

ГОУ ВПО
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Институт недропользования

Кафедра Геологии и геохимии полезных ископаемых

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор

ООО "Восточно-Саянская никелевая
компания"

 Т.А. Мехоношин
"13" августа 20 11 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

 Н.А. Буглов
" 8 " августа 20 11 г.

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
(рабочая учебная программа дисциплины)

Направление подготовки: 261400 "Технология художественной об-
работки материалов"

Профиль подготовки: 121200 «Технология художественной обработки
драгоценных камней и металлов» (ТХМб)

Квалификация (степень) бакалавр

Форма обучения очная

Составитель программы

Колотилина Т. Б., доцент, к.г.-м.н., доцент

1. Информация из ФГОС, относящаяся к дисциплине

1.1. Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов относящиеся к виду деятельности выпускника: производственно-технологической и научно-исследовательской.

1.2. Задачи профессиональной деятельности выпускника

В дисциплине рассматриваются указанные в ФГОС задачи профессиональной деятельности выпускника:

Бакалавр по направлению подготовки “Технология художественной обработки материалов” должен быть подготовлен к решению следующих обобщенных типов задач:

а) в области производственно-технологической деятельности:

выбирать материалы для изготовления художественно-промышленной продукции;

определять физико-химические свойства выбранных материалов.

б) в области научно-исследовательской деятельности:

проводить классификацию материалов для изготовления художественно-промышленных объектов (по различным классификационным признакам);

Перечень компетенций, установленных ФГОС

Освоение программы настоящей дисциплины позволит сформировать у обучающегося следующие компетенции:

общекультурные:

- *владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки кристаллографической информации, иметь навыки работы с компьютерными программами, позволяющими создавать кристаллографические модели*

общенаучные:

- *обладать необходимым комплексом знаний в области естественных, социальных, экономических, гуманитарных наук, предусмотренным основной образовательной программой, позволяющих успешно решать профессиональные задачи и оценивать качество их выполнения;*
- *быть готовым использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности;*

профессиональные:

- *быть способным к выбору оптимального материала и технологии его обработки для изготовления готовых изделий;*
- *быть способным к систематизации и классификации материалов и технологических процессов в зависимости от функционального назначения и художественных особенностей изготавливаемого объекта.*

1.3. Перечень умений и знаний, установленных ФГОС

Студент после освоения программы настоящей дисциплины должен: знать:

- современную структурную систематику кристаллов;
- основные морфологические признаки реальных природных кристаллов;
- кристаллохимические особенности, определяющие химический состав и внутреннее строение кристаллов минералов

уметь:

- определять кристаллы минералов по набору физических, оптических и других признаков;
- предсказывать возможный набор сопутствующих кристаллов при обнаружении в образцах отдельных кристаллических индивидов.

владеть:

- приемами и способами диагностики минералов.

2. Цели и задачи освоения программы дисциплины

Цели изучения дисциплины:

- Получение студентами знаний по основным теоретическим и прикладным вопросам кристаллографии как научной базы исследований состава и строения кристаллического вещества.

Задачи изучения дисциплины:

- определение элементов симметрии кристаллов и составление формул симметрии
- определение по внешней форме вида симметрии, сингонии и категории;
- обучение распознавания комбинаций простых форм кристаллов

3. Место дисциплины в структуре ООП

Для изучения дисциплины, необходимо освоение содержания дисциплин: физика, химия, математика, общая геология, материаловедение.

Знания и умения, приобретаемые студентами после освоения содержания дисциплины, будут использоваться в области геммологии, минералогии и технологии художественной обработки материалов.

4. Компетенции обучающегося, формируемые освоением дисциплины (результаты освоения дисциплины)

В результате освоения дисциплины обучающийся должен: уметь:

- *Анализировать комбинации простых форм;*
- *Описывать структуры минералов;*
- *Решать кристаллографические задачи с помощью сетки Вльфа;*

- *Определять физические и механические свойства минералов;*
знать:
- *Простые формы кристаллических многогранников;*
- *Типы кристаллических структур;*
- *Физические свойства минералов;*
владеть:
 - методами графического вычисления кристаллов

5. Основная структура дисциплины.

Таблица 1 – Структура дисциплины

Вид учебной работы	Трудоемкость, часов			
	Всего	Семестр		
		№ 2	№	№
Общая трудоемкость дисциплины	72	72		
Аудиторные занятия, в том числе:	36	36		
лекции	18	18		
лабораторные работы	18	18		
практические/семинарские занятия				
Самостоятельная работа (в том числе курсовое проектирование)	36	36		
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине), в том числе курсовое проектирование		зачёт		

6. Содержание дисциплины

6.1. Перечень основных разделов и тем дисциплины

- 6.1.1. Геометрическая кристаллография;
- 6.1.2. Структурная кристаллография;
- