода осей, получим 133 , 63 и 36° ; взяв косинусы этих углов и подставив в приведенную формулу, получим:

$$OA : OB : OC = a : b : c = 1/0,682 : 1/0,454 : 1/0,809$$

$$\text{или } a : b : c = 0,454/0,682 : 1 : 0,454/0,809 = 0,6658 : 1 : 0,5613.$$

Это значит, что если за ребро b взять, например, 10 см, то ребра a и c будут равны (округлыми) $6,7$ и $5,6$ см, т. е. теперь можем построить искомый параллелепипед, т. к. знаем все его элементы.

Переходим к определению символов граней кристалла.

Из формул $h : k : l = \cos P_{1x}/\cos P_0 : \cos P_{1y}/\cos P_0 : \cos P_{1z}/\cos P_0$.

Необходимо знать косинусы углов, которые нормали к граням образуют с точками выхода кристаллографических осей X , Y и Z на проекции. Эти углы легко измерить при помощи сетки Вульфа, приводя полюс грани и точку выхода оси на один меридиан. Результаты измерения заносим в табл. 8.

Таблица 8

Вычисление символов граней ортоклаза

| Грани | Углы с осями | | | Косинусы углов | | | Частные $\cos P/\cos (111)$ | | | Символы грани |
|----------|--------------|-----|-----|----------------|-------|-------|-----------------------------|------|------|-----------------|
| | +X | +Y | +Z | +X | +Y | +Z | +X | +Y | +Z | |
| <i>b</i> | 90° | 0° | 90° | 0 | 1 | 0 | — | — | — | (010) |
| <i>c</i> | 90° | 90° | 26° | 0 | 0 | 0,899 | — | — | — | (001) |
| <i>m</i> | 39° | 59° | 90° | 0,777 | 0,515 | 0 | 1,14 | 1,13 | 0 | (110) |
| <i>n</i> | 90° | 45° | 50° | 0 | 0,707 | 0,643 | 0 | 1,56 | 0,79 | (021) |
| <i>o</i> | 133° | 63° | 36° | -0,682 | 0,454 | 0,809 | -1 | 1 | 1 | ($\bar{1}11$) |
| <i>x</i> | 141° | 90° | 24° | -0,777 | 0 | 0,914 | -1,14 | 0 | 1,13 | ($\bar{1}01$) |
| <i>y</i> | 171° | 90° | 54° | -0,988 | 0 | 0,588 | -1,45 | 0 | 0,73 | ($\bar{2}01$) |

В столбце 1 табл. 9 пишем буквенные обозначения граней. В столбцах 2, 3 и 4 располагаем соответствующие углы с осями +X, +Y и +Z. В столбцах 5, 6 и 7 выписываем косинусы измеренных углов. Зная эти косинусы, составляем в таблице «Вычисление символов граней ортоклаза» столбцы 8, 9 и 10. При этом принимаем в расчет знак делимого (например, для косинусов граней *o*, *x* и *y*), как в делителе берем только абсолютную величину косинуса единичной грани. Знак минус здесь не принимается во внимание, т. к. отрезки, отсекаемые единичной гранью, определяют масштабы по осям и как единицы меры не имеют знака.

Дробные отношения заменяем отношением целых чисел, делая при этом соответствующие сокращения. Например, для грани *m* имеем 1,14; 1,13 и 0. Первые два значения можем принять за равные и, разделив их одно на другое, получим 110 — это и будет символ грани, если его написать в виде (110). Возьмем еще пример. Для грани *y* имеем 1,45; 0; 0,73. Можем считать, что 0,73 по абсолютному значению вдвое меньше 1,45. Разделив все три величины на 0,73, получим 2, 0, 1 — символ ($\bar{2}01$). Таким образом, составляем последний столбец таблицы 2.

Здесь для символов ребер принято заключать индексы в квадратные скобки, например [100]. Фигурные скобки означают символ всей про-

стой формы. Если в нашем примере для m поставить $\{110\}$, то это будет обозначать всю простую форму — ромбическую призму, состоящую из граней (110) , $(\bar{1}10)$, $(1\bar{1}0)$ и $(\bar{1}\bar{1}0)$. Знак минус ($\bar{}$) ставится в символе над соответствующим индексом; он показывает, что грань пересекает отрицательное направление оси (как на взятом примере грани o , x и y пересекают ось X). Вписываем найденные индексы в соответствующих местах на проекции.

ТРИКЛИННАЯ СИНГОНΙΑ

Пример 3. Борная кислота $B(OH)_3$ (рис. 19).

Даны углы: $bm = 59^\circ 00'$; $mM = 61^\circ 30'$; $cm = 80^\circ 33'$; $cs = 43^\circ 14'$; $cv = 41^\circ 06'$; $cM = 95^\circ 03'$.

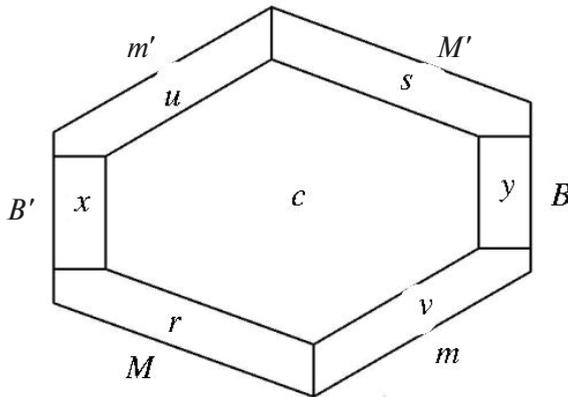


Рис. 19. Кристалл борной кислоты (вид сверху)

Из рис. 19 определяем, что кристалл принадлежит к низшей категории, триклинной сингонии, центральному виду C .

Ставим пояс $Mmb\dots$ вертикально (рис. 20); помещаем b и b' по концам экватора, как делали в предыдущем примере.

Грани m и M наносятся легко по имеющимся углам. От них находим полюс грани c двумя засечками ($80^\circ 30'$ и 95°).

Проводим пояса mcm' и McM' . На них находим s и v по их углам с гранью c . Все данные исчерпаны, осталось нанести целый ряд граней — x , y , u , r . Нам должны помочь имеющиеся пояса.

Проводим пояса bcb' и vs — в точке их пересечения лежит полюс грани y .

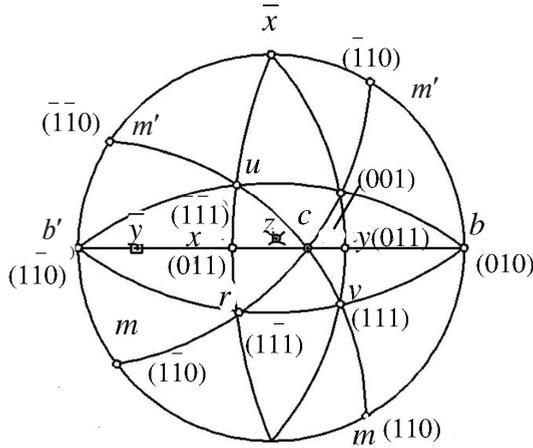


Рис. 20. Проекция граней кристалла борной кислоты

Проводим пояс bsb' . В точке пересечения его с поясом mcm лежит полюс грани u ; проведя bvb' , найдем r в точке пересечения этого пояса с McM' .

Пояс ur в пересечении с $bc b'$ даст полюс грани x . Таким образом, используя каждую вновь получаемую грань, мы дошли до конца задачи.

За кристаллографические оси возьмем направления ребер следующих поясов: для оси X — ось пояса $b'xcyb$, для оси Y — ось пояса, проходящего через c и опирающегося на точки пересечения поясов yus и rxu с основным кругом. В этих точках должны лежать грани пинакоида (100) , который на кристаллах борной кислоты не наблюдается; для оси Z — ось пояса $Mmb...$, она выходит в центре проекции.

Наносим точки выходов осей координат. Для X и Y имеем отрицательные концы. Измеряем осевые углы: $\alpha = 104^\circ$; $\beta = 93^\circ$; $\gamma = 89^\circ 20'$.

Сравним с величинами, полученными вычислением: $\alpha = 104^\circ 17'$; $\beta = 92^\circ 34'$; $\gamma = 89^\circ 42'$.

За единичную грань принимаем v . Результаты графического вычисления приведены в табл. 9, $a : 1 : c = 0,326/0,580 : 1 : 0,326/0,620 = 0,561 : 1 : 0,528$.

Таблица 9

Вычисление символов граней борной кислоты

| Грани | Углы с осями | | | Косинусы углов | | | Частные $\cos P/\cos (111)$ | | | Символы грани |
|-------|--------------|----------------|------------|----------------|-------|-------|-----------------------------|-----|-----|---------------|
| | + X | + Y | + Z | + X | + Y | + Z | + X | + Y | + Z | |
| c | 90° | 90° | 15° | 0 | 0 | 0,966 | — | — | — | (001) |
| b | 90° | $14^\circ 15'$ | 90° | 0 | 0,970 | 0 | — | — | — | (010) |

Окончание табл. 9

| Гра- ни | Углы с осями | | | Косинусы углов | | | Частные cos P/cos (111) | | | Сим- волы грани |
|------------|--------------|--------|--------|----------------|--------|-------|----------------------------|------|-----|--------------------------|
| | + X | + Y | + Z | + X | + Y | + Z | + X | + Y | + Z | |
| <i>m</i> | 31° | 60° | 90° | 0,857 | 0,500 | 0 | 1,5 | 1,5 | 0 | (110) |
| <i>M</i> | 30°40' | 120° | 90° | 0,860 | -0,500 | 0 | 1,5 | -1,5 | 0 | (1 $\bar{1}$ 0) |
| <i>y</i> | 90° | 65°15' | 38°45' | 0 | 0,412 | 0,781 | 0 | 1,3 | 1,3 | (011) |
| <i>x</i> | 90° | 121° | 17°45' | 0 | -0,515 | 0,953 | 0 | -1,6 | 1,5 | (1 $\bar{1}$ 0) |
| <i>v</i> | 54°30' | 71° | 51°45' | 0,580 | 0,326 | 0,620 | 1 | 1 | 1 | (111) |
| <i>s</i> | 127° | 71° | 50°45' | -0,660 | 0,326 | 0,636 | -1,1 | 1 | 1 | ($\bar{1}$ 11) |
| <i>r</i> | 50° | 112° | 46° | 0,642 | -0,375 | 0,696 | 1,1 | -1,2 | 1,1 | (1 $\bar{1}$ 0) |
| <i>u</i> | 130°30' | 114° | 43° | -0,649 | -0,407 | 0,732 | -1,1 | -1,2 | 1,2 | ($\bar{1}$ $\bar{1}$ 1) |

Вычисленные значения: $-0,577: 1: 0,528$.

Во всех разобранных примерах мы не испытали затруднений при определении отношения $a : b : c$ и символов граней потому, что всегда имелась грань, пересекающая все три оси X , Y и Z , которую можно было взять за единичную. На практике часто случается, что ни одна грань измеренного кристалла (при определенной установке) не будет удовлетворять этому условию. Рассмотрим несколько вариантов.

1. Есть две грани, которые пересекают попарно все три оси, например, одна пересекает X и Y , другая Y и Z . Приняв первую за (110), определяем $a : b$ из второй, принятой за (011), находим $b : c$. Приравнявая эти отношения, получим искомое $a : b : c$.

При графическом вычислении можно решить эту задачу следующим образом. Проводим дуги (001) — (110) и (100) — (011). В точке пересечения этих дуг найдем место отсутствующей на кристалле грани (111).

2. Имеется одна грань, пересекающая две оси. В общем случае задачу решить нельзя; можно определить лишь одно из отношений $a : b$, $b : c$ или $a : c$. В частных случаях полное вычисление кристалла возможно, а именно:

- 1) когда кристалл принадлежит к одной из средних сингоний и грань пересекает ось Z и одну из двух других;
- 2) когда кристалл принадлежит к кубической сингонии, в этом случае неважно, какие две оси пересекают грань.

3. Нет граней, пересекающих оси попарно. Это может быть в том случае, когда на кристалле имеется всего три пары параллельных гра-

ней (или четыре в случае гексагонального облика). Задачу решить нельзя. Можно, приписав граням символы (100), (010) и (001), измерить осевые углы, но $a : b : c$ определить невозможно.

8.2. Примеры выполнения расчетно-графической работы для моделей средней категории

ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ СИНГОНΙΑ

В тетрагональной сингонии мы имеем три оси. За Z берется L_4 . За X и Y оси второго порядка, нормали к плоскостям симметрии или направления действительных или возможных ребер (взаимно перпендикулярных, а также перпендикулярных к главной оси).

ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ И ТРИГОНАЛЬНАЯ СИНГОНИИ

Во всех видах гексагональных и тригональных сингоний есть одна ось высшего порядка, ее всегда берут за вертикальную ось Z . Если есть оси второго порядка (всегда перпендикулярные к главной), то они берутся за три остальные оси, которые в этих сингониях называются X , Y и U . Если таких сингоний нет, то есть плоскости симметрии, параллельные главной оси (например, в видах L_66PL_33P), то за X , Y и U берут три нормали к этим плоскостям. Наконец, в видах, где нет ни осей L_2 , ни плоскостей, параллельных главной оси (например L_6 , L_6PC , L_3 , L_3P), за оси X , Y и U берутся направления трех действительных или возможных ребер, удовлетворяющие поставленному условию (углы 120°), т. е. тому, что угол $\gamma = 120^\circ$ считается между одноименными выходами осей (плюс или минус).

Пример

Кристалл гринокита (CdS) (рис. 21). Определяем элементы симметрии: одна ось шестого порядка и шесть пересекающихся по ней плоскостей симметрии (L_66P). Осей второго порядка нет, следовательно, за X , Y и U придется брать нормали к плоскостям симметрии. Поскольку плоскостей симметрии шесть, то возможны две различные установки. Сначала возьмем ту, при которой ось Y является осью пояса $mzxc$ и т. д.

Разберем еще один вариант установки кристалла: за X , Y и U возьмем нормали к граням простой формы m , т. е. нормали к трем другим плоскостям симметрии кристалла гринокита. В таком случае точка выхода оси X будет совпадать с полюсом грани m' на проекции, Y будет совпадать с полюсом грани m'' и U — с полюсом грани m''' . За единичную возьмем грань гексагональной пирамиды x (рис. 23). При этой установке ее символ будет (1121) . Другие грани получают следующие символы: m (1120) , z (2241) , i (1122) , c (0001) , k (1121) , y (0001) .

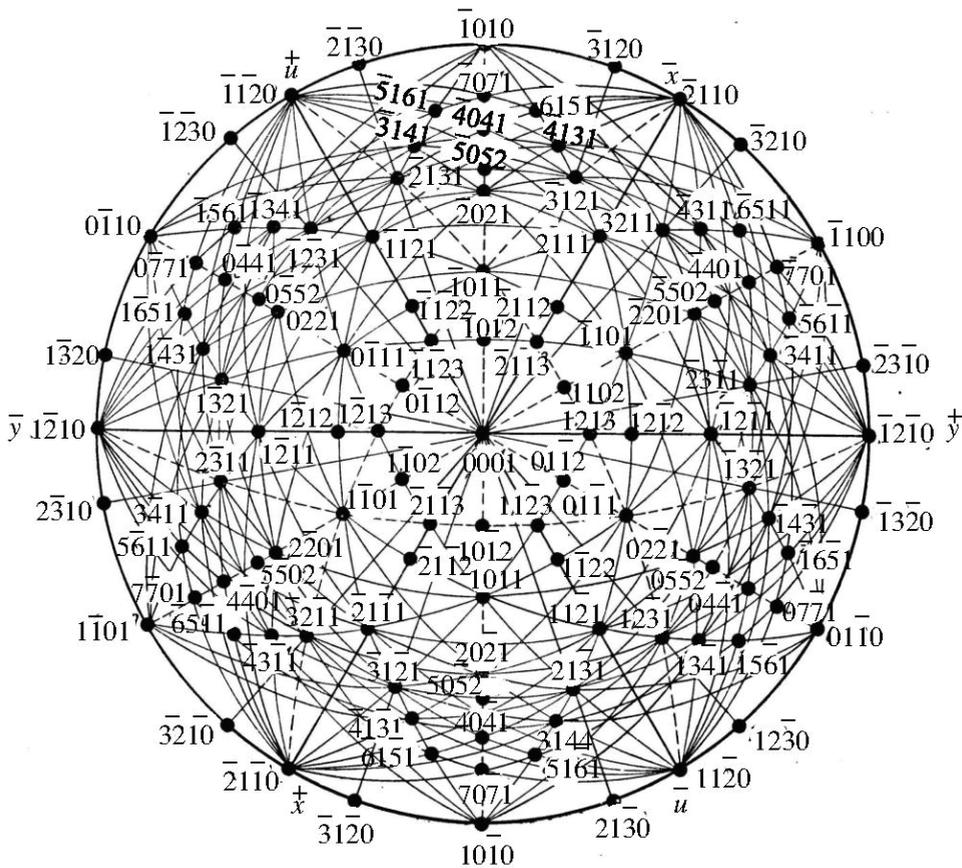


Рис. 23. Комплекс граней в гексагональной сингонии

Другие варианты этой установки, т. е. те, которые получаются при выборе за единичную граней z и i , рассматривать не будем.

В тригональной и гексагональной сингонии принята установка О. Бравэ, при которой сумма индексов по трем горизонтальным осям

(X , Y и Z) $h + i + k = 0$. Когда один из индексов равен 0, два других должны иметь разные знаки и быть равными друг другу по абсолютной величине. Когда ни один из трех индексов не равен 0, то абсолютная величина одного из них должна быть равна сумме абсолютных величин двух других $k = h + i$.

8.3. Пример выполнения расчетно-графической работы для моделей высшей категории

КУБИЧЕСКАЯ СИНГОНИЯ

Во всех видах кубической сингонии есть три взаимно перпендикулярные оси симметрии: либо $3L_4$, либо $3L_2$. Они берутся за оси X , Y и Z . Так как эти три оси симметрии совершенно одинаковы, то безразлично, какую именно поставить на то или другое место. За единичную грань берется грань октаэдра или тетраэдра.

Поскольку в кубической сингонии установка однозначна, углы между гранями различных простых форм этой сингонии также имеют постоянные определенные значения. Угол между гранями октаэдра $(111) - (\bar{1}\bar{1}\bar{1}) = 70^\circ 31'$. Угол между гранью октаэдра и куба $(100) - (111) = 54^\circ 44'$. Угол между гранью октаэдра и ромбододекаэдра $(111) - (110) = 35^\circ 15'$.

Представим себе на проекции грани (100) , (010) , (001) и (111) — основной тетраэдр (рис. 24). Проведя дуги больших кругов $(001) - (111)$; $(100) - (111)$; $(010) - (111)$, найдем три точки их пересечения с дугами $(100) - (001)$, $(100) - (010) - (001)$. Это будут точки d , m , e . Они являются полюсами возможных граней, так как представляют собой точки пересечения двух поясов. Символ грани m должен быть равен сумме индексов (100) и (010) , т. е. должен иметь индексы (110) . Проверим по дуге $(001) - m$: сумма индексов $m + (001)$ равна (111) ; следовательно, (111) минус (001) , т. е. (110) , есть символ грани m . Таким же способом найдем и проверим символы граней $d = (101)$ и $e = (011)$.

Проведя диагонали сферических четырехугольников, например $(100) - (110) - (111) - (101)$, получим новые грани (211) , (121) и (112) . Обратим внимание на то, что все три символа сходны. В каждом по две единицы и одна двойка. Эта двойка меняет свое место: чем ближе проекция грани к выходу оси, тем выше индекс по этой оси. Получилось

шесть треугольников. Треугольники, на которые разбивается исходный треугольник $(100) - (010) - (001)$, называются **треугольниками первого периода**.

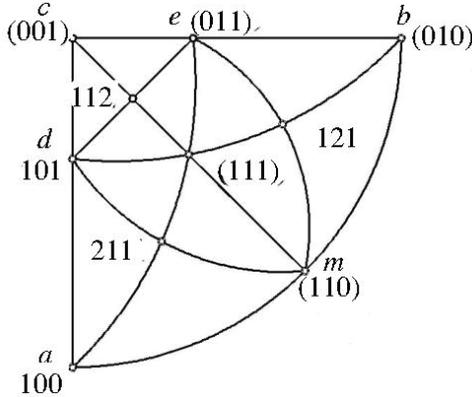


Рис. 24. Результат нахождения символов грани способом суммирования индексов

Далее необходимо для каждого из треугольников найти центральную точку, проведя соответствующие дуги (рис. 24).

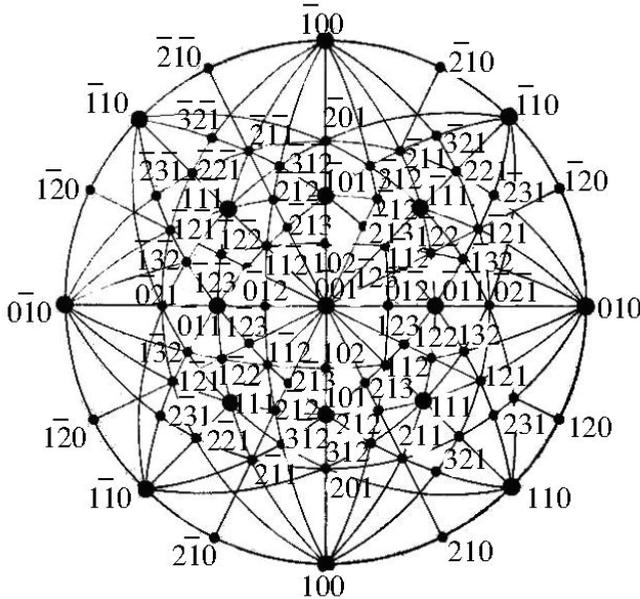


Рис. 25. Комплекс граней в кубической сингонии

Например, центральную точку для треугольника (100) — (101) — (111) найдем в точке пересечения дуг (101) — (110) и (100) — (112). Найдя центральную точку для треугольника первого периода, его, в свою очередь, можно разбить на шесть треугольников второго периода и т. д. При индексировании вновь получающихся возможных граней надо идти последовательно по периодам, иначе могут получиться неправильные результаты. Это построение называется **развитием комплекса граней по периодам**.

Основной тетраэдр определяется формой ячейки пространственной решетки, которая характеризует и внешнюю форму кристалла. Отсюда ясно, что положения четырех исходных граней играют решающую роль в распределении всех остальных граней.

8.4. Пример оформления расчетно-графической работы

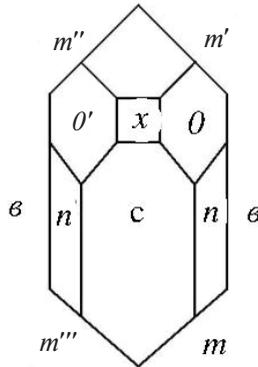
Расчетно-графическая работа оформляется на примере расчета символов граней кристалла ортоклаза по данным измерения углов на гониометре. Варианты РГР представлены в главе 8.5.

Пример расчета символов граней кристалла ортоклаза
по данным измерения углов на гониометре

К [AlSi₃O₈]

Сингония моноклинная.

Элементы симметрии — L_2PC .



Кристалл ортоклаза, вид сверху

Результаты измерения углов между гранями: $mm''' = 61^\circ (61^\circ 13')$, $cm = 68^\circ (67^\circ 47')$, $cx = 50^\circ (50^\circ 16')$, $cy = 80^\circ (80^\circ 18')$, $cn = 45^\circ (44^\circ 56')$, $co = 27^\circ (26^\circ 52')$. Единичная грань «0».

8.5. Варианты заданий расчетно-графической работы

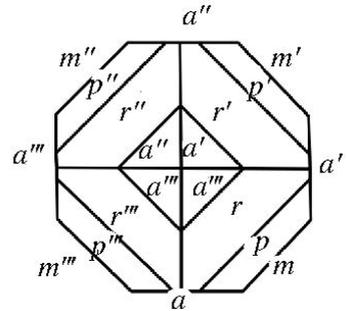
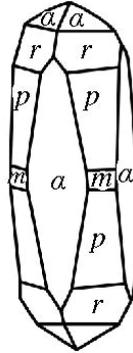
ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ СИНГОНΙΑ

Задача 1. Каломель Hg_2Cl_2

$$pp''' = 164^\circ 25'$$

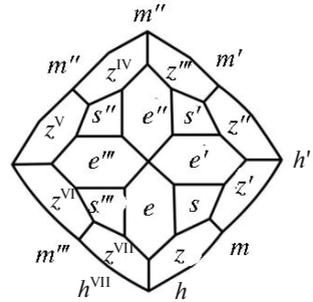
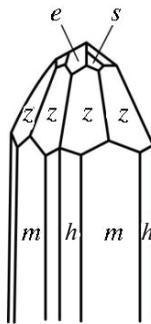
$$ar = 49^\circ 09'$$

$$aa' = 52^\circ 57'$$

Единичная грань r Задача 2. Касситерит SnO_2

$$ms = 46^\circ 27'$$

$$hh^{VII} = 54^\circ$$

Единичная грань r 

а

б

Задача 3. Рутил TiO_2

$$ms = 47^\circ 40'$$

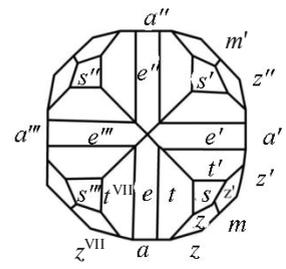
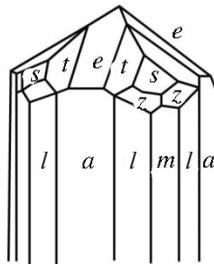
$$ee'' = 65^\circ 34'$$

$$tt' = 29^\circ 06'$$

$$al = 18^\circ 26'$$

$$mz = 25^\circ 46'$$

$$zz' = 20^\circ 45'$$

Единичная грань r 

а

б

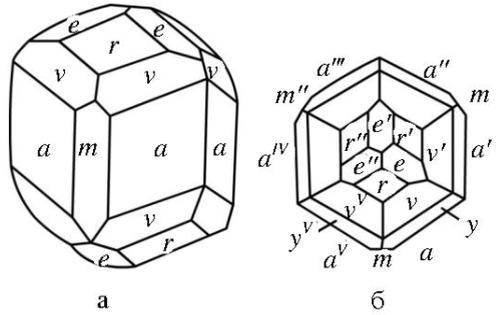
Задача 7. Пираргирит Ag_2SbS_8

$$rr' = 71^\circ 22'$$

$$ay = 15^\circ 34'$$

$$av = 24^\circ 54'$$

Единичная грань r

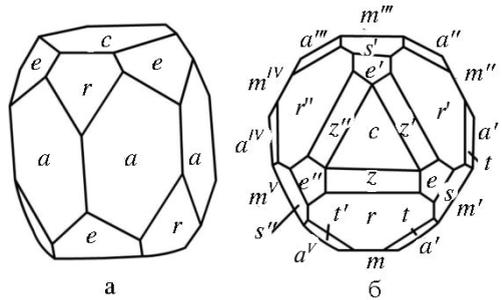


Задача 8. Эвдиалит

$$ce = 50^\circ 38'$$

$$cs = 78^\circ 24'$$

Единичная грань r



Задача 9. Турмалин

$$ce = 14^\circ 30'$$

$$co = 45^\circ 57'$$

$$qq' = 18^\circ 51'$$

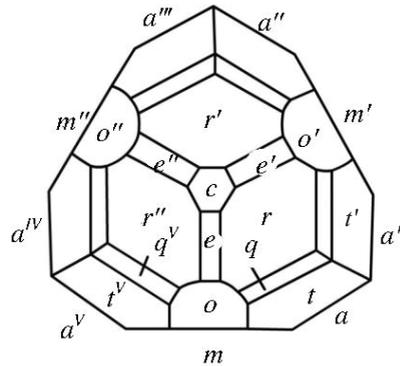
Единичная грань r

Выходы осей совпадают с полюсами

$\overset{+}{X}$ — грани a^v

$\overset{+}{Y}$ — грани a'

$\overset{+}{U}$ — грани a'''



РОМБИЧЕСКАЯ СИНГОНИЯ

Задача 14. Хризолит $(Mg,Fe)_2SiO_4$

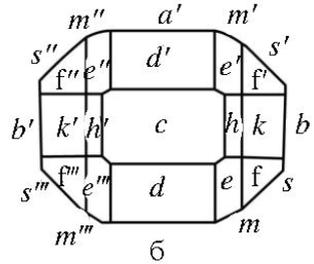
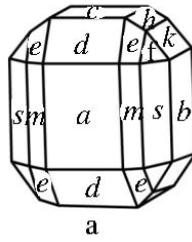
$dd' = 103^{\circ}06'$

$hh' = 60^{\circ}47'$

$ss' = 94^{\circ}04'$

$kk' = 99^{\circ}06'$

Единичная грань e



Задача 15. Стефанит Ag_5SbS_4

$mm''' = 64^{\circ}21'$

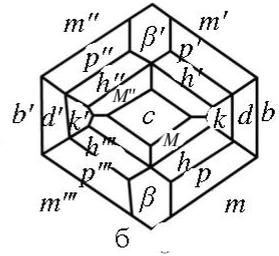
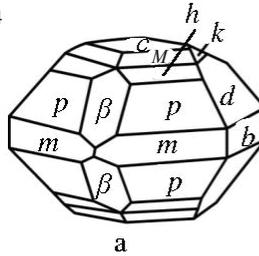
$pp''' = 49^{\circ}44'$

$kk' = 68^{\circ}50'$

$dd' = 107^{\circ}45'$

$cM = 23^{\circ}13'$

Единичная грань p



Задача 16. Скогболит $FeTa_2O_6$

$pp' = 67^{\circ}28'$

$pp''' = 53^{\circ}58'$

$qq' = 125^{\circ}47'$

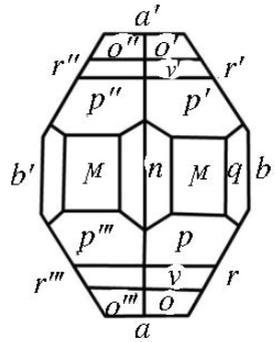
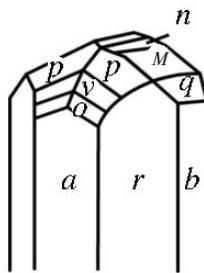
$rr' = 57^{\circ}03'$

$nn' = 12^{\circ}23'$

$vv' = 90^{\circ}06'$

$oo' = 106^{\circ}22'$

Единичная грань p



Задача 17. Гердерит (CaF) BePO_4

$ss' = 137^\circ 02'$

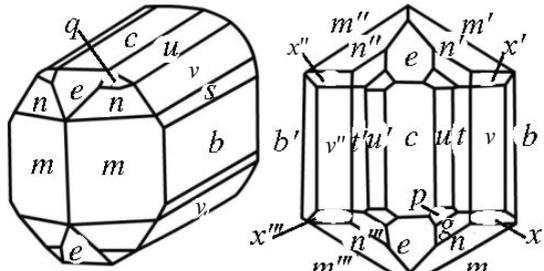
$ee' = 91^\circ 20'$

$uu' = 45^\circ 54'$

$mm''' = 63^\circ 39'$

$nn' = 103^\circ 24'$

Единичная грань p



а

б

МОНОКЛИННАЯ СИНГОНИЯ

Задача 18. Дюрангит Na(AlF) AsO_4

$mm''' = 69^\circ 50'$

$ap = 38^\circ 06'$

$pp' = 45^\circ 15'$

$a'\pi = 61^\circ 15'$

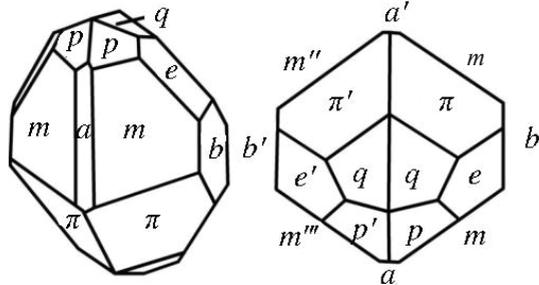
$\pi\pi' = 67^\circ 50'$

$m'q = 72^\circ 06'$

$me = 48^\circ 10'$

X — ось пояса $bee'b'$

Единичная грань p



а

б

Задача 19. Вивианит $\text{Fe}_3\text{P}_2\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

$mm''' = 71^\circ 58'$

$YY''' = 27^\circ 13'$

$a'\omega = 54^\circ 40'$

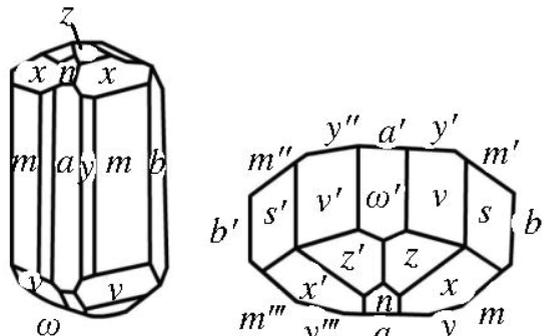
$xx' = 47^\circ 53'$

$az = 55^\circ 03'$

$zz' = 31^\circ 28'$

X — ось пояса, проходящего через b, b' и точку пересечения поясов $mxz'v''$ и $m''x'z'vm'$

Единичная грань x



а

б

Задача 20. Колеманит $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}_4$

$$tt''' = 39^\circ 58'$$

$$mm''' = 72^\circ 03'$$

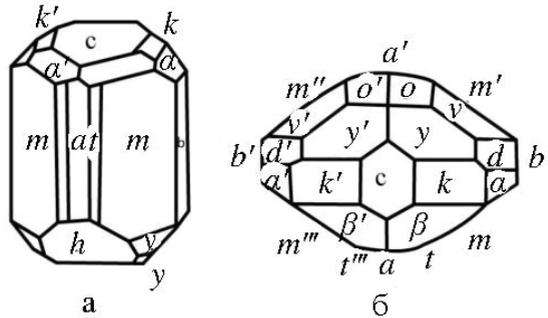
$$ac = 69^\circ 51'$$

$$c\beta = 33^\circ 45'$$

$$aa' = 90^\circ 54'$$

X — ось пояса $bc\beta'$

Единичная грань β



Задача 21. Роговая обманка $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_7(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$

$$mm''' = 55^\circ 49'$$

$$ee' = 64^\circ 22'$$

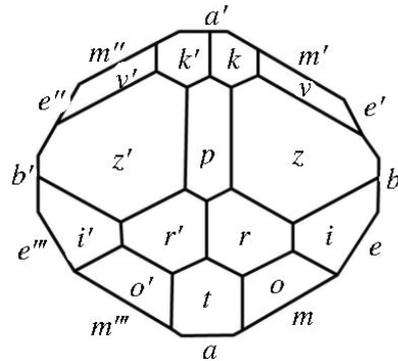
$$cm = 75^\circ 53'$$

$$at = 49^\circ 54'$$

$$a'k = 51^\circ 44'$$

X — ось пояса $bc\beta'$

Единичная грань (на рисунке нет) лежит в точке пересечения поясов btb' и aca'



Задача 22. Мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

$$cl = 32^\circ 26'$$

$$c\omega = 24^\circ 18'$$

$$a'r = 49^\circ 50'$$

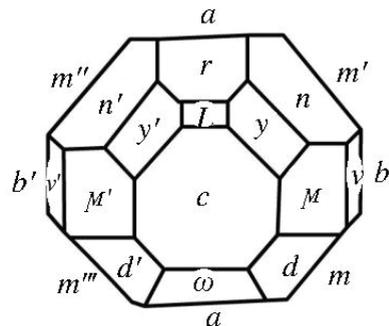
$$mm''' = 93^\circ 29'$$

$$nn' = 86^\circ 47'$$

$$cv = 62^\circ 06'$$

X — ось пояса $bc\beta'$

Единичная грань d



ТРИКЛИННАЯ СИНГОНΙΑ

Задача 23. Радонит $MnSiO_3$

$bm = 45^\circ 53'$

$b'M = 41^\circ 38'$

$b'a = 85^\circ 34'$

$cm = 68^\circ 45'$

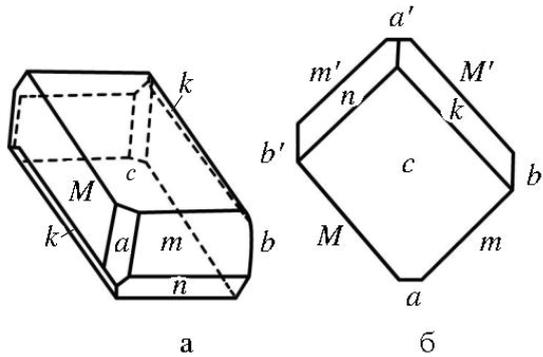
$cM = 86^\circ 23'$

$cp = 29^\circ 49'$

X — ось пояса $bc'b'$

Y — ось пояса aca'

Единичная грань p (на рисунке не показана) лежит в поясе $mc'm'$



Задача 24. Аксинит $H(Fe, Mn)Ca_2Al_2B(SiO_4)_4$

$am = 15^\circ 34'$

$aM = 28^\circ 55'$

$mr = 64^\circ 22'$

$Mr = 45^\circ 15'$

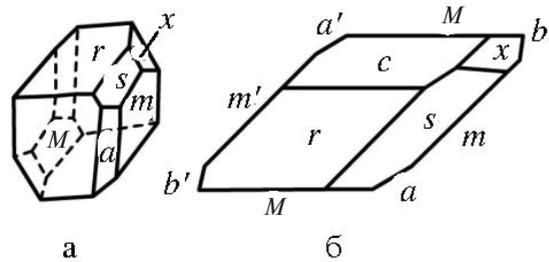
$bm = 32^\circ 47'$

$cM = 89^\circ 55'$

X — ось пояса $bc'b'$

Y — ось пояса $bc'b'$

Единичная грань x



Задача 25. Альбит $NaAlSi_3O_8$

$bm = 60^\circ 26'$

$b'M = 60^\circ 20'$

$cm = 65^\circ 17'$

$cM = 69^\circ 10'$

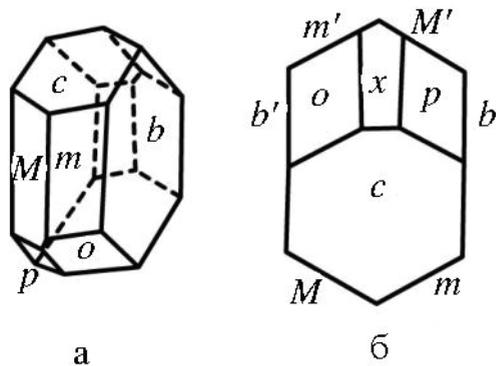
$cp = 55^\circ 53'$

$bx = 86^\circ 20'$

X — ось пояса $bc'b'$

Y — ось пояса cx

Единичная грань p



Задача 26. Уксуснокислый дидим $\text{Di}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

$$ab = 107^\circ 00'$$

$$bm = 61^\circ 26'$$

$$ac = 68^\circ 32'$$

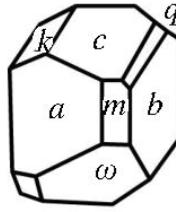
$$bc = 74^\circ 29'$$

$$kb = 58^\circ 58'$$

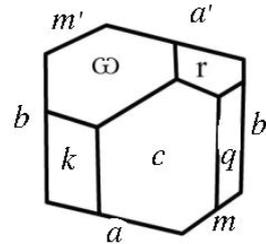
X — ось пояса $bc b'$

Y — ось пояса aca'

Единичная грань ω



а



б

Задача 27. Тетраэтиламмоний-пентахлородимеркуриат $\text{HgCl}_5\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$

$$na = 68^\circ 01'$$

$$mb = 27^\circ 55'$$

$$ac = 71^\circ 04'$$

$$bc = 87^\circ 31'$$

$$bq = 34^\circ 54'$$

$$wc = 45^\circ 24'$$

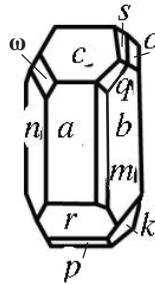
$$a'r = 50^\circ 29'$$

$$nb' = 47^\circ 36'$$

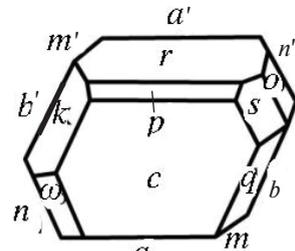
X — ось пояса $bc b'$

Y — ось пояса aca'

Единичная грань o



а



б

Задача 28. Ванадат бария $\text{Ba}_3\text{V}_{10}\text{O}_{28} \cdot 19\text{H}_2\text{O}$

$$am = 41^\circ 56'$$

$$ab = 96^\circ 13'$$

$$ac = 69^\circ 32'$$

$$bc = 62^\circ 40'$$

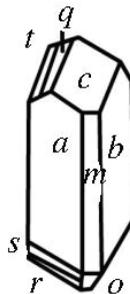
$$m'o = 47^\circ 19'$$

$$a's = 27^\circ 05'$$

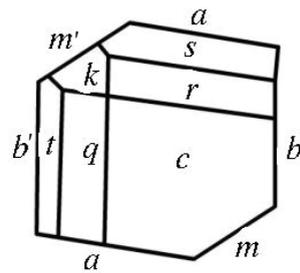
X — ось пояса $bc b'$

Y — ось пояса aca'

Единичная грань $O(\text{III})$



а



б

Задача 29. Халькантит $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

$am = 30^\circ 51'$

$mb = 69^\circ 50'$

$aM = 25^\circ 59'$

$Mp = 71^\circ 39'$

$ap = 59^\circ 10'$

$mc = 107^\circ 17'$

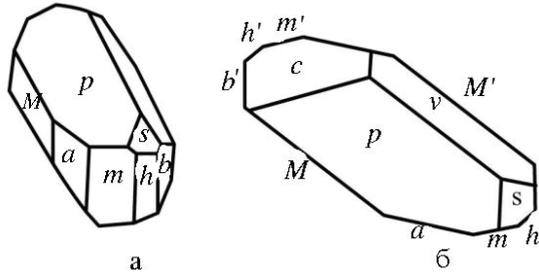
$bs = 55^\circ 02'$

$ah = 53^\circ 24'$

X — ось пояса $bc'b'$

Y — ось пояса aca'

Единичная грань p



Задача 30. Двухромовокислый калий $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (в установке Шабуса)

$ab = 96^\circ 24'$

$bc = 98^\circ 09'$

$ca = 88^\circ 15'$

$b'n = 55^\circ 50'$

$bq = 67^\circ 22\frac{1}{2}'$

$bt = 54^\circ 53'$

$bl = 38^\circ 22'$

$mb = 65^\circ 35'$

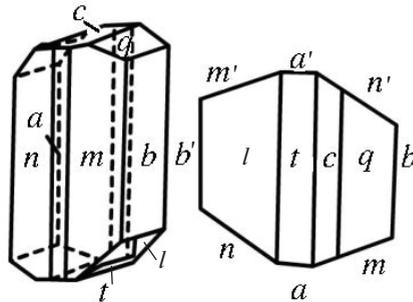
X — ось пояса $bc'b'$

Y — ось пояса aca'

Единичная грань O (на рисунках нет), ее полюс находится по углам:

$bo = 77^\circ 49'$

$qo = 43^\circ 17'$



9. Выполнение контрольной работы по кристаллографии

.....

Контрольная работа проводится по разделу «Геометрическая кристаллография» и ее целью является проверка знаний основных законов кристаллографии, умения графически изображать кристалл в виде рисунка и на плоскости в виде стереографической проекции.

Преподаватель выдает студенту один из приведенных ниже вариантов задания, в каждый из которых входит три модели: из низшей, средней и высшей категорий.

Модели кристаллов описываются студентами в следующей последовательности:

- определить элементы симметрии кристалла по модели;
- определить вид кристалла, сингонию, категорию по табл. 1;
- определить простые формы кристалла по табл. 2–4, рис. 1–3;
- выполнить рисунок кристалла;
- сделать установку кристалла с указанием выбора кристаллографических осей на рисунке и параметров установки по соответствующей категории;
- построить стереографическую проекцию кристалла;
- определить символы граней и простых форм (с указанием на рисунке).

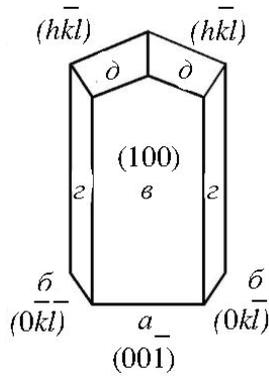
9.1. Примеры описания моделей кристаллов

Пример описания модели кристалла низшей категории



1. L_22P
2. Планы вид, ромбическая сингония, низшая категория.
3. Простые формы:
 - а) моноэдр — открытая, постоянная;
 - б) диэдр — открытая, переменная;
 - в) пинакоид — открытая, постоянная;
 - г) призма ромбическая — открытая, переменная;
 - д) пирамида ромбическая — открытая, переменная.

4. Рисунок кристалла:



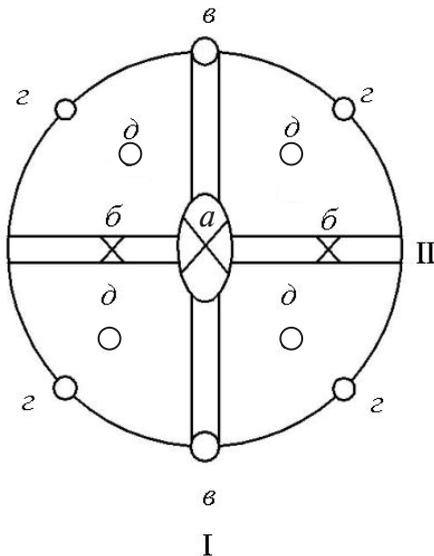
5. Установка кристалла с указанием выбора кристаллографических осей на рисунке и параметров установки низшей категории ромбической сингонии:

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

$$a_0 \neq b_0 \neq c_0$$

$$a : 1 : c$$

6. Построение стереографической проекции кристалла:



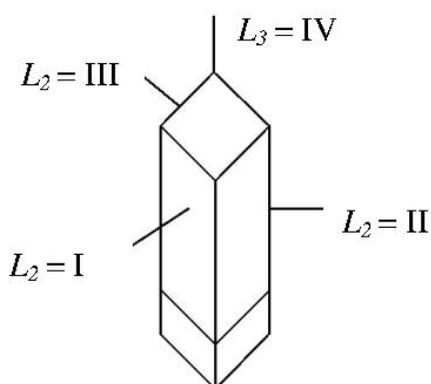
4. Символы простых форм:

- а) моноэдр $\{00\bar{1}\}$;
- б) диэдр $\{0k\bar{l}\}$;
- в) пинакоид $\{100\}$;
- г) ромбическая призма $\{hk0\}$;
- д) ромбическая пирамида $\{hk\bar{l}\}$.

Пример описания модели кристалла средней категории



- 1. $L_3 3L_2 3PC$.
- 2. Планаксиальный вид, тригональная сингония, средняя категория.
- 3. Простые формы:
 - а) призма гексагональная — открытая, постоянная;
 - б) ромбоэдр — замкнутая, переменная.
- 4. Рисунок кристалла:



5. Установка кристалла с указанием выбора кристаллографических осей на рисунке и параметров установки по средней категории тригональной сингонии:

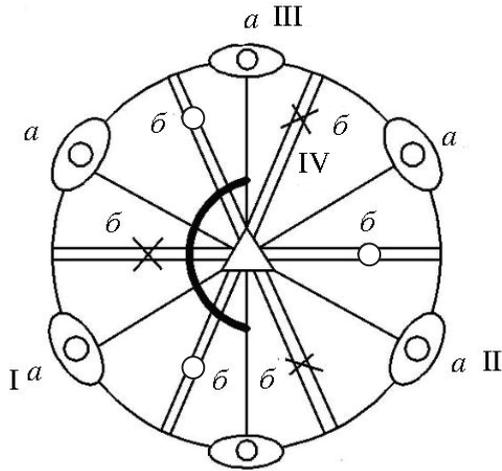
$$\gamma = 120^\circ$$

$$\alpha = \beta = \delta = 90^\circ$$

$$a_0 = b_0 = d_0 \neq c_0$$

$$1 : 1 : 1 : c$$

6. Построение стереографической проекции:



7. Символы граней и простых форм (с указанием на рисунке напротив определенной соответствующей формы):

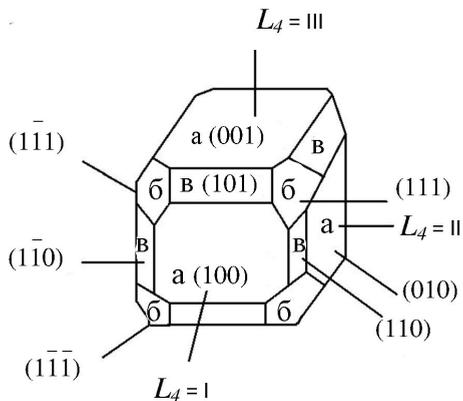
а) призма гексагональная $\{1\bar{2}10\}$;

б) ромбоэдр $\{10\bar{1}L\}$.

Пример описания модели кристалла высшей категории

1. Определение элементов симметрии кристалла (по модели):
 $3L_4 4L_3 6L^2 9PC$.
2. Планаксиальный вид, кубическая сингония, высшая категория
3. Простые формы:
 - а) гексаэдр — замкнутая, постоянная;
 - б) октаэдр — замкнутая, постоянная;
 - в) ромбододекаэдр — замкнутая, постоянная.

4. Рисунок кристалла:



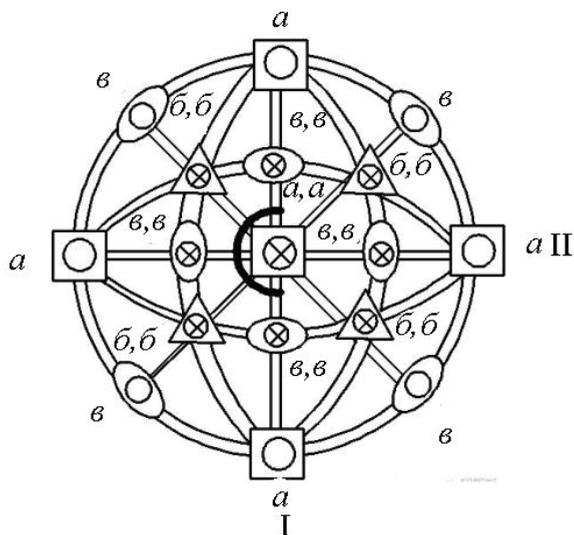
5. Установка кристалла с указанием выбора кристаллографических осей на рисунке и параметров установки по кубической сингонии:

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

$$a_0 = b_0 = c_0$$

$$1 : 1 : 1$$

6. Построение стереографической проекции кристалла:



7. Символы простых форм:

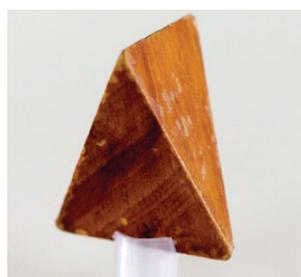
- а) гексаэдр $\{100\}$;
- б) октаэдр $\{111\}$;
- в) ромбододэкаэдр $\{110\}$.

9.2. Варианты заданий к контрольной работе по кристаллографии

Вариант № 1



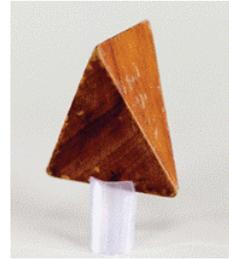
Вариант № 2



Вариант № 3



Вариант № 4



Вариант № 5



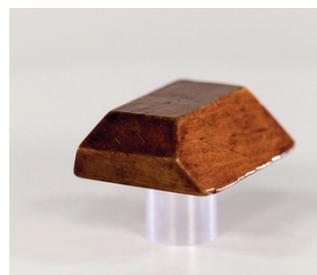
Вариант № 6



Вариант № 7



Вариант № 8



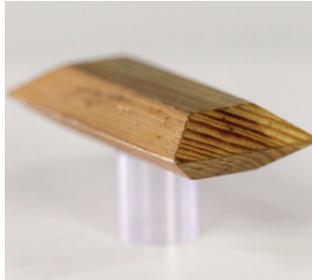
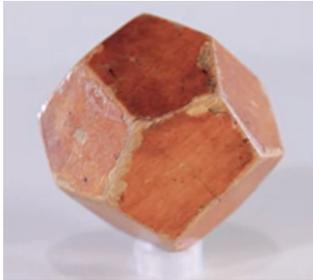
Вариант № 9



Вариант № 10



Вариант № 11



Вариант № 12



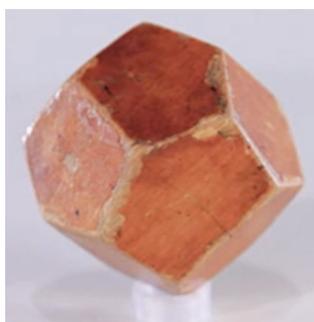
Вариант № 13



Вариант № 14



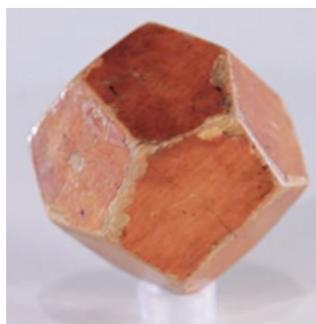
Вариант № 15



Вариант № 16



Вариант № 17



Вариант № 18



Вариант № 19



Вариант № 20



Вариант № 21



Вариант № 22



Вариант № 23



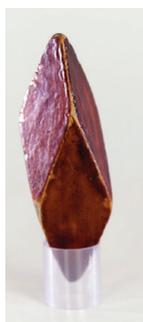
Вариант № 24



Вариант № 25



Вариант № 26



Вариант № 27



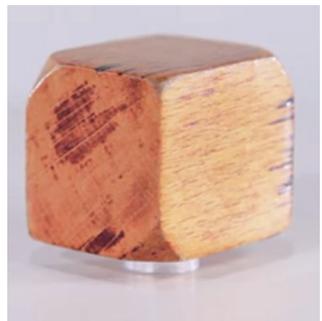
Вариант № 28



Вариант № 29



Вариант № 30



Часть 2.

МИНЕРАЛОГИЯ

Минералогия — наука о минералах (в переводе с позднелатинского *minera* — руда). Минералогия изучает не только рудные минералы, но и нерудные — слюды, полевые шпаты, глины, соли. Минерал — продукт химических реакций, происходящих в земной коре. Минералогия — одна из древнейших отраслей геологических наук — зародилась еще в каменном веке, когда люди научились использовать камни для изготовления орудий, оружия, утвари. Археологические исследования показали, что в палеолите первобытный человек знал около 20 минералов, в неолите их количество увеличилось до 40. В истории развития человеческого общества знакомство людей с различными металлами обусловило переход от каменных изделий к культуре меди, бронзы и железа. С развитием науки и техники возникла необходимость исследовать искусственные минералы огнеупоров, цемента, фарфора. В конце XIX века возникла новая наука о метеоритах. В настоящее время определение минерала выглядит так: **минерал** — это продукт естественных химических реакций, происходящих в земной коре, в космосе или созданных по воле человека и характеризующихся определенным химическим составом и структурой.

По мере изучения минералов было установлено, что в ряде случаев они имеют сложный состав и состоят из нескольких минеральных видов. Например, оливин состоит из форстерита и фаялита. Каждый минеральный вид имеет определенный химический состав и структуру, которые находятся в тесной взаимосвязи и определяют его конституцию, которая в свою очередь обуславливает свойства, присущие минералу, и его морфологию. Свойства, определяемые визуально или при помощи простых испытаний, называют **внешними признаками**. В отдельных случаях внешние признаки настолько специфичны,

что позволяют однозначно определить минерал. В других случаях они позволяют выделить группу минералов, в которой определение конкретного вида требует тщательного анализа.

К внешним признакам относят: морфологию и симметрию кристаллов, строение агрегатов, блеск, цвет, черту, твердость, спайность, отдельность, упругость, пластичность, хрупкость, плотность, магнитные свойства.

1. Физические свойства минералов

.....

1.1. Формы минералов и агрегатов

Значительная часть минералов в природе встречается в виде агрегатов различного вида. Эти минеральные агрегаты могут быть кристаллического, скрытокристаллического и аморфного строения. При диагностике минералов их внешний **облик** является нередко характерным признаком.

Все многообразие форм минералов можно условно разделить на три основные группы. Каждая группа характеризуется свойственным обликом:

- одинаково развитые по всем трем направлениям — изометрические кристаллы (кубические кристаллы пирита, флюорита, галенита);
- вытянутые в одном направлении — столбчатые, призматические, игольчатые (призматические кристаллы антимонита или горного хрусталя);
- вытянутые в двух направлениях при сохранении третьего — таблитчатые, пластинчатые, листоватые, чешуйчатые кристаллы (тальк, биотит, гипс).

В природе многие минералы часто встречаются в виде **хорошо образованных кристаллов**. Формы этих кристаллов нередко настолько характерны, что по внешнему облику их или его габитусу (лат. *габитус* — внешность, наружный вид) можно определить название минерала. Выделяют призматический, кубический, дипирамидальный, октаэдрический и другие габитусы кристаллов. Так, минералы галит, пирит, флюорит имеют кубический габитус кристаллов. Кристаллы

кальцита встречаются в форме ромбоэдра. Они имеют ромбоэдрический габитус. Для кристаллов кварца характерны образования в виде призм, ограниченных пирамидальными гранями. Но следует иметь в виду, что ряд минералов обладает способностью кристаллизоваться в виде различных форм. Например, кальцит может встречаться не только в виде ромбоэдров, но и в форме таблитчатых и других кристаллов. Минерал кварц в различных природных условиях тоже может образовывать кристаллы различной формы.

Размеры выделений кристаллов различных минералов могут быть самыми разнообразными — от долей миллиметра до нескольких сот метров.

В природе часто встречаются кристаллы причудливой формы, сростки минералов (двойники), конкреции, секретиции, дендриты и друзы.

Двойниками называются закономерные сростки кристаллов. Например, двойник гипса (ласточкин хвост), двойники флюорита, касситерита, ортоклаза и других минералов. Наряду с двойниками существуют и тройники (например, арагонит), а у ставролита наблюдаются крестообразные двойники.

Конкреции образуются при концентрации вещества вокруг центра кристаллизации (кальцит, флюорит). Часто конкреции попадают среди осадочных пород. Концентрическое строение кристалла отражает стадийность формирования. Обычно конкреции имеют радиально-лучистое округлое строение.

Секретиции образуются на внутренних стенках пустот в породах в виде минеральных наростов и кристаллов. Такие кристаллы заполняют всю полость пород (горный хрусталь, кальцит). Мелкие секретиции называются миндалинами, крупные — жеодами.

Дендриты — ветвящиеся сростки кристаллов (золото, серебро). Ярким примером дендритов могут служить зимние стекла, разрисованные ажурной мозаикой морозом.

Друзы — группа кристаллов, сросшихся в основании. Встречаются очень красивые друзы кварца, кальцита, гипса, топаза, пирита и других минералов. В тех случаях, когда кристаллы плохо развиты, имеют небольшие размеры, друзу называют **щеткой**.

Наиболее распространенной формой минеральных агрегатов являются зернистые агрегаты. Описание зернистых агрегатов можно давать с точки зрения размеров, соотношения в них кристаллической и стекловатой фазы.

По размеру зерен выделяются следующие формы агрегатов:

- тонкозернистые — менее 1,0 мм;
- среднезернистые — 2–5 мм;
- крупнозернистые — 5–10 мм;
- гигантозернистые — более 10 мм.

По степени кристалличности выделяются агрегаты:

- полнокристаллические (гранит);
- полукристаллические (порфиры и порфириды): среди стекловатой массы наблюдаются кристаллы;
- стекловатые — состоящие полностью из стекла.

Натечные формы. Натечные образования присущи аморфным минералам (например, опалу) и скрытокристаллическим минералам (кремь, халцедон). Натечные известковые образования встречаются в карстовых пещерах — сталактитами и сталагмитами арагонита, развивающимися в пещерах. Первые растут от потолка сверху вниз, вторые от пола пещеры снизу вверх; срастаясь, они образуют столбы. К натечным образованиям относятся жеоды, представляющие собой не полностью заполненные пустоты бурого железняка. Такого же рода натечные образования полосчатого и слоистого строения образует аморфный кремнезем — агаты. Иногда аморфные полосы переходят в мелкие кристаллы, образуя халцедон.

Оолитовые образования обнаруживают концентрически-зональное строение. Если размер зерен не превышает 1–2 мм, то такие выделения называют *икряным камнем*, они характерны для известняков, железных руд. Если размер «горошин» составляет несколько миллиметров, то это собственно оолитовые образования (греч. *оос* — горошина, *литос* — камень). Эта структура характерна для бокситов. Если размер таких выделений достигает 10 мм и более, такого рода структура называется нодулярной (греч. *нодуля* — бобовина). Она характерна для выделений хромита в серпентините.

Тонкозернистые массы называются **землистыми** агрегатами, представляют собой мягкие мучнистые образования, в которых невозможно различить какие-либо кристаллы, и они характерны для глинистых минералов. Кристаллическое строение таких землистых масс устанавливают под электронным микроскопом с увеличением в 20 000 раз.

1.2. Механические свойства минералов

Спайностью называют способность минералов раскалываться по определенным кристаллографическим направлениям с образованием плоских зеркальных поверхностей. Выделяют следующие виды спайности:

- весьма совершенная: кристалл легко расщепляется на тонкие гладкие листочки, его трудно разделить в неспайном направлении (слюда, тальк, молибденит);
- совершенная: поверхности менее гладкие, образуются при большем механическом усилии; наряду со спайными поверхностями, может наблюдаться излом (ортоклаз, галенит, кальцит, сфалерит, кальцит);
- несовершенная: поверхности спайности отсутствуют или обнаруживаются с трудом (кварц, нефелин), такие минералы обычно имеют раковистый излом.

От плоскости спайности естественные грани отличаются тем, что естественную грань кристалла можно отколоть и она не повторится, а плоскости спайности можно получать многократно, пока позволяют размеры кристаллов. Плоскости спайности более гладкие и совершенные, в то время как естественные грани часто имеют следы растворения, присыпки посторонних минералов.

В кубической сингонии наблюдается спайность по трем (по кубу — галенит, галит), четырем (по октаэдру — флюорит), шести (по ромбодекаэдру — сфалерит) направлениям. В тригональной и ромбической сингониях — по трем направлениям (по ромбоэдру — кальцит, магнезит, доломит, сидерит), по трем пинакоидам — ангидрит, барит. Нередко встречается спайность по двум направлениям — по тетрагональной призме (рутил), ромбической призме (пи-роксены, амфиболы), по двум пинакоидам (полевые шпаты). Спайность по одному направлению (по пинакоиду) наблюдается в кристаллах средних и низших сингоний — тальке, слюдах, гипсе, хлорите, молибдените.

В некоторых минералах при раскалывании образуются ровные, иногда блестящие поверхности, напоминающие спайные. Возникновение подобных плоскостей носит название **отдельность** и связано с наличием закономерных включений вдоль зон роста кристалла в результате возникновения структур распада или полисинтетического двойникового. Отличительным признаком отдельности является конечный

размер пластинок, если они вызваны двойникованием, и матовое отражение плоскостей при наличии включений.

Твердостью называется способность минерала препятствовать внешнему механическому воздействию: царапанию, вдавливанию, шлифованию. Существуют следующие методы определения твердости:

- *царапанье* — Ф. Моос подобрал 10 минералов так, что каждый последующий царапает предыдущий (табл. 11);
- *вдавливание*;
- *шлифование*.

Метод определения твердости вдавливанием подразделяется:

- на *метод Бринеля* — вдавливание металлического шарика под нагрузкой, мерой твердости является нагрузка, отнесенная к площади отпечатка;
- *способ Роквелла* — вдавливание шарика и алмазной пирамидки;
- *способ Виккерса* — вдавливание алмазной пирамидки (ПМТ-3 — поляризационный микротвердомер).

Шлифование — метод Разиваля. Взвешивается образец до шлифования и после, 100 г абразивного порошка до его полного срабатывания. Мера твердости — потеря массы, в процентах. За 100 % потери массы принят кварц.

Таблица 11

Определение твердости минералов

| Минерал | Формула | По Моосу | По Виккерсу (вдавливание), кг/мм ² | По Разивалю (шлифование), % |
|----------|---------------------------|----------|---|-----------------------------|
| Тальк | $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$ | 1 | 2,4 | 0,03 |
| Гипс | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ | 2 | 36,0 | 1,04 |
| Кальцит | $CaCO_3$ | 3 | 109,0 | 3,75 |
| Флюорит | CaF_2 | 4 | 189,0 | 4,17 |
| Апатит | $Ca_5(PO_4)_3(F, OH, Cl)$ | 5 | 536,0 | 5,42 |
| Ортоклаз | $K[AlSi_3O_8]$ | 6 | 795,0 | 31,0 |
| Кварц | SiO_2 | 7 | 1120,0 | 100,0 |
| Топаз | $Al_2[SiO_4](F, OH)_2$ | 8 | 1427,0 | 146,0 |
| Корунд | Al_2O_3 | 9 | 2060,0 | 833,0 |
| Алмаз | C | 10 | 10060,0 | 117000,0 |

При определении микротвердости на приборе ПМТ-3 оцениваются хрупкость и пластичность минералов. По появлению первой трещины при определенной нагрузке устанавливается балл хрупкости и пластичности по таблице С. Д. Дмитриева (табл. 12).

Таблица 12

Шкала хрупкости и пластичности минералов

| № п/п | Категория хрупкости | Минимальная нагрузка, при которой возникает первая трещина, г | Типичные минералы |
|-------|---------------------|---|------------------------|
| 1 | Весьма хрупкие | При всех нагрузках | Пирит, гипс |
| 2 | Хрупкие | 20 и выше | Пентландит, тетраэдрит |
| 3 | Слабо пластичные | 50 и выше | Кварц, пирротин |
| 4 | Пластичные | 100 и выше | Магнетит |
| 5 | Весьма пластичные | При нагрузке 200 трещины не образует | Медь, галенит, галит |

В дополнение к минералам шкалы Мооса при определении твердости можно использовать бытовую шкалу твердости: у ногтя твердость 2,5; у стекла — 5,5; у иглы или стального ножа — 7. Минералы твердости 1 пишут по бумаге, не царапая ее.

Определение твердости методом царапания заключается в следующем. Сначала образцом минерала чертят стекло и узнают примерную твердость минерала. Затем берут эталонные минералы из шкалы Мооса, имеющие твердость, близкую к предполагаемой. Если минерал на одном из соседних эталонных образцов оставляет царапину, а на другом нет, то твердость минерала считается средней между ними (например, если минералом можно царапать флюорит, но нельзя апатит, то твердость его 4,5).

Наиболее распространены минералы с твердостью не выше 7, а минералы с большей твердостью встречаются редко. К числу последних относятся некоторые гранаты — твердость 7,5–8, берилл — 8, турмалин — 8 и корунд — 9. Корунд является единственным минералом с твердостью 9; у алмаза твердость 10.

1.3. Оптические свойства минералов

Падающий на минерал световой поток частично отражается обратно. Этот отраженный свет и создает впечатление блеска минерала. Интенсивность блеска, т. е. количество отраженного света, тем больше, чем больше показатель преломления минерала.

Металлический блеск имеют минералы с показателем преломления выше 3, они сверкают подобно металлу. Такие минералы непрозрачны в проходящем свете и дают черную или очень темную черту. В порядке возрастающей отражательной способности минералы располагаются в следующей последовательности: молибденит, стибнит, галенит, халькопирит, пирит.

Полуметаллический блеск имеют минералы непрозрачные и полупрозрачные в проходящем свете с показателем преломления 2,6–3,0, пример: гематит.

Неметаллический блеск по мере уменьшения количества отраженного света подразделяется:

— на **алмазный блеск** — очень сильный, характерен для минералов с показателем преломления 1,9–2,6. Сюда следует отнести циркон, касситерит, сфалерит, алмаз (табл. 13);

Таблица 13

Зависимость блеска минералов от показателя преломления и отражательной способности

| Блеск | Показатель преломления n | Пределы отражательной способности R , % | Минералы | n | R , % |
|-------------------|----------------------------|---|------------|-------|---------|
| Стекланный | 1,3–1,9 | 2–10 | Лед | 1,309 | 2,0 |
| | | | Флюорит | 1,434 | 3,1 |
| | | | Кварц | 1,544 | 4,5 |
| | | | Корунд | 1,703 | 7,8 |
| Алмазный | 1,9–2,5 | 10–19 | Циркон | 1,950 | 10,2 |
| | | | Касситерит | 2,000 | 11,7 |
| | | | Сфалерит | 2,370 | 16,5 |
| | | | Алмаз | 2,420 | 17,2 |
| | | | Киноварь | 2,850 | 23,1 |
| Полуметаллический | 2,5–3,0 | 19–25 | Гематит | 3,000 | 25,0 |
| Металлический | Больше 3,0 | Больше 25 | Антимонит | 4,040 | 36,0 |
| | | | Молибденит | 4,700 | 42,0 |
| | | | Серебро | — | 95,0 |

— *стеклянный* блеск, подобный отражению света от стекла, характерен для минералов с показателем преломления 1,3–1,9 — это лед, галогидные соединения, сульфаты, карбонаты, силикаты и другие. На долю минералов со стеклянным блеском приходится около 70 % природных соединений. Они в основном светлоокрашены, и черта у них светлая (табл. 12).

Вторым важным фактором (независимо от показателей преломления света), влияющим на результат отражения света, является характер поверхности, от которой происходит отражение. Выше были рассмотрены блески минералов, обусловленные зеркально гладкими поверхностями (гранями кристаллов, плоскостями спайности). Если минерал в изломе имеет неровную, ямчатую, бугристую поверхность, то блеск тускнеет и минерал приобретает *жирный блеск* — выглядит как будто его поверхность покрыта тонким слоем жира. Поверхность с более грубо выраженной неровностью обладает *восковым блеском*. Наконец, если тонкодисперсные массы обладают еще и тонкой пористостью, то тогда поверхности приобретают *матовый блеск* (главным образом у землистых агрегатов — каолинита, мела, сажистого пиролюзита). У минералов с параллельно-волокнистым строением (асбест, селенит) — *шелковистый блеск*, а у минералов с весьма совершенной спайностью (талек, мусковит) — *перламутровый блеск*.

1.4. Цвета минералов, цвет черты

Академик А. С. Ферсман предложил выделить следующие три **группы минералов по цвету**.

1. *Идиохроматическая* — (*идиос* — собственный, *хромос* — цвет) окраска обусловлена собственным химическим составом минерала:

- малахит $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}[\text{OH}]_2$ — зеленый;
- азурит $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}[\text{OH}]_2$ — синий;
- крокоит PbCrO_4 — оранжевый;
- родонит $\text{Mn}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$ — красный.

В минералах этой группы окраска обусловлена группами атомов — у малахита и азурита, отдельными элементами — хромом в крокоите, марганцем в родоните.

2. *Аллохроматическая* — (*аллос* — чуждый, *хромос* — цвет) окраска, обусловленная присутствием в минералах примесных атомов или радикалов:

| | | | |
|--------------------------------------|-------------|---|--|
| горный хрусталь | бесцветный | } | SiO ₂ |
| дымчатый горный хрусталь (раухтопаз) | дымчатый | | |
| морион | черный | | |
| аметист | фиолетовый | } | Al ₂ O ₃ |
| цитрин | коричневый | | |
| лейкосапфир | бесцветный | } | Be ₃ Al ₂ [Si ₆ O ₁₈] |
| сапфир | синий | | |
| рубин | красный | | |
| аквамарин | голубоватый | } | Be ₃ Al ₂ [Si ₆ O ₁₈] |
| изумруд | зеленый | | |
| воробьевит | розовый | | |
| гелиодор | желтый | | |

При одинаковом химическом составе, при одинаковой форме и структуре кристаллов разница в цвете может быть обусловлена только примесями.

3. *Псевдохроматическая* (*псевдо* — ложный, *хромос* — цвет) — окраска, связанная с различными оптическими эффектами: интерференцией, дифракцией, преломлением:

- преломление — бриллиант;
- иризация — лабрадорит;
- иризирующие пестроокрашенные пленки (побежалость) — халькопирит, борнит, гидроокислы железа.

Минералы с идиоохроматической окраской можно определять с точностью до минерального вида, а минералы с аллохроматической окраской — до минеральной разновидности. Псевдохроматическая окраска дает дополнительные качества минералов и иногда косвенно дает возможности для их диагностики.

Черта — цвет минерала в порошке или в черте на фарфоровой пластинке является более постоянным критерием и имеет важное диагностическое значение. Цвет черты и цвет минерала могут резко различаться между собой, например: желтый пирит дает черную черту, гематит — вишнево-красную, а коричневый лимонит — желто-бурую. Минералы с металлическим блеском дают черную или темноокрашенную черту, а минералы без металлического блеска — белую или светлоокрашенную черту. Землистые и тонкозернистые разновидности минералов имеют цвет, сходный с цветом черты.

1.5. Магнитные свойства

По магнитным свойствам минералы подразделяют на магнитные, слабомагнитные и немагнитные. Магнитные минералы притягиваются постоянным магнитом. К ним относятся магнетит, моноклинный пирротин и некоторые разновидности ильменита. Некоторые разновидности магнетита ведут себя как постоянный магнит, т. е. притягивают к себе железные предметы и магнитные минералы. К слабомагнитным относятся те минералы, которые приобретают магнитные свойства под действием электрического поля. Так ведут себя минералы, содержащие железо: геденбергит, алмадин, железистый сфалерит (марматит) и т. д.

1.6. Удельный вес и плотность

Удельный вес — отношение веса вещества к весу равного объема воды при 4°C. Если вес минерала в воздухе (точнее, в пустоте) равен p_2 , а в воде при 4°C — p_1 , то его удельный вес

$$d = \frac{p_2}{(p - p_1)^2}.$$

Как видно из формулы, эта константа не имеет размерности.

В качестве синонима удельного веса часто употребляют понятие *плотность* — массу вещества, приходящуюся на единицу объема. Плотность G выражается в определенных единицах измерения, обычно в граммах на сантиметры кубические. Плотность вещества определяется исходя из молекулярного веса M , количества молекул в формуле (формульных единиц) Z и объема элементарной ячейки V , выраженного в *ангстремах* ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$), N — число Авогадро, равно $6,02 \cdot 10^{23}$.

$$G = \frac{ZM}{NV}.$$

Плотность минералов варьирует от 0,8 у некоторых органических минералов до $22,7 \text{ г/см}^3$ у осмистого иридия. Она зависит от кристаллической структуры и химического состава минерала. Высокая плотность характерна для минералов с компактной структурой, низкая — для минералов со слоистой и каркасной структурой (алмаз — $3,5 \text{ г/см}^3$, графит — $2,2 \text{ г/см}^3$).

Плотность возрастает с увеличением массы атома или иона и уменьшается с увеличением их размеров. Например, плотность плагиоклазов изменяется от 2,61 г/см³ (альбит) до 2,76 г/см³ (анортит).

Основная масса минералов имеет плотность, которая находится в интервале от 2,5 до 5,2 г/см³, и лишь немногие имеют более высокие или низкие значения. По степени распространенности и плотности минералы условно можно разделить на легкие (плотность менее 2,5 г/см³), средние (2,5–4,0 г/см³) и тяжелые (более 4 г/см³). Плотность мономинерального образца приблизительно можно оценить, сравнивая с образцами с известной плотностью и близкого объема.

2. Классификация минералов

.....

Существует несколько классификаций минералов, в основу каждой из которых положены различные признаки. Наиболее общепризнанной является кристаллохимическая классификация, за основу которой принимаются в равной мере химический состав и кристаллическая структура минералов.

В России наиболее распространена классификация минералов на типы и классы по химическому составу. Более мелкие подразделения внутри классов (подклассы, отделы, группы и др.) выделяются по типу структуры и в соответствии со степенью усложнения состава. По этой классификации выделяется большое количество классов, из которых в данном курсе будут рассмотрены следующие: 1 — самородные элементы, 2 — сульфиды, 3 — галогениды, 4 — оксиды и гидроксиды, 5 — карбонаты, 6 — сульфаты, 7 — фосфаты и 8 — силикаты.

1 класс. **Самородные элементы** — элементы в свободном состоянии. К ним относятся металлы — золото Au, серебро Ag, медь Cu, платина Pt и др.; полуметаллы — мышьяк As, висмут Bi; неметаллы — графит C, сера S и др.

2 класс. **Сульфиды** — соли сероводородной кислоты H₂S. Наиболее характерными признаками, свойственными большинству сульфидов, являются сильный металлический блеск и высокий удельный вес. Сюда относятся минералы пирит FeS₂, халькопирит CuFeS₂ и галенит PbS.

3 класс. **Галогениды** — соли соляной кислоты HCl (хлориды) и соли плавиковой кислоты HF (фториды). Для них характерны низкая твер-

дость (2–4), прозрачность и совершенная спайность. К этому классу относятся галит NaCl , сильвин KCl и флюорит CaF_2 .

4 класс. **Оксиды и гидроксиды** — соединения металлов и неметаллов с кислородом и водой H_2O . Для оксидов характерна прочность кристаллической решетки, чем обусловлена их высокая твердость (5–9). К этому классу относятся корунд Al_2O_3 , кварц SiO_2 , опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и минералы группы железа — магнетит Fe_3O_4 , гематит Fe_2O_3 и лимонит $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

5 класс. **Карбонаты** — соли угольной кислоты H_2CO_3 . Большая часть карбонатов бесцветна, твердость невысокая (3), характерна совершенная спайность по ромбоэдру и эффект двойного лучепреломления. К этому классу относятся кальцит CaCO_3 , доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, магнезит MgCO_3 .

6 класс. **Сульфаты** — соли серной кислоты H_2SO_4 . В технике их называют купоросами. Для минералов этого класса характерны низкая твердость (2–3,5), разнообразная окраска. К ним относятся гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и ангидрит CaSO_4 , медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot \text{FeSO}_4$ и железный купорос FeSO_4 .

7 класс. **Фосфаты** — соли ортофосфорной кислоты H_3PO_4 . Характерна средняя твердость (5) и светлая окраска. Сюда входит минерал апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl})$.

8 класс. **Силикаты** — самая обширная группа породообразующих минералов — соединения, содержащие SiO_2 . Основой кристаллической решетки силикатов является скелет из кремнекислородных тетраэдров $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (рис. 28). Кремнекислородные тетраэдры в структурах силикатов могут находиться либо в виде изолированных друг от друга структурных единиц $[\text{SiO}_4]^{4-}$, либо могут соединяться друг с другом разными способами. В зависимости от способа сочленения кремнекислородных тетраэдров выделяются следующие подклассы:

1) **островные силикаты** с изолированными тетраэдрами (рис. 28, а), представленные оливином; для них характерны повышенные твердость и удельный вес, изометричные формы кристаллов;

2) **цепочечные силикаты** с одинарными цепочками тетраэдров (рис. 28, б), представленные пироксенами;

3) **ленточные силикаты** со сдвоенной цепочкой тетраэдров (рис. 28, в), представленные роговой обманкой; несмотря на существенное различие в количественных компонентах, цепочечные и ленточные силика-

ты имеют много общих свойств: удлиненная форма кристаллов, средняя спайность в двух направлениях, твердость 5–6, темный цвет;

4) **листовые силикаты** с непрерывными слоями кремнекислородных тетраэдров (рис. 28, *з*), представленные слюдами (биотит, мусковит), хлоритом, тальком, каолинитом, серпентином; в прямой зависимости от кристаллической структуры находится характерное свойство этих силикатов — весьма совершенная спайность, а также гексагональная форма кристаллов;

5) **каркасные силикаты** с непрерывными трехмерными каркасами тетраэдров $[\text{SiO}_4]^{4-}$; эти соединения представляют собой почти исключительно алюмосиликаты, в которых часть ионов Si^{4+} в кремнекислородных тетраэдрах замещена на ионы Al^{3+} ; для этих силикатов характерна светлая окраска и твердость 5–7.

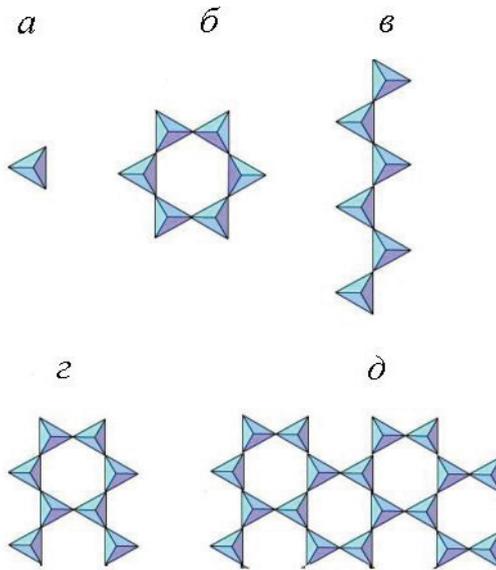


Рис. 28. Способы соединения кремнекислородных тетраэдров в кристаллических структурах силикатов:

a — единственный кремнекислородный изолированный тетраэдр; *б* — кольцо из шести тетраэдров; *в* — цепочка (лента); *з* — лента; *д* — непрерывный лист (слой) тетраэдров

2.1. Описание минералов

Самородные элементы (Раздел 1)

Графит С. Кристаллы редки (встречается в виде пластинок или табличек), чаще встречается в виде тонкочешуйчатых агрегатов. Окраска железо-черная до темной стально-серой, черта черная блестящая, блеск сильный металлоидный. Твердость 1, жирный, пишет по бумаге и пачкает руки. Спайность весьма совершенная в одном направлении. Графит широко применяется в технике для производства тиглей, электродов, сухих элементов, в качестве составной части машинных смазок, для футеровки элементов, для футеровки высокотемпературных печей и т. д. Из него изготавливают краски и карандашные грифели.

Сера S. Встречается в виде кристаллов, сплошных зернистых агрегатов, иногда образует почковидные массы, друзы. Цвет желтый различных оттенков. Блеск на гранях алмазный, в изломе жирный. Твердость 1–2, очень хрупка, спайность несовершенная, излом неровный, раковистый. Легко загорается от спички и горит с образованием сернистого газа. Сера применяется в производстве серной кислоты, красок, для устройства фейерверков и т. д.

Сульфиды и простые и сложные (класс 1)

Галенит PbS (свинцовый блеск). Характерны кристаллы кубической формы, крупно- и мелкозернистые агрегаты. Цвет свинцово-серый, черта серовато-черная, блеск металлический, твердость 2–3, хрупок, спайность совершенная по трем направлениям (по кубу). Применение — важнейшая свинцовая руда.

Халькопирит CuFeS₂ (медный колчедан). Кристаллы редки, агрегаты — сплошные мелкозернистые массы, часто встречается в виде неправильной формы вкрапленных зерен. Окраска латунно-желтая, с темно-желтой или пестрой побежалостью; черта с зеленоватым оттенком, блеск сильный металлический. Твердость 3,5–4, спайность несовершенная, излом неровный. Халькопирит является важнейшей рудой для получения меди.

Пирит FeS_2 (серный колчедан, железный колчедан). Часто встречается в виде крупных, хорошо образованных кристаллов изометричной формы — кубов с характерной штриховкой на гранях. Агрегаты — сплошные зернистые массы, часто в ассоциации с халькопиритом. Окраска светлая латунно-желтая, часто с желтовато-бурой и пестрой побежалостью. Черта зеленовато-черная, блеск сильный металлический, твердость 6–6,5; спайность весьма несовершенная, излом раковистый. Пирит является основным сырьем для получения серной кислоты. Получаемые в результате обжига пиритные огарки применяются как железная руда и краски (в зависимости от чистоты). Руда меди и золота.

Сфалерит ZnS (цинковая обманка). Название происходит от греческого *сфалерос* — обманчивый. Встречается в виде зернистых выделений, вкрапленников, кристаллов, почковидных и скрытокристаллических образований. Кристаллы имеют тетраэдрический или кубооктаэдрический облик. Часты двойники. Спайность совершенная по {110}. Излом раковистый. Блеск алмазный, жирный. Полупрозрачен. Цвет меняется от светлых тонов желтого, коричневого до темно-бурого и черного. При отсутствии примеси железа — бесцветный. Реже — красноватый, зеленый. Черта от светлого до коричневого цвета. Разновидности: клейофан — светлоокрашенный, бесцветный; марматит — черный, богатый железом. Хрупок. На гранях обычно наблюдается штриховка. Основная руда на цинк. Для извлечения редких элементов: кадмия, индия, германия. Для изготовления цинковых белил.

Халькозин Cu_2S (медный блеск). Название происходит от греческого слова *халькос* — медь. Сингония ромбическая. Твердость 2,5–3. Удельный вес 5,5–5,8. Сплошные тонкозернистые массы, вкрапленники, псевдоморфозы по борниту, халькопириту, ковеллину. Кристаллы редки. Спайность несовершенная. Излом раковистый. Блеск металлический. Непрозрачен. Цвет свинцово-серый. Черта темно-серая. Очень хрупок. При царапании ножом остается блестящий след, чем отличается от блеклой руды. Главнейшая медная руда.

Марказит FeS_2 (лучистый колчедан). Сингония ромбическая. Твердость 6–6,5. Удельный вес 4,8–4,9. Конкреции, почки, натечные агрегаты, сплошные массы, кристаллы копьевидной и таблитчатой формы.

Спайность несовершенная. Излом неровный. Блеск металлический. Непрозрачен. Цвет серовато-желтый. Черта черная, зеленовато-черная. Разновидности: *мельниковит* — *марказит* — порошокватая разность. Для производства серной кислоты и серы.

Пирротин FeS (магнитный колчедан). Сингония гексагональная. Твердость 3,5–4,5. Удельный вес 4,6–4,7. Встречается в виде мелкозернистых агрегатов, сплошных масс, вкраплений. Кристаллы редки. Спайность несовершенная. Излом неровный, раковистый. Блеск металлический. Непрозрачен. Цвет темный, бронзово-желтый, иногда коричневатый. Черта серо-черная. Магнитен. Хрупок. Обладает бурой побежалостью. Хороший проводник электричества. Сырье для сернокислотного производства.

Молибденит MoS_2 (молибденовый блеск). Название происходит от греческого слова *молибдос* — свинец, за сходство со свинцом. Сингония гексагональная. Твердость 1. Удельный вес 4,7–4,8. Листоватые, чешуйчатые агрегаты, сферолиты, оторочки и рассеянная вкрапленность в кварцевых жилах. Кристаллы гексагональной формы, таблитчатые, иногда бочонковидные. Спайность весьма совершенная. Блеск металлический. Непрозрачен. Цвет и черта голубовато-серые, свинцово-серые. Гибок, но не упруг. Жирен на ощупь. Легко чертится и сминается ногтем. Важнейшая руда на молибден, используемый для специальных сортов стали, в электротехнике, в химическом производстве. Извлекается рений.

Антимонит Sb_2S_3 (сурьмяный блеск, *стибнит*). Название происходит от латинского *антимониум* — сурьма. Сингония ромбическая. Твердость 2. Удельный вес 4,6. Агрегаты призматических и игольчатых кристаллов, зернистые массы. Кристаллы столбчатые, призматические, игольчатые. Спайность совершенная по $\{010\}$. Излом неровный, раковистый. Блеск металлический. Непрозрачен. Цвет и черта свинцово-серые, стально-серые. Разновидности: *метастибнит* — аморфный антимонит в виде красных корочек и стяжений. Радужная или синеватая побежалость. В тонких сколах просвечивает желтовато-красным цветом. Имеет вертикальную штриховку, на изломах — мелкую поперечную. Вдоль удлинения при чиркании зажигаются спички. Главный источник сурьмы, изготовление сплавов.

Киноварь HgS (циннабарит, ртутная обманка). Название произошло от индийского слова, обозначающего красную смолу, «кровь дракона». Сингония тригональная. Твердость 2–2,5. Удельный вес 8,0–8,2. Зернистые массы, вкрапленники, налеты, реже кристаллы. Форма кристаллов — ромбоэдрическая, таблитчатая, иногда — столбчатая. Часты двойники. Спайность совершенная. Излом раковистый, иногда занозистый. Блеск алмазный, иногда матовый. Цвет карминно-красный, коричневато-красный. Черта ярко-красная. Разновидности: скрытокристаллические массы — *печенковая ртутная руда* — с органическими и землистыми примесями. Диамагнитна. Хрупка. Нередко обладает свинцово-серой побежалостью. Основная руда на ртуть.

Реальгар As_4S_4 или AsS (красная мышьяковая обманка). Название происходит от арабских слов, обозначающих «пыль рудника». Сингония моноклинная. Твердость 2. Удельный вес 3,6. Зернистые и плотные агрегаты, налеты, кристаллы (мелкие, коротко- или длиннопризматические, часто игольчатые). Спайность совершенная. Излом полураковистый. Блеск смолистый до жирного. Прозрачен до просвечивающего. Цвет огненно-красный, оранжево-желтый. Черта оранжево-красная до огненно-красной. Разрушается на свету, превращаясь в порошок оранжевого цвета. Штриховка вдоль вытянутости кристаллов. Используется как руда на мышьяк.

Аурипигмент As_2S_3 (желтая мышьяковая обманка). Название происходит от золотисто-желтого цвета. Сингония моноклинная. Твердость 2. Удельный вес 3,5. Зернистые и порошковатые агрегаты, столбчатые, волокнистые и почковидные массы, чешуйчатые и слюдоподобные образования. Кристаллы короткопризматические. Спайность весьма совершенная. Блеск перламутровый (на плоскостях спайности), жирный, смоляной (на изломе). Просвечивающий. Цвет золотисто-желтый, лимонно-желтый, иногда буроватый. Черта светло-желтая. Диамагнитен. Не проводит электричества. Руда на мышьяк.

Борнит Cu_5FeS_4 (пестрая медная руда). Назван по имени австрийского минералога И. Борна. Известны две модификации — кубической и ромбической сингонии. Твердость 3. Удельный вес 4,9–5,3. Сплошные массы или зерна неправильной формы. Кристаллы редки. Спайность несовершенная. Излом раковистый. Блеск полуметаллический.

Цвет темный медно-красный на свежем изломе. Черта серовато-черная. Часто наблюдается пестрая побежалость, с преобладанием ярко-синего цвета. Хрупок. Важнейшая медная руда.

Арсенопирит FeAsS (мышьяковый колчедан). Назван по составу «мышьяковый пирит». Сингония моноклинная. Твердость 6. Удельный вес 6. Зернистые и шестоватые агрегаты. Кристаллы и звездчатые сростки. Спайность средняя. Излом неровный. Блеск металлический. Непрозрачен. Цвет серебристо- и оловянно-белый до стально-серого в изломе. Черта серо-черная, иногда со слабо-фиолетовым или бурым оттенком. Разновидность: *данаит* (содержит кобальт от 3 до 12%). Наблюдается продольная штриховка. Часто — желтая побежалость. Чесночный запах при трении. Используется для получения соединений мышьяка. Применяется в сельском хозяйстве, медицине, кожевенном и красочном производствах. Для попутного извлечения кобальта и золота.

Сульфосоли (класс 2)

Блеклые руды ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ *теннантит* и $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ *тетраэдрит*). Название дано из-за тусклого блеска на несвежем изломе. Представляют собой изоморфный ряд минералов, где крайними членами являются *теннантит* (мышьяковая блеклая руда) и *тетраэдрит* (сурьмянистая блеклая руда). Сингония кубическая. Твердость 4 (теннантит тверже тетраэдрита). Удельный вес 4,4–5,1. Сплошные массы, мелко- и среднезернистые до плотных. Вкрапленность в рудах. Кристаллы, двойники. Спайность отсутствует. Излом раковистый, неровный. Блеск металлический. Непрозрачный. Цвет и черта стально-серые до железно-черных. При царапании проявляется хрупкость — черта «пылится» и не оставляет блестящего следа, как у халькозина, похожего на блеклые руды. Источник меди и мышьяка.

Оксиды и гидроксиды (раздел 5)

Класс 1. Простые и сложные оксиды

Корунд Al_2O_3 . Известно много разновидностей корунда — как обычного, так и прозрачного (благородного). Главными среди прозрачных корундов являются: лейкосапфир — бесцветный, сапфир — синий,

рубин — красный, восточный топаз — желтый, восточный аметист — фиолетовый, восточный изумруд — зеленый. Особо выделяют еще наждак, представляющий собой смесь мелкозернистого корунда с магнетитом, гематитом, полевым шпатом и кварцем. Кристаллы корунда имеют бочонковидную, удлиненную форму. Агрегаты — мелкозернистые сплошные массы. Цвет синий, красный, серый. Блеск стеклянный, спайность несовершенная, твердость 9.

Обычный непрозрачный корунд представляет собой ценный огнеупорный и абразивный материал. Прозрачные разновидности корунда используются в ювелирном деле и в точной механике (рубин).

Гематит Fe_2O_3 (железный блеск). Известны его разновидности: железная слюдка — тонкопластинчатая разность, железная сметана — красная порошковатая разность, красный железняк — плотная скрытокристаллическая разность, красная стеклянная голова — почкообразные формы с радиально-волокнистым строением. Гематит образует кристаллы уплощенной таблитчатой и пластинчатой формы. Агрегаты листоватые, чешуйчатые, землистые. Цвет черный до буровато-красного. Черта вишнево-красная до красновато-бурой. Блеск полуметаллический, иногда матовый. Твердость 5,5–6,5. Спайности нет, излом неровный. Гематит является важнейшей железной рудой. Порошковая разность используется для приготовления красной краски и карандашей.

Магнетит Fe_3O_4 (магнитный железняк). Кристаллы изометричной формы в виде октаэдров. Агрегаты зернистые, в пустотах встречаются друзы. Цвет железо-черный, черта черная, блеск металлический. Твердость 5,5–6,5. Спайности нет, излом неровный. Сильно магнитен. Магнетит является важнейшей железной рудой.

Кварц SiO_2 . Образует удлиненно-призматические кристаллы, обычные сростки, друзы. В агрегатах — сплошные массы различной степени зернистости: от грубошестоватых до скрытокристаллических, натечных. Бесцветный, от молочно-белого до серого, желтый, розовый, голубой, зеленый, фиолетовый, коричневый или черный. Черта белая, бесцветная. Спайность отсутствует, излом раковистый. Твердость 7.

Основные разновидности: *горный хрусталь* бесцветный, хорошо окристаллизованный; *аметист* — фиолетовый; *дымчатый кварц* —

бурый, темный; *морион* — черный кварц. Кварц применяется в оптике и радиотехнике, в ювелирном и гранильном деле, в механике точных приборов, стекольном и других производствах. Сплошные массы.

Опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Аморфный, форма выделений — колломорфные агрегаты, почки, натеки и сплошные массы. Цвет белый, голубоватый, серый (редко черный), синий, а также красный, желтый, бурый. Блеск жирный, восковой, перламутровый. Цвет черты белый. Иногда минерал прозрачный. Твердость 5,5–6,5. Спайность отсутствует, излом раковистый, неровный, занозистый.

Разновидности: опал благородный — опал ювелирного качества с радужной опалесценцией (сильными внутренними рефлексами); опал огненный — оранжево-желтый с переливами в красных тонах в виде «языков пламени».

Применяется в ювелирном деле; породы, состоящие из опала (диатомиты, трепелы, опоки), используются в производстве огнеупорных кирпичей, а также в абразивной и керамической промышленности.

Халцедон SiO_2 . Скрытокристаллическая разновидность кварца. Твердость 7–8. Удельный вес 2,5–2,6. Сплошные массы, натечные, почковидные. Спайность отсутствует. Излом неровный, раковистый. Просвечивает. Блеск восковой, матовый. Цвет белый, серый, голубоватый, желтоватый, коричневатый и др. Черта бесцветная. Разновидности: *сердолик* или *карнеол* — желто-красный, красный, восково-желтый; *сапфирин* — голубовато-серый; *хризопраз* — яблочно-зеленый; *гелиотроп* — зеленый с красными пятнами; *агат* — полосчатый, красивой окраски разных цветов; *оникс* — ленточно-полосатый разной окраски; *яшма* — кремнистая плотная порода, главная часть которой слагается халцедоном и кварцем с различными примесями. *Кремень* — халцедон, сильно загрязненный примесями песка и глины. Применяется как абразивный материал. Поделочный камень. Для изготовления ступок, опорных призм, подпятников в приборах.

Пирролюзит MnO_2 . Название происходит от двух слов греческого происхождения: *пир* — огонь, *лойсис* — мытье. Минерал использовался для обесцвечивания стекла. Сингония тетрагональная. Твердость 6 (для кристаллов), 2 (для землистых разновидностей). Удельный вес 5. Землистые, сажистые, сплошные кристаллические и скрытокристалличе-

ские массы. Дендриты. Оолиты. Корки. Конкреции. Иногда лучистые и зернистые агрегаты. Кристаллы длинно- и короткопризматические. Спайность совершенная. Излом неровный, землистый. Блеск металлический, матовый. Цвет темно-стально-черный (в агрегатах), стально-серый (на кристаллах). Черта черная, синевато-черная. Хрупок. Иногда дает синеватую побежалость. Важнейшая руда на марганец.

Рутил TiO_2 . Название произошло от латинского слова *рутилус* — красноватый. Сингония тетрагональная. Твердость 6. Удельный вес 4,4. Встречается в виде кристаллов и зернистых агрегатов. Кристаллы имеют призматический, столбчатый и игольчатый облик. Нередки колленчатые и сердцевидные двойники и тройники. Спайность совершенная. Излом раковистый. Блеск металловидный, алмазный. В тонких сколах прозрачен. Цвет красновато-бурый, красный, бурый, желтый, синеватый, фиолетовый, зеленый, черный. Черта желтая до светло-коричневой. *Нигрин* — железо-содержащий рутил черного цвета. *Сагенит* — игольчатый рутил в кварце, слюдах и др. Хрупок. Грани кристаллов часто покрыты вертикальной штриховкой или бороздками и бугорками. Нерастворим в кислотах. Руда на титан.

Ильменит $FeTiO_3$ (титанистый железняк). Назван по местности — Ильменским горам на Урале. Минерал относится к сложным окислам. Сингония тригональная. Твердость 5–6. Удельный вес 4,8. Плотные образования неправильной формы. Зерна таблитчатые, кристаллы от мелких до крупных (до нескольких десятков сантиметров). Формы кристаллов — толсто-таблитчатые, пластинчатые. Спайность весьма совершенная. Излом раковистый. Блеск металлический, полуметаллический. Непрозрачен. В очень тонких сколах просвечивает красно-бурый цвет. Цвет железо-черный со стально-серым оттенком. Черта черная, буровато-черная. Слабо магнитен. Руда для получения титана.

Хромит $FeCr_2O_4$ (хромистый железняк). Название дано по составу. Сингония кубическая. Твердость 5,5–7,5. Удельный вес 4,2–5,0. Зернистые массы, вкрапленные округлые зерна, редко кристаллы октаэдрического облика. Спайность отсутствует. Излом неровный. Блеск металлический до жирного. Черта бурая, коричнево-зеленая. Основная руда для получения хрома.

Касситерит SnO_2 (оловянный камень). Название происходит от греческого слова *касситерос* — олово. Сингония тетрагональная. Твердость 6–7. Удельный вес 6,5–7. Кристаллы, зернистые агрегаты, сферолиты, иногда скрытокристаллические массы. Кристаллы дипирамидальные, призматические, часты двойники. Спайность несовершенная. Излом неровный, полураковистый. Блеск от алмазного до матового. Иногда металлический — на гранях. Цвет различный — от бесцветного до черного: бурый, коричневый, желтый, оранжевый, красный, серый, зеленый, белый. Черта белая, серая, желтая, бурая. Разновидность: *деревянистое олово*, плотные полосчатые или конкреционные образования. На гранях наблюдается штриховка. Важнейшая руда на олово.

Гидроксиды (Класс 2)

Гётит $\text{FeO}(\text{OH})$ (бурый железняк, лимонит). Он не образует кристаллических форм, а является скрытокристаллическим или аморфным. Обычно встречается в виде натечных масс, а также в виде жеод, конкреций, плотных и землистых масс.

Окраска темно-бурая до черного, порошковые разности коричнево-желтые. Черта желтовато-бурая. Блеск полуметаллический, матовый. Твердость 5–5,5. Спайности нет, излом неровный, землистый. Используется как железная руда.

Диаспор $\text{AlO}(\text{OH})$. Назван от греческого слова *диаспора* — расстояние, вследствие распада минерала на мелкие куски при нагревании. Сингония ромбическая. Твердость 6,5–7. Удельный вес 3,3–3,5. Листоватые, чешуйчатые, волокнистые, натечные образования. Метакolloидные массы. Изредка кристаллы таблитчатого, столбчатого или игольчатого вида. Спайность совершенная. Блеск стеклянный, перламутровый. Цвет желтовато-бурый, белый, зеленоватый, серый, розовый, светло-фиолетовый. Черта белая. Полиморфной разновидностью диаспора является *бемит*. Очень хрупок. Диэлектрик. В пробирке при прокаливании распадается на мелкие белые чешуйки. В составе бокситов вместе с гидраргиллитом и бемитом используется для получения алюминия.

Боксит (смесь минералов глинозема).

Галогениды (галоиды) (Раздел 4)

Фториды (класс 1)

Флюорит CaF_2 (плавиковый шпат). Кристаллы обычно хорошо образованные, изометричной формы. Агрегаты — друзы, зернистые. Окраска часто полихромная, зеленая, голубая, фиолетовая. Блеск стеклянный. Твердость 4, спайность совершенная по октаэдру. Флюорит применяется в металлургии в качестве плавня при выплавке различных металлов. В химической промышленности он является основным сырьем для получения плавиковой кислоты и других фтористых соединений. В стекловарении его используют при изготовлении некоторых сортов оптических стекол, а в алюминиевой промышленности — для получения криолита. Криолиты бесцветного прозрачного флюорита используются в оптике.

Хлориды (класс 2)

Галит NaCl (каменная соль). Кристаллы кубической формы. Агрегаты — друзы, сплошные зернистые массы, плотные кристаллические корочки. Окраска бесцветная, снежно-белая, желтая, бурая, синяя, серая, черная. Блеск стеклянный, жирный. Твердость 2,5. Очень хрупок, спайность совершенная по кубу, растворим в воде, на вкус соленый. Галит применяется главным образом как пищевой продукт и консервирующее средство, а также в химической, металлургической, кожевенной и других отраслях промышленности.

Сильвин KCl . Кристаллы кубической формы, агрегаты от крупного до тонкокристаллических, иногда плотные сливные массы. Окраска бесцветная, молочно-белая, желтоватая, розовато-красная. Блеск стеклянный, жирный. Твердость 2, хрупок, спайность совершенная по кубу. Растворим в воде, вкус горько-соленый. Важнейший источник калия (для производства удобрений), кроме того, сильвин используется в химической промышленности.

Соли кислородных кислот (раздел 6)

Карбонаты (класс 3)

Кальцит CaCO_3 (известковый шпат). Имеет разновидность: исландский шпат — прозрачный двупреломляющий кальцит, который раздваивает рассматриваемые через него изображения.

Кристаллы очень разнообразны по форме. Агрегаты — друзы, зернистые. Бесцветный, окраска белая, желтая, голубая, серая, розовая, красная, бурая, черная. Твердость 3. Хрупок, спайность совершенная в трех направлениях по ромбоэдру. При взаимодействии с соляной кислотой бурно вскипает.

Исландский шпат применяется в оптике для изготовления двупреломляющих призм; известняки — горные породы, состоящие из кальцита, — для изготовления вяжущих строительных материалов (известь, цемент), как строительный и бутовый камень, в качестве флюса в металлургии. Мел используется как пишущий, красочный и полировальный материал. Мраморы — горные породы, состоящие из кальцита, являются строительными и поделочными материалами.

Магнезит MgCO_3 (магнезиальный шпат). Кристаллы редки. Агрегаты крупнозернистые. Окраска белая с сероватым или желтоватым оттенками. Блеск стеклянный. Твердость 4. Хрупок, спайность совершенная в трех направлениях по ромбоэдру. С холодной соляной кислотой не реагирует, растворяется только в горячей соляной кислоте.

Магнезит применяют в основном для производства высокоогнеупорных магнезитовых материалов и металлического магния, специальных цементов; применяется в бумажной, резиновой и других отраслях промышленности.

Доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Кристаллы разнообразные по форме. Агрегаты зернистые. Окраска серовато-белая. Блеск стеклянный. Твердость 3,5–4. Хрупок, спайность совершенная в трех направлениях по ромбоэдру. С соляной кислотой реагирует в порошке. Применяется для получения различных огнеупорных материалов, извести и магнезительного цемента, в качестве флюса при плавке руд и как химическое удобрение.

Сидерит FeCO_3 (железный шпат). Название происходит от слова *сидерос* — железо. Сингония тригональная. Твердость 4–4,5. Удельный вес 3,5–3,9. Кристаллически-зернистые агрегаты. Шаровые конкреции (сферосидериты). Оолиты. Кристаллы ромбоэдрические. Спайность совершенная. Блеск стеклянный. Цвет желтовато-бурый, темно-бурый, серый. Черта светло-коричневая. При взаимодействии с холодной соляной кислотой не вскипает, а образует зеленовато-желтое пятно. Важная руда на железо.

Малахит $\text{Cu}[\text{CO}_3](\text{OH})_2$ (медная зелень). Название происходит от греческого слова *малахе* — мальва (видимо, назван по цвету зелени этого растения). Сингония моноклинная. Твердость 4. Удельный вес 4. Натечные формы, корки, почки с концентрически-зональным строением, землистые массы. Кристаллы призматические, очень редки. Спайность по {001} средняя. Излом раковистый. Блеск стеклянный, алмазный, шелковистый, матовый. Цвет зеленый. Черта светло-зеленая. В HCl бурно выделяет CO_2 . Руда на медь, поделочный камень.

Сульфаты (класс 4)

Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Известны следующие его разновидности: *селенит* — параллельно-волокнистая разновидность с шелковистым блеском; *алебастр* — снежно-белая тонкозернистая разновидность.

Кристаллы таблитчатые. Агрегаты — друзы, мелкозернистые, а также параллельно-волокнистые. Бесцветный, окраска белая, иногда серая, медово-желтая, красная, бурая, черная. Блеск стеклянный, на плоскостях спайности перламутровый. Твердость 2 (чертится ногтем). Спайность совершенная в трех направлениях. Излом неровный, занозистый.

Гипс широко применяется в различных отраслях промышленности в качестве добавки к портландцементу, для получения вяжущих веществ, изготовления архитектурных деталей (перегородок, плит), в бумажном производстве, для приготовления различных красок, эмалей, глазурей и т. д. Алебастр и селенит широко используется как поделочный камень.

Ангидрит CaSO_4 . Название минерала говорит об отсутствии в нем воды в отличие от гипса. Сингония ромбическая. Агрегаты плотные, мелкозернистые. Цвет белый, серый или голубоватый. Черта белая,

блеск стеклянный. Твердость 3–4, хрупкий, спайность совершенная в трех направлениях по кубу. Блеск стеклянный, перламутровый. Переходит в гипс в присутствии воды и увеличивается в объеме до 30 %. Применяется как сырье для получения серной кислоты и как строительный материал, в производстве цемента, как удобрение, в химической промышленности. Поделочный камень.

Барит $BaSO_4$ (тяжелый шпат). Название дано от греческого слова *барос* — тяжелый (из-за большого удельного веса). Сингония ромбическая. Твердость 2,5–3,5. Удельный вес 4,3–4,7. Зернистые плотные агрегаты. Кристаллы таблитчатой формы, реже — призматические, столбчатые. Спайность по {010} совершенная, по {201} средняя, по {001} несовершенная. Блеск стеклянный. Бесцветный, желтый, серый, красный, бурый, голубой. Черта белая. Большой удельный вес. Используется при бурении скважин в качестве утяжелителя глинистых растворов, в лакокрасочной, химической, резиновой и бумажной промышленности, в медицине и сельском хозяйстве (для борьбы с вредителями).

Вольфраматы (класс 6)

Вольфрамит $(Mn, Fe)WO_4$ (волчец — старое русское название). Название «вольфрамит» дано по составу. Название «волчец» происходит от слов «волчья пена» — накипь, появлявшаяся при выплавке оловянных руд, когда минерал еще не был открыт. Минерал представляет собой смесь двух крайних членов изоморфного ряда: ферберита и гюбнерита. Сингония моноклинная. Твердость 4,5–5,5. Удельный вес 6,7–7,5. Встречается в форме кристаллов толстотаблитчатого или призматического облика и крупнозернистых агрегатов. Спайность совершенная. Блеск алмазный, полуметаллический на плоскостях спайности, жирный на изломе. Цвет буро-черный. *Ферберит* — черный. *Гюбнерит* имеет красноватый или фиолетовый оттенок. Черта буро-черная (*ферберит*), желтая, светло-бурая (*гюбнерит*). Хрупок. Наблюдается штриховка. Главная руда на вольфрам.

Фосфаты (класс 7)

Апатит $Ca_3[PO_4]_2F, Cl$. Название происходит от греческого слова *апатао* — обманываю, за сходство с рядом минералов (бериллом, тур-

малином и др.). Кристаллы — часто хорошо образованные шести-гранные призмы. Агрегаты зернистые. Окраска белая, бледно-зеленая, голубая. Сингония гексагональная. Спайность несовершенная. Блеск стеклянный, жирный. Твердость 5, хрупок. Спайность несовершенная, излом неровный. Апатит используется как сырье для фосфорных удобрений, для производства фосфорной кислоты и ее солей. Широко распространены конкреционные образования апатита: *фосфорит* — горная порода, сложенная в основном аморфным или микрокристаллическим апатитом с примесью глинистых частиц, кварца, кальцита, гидроокислов железа, используется для приготовления фосфатных удобрений.

Силикаты (класс 10)

Силикаты представляют собой многочисленный класс минералов, включающий в себя совместно с разновидностями до пятисот представителей, что составляет около четверти всех известных минералов. Они являются важнейшими породообразующими минералами.

Силикаты островные (подкласс А)

Оливин $(\text{Mg, Fe})_2[\text{SO}_4]$. Название по оливково-зеленому цвету. Представляет собой изоморфную смесь форстерита и фаялита. Сингония ромбическая. Правильные кристаллы очень редки, обычно распространен в виде зернистых агрегатов. Окраска от зеленовато-желтого до черного. Черта бесцветная, желтоватая. Блеск стеклянный. Твердость 6–7. Спайность несовершенная. Хрупок, излом раковистый, неровный. Желтовато-зеленого цвета прозрачная разновидность оливина — хризолит — драгоценный камень. Используется как огнеупорное сырье, оливиновая мука — удобрение.

Гранат $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$. Название происходит от латинского слова *гранум* — зерно. Кристаллы граната по форме, иногда и по цвету напоминают зерна плодов гранатового дерева. Гранаты представляют собой изоморфный ряд. Конечными членами этого ряда являются: *пироп* (красно-красный), *альмандин* (красный, буро-красный); *спессартин* (красный с фиолетовым оттенком); *гроссуляр* (зеленый, желтый); *андрадит* (бурый, буровато-зеленый, черный), его прозрачная разновидность —

демантоид; *уваровит* (изумрудно-зеленый). Перечисленные минералы образуют друг с другом твердые растворы и в чистом виде в природе встречаются редко. Сингония кубическая. Твердость 6,5–7,5. Встречается в виде кристаллов — ромбододекаэдров, пентагон-додэкаэдров, тетрагонтриоктаэдров. Спайность отсутствует. Излом неровный, раковистый. Блеск стеклянный. Цвет красный, зеленый, желтый, красно-фиолетовый, черный. Абразивный материал. Используется в ювелирной промышленности (пироп, уваровит, демантоид).

Эпидот $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3[\text{Si}_3\text{O}_{12}](\text{OH})$. Название происходит от греческого слова *эпидос* — приращение, прибавка, так как основание призматического кристалла имеет одну сторону длиннее другой. Сингония моноклинная. Твердость 7. Длиннопризматические кристаллы с продольной штриховкой. Лучистые и шестоватые агрегаты, зернистые массы. Спайность совершенная по {001}. Блеск стеклянный, сильный. Цвет фисташково-зеленый, грязно-зеленый, реже — черный. Разновидности: *клоиноцоизит* — маложелезистый эпидот, *пьемонтит* обогащен марганцем. Породообразующий минерал, поделочный камень.

Силикаты кольцевые (подкласс Б)

Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. Название дано по химическому элементу бериллию. Сингония гексагональная. Твердость 7,5–8. Удельный вес 2,6–2,9. Призматические удлиненные кристаллы — гексагональные призмы в комбинации с дипирамидой и пинакоидом. Кристаллы иногда достигают больших размеров — до нескольких метров в длину. Спайность несовершенная. Излом раковистый. Цвет от бледных оттенков серого, желтого и розового цвета до голубого и ярко-зеленого. Разновидности: *аквамарин* — голубой, цвета морской волны, прозрачный; *изумруд* — ярко-зеленого цвета; *воробьевит* — розовый (содержит цезий); *гелиодор* — желтая прозрачная разновидность. Руда на бериллий. Изумруд, воробьевит, аквамарин и гелиодор — драгоценные камни.

Турмалин $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Al}, \text{Fe})[\text{BO}_3]_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. Сингония тригональная. Твердость 7. Агрегаты шестоватые, радиально-лучистые, волокнистые, реже — зернистые. Кристаллы призматические, игольчатые, вытянутые вдоль оси третьего порядка. Характерна продольная штриховка и сечение в форме сферического треугольника. Спайность от-

сутствует. Блеск стеклянный. Цвет разнообразный — от светлых тонов до бурых и черных оттенков.

Разновидности: *шерл* — черный; *рубеллит* — розовый (содержит литий); *индиголит* — синий; *дравит* — бурый. Встречаются полихромные турмалины — с чередующимися полосами разных оттенков красного, розового, зеленого, бесцветного, синего. Пьезо- и термоэлектрическое сырье, используется в ювелирной промышленности.

Силикаты цепочечные (подкласс В)

***Авгит* $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$.** Название — от греческого слова *авге* — блеск, из-за сильного блеска на гранях. Сингония моноклинная. Твердость 5–6,5. Короткостолбчатые, таблитчатые кристаллы. Сплошные зернистые массы. Спайность средняя. Излом раковистый. Блеск полуметаллический, стеклянный. Цвет черный, бурый, темно-зеленый. Разновидность: титанавгит. Породообразующий минерал.

***Пироксен* $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})[\text{Si}_2\text{O}_6]$.** Кристаллы довольно редки, короткостолбчатые и таблитчатые, агрегаты зернистые. Окраска обычно черная с зеленоватым или буроватым оттенком. Блеск стеклянный. Твердость 5,5–6. Спайность средняя с углом между плоскостями спайности 90° . Излом неровный, ступенчатый. Является важнейшим породообразующим минералом.

Силикаты ленточные (подкласс Г)

***Роговая обманка* $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_7(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$.** Относится к ленточным силикатам (амфиболам). Сингония моноклинная. Кристаллы удлиненные, столбчатые, агрегаты крупно-, гигантозернистые. Окраска различная. В зависимости от химического состава выделяются разновидности: черная — роговая обманка, зеленая — актинолит, синяя — глаукофан. Блеск стеклянный, твердость 5,5–6. Спайность средняя с углом между плоскостями спайности 120° . Излом часто занозистый. Важнейший породообразующий минерал.

Силикаты листовые (подкласс Д)

Биотит $K(\text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{OH}, \text{F})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$. Листовые силикаты. Сингония моноклинная. Кристаллы таблитчатые, агрегаты листоватые и чешуйчатые. Окраска черная, бурая, блеск стеклянный, на плоскостях спайности с перламутровым отливом. Твердость 2–3. Спайность весьма совершенная. Разновидность: *лепидолит* — черная слюда, без магния. Породообразующий минерал.

Мусковит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$. Название произошло от старинного названия города Москвы — «Муска» (итал.), т. к. через Москву этот минерал вывозился на запад под названием «московского стекла».

Тальк $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$. Разновидностями являются стеатит, жировик или мыльный камень — плотная разность талька, благородный тальк — прозрачный, светло-зеленый. Кристаллы редки. Агрегаты листоватые, чешуйчатые, плотные. Окраска бледно-зеленая, белая с желтоватым, буроватым, розоватым оттенками. Блеск стеклянный с перламутровым отливом; жирный на ощупь. Спайность весьма совершенная. Листочки гибки, но не упруги. Твердость 1. Тальк применяется в качестве кислотно- и огнеупорного материала. Используется в медицине, парфюмерии, бумажном и резиновом производствах, а также в сельском хозяйстве.

Каолинит $\text{Al}_4(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$. Кристаллы редки и мелки. Агрегаты рыхлые, землистые, тонкочешуйчатые. Цвет белый, блеск матовый у сплошных масс. Жирный на ощупь. При замешивании с водой образует пластичную массу. Твердость 1. Спайность весьма совершенная. Каолинит является главной составной частью многих огнеупорных глин, употребляемых как сырье для керамических и огнеупорных изделий, как строительный материал, в качестве наполнителя при производстве бумаги, линолеума и т. п.

Хлориты $(\text{Mg}, \text{Al})(\text{OH})_8[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}]$. К хлоритам относятся слюдоподобные минералы сложного химического состава. Кристаллы таблитчатые. Агрегаты — чешуйчатые, листоватые. Окраска обычно зеленая различных оттенков. Черта зеленовато-белая. Блеск стеклянный до перламутрового. Твердость 1,5–3. Спайность весьма совершенная. Излом занозистый, неровный.

Серпентин $Mg_3(OH)_4[Si_4O_{10}]$. *Хризотил-асбест* — волокнистая разновидность серпентина. Образует агрегаты — плотные скрытокристаллические массы, иногда с прожилками хризотил-асбеста. Окраска темно-зеленая, зеленовато-черная. Блеск стеклянный, матовый, жирный. Твердость 2,5–4. Спайность весьма совершенная. Серпентин используется как облицовочный и поделочный камень, а также как высококачественное огнеупорное сырье. *Хризотил-асбест* обладает огнестойкостью и щелочеупорностью, плохо проводит тепло, электричество и звук, что определяет его большое значение при производстве жаростойких и кислотоупорных материалов, картона, пряжи, специальных костюмов. В электро- и радиотехнике применяется как изоляционный материал. Наиболее ценится длиноволокнистый асбест, называемый текстильным, так как он пригоден для изготовления несгораемых тканей и тормозных лент.

Силикаты каркасные (подкласс E)

Полевые шпаты. Это наиболее распространенные породообразующие минералы. По химическому составу полевые шпаты делятся на две подгруппы: калиевые полевые шпаты и натриево-кальциевые, или плагиоклазы.

Подгруппа *калиевых полевых шпатов* включает в себя минералы *микроклин* и *ортоклаз*.

Ортоклаз $K[AlSi_3O_8]$. Кристаллы призматические. Агрегаты зернистые, друзы. Окраска белая с розоватым оттенком. Блеск стеклянный, матовый. Твердость 6. Спайность средняя, угол между плоскостями спайности 90° . Излом неровный, ступенчатый.

Подгруппа *натриево-кальциевых полевых шпатов*, или *плагиоклазов* является рядом смесей, крайние члены которых носят название *альбит* $Na[AlSi_3O_8]$ и *анортит* $Ca[Al_2Si_2O_8]$. Существуют все разновидности непрерывно меняющегося состава от чистого альбита до чистого анортита. В кремнекислородных тетраэдрах $[SiO_4]^{4-}$ кристаллической структуры альбита один из четырех ионов Si^{4+} замещен ионом Al^{3+} , тогда как в анортите Al^{3+} замещает два иона Si^{4+} . В связи с этим содержание SiO_2 постепенно уменьшается от альбита к анортиту. По содержанию SiO_2 плагиоклазы делятся на три группы: *кислые* (существенно натриевые), *средние* (натриево-кальциевые) и *основные* (существенно кальциевые) плагиоклазы.

Кристаллы таблитчатые и призматические. Агрегаты зернистые и друзы. Окраска белая с зеленоватым оттенком. Блеск стеклянный. Твердость 6–6,5. Спайность средняя с углом 86° . Излом неровный.

Лабрадор $(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}_2\text{Si}_2]_8$ — один из средних плагиоклазов, образует сплошные крупнозернистые агрегаты. Член изоморфного ряда: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — альбит; $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ — анортит. Составляет 50–70 % анортитового компонента. Это полупрозрачный минерал от темно-серого до черного цвета, обладающий специфическим свойством — иризацией — переливчатыми отсветами на плоскостях спайности в зеленых и синих тонах. Лабрадор — ценный поделочный камень.

Фельдшпатыды

К фельдшпатам относятся минералы (нефелин, лейцит, лазурит, содалит и др.), близкие к полевым шпатам по структуре, но содержащие меньшее количество кремнезема и больше щелочей по сравнению с полевыми шпатами.

Нефелин $\text{Na} [\text{AlSiO}_4]$. Название дано от греческого слова *нефели* — облако, так как при разложении в крепких кислотах минерал дает облаковидный гель кремнезема. Сингония гексагональная. Твердость 5–6. Сплошные крупнозернистые массы. Призматические и короткостолбчатые кристаллы. Спайность несовершенная. Блеск жирный. Цвет серый, желтоватый, зеленоватый, красноватый. Разновидности: *элолит* (масляный камень) — сливные массы с жирным блеском. Руда на алюминий. Калийное удобрение. Используется в керамической и стекольной промышленности.

2.2. Перечень практических (лабораторных) занятий

Лабораторная работа № 1

Раздел 1. Самородные элементы

1. Сера S.
2. Графит C.

Раздел 3. Сульфиды и сульфосоли

Класс 1. Простые и сложные сульфиды

3. Пирит — серный колчедан FeS_2 .
4. Халькопирит — медный колчедан CuFeS_2 .
5. Арсенопирит — мышьяковый колчедан FeAsS .
6. Пирротин — магнитный колчедан FeS .
7. Марказит FeS_2 .
8. Молибденит — молибденовый блеск MoS_2 .
9. Галенит — свинцовый блеск PbS .
10. Антимонит — сурьмяный блеск Sb_2S_3 .
11. Реальгар AsS .
12. Аурипигмент As_2S_3 .
13. Сфалерит ZnS .
14. Халькозин Cu_2S .
15. Борнит Cu_3FeS_4 .
16. Киноварь HgS .

Класс 2. Сульфосоли

17. Блеклые руды (теннантит $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ и тетраэдрит $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$).

Лабораторная работа № 2

Раздел 5. Оксиды и гидроксиды**Класс 1. Простые и сложные оксиды**

1. Кварц SiO_2 .
2. Халцедон SiO_2 .
3. Опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.
4. Касситерит SnO_2 .
5. Рутил TiO_2 .
6. Пирролюзит MnO_2 .
7. Корунд Al_2O_3 .
8. Гематит — красный железняк FeO_3 .
9. Ильменит — титанистый железняк FeTiO_3 .
10. Магнетит — магнитный железняк FeFe_2O_4 .
11. Хромит — хромистый железняк FeCr_2O_4 .

Класс 2. Гидроксиды

12. Гетит $\text{FeO}(\text{OH})$.
13. Диаспор $\text{AlO}(\text{OH})$.
14. Боксит (смесь минералов глинозема).

Лабораторная работа № 3

Раздел 4. Галогениды

Класс 1. Фториды

1. Флюорит CaF_2 .

Класс 2. Хлориды

2. Галит NaCl .

3. Сильвин KCl .

4. Карналлит $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Раздел 6. Соли кислородных кислот

Класс 3. Карбонаты

5. Кальцит CaCO_3 .

6. Магнезит MgCO_3 .

7. Сидерит FeCO_3 .

8. Доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

9. Малахит $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$.

10. Церуссит PbCO_3 .

Класс 4. Сульфаты

11. Ангидрит CaSO_4 .

12. Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

13. Барит BaSO_4 .

Класс 5. Хроматы

14. Крокоит PbCrO_4 .

Класс 6. Вольфраматы

15. Шеелит CaWO_4 .

16. Вольфрамит $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{WO}_4$.

Класс 7. Фосфаты

17. Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$.

Лабораторная работа № 4

Класс 10. Силикаты

Подкласс А. Островные $[\text{SiO}_4]$

1. Циркон $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$

2. Оливин $(\text{Fe}, \text{Mg})_2[\text{SiO}_4]$

3. Топаз $\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{F}, \text{OH})_2$

4. Кианит (Дистен) $\text{Al}_2\text{O}[\text{SiO}_4]$

5. Гранат $\text{T}_3\text{R}_2[\text{SiO}_4]_3$, где (Т-Мg, Мn, Fe; R-Al, Fe, Cr)

6. Титанит (Сфен) $\text{CaTiO}[\text{SiO}_4]$
 7. Эпидот $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3[\text{Si}_3\text{O}_{12}](\text{OH})$
Подкласс Б. Кольцевые $[\text{Si}_3\text{O}_9]$, $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
 8. Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
 9. Шерл (Турмалин) $\text{NaFe}^{2+}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}](\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$
 10. Родонит $\text{Ca}, \text{Mn}_4[\text{Si}_5\text{O}_{15}]$
Подкласс В. Цепочечные $[\text{Si}_2\text{O}_6]$
 11. Диопсид $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$
 12. Авгит $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ti}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$
 13. Энстатит $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$
Подкласс Г. Ленточные $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$
 15. Актинолит $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2[\text{OH}]_2$
 16. Роговая обманка $\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_4(\text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$
Подкласс Д. Листовые $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$
 17. Тальк $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
 18. Биотит $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$
 19. Мусковит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$
 20. Хлорит $(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$
 21. Каолинит $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5]_x(\text{OH})_4$
 22. Серпентин $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$
 23. Хризотил-асбест $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$
Подкласс Е. Каркасные $[\text{SiO}_2]_n$
 24. Ортоклаз $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
 25. Микроклин $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
 26. Альбит $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$
 27. Лабрадор $(\text{Na}, \text{Ca})[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$. Член изоморфного ряда — (альбит-анортит). Составляет 50–70 % анортитового компонента.
 28. Нефелин $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$

2.3. Контрольная работа по описанию и диагностике минералов

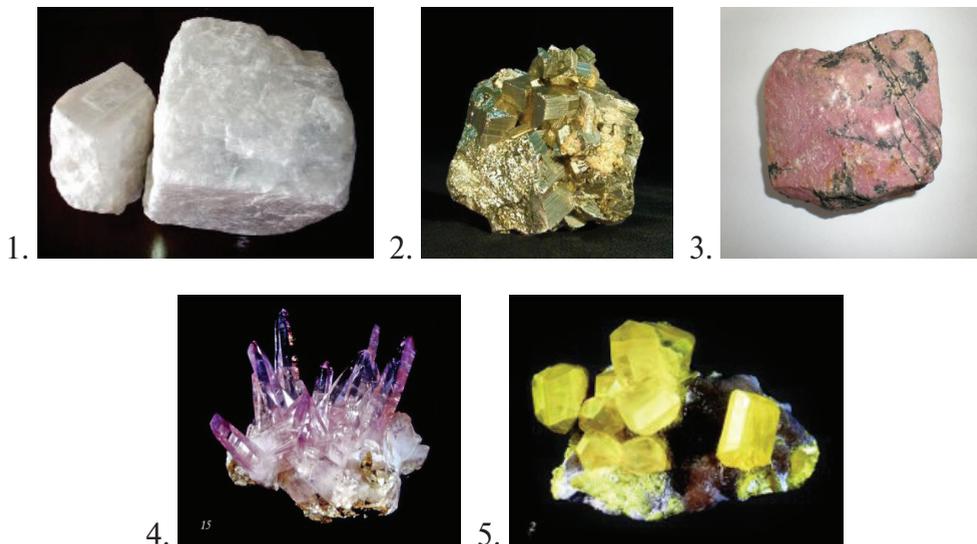
Преподаватель выдает студенту один из вариантов задания, согласно которому требуется определить и описать минералы по главным диагностическим признакам. Минералы подобраны по 1 штуке из различных классов: сульфиды, карбонаты, самородные, оксиды, силикаты и др. Всего выдается 5 минералов для определения.

Минералы описываются студентом в следующей последовательности:

- определение минерала по его характерным признакам, название раздела, химическая формула;
- сингония, облик кристалла;
- строение минерального агрегата (зернистый, конкреции, секреции, оолиты, землистые массы);
- спайность (степень совершенства), количество направлений, форма спайных обломков, характер поверхности излома (ровный, раковистый);
- цвет минерала, черта;
- блеск минерала — металлический, полуметаллический, стеклянный, алмазный и другие особенности, не связанные с отражательной способностью;
- твердость по Ф. Моосу, определяется примерно по бытовой шкале, более точно — по шкале стандартных минералов;
- особые свойства: связанные с окраской — иризация, побежалость; с реакцией на разбавленную соляную кислоту и с растворимостью в воде; вкус, магнитность, плотность;
- сходные минералы: сера-аурипигмент, реальгар-киноварь, кальцит-доломит;
- условия нахождения минералов (в изверженных, осадочных, метаморфических породах, как породообразующий, жильный или рудный минерал);
- месторождения.

2.4. Пример выполнения контрольной работы по минералогии

Вариант № 5



Пример описания для Варианта № 5

Преподаватель выдает 5 минералов из разных классов. Студент определяет минералы по главным диагностическим признакам: твердость — по стеклу (твердость стекла — 5,5), цвет черты — по фарфоровой пластинке, реакцию с кислотой HCl (реагирует или нет), плотность по весу и т. д. При выполнении работы необходимо знать свойства минералов, теорию. Можно использовать таблицу для определения минералов (приложение 3).

1. Барит: BaSO_4 . Сингония ромбическая. Строение агрегата зернистое. Спайность совершенная в трех направлениях, излом ровный. Цвет белый. Блеск стеклянный. Твердость 3–3,5. Плотность 4,5. Особые свойства: большой удельный вес. Сходные минералы: ангидрит.

2. Пирит: FeS_2 . Сингония кубическая. Облик кубический; штриховка на гранях куба. Спайность несовершенная, излом раковистый. Цвет светло-желтый; черта зеленовато-черная. Блеск сильный металлический. Твердость 6–6,5. Особые свойства: высокая твердость.

3. Родонит: $\text{CaMn}_4[\text{Si}_5\text{O}_{15}]$. Строение агрегата: плотный. Спайность совершенная, излом неровный. Цвет розовый до ярко-красного. Блеск

стеклянный. Твердость 5,5–6,5. Особые свойства: розовый цвет с прожилками гидроокислов марганца.

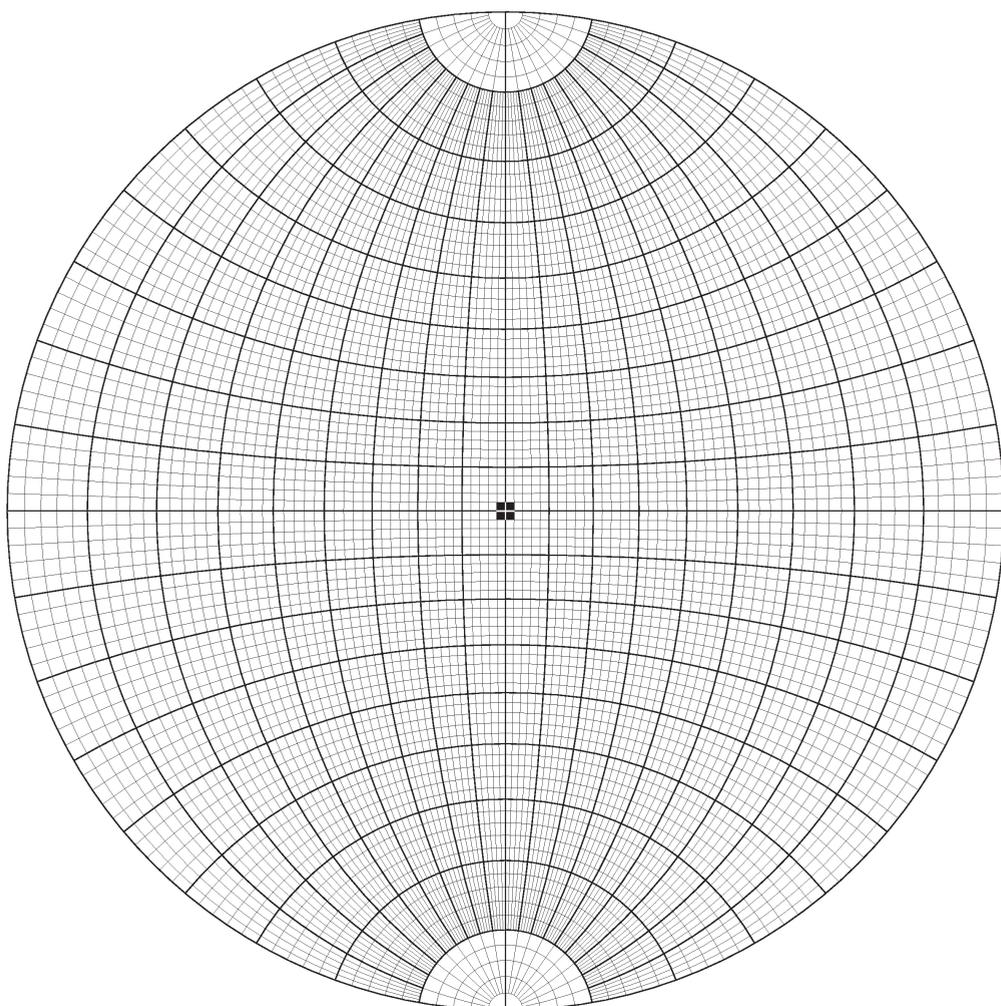
4. Аметист (фиолетовый кварц): SiO_2 . Сингония тригональная, гексагональная. Облик кристалла призматический, бипирамидальный. Строение агрегата: друза; спайность несовершенная, излом раковистый, неровный; цвет фиолетовый; блеск стеклянный. Твердость 7, плотность 2,6.

5. Сера: S. Сингония ромбическая. Облик кристалла изометрический. Спайность несовершенная, излом раковистый, неровный. Цвет медово-желтый, черта белая. Блеск на гранях алмазный; на изломе жирный. Твердость 1,5–2. Особые свойства: при нагревании растрескивается, легко горит, выделяя SO_2 .

Библиографический список

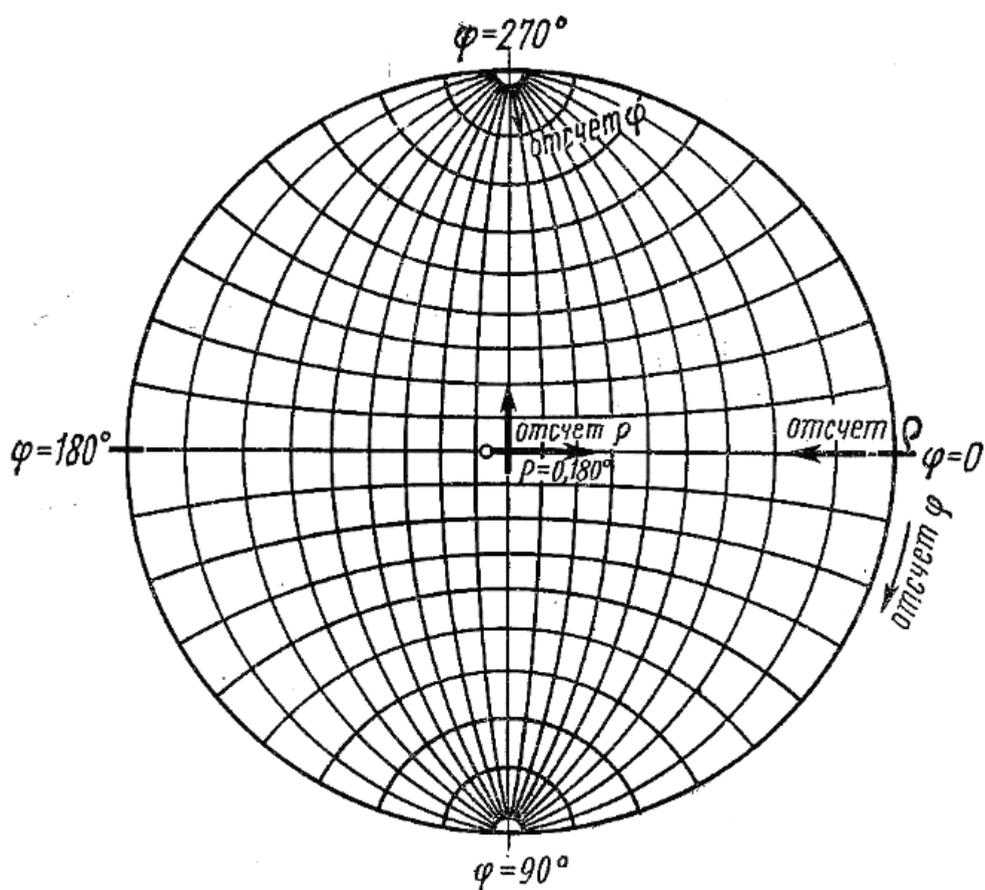
1. Бетехтин А. Г. Курс минералогии : учеб. пособие / А. Г. Бетехтин. М. : КДУ, 2007. 721 с.
2. Егоров-Тисменко Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия / Ю. К. Егоров-Тисменко. М. : Высшая школа, 2005. 589 с.
3. Алявдин В. Ф. Краткий курс кристаллографии / В. Ф. Алявдин, И. И. Шафрановский. М. : Высшая школа, 1984. 120 с.
4. Юдин И. А. Минералогия горных пород, технических камней и метеоритов : учеб. пособие / И. А. Юдин, В. Н. Логинов, Ф. Л. Капустин. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. 124 с.
5. Вертушков Г. Н. Таблицы определения минералов по физическим и химическим свойствам / Г. Н. Вертушков, В. Н. Авдонин. М. : Недра, 1992. 494 с.
6. Попов Г. М. Кристаллография / Г. М. Попов, И. И. Шафрановский. М. : Высшая школа, 1972. 352 с.
7. Гумилевский С. В. Кристаллография и минералогия / С. В. Гумилевский, В. М. Киршон, Г. П. Луговской. М. : Высшая школа, 1976. 392 с.
8. Кристаллография и минералогия : метод. указания. Ч. 1 / сост. В. Н. Логинов, О. И. Корженко. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. 31 с.
9. Кристаллография и минералогия : метод. указания. Ч. 2 / сост. В. Н. Логинов. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. 45 с.

Приложение 1



Сетка Вульфа

Приложение 2



Сетка Вульфа: отсчет углов

Приложение 3

Определение минералов по внешним признакам

| № | Название минерала, химическая формула | Сингония, облик кристалла | Строение агрегата | Спайность, излом | Цвет, черта | Блеск | Твердость | Плотность | Особые свойства | Сходные минералы | Условия нахождения |
|------------------------------|--|--|----------------------|--|--|---------------------------------------|-----------|-----------|--|-----------------------|--|
| 1 | Графит C | Гексагональная; пластинчатый, таблитчатый | Чешуйчатый, плотный | Весьма совершенная по I направлению (по пинаккулу) | Черный, серый; черная | Металловидный или матовый | 1 | 2,1–2,2 | Пачкается руки, пилет на бумаге, жирен на ощупь | Молибденит | Гнейсы, пегматиты, сисениты |
| 2 | Сера S | Ромбическая; пирамидальный, изометрический | Зернистый, землестый | Несовершенная; раковистый, неровный | Серо-желтый, медово-желтый; белый; белая | На глянцах алмазный; на изломе жирный | 1,5–2 | 2,0–2,1 | При нагревании растрескивается, легко горит, выделяя SO ₂ | Аурипигмент | В вулканических отложениях, осадочных породах, в зоне окисления сульфидных месторождений |
| Сульфиды и сульфосоли | | | | | | | | | | | |
| 3 | Пирит (серный колчедан) FeS ₂ | Кубическая; Кубический, октаэдрический; штриховка на гранях куба | Зернистый | Несовершенная; раковистый излом | Светло-желтый; зелено-ваточерная | Сильный металлический | 6–6,5 | 4,9–5,2 | Высокая твердость | Халькопирит, марказит | Жилы, колчеданные залежи, метаморфические и осадочные породы |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|--|------------------------------|---|--|-----------------------|-------|---------|--|-------------------------|---|
| 4 | Халькопирит (медный колчедан) $CuFeS_2$ | Тетрагональная; тетраэдрический | Зернистый | Несовершенная; раковистый | Лагунно-желтый; зеленовато-черная | Сильный металлический | 3–4 | 4,1–4,3 | Пестрая по бежалость | Пирит, пирротин, золото | Жилы, контактово-метасоматические месторождения, колчеданные залежи |
| 5 | Арсенопирит (мышьяковый колчедан) $FeAsS$ | Моноклиновая; призматический, изометрический | Шестоватый, зернистый | Несовершенная; неровный | Оловяно-белый до стальнo-серого; серовато-черная | Металлический | 5,5–6 | 5,9–6,3 | При ударе молотком издает чесночный запах | Маарказит | В кварцевых жилах, скарнах |
| 6 | Пирротин (магнитный колчедан) FeS | Гексагональная; моноклиновая; таблитчатый, дипирамидальный | Зернистый | Несовершенная; неровный | Бронзово-желтый; серовато-черная до черной | Металлический | 4 | 4,6–4,7 | Магнитен, бурая побелость | Пирит, халькопирит | В основных изверженных породах, кварцевых жилах, скарнах |
| 7 | Марказит FeS_2 | Ромбическая; таблитчатый, призматический | Конкреции, почковидные массы | Несовершенная; неровный | Лагунно-желтый с серым оттенком; зеленовато-черная | Металлический | 5–6 | 4,9 | – | Пирит, арсенопирит | В осадочных породах, богатых органическим веществом |
| 8 | Молибденит (молибденитовый блеск) MoS_2 | Гексагональная; таблитчатый | Листоватый, чешуйчатый | Весьма совершенная в одном направлении (по пинакоиду) | Свинцово-серый с голубоватым оттенком | Металлический | 1 | 4,7–4,8 | Мажет руки, жирный на ощупь, черта при растирании зеленеет | Графит, тетраэдрит | Кварцевые и пегматитовые жилы, скарны |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|---|---|---|--|--|---------------------------------------|-------|---------|--|---------------------|----|---|
| 1 | 9 | Галенит (свинцовый блеск) PbS | Кубическая; кубы, октаэдры | Зернистый, плотный | Совершенная по трем направлениям под давлением углем (по кубу) | Свинцово-серый; серовато-черная | Металлический | 2–3 | 7,4–7,6 | Большой удельный вес, слабо ковков | Анти-монит | 12 | Гидротермальные сульфидные и кварцевые-сульфидные жилы, скарны |
| 10 | 10 | Антимонит (сурьмяный блеск) Sb ₂ S ₃ | Ромбическая; призматический, игольчатый | Зернистый, спутанно-волокнистый | Совершенная в одном направлении (по пи-наккиду) | Серый; черная | Металлический | 2 | 4,5–4,7 | Черта при растирании краснеет | Галенит | | Кварцевые жилы |
| 11 | 11 | Реальгар AsS | Моноклинная; призматический | Игольчатый, зем-листый, зернистый, налеты | Совершенная в одном направлении (по 010); по-луракови-стый | Красный, оранжево-красный; красная, оранжево-красная | На границах алмазных, в изломе-жирный | 1,5–2 | 2,56 | Низкая твердость, парагенезис с аурипигментом | Крокозит, кинноварь | | В карбонатно-сульфидных жилах, в вулканических отложениях |
| 12 | 12 | Аурипигмент As ₂ S ₃ | Моноклинная; призматический | Чешуйчатый, порошок, коватый, натечный | Весьма совершенная в одном направлении (по 010) | Золотистый; желтый; золотисто-желтая | От алмазного до полуметаллического | 1,5–2 | 3,5 | Низкая твердость, яркий цвет, парагенезис с реальгаром | Сера | | В низкотемпературных гидротермальных месторождениях, в отложениях гор. источников |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---|---|----------------------|---|--|---------------------------|-------|---------|--|-----------------------------|---|
| 13 | Сфалерит ZnS | Кубическая; тетраэдрический | Зернистый, землистый | Совершенная (по 110) в шести направлениях | Бесцветный, серый, желтый (клей-офан); желтая. Зеленый, красный, черный, бурый, коричневая | Алмазный | 3–4 | 3,9–4,1 | – | Вольфрамит | В кварцевых жилах, колчеданных залежах, известняках, полиметаллических месторождениях |
| 14 | Халькозин (медный блеск) Cu ₂ S | Ромбическая; короткопризматический, таблитчатый | Плотный, зернистый | Несовершенная; раковистый | Темносерый, черная | Металлический | 2–3 | 5,5–5,8 | Царапина от иглы блестящая, ковок | Блеклые руды | Низкотемпературные гидротермальные образования |
| 15 | Борнит Cu ₃ FeS ₄ | Кубическая; кубический, октаэдрический | Зернистый | Несовершенная; раковистый | Темный медно-красный; серовато-черная | Полуметаллический | 3 | 4,9–5,3 | Пестрая по бежалость, свежий излом мелко-красный | Пирротин | Колчеданные залежи, кварцевые жилы, песчаники, габбро |
| 16 | Киноварь HgS | Тригональная; ромбоэдрический, таблитчатый | Зернистый, землистый | Совершенная по трем направлениям (по 010); неровный | Красный, коричневато-красный; яркий; ко-красная | Сильный полуметаллический | 2–2,5 | 8–8,2 | Красный цвет, низкая твердость, высокий удельный вес | Куприт, крокоцит, ренальгар | Гидротермальные, низкотемпературные месторождения, в известняках, песчаниках, жилах |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------------------|--|--|---|---|--|-------------------------------------|-------|---------|---|------------------|--|
| 2-й класс. Сульфосоли | | | | | | | | | | | |
| 17 | Блеклые руды (теннантит $Cu_{12}As_4S_{13}$ и тетраэдрит $Cu_{12}Sb_4S_{13}$) | Кубическая; тетраэдрический | Зернистый, плотный | Отсутствует; неровный | Стально-серый до железно-черного; от черной до красной | Металлический или полуметаллический | 3–4,5 | 4,9–5,1 | При царапании ножом черта пылится, в изломе — блестящий | Халькозин | Жилы кварцево-сульфидные, сульфидные |
| Раздел IV. Галогениды | | | | | | | | | | | |
| 1-й класс. Фториды | | | | | | | | | | | |
| 18 | Флюорит CaF_2 | Кубическая; кубический, октаэдрический | Зернистый, землистый (растовки), радиально-лучистый | Совершенная по (111) в четырех направлениях; неровный, раковистый | Бесцветный, зеленый, фиолетовый, голубой, красноватый; белый; бесцветная | Стекланый | 4 | 3,18 | — | Кварц, карбонаты | В грейзенах, скарнах, кварцевых и пегматитовых жилах, fumarолах, осадочных породах |
| 2-й класс. Хлориды | | | | | | | | | | | |
| 19 | Галит $NaCl$ | Кубическая; кубический | Зернистый, друзы, сталактиты | Совершенная по (100) в трех направлениях; раковистый | Бесцветный, белый, серый, желтый, красный; белая | Стекланый | 2–2,5 | 2,2 | Легко растворяется в воде, солевой на вкус | Сильвин | В соляных залежах, солончаках |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|---|--|--|-------------------------------|-----------|-------------|--|------------------------|--|----|
| 1 | 20 | Сильвин КСl | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | | Кубиче- ская; куби- ческий | Зерни- стый, землн- стый | Совершен- ная по (100) в трех на- правлениях; неровный | Бесцвет- ный, бе- лый, голу- бой, жел- тый, крас- ный; белая | Стеклян- ный | 1,5– 2 | 1,99 | Растворяется в воде, вкус горький, со- леный, жгу- чий | Галит | В соляных за- лежах морско- го происхож- дения, в вул- канических продуктах | |
| | 21 | Карналлит КСl MgCl ₂ · 6H ₂ O | Зерни- стый | Отсутству- ет; ракови- стый | Бесцвет- ный, розо- вый. Жел- тый. Крас- ный. Бу- рый; белая | Стеклян- ный или жирный | 2,5 | 1,6 | Вкус горь- кий, жгучий, сорбирует воду из ат- мосферы | Галит, силь- вин | В залежах ка- лийных солей | |
| Раздел V. Оксиды, гидроксиды 1-й класс. Простые и сложные | | | | | | | | | | | | |
| | 22 | Кварц SiO ₂ | Зерни- стый, друзы, щетки | Несовер- шенная; ра- ковистый. Неровный | Бесцвет- ный, бе- лый, се- рый, ро- зовый, желтый, фиолето- вый | Стеклян- ный | 7 | 2,6 | – | Нефе- лин, топаз | Породообр. в кислых гор- ных породах, в пегматито- вых и кварце- вых жилах | |
| | 23 | Халцедон SiO ₂ | Плотный, натеч- ный, ста- лактиты, короч- ки, кон- центри- чески-по- лосчатый (агат) | Неровный | Белый, серый, голубой, желтый, красный, зеленый | Восковой до мато- вого | 6,5– 7 | 2,5– 2,6 | – | Опал | Гидротермаль- ные жилы, вы- полняет пу- стоты в эффу- зивных горных породах | |

| | | | | | | | | | | | |
|----|--|---|---------------------------------|--|---|---|------------------|---------|--------------------------------|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 24 | Опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ | Твердый гидрогель | Аморфный, плотный, натечный | Раковистый | Бесцветный. Различные оттенки желтого, зеленого, красного, бурого | Стекланый, упористых масс восковой, матовый | 5–5,5 1,9–2,2 | – | Халцедон | В гидротермальных источниках, гейзерах, в зоне выветривания у/основных пород, в осадочных породах | |
| 25 | Касситерит SnO_2 | Тетрагональная; призматический, дигипирамидальный | Зернистый, вкрапления, натечный | Несовершенная; раковистый | От светло-желтого до бурого и черного; белая, коричневая | Алмазный | 6–7 | 7 | – | Рутил, циркон | В кварцевых и пегматитовых жилах, скарнах, измененных гранитах, россыпях |
| 26 | Рутил TiO_2 | Тетрагональная; призматический, дигипирамидальный, часто двойники, тройники | Зернистый, игольчатый | Совершенная (в 2 направлениях); раковистый | Темно-желтый, бурый, красный, черный; желтая, коричневая | Алмазный до металлоидного | 6–6,5 | 4,2 | – | Касситерит | В метаморфических породах, кварцевых жилах, россыпях |
| 27 | Пирролюзит MnO_2 | Тетрагональная; призматический | Зернистый, землестый, конкреции | Совершенная (по 110); неровный | Черный (иногда синеватая побелость); черная | Полуметаллический | От 2 до 5–6 | 4,7–5,2 | Землестые различия пакают руки | Оксиды и гидроксиды Mn | Осадочные месторождения, марганцевые шпаты |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---|--|---|--|---|---|---------|---------|-------------------------------------|--|--|
| 28 | Корунд Al_2O_3 | Тригональная; призматический, таблитчатый, дипирамидальный | Зернистый, вкрапления | По пинакоиду и ромбоэдру — отдельность; раковинистый, неровный | Бесцветный, серый, синий, красный, желтый, зеленый | Стекланый | 9 | 4—4,4 | Высокая твердость, форма кристаллов | Шпиль | В сиенитах, пегматитах, гнейсах, россыпях |
| 29 | Гематит (красный железняк, железный блеск и т. д.) Fe_2O_3 | Тригональная; таблитчатый, ромбоэдрический | Зернистый, чешуйчатый, почковидный, землистый | Отсутствует, отдельность по пинакоиду; раковинистый, неровный | Стально-серый до черного, землистые буровато-красные; вишнево-красная | Полуметаллический, иногда синеватая побежалость | 5,5—6 | 5—5,3 | Характерная черта | Магнетит, хромит, ильменит, вольфрамит | В железистых кварцитах, кварцевых жилах, скарнах, коре выветривания |
| 30 | Ильменит (титанистый железняк) $FeTiO_3$ | Тригональная; таблитчатый | Плотный, зернистый | Несовершенная; раковинистый, неровный | Черный, серый; черная | Полуметаллический | 5—6 | 4,5—5,2 | Слабо магнитен | Магнетит, гематит | Магматические породы, гнейсы, амфиболы, жилы, россыпи |
| 31 | Магнетит (магнитный железняк) $Fe^{2+}Fe^{3+}O_4$ | Кубическая; октаэдрический | Зернистый, землистый | Отдельность по октаэдру; раковинистый | Сталь-но-серый до черного; черная | Полуметаллический | 5—6 | 4,9—5,2 | Сильно магнитен | Ильменит, магнетит, хромит | В изверженных основных породах, скарнах, железистых кварцитах, россыпи |
| 32 | Хромит (хромистый железняк) $FeCr_2O_4$ | Кубическая; октаэдрический | Зернистый | Отсутствует; неровный, раковинистый | Черный; зеленоватоло-бурая (табачная) | Металлоидный | 5,5—7,5 | 4,4—4,6 | Табачная черта | Магнетит, ильменит, гематит | В ультраосновных изверженных породах и продуктах их изменения |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|------------------------------------|---|---|---|---|---|-------|---------|---|-------------------|--|
| 2-й класс. Гидроксиды | | | | | | | | | | | |
| 33 | Гётит $\text{FeO}(\text{OH})$ | Ромбическая; игольчатый | Натеки, корки, волокнистый, землистый | Совершенная по (010); занозистый, неровный | Темно-бурый до черноты; желтовато-бурая, бурая | Алмазный до полуметаллического | 5–5,5 | 4,1–4,3 | Параллельно-волокнистое строение натеков и желтоватый оттенок черты | Гематит-кальцит | В осадочных и железорудных месторождениях, зоне окисления сульфидных месторождений, в составе бурых железняков |
| 34 | Диаспор $\text{AlO}(\text{OH})$ | Ромбическая; пластинчатый, плоскопризматический | Листоватый, тонко-чешуйчатый | Совершенная по (010); ровный | Бесцветный; желтый, желтоватый, бурый, серый, белая | Стеклообразный, на плоскостях спайности — перламутровый | 6–7 | 3,3–3,5 | – | Хлорит | Во вторичных кварцитах, метаморфических породах, кварцевых жилах и месторождениях хромита |
| Раздел VI. Соли кислородных кислот | | | | | | | | | | | |
| 3-й класс. Карбонаты | | | | | | | | | | | |
| 35 | Кальцит CaCO_3 | Тригональная; ромбоэдрический призматический | Зернистый, друзы, волокнистый, налетный | Совершенная (10–11) по трем направлениям; ступенчатый | Бесцветный, белый, голубой, розовый, серый; белая | Стеклообразный | 3 | 2,72 | Бурно реагирует с HCl , низкая твердость | Арагонит, доломит | В карбонатных, кварцевых карбонатных жилах, метаморфических и осадочных породах |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|-------------------------------|-------------------------------|---|---|---|-------------------------------------|---------|---------|----------------------------------|-------------------|---|
| 36 | Магнезит $MgCO_3$ | Тригональная; ромбоэдрический | Зернистый, плотный, фарфоровидный | Совершенная в трех направлениях; раковистый | Бесцветный, белый, желтый, серый; белая | Стекланый | 4–4,5 | 3–3,1 | – | Кальцит, доломит | В корях выветривания ультраосновных пород и гидротермально-метасоматических залежах |
| 37 | Сидерит $FeCO_3$ | Тригональная; ромбоэдрический | Зернистый, плотный, землистый, налетный, конкрекции | Совершенная в трех направлениях; ровный | Желто-ваго-белый, серый, бурые; белая | Стекланый | 3,5–4,5 | 3,9–4,0 | Реагирует с HCl | Анкерит | В химогенных осадочных горных породах и кварцкарбонатных жилах |
| 38 | Доломит $CaMg(CO_3)_2$ | Тригональная; ромбоэдрический | Зернистый, плотный | Совершенная в трех направлениях (по ромбодру); ровный | Бесцветный, серый, желтый, бурые; белая | Стекланый | 3,5–4 | 2,85–3 | Реагирует с HCl в порошке | Кальцит, магнетит | В химогенных осадочных горных породах и кварцкарбонатных жилах |
| 39 | Малахит $Cu_2(OH)_2(CO_3)$ | Моноклинная; призматический | Натеchnый. Радиально-лучистый, чистый, землистый | Совершенная в одном направлении; неровный, раковистый | Зеленый; бледно-зеленая | Стекланый до алмазного, шелковистый | 3,5 | 3,9–4,1 | Реагирует с HCl , зеленый цвет | Куприт, азурит | В зоне окисления медных сульфидных месторождений |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|--|-------------------------------------|---|--|-----------------------------|-------|------|--|-----------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 40 | Церуссит PbCO_3 | Ромбическая; пластинчатый, бипирамидальный, призматический | Зернистый, течный, иногда землистый | Ясная по (110); раковистый | Белый, сероватый, желтоватый, буроватый; белая | Алмазный, иногда стеклянный | 3–3,5 | 6,55 | Алмазный блеск, высокий уд. вес, реагирует с HCl | – | В зоне окисления свинцовых месторождений |
| 4-й класс. Сульфаты | | | | | | | | | | | |
| 41 | Ангидрит CaSO_4 | Ромбическая; призматический, толстотаблитчатый | Зернистый, плотный | Совершенная по трем направлениям; ровный | Белый с голубым, серым и красноватым оттенком; белая | Стеклянный | 3,5 | 2,98 | – | Гипс, карбонаты | В осадочных горных породах, гидротермальных жилах, колчеданых залежах |
| 42 | Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | Моноклинная; призматический, таблитчатый | Зернистый. Волокнистый, друзы | Весьма совершенная в одном направлении (по пинакоиду); ровный | Бесцветный, белый; белая | Стеклянный | 2 | 2,3 | Царапается ногтем, слабо растворяется в воде | Кальцит | В осадочных породах, в зоне окисления сульфидных месторождений |
| 43 | Барит BaSO_4 | Ромбическая; призматический, пластинчатый | Плотный, зернистый, конкрекции | Совершенная в трех направлениях; ровный | Бесцветный, белый, голубой, желтый, красный | Стеклянный | 3–3,5 | 4,5 | Большой уд. вес | Ангидрит | В гидротермальных жилах, желваки и конкрекции в осадочных породах |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------------------|---|---|--------------------|--|--|--|---------|---------|--|--------------------------------------|--|
| 5-й класс. Хроматы | | | | | | | | | | | |
| 44 | Крокоит $PbCrO_4$ | Моноклинная; призматический | Игольчатый | Совершенная по (110) в двух направлениях; ровный | Яркий оранжево-красный; желтоватая | Алмазный | 2,5–3 | 6,0–6,1 | Ярко-красный цвет, шестоватый облик кристаллов | Реальгар | В зоне окисления сульфидных месторождений |
| 6-й класс. Вольфраматы | | | | | | | | | | | |
| 45 | Шеллит $CaWO_4$ | Тетрагональная; дипирамидальный, октаэдрический | Зернистый, плотный | Ясная по (101); неровный | Белый, серый, желтый, коричневый, бурый; белая | Жирноватый, алмазный | 4,5–5 | 5,8–6,2 | Люминесцирует в ультрафиолетовом цвете | Кварц, карбонаты, барит | В кварцевых жилах и скарнах |
| 46 | Вольфрамит $(Mn, Fe)WO_4$ | Моноклинная; табличатый, призматический | Зернистый | Совершенная по (010); неровный | Черный, бурый, красноватобурый; до черной | Алмазный | 4,5–5,5 | 6,7–7,5 | – | Сфалерит, гематит, рутил, касситерит | Кварцевые, пегматитовые жилы, грейзены, сульфидные жилы |
| 7-й класс. Фосфаты | | | | | | | | | | | |
| 47 | Фторапатит $Ca_5 [PO_4]_3 F$ апатит — (CaF) | Гексагональная; призматический, пластинчатый | Зернистый, плотный | Ясная по (0001); раковистый; неровный | Бесцветный, белый, желтый, синеватый, фиолетовый, розовый; белая | Стеклянный, на поверхности излома жирный | 5 | 3,1–3,2 | Растворяется в кислотах, форма кристаллов, твердость | Берилл | В кислых и щелочных породах, контактово-метасоматических жилах, пегматитах, карбонатитах |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|-------------------------------------|--|---|-------------------------|-------|---------|--|------------------------|---|---------------------|
| 1 | 48 | Фосфорит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{Cl}$ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | | – | Конкреции. Стяжения, земляные массы | Раковистый (у конкреций и стяжений) | Бурый, черный; серая | – | – | – | 3,1–3,2 | – | – | В осадочных породах |
| 10-й класс. Силикаты | | | | | | | | | | | | |
| Подкласс А — Островные [SiO₄] | | | | | | | | | | | | |
| 49 | Циркон $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$ | Тетрагональная; призматический, дигипсидальный | Зернистый | Несовременная; неровный или раковистый | Бесцветный. Чаше желтый, оранжевый, жевый, красный, темно-бурый; белая до светло-желтой | Алмазный, иногда жирный | 7–7,5 | 3,9–4,6 | Тетрагональный корогостолбчатый облик кристаллов | Рупил, касситерит | Акцессорный минерал кислых и щелочных изверженных пород, в пегматитах, россыпях | |
| 50 | Оливин $(\text{Fe}, \text{Mg})_2[\text{SiO}_4]$ Промежуточный член ряда «Фостерит — фаялит» | Ромбическая; призматический | Зернистый | Несовременная; раковистый | Бесцветный, оливково-зеленый, бурый, черный; бледно-зеленая | Стеклянный | 6,5–7 | 3,6–4,1 | Темная, зеленая желтая окраска, неровный излом | Авгит, апатит, гранаты | В основных и ультраосновных горных породах | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|-----------------------------------|---|--------------------------------|--|--|---|-------|---------|--|-----------------|---|
| 51 | Топаз $Al_2[SiO_4]F_2$ | Ромбическая; призматический | Зернистый | Совершенная по (001) в одном направлении; неровный, раковистый | Бесцветный, желтый, голубой, розовый, зеленый | Стекланный | 8 | 3,5–3,6 | Не растворяется в кислотах, высокая твердость | Кварц | В гранитных пегматитах и грейзенах, реже во вторичных кварцитах и кварцевых жилах |
| 52 | Кианит (Дистен) $Al_2[SiO_4]O$ | Триклинная; призматический | Сноповидный, радиальнолучистый | Совершенная по (100); ровный | Белый, серый, голубой, желтый, зеленый; белая | Стекланный | 4,5–7 | 3,5–3,7 | Твердость в различных направлениях неодинакова | Тремолит | В метаморфических породах и кварцевых жилах |
| 53 | Альмандин $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$ | Кубическая; ромбододекаэдрический | Зернистый | Отсутствует; раковистый, неровный | Красный, бурый, желтый, зеленый, черный; белая | Стекланный, жирный, близкий к алмазному | 7–7,5 | 3,5–4,2 | Характерный облик кристаллов | Пироп | В пегматитовых жилах, в кристаллических сланцах |
| 54 | Титанит (Сфен) $CaTi[SiO_4]O$ | Моноклиновая; таблитчатый, призматический | Зернистый | Совершенная по (110); неровный, раковистый | Коричневый до черного, желтый, зеленый, белый; белая, коричневая | Алмазный | 5–6 | 3,3–3,6 | Клиновидная форма кристаллов | Щиркон, гранаты | В щелочных породах, скарпанах, гранатах, гнейсах, сланцах, жилах альпийского типа |

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|-----------------------------------|-------------------------------------|---|----------------|-------|---------|--|------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 55 | Эпидот $\text{Ca}_2\text{Al}_3[\text{SiO}_4]_x[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})$ | Моноклинная; призматический, таблитчатый | Зернистый | Совершенная по (001); неровный | Желтоватый, зеленоватый, темный, зеленоватый, коричневый, черноватый; сероватозеленая | Стеклообразный | 6–6,5 | 3,4 | – | Гранаты | В метаморфических основных породах, скарнах, жилах альпийского типа |
| Подкласс Б — Кольцевые $[\text{Si}_3\text{O}_9]$ $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ | | | | | | | | | | | |
| 56 | Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ | Гексагональная; призматический, пластинчатый | Зернистый | Несовершенная; раковистый, неровный | Бесцветный, желтый, голубой, зеленый, розовый; белая | Стеклообразный | 7,5–8 | 2,6–2,9 | Высокая твердость, облик кристаллов | Апатит, турмалин | В пегматитах, грейзенах, сокоотемпературных кварцевых жилах |
| 57 | Шерл (Турмалин) $\text{NaFe}^{2+}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}]_x(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$ | Тригональная; призматический | Шестоватый, игольчатый, зернистый | Несовершенная; неровный, раковистый | Черный, (зеленый, бурый, красный, синий, бесцветный, часто похромный) | Стеклообразный | 7–7,5 | 2,9–3,2 | Характерное попереченное сечение, вертикальная штриховка, отсутствие спайности | Роговая обманка | Кварцевые и пегматитовые жилы, грейзены, гнейсы, кристаллические сланцы |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|--|---|---|---|---|-----------------|-------------|-------------|---|-------------------------------|---|
| 58 | Родонит $\text{CaMn}_4\text{Si}_3\text{O}_{13}$ | Трилин- ная; при- зматиче- ский, та- бличатый | Зерни- стый, ра- плотный | Совершен- ная; неров- ный | Розовый до ярко- красно- го. Ко- ричнево- красный | Стеглян- ный | 5,5– 6,5 | 3,4– 3,8 | Розовый цвет с прожил- ками гидро- окислов мар- ганца | Гранат | В метаморфи- ческих горных породах |
| Подкласс В — Цепочечные $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ | | | | | | | | | | | |
| 59 | Диопсид $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ | Моноклин- ная; при- зматиче- ский | Зерни- стый, ра- диаль- но-лучи- стый | Совершен- ная по двум направле- ниям под углом 87°; ступенча- тый | Серо-зе- леный; светло-зе- леная, бе- лая | Стеглян- ный | 5,5– 6 | 3,3– 3,4 | — | Авгит | Породообразу- ющий минерал многих магма- тических и ме- таморфиче- ских пород, пегматитов |
| 60 | Авгит $(\text{Ca, Na})_x$ $(\text{Mg, Fe, Al, Ti})_x$ $[(\text{Si, Al})_2\text{O}_6]$ | Моноклин- ная; при- зматиче- ский | Зерни- стый | Совершен- ная по (110); раковистый, неровный | От зе- леного до черно- го; зеле- новатая, буровая- тая | Стеглян- ный | 5,5– 6 | 3,2– 3,6 | — | Диоп- сид | Породо- образующий в магмати- ческих гор- ных поро- дах, в гнейсах, кварцитах |
| 61 | Энстатит $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ | Ромбиче- ская; при- зматиче- ский | Зерни- стый | Совершен- ная в двух направ- лениях, под углом 85°; ступенча- тый | Серова- то-белый, буровато- зеленый; белая, се- рая | Стеглян- ный | 5,5 | 3,2– 3,3 | — | Диоп- сид, брон- зит | В ультраоснов- ных и основ- ных магмати- ческих поро- дах |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|---|---|---|--|--|-------------------------------------|-------|---------|--|------------------------|---|
| 62 | Бронзит (Fe, Mg) ₂ [Si ₂ O ₆] | Ромбическая; призматический | Зернистый | Совершенная в двух направлениях, под углом 85°; ступенчатый | Серовато-белый, буровато-зеленый; белая, серая | Стеклоянный | 5,5 | 3,2–3,3 | Энстатит, содержащий 5–14% железа | Диопсид, энстатит | В ультраосновных и основных магматических породах |
| Подкласс Г — Ленточные [Si₄O₁₁] | | | | | | | | | | | |
| 63 | Актинолит Ca ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₅ X [Si ₈ O ₂₂](OH) ₂ Железистый тремолит | Моноклинная; призматический, игольчатый | Зернистый, шестоватый, лущистый, плотный (нефрит) | Совершенная по (110) в двух направлениях под углом 124°; ступенчатый | Зеленый, бурый до черного; бледно-зеленая | Стеклоянный | 5,5–6 | 3,1–3,3 | По внешнему виду кристаллов, цвету и спайности | Авгит и другие пиксены | В магматических горных породах среднего, реже основного состава, в амфиболитах, гнейсах |
| 64 | Роговая обманка NaCa ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₄ (Fe ³⁺ , Al) [(Si, Al) ₄ O ₁₁](OH) ₂ | Моноклинная; призматический | Зернистый | Совершенная по (110) в двух направлениях под углом 124°; ступенчатый | Зеленый, бурый до черного; бледно-зеленая | Стеклоянный | 5,5–6 | 3,1–3,3 | По внешнему виду кристаллов, цвету и спайности | Авгит и другие пиксены | В магматических горных породах среднего, реже основного состава, в амфиболитах, гнейсах |
| Подкласс Д — Листовые [Si₄O₁₀] | | | | | | | | | | | |
| 65 | Тальк Mg ₃ [Si ₄ O ₁₀] _x (OH) ₂ | Моноклинная, пластинчатый | Чешуйчатый, плотный (стеатит) | Весьма совершенная в одном направлении по (001); ровный | Белый, бледно-зеленый; белая | Стеклоянный с перламутровым отливом | 1 | 2,7–8 | Жирный на ощупь, огнеупорен, листочки гибкие, но не упруги | Каолинит | В гидротермально-измененных ультраосновных и метаморфических породах |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|--|--|---|--|--|---------------------------------------|-------|---------|--|-------|--|
| 66 | Биотит $K(Mg, Fe)_3$ $[AlSi_3O_{10}]$ $(OH)_2$ | Моноклинная; пластинчатый, пирамидальный | Чешуйчатый | Весьма совершенная по (001) в одном направлении; | Черный, бурый; коричневая | Стекланый | 2–3 | 3,0–3,1 | Листочки гибкие, упругие | Слюды | В составе изверженных и метаморфических горных пород, в пегматитах |
| 67 | Мусковит $KA_2[AlSi_3O_{10}]$ $x(OH)_2$ | Моноклинная; пластинчатый | Чешуйчатый | Весьма совершенная по (001) в одном направлении; | Бесцветный, белый, зеленый, желтый (фуксит); белая | Стекланый | 2,5–3 | 2,8–3,1 | Листочки гибкие, упругие | Слюды | В кислых изверженных породах, метаморфических, пегматитах, грейзенах |
| 68 | Хлориты $(Mg, Fe)_5Al$ $[Al-Si_3O_{10}]$ $[OH]_8$ (разн. пеннин) | Моноклинная; пластинчатый | Чешуйчатый | Весьма совершенная по (001) в одном направлении | Зеленый, реже бежевый, черный; бледно-зеленая | На плоскостях спайности перламутровый | 2–2,5 | 2,6–2,8 | Зеленый цвет, листочки гибкие, неупругие | Слюды | В метаморфических породах, в осадочных железорудных месторождениях |
| 69 | Ревдинскит $(Ni, Mg)_6$ $[Si_4O_{10}][OH]_8$ | Моноклинная | Чешуйчатый, порошковатый, землистый | Совершенная по (001) | Бледно-зеленый, серовато-зеленый; белая | Жирный | 2–2,5 | 2,5–3,2 | – | – | В коре выветривания ультраосновных пород |
| 70 | Каолинит $Al_2[Si_2O_5]_x$ $(OH)_4$ | Триклинная | Рыхлые, чешуйчатые, плотные, тонкозернистые | Весьма совершенная по (001) | Белый, желтоватый, буроватый; белая | Маговый | 2–2,5 | 2,58 | Сводой становится пластичен | – | В коре выветривания кислых горных пород |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|---|--|---------------------------------------|---|---|-------------------|-----|------|---|-----------|---|
| 71 | Серпентин (хризотил, антигорит, лизардит) $Mg_3 [Si_2O_5]x(OH)_4$ | Моноклинная; волокнистый, пластинчатый, тонкозернистый | Плотная, спутановолокнистая, слоистая | Совершенная в одном направлении; ровный | Белый, желтый, от зеленого до черного; светло-зеленая | Стекланый, жирный | 3–4 | 2,6 | Пятнистая окраска, часто прослойки асбеста | – | При гидротермальном изменении ультраосновных пород |
| 72 | Хризотил-асбест $Mg_3 [Si_2O_5]x(OH)_4$ | Моноклинная; волокнистый | Волокнистый, параллельношестоватый | Весьма совершенная по (001); ровный | Белый, желтый, зеленоватый; белая | Шелковистый | 2–3 | 2,55 | Огнестойкий, легко разделяется на отдельные волокна | – | При гидротермальном изменении ультраосновных пород образует прожилки в серпентинитах |
| Подкласс E – Каркасные $[SiO_2]_n$ | | | | | | | | | | | |
| 73 | Ортоклаз К $[AlSi_3O_8]$ | Моноклинная; призматический | Зернистый | Совершенная по (001) и (010) в двух направлениях под прямым углом; ровный | Светло-розовый, буровато-желтый, белый, красноватый | Стекланый | 6 | 2,6 | Спайность под углом 90° | Микроклин | Породообразующий в кислых и щелочных интрузивных и эффузивных породах, пегматитах и метаморфических породах |
| 74 | Микроклин К $[AlSi_3O_8]$ | Триклинная; призматический | Зернистый | Совершенная по (001) и (010) в двух направлениях под прямым углом; ровный | Серо-желтый, красный, зеленый (амазонит) | Стекланый | 6 | 2.6 | – | Ортоклаз | В кислых и щелочных интрузивных и эффузивных породах, пегматитах |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|--|--|-----------|---|--|-----------------------------|-----|---------|----|----------|--|
| 75 | Альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | Триклинная; призматический, пластинчатый | Зернистый | Совершенная по (001) и (010) в двух направлениях под прямым углом; ровный | Белый, серовато-белый, иногда с зеленоватым оттенком | Стекланный | 6 | 2,6–2,8 | – | Ортоклаз | Породообразующий в изверженных горных породах, пегматитах, метаморфических породах, жилах альпийского типа |
| 76 | Лабрадор (Na, Ca) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Член изоморфного ряда «альбит — анортит», 50–70% анортитового компонента | Триклинная; призматический, таблитчатый | Зернистый | Совершенная по (001) и (010) в двух направлениях под прямым углом; ровный | Серый до черного с переливчатым оттенком синих или зеленых тонов | Стекланный | 6 | 2,6–2,8 | – | – | Главный минерал породы «лабрадорит», основных магматических пород, пегматитов, метаморфических пород |
| 77 | Нефелин $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$ | Гексагональная; призматический | Зернистый | Несовершенная; неровный | Желтый, красный, серый, зеленый, бесцветный | Стекланный, в изломе жирный | 5–6 | 2,6–2,7 | – | – | В магматических щелочных горных породах |

Учебное издание

Сергеева Валентина Валерьевна

**КРИСТАЛЛОГРАФИЯ
И МИНЕРАЛОГИЯ**

Редактор Т. Е. Мерц
Верстка О. П. Игнатъевой

Подписано в печать 14.04.2017. Формат 70×100/16.
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 7,3. Усл. печ. л. 12,3. Тираж 50 экз.
Заказ 11

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru

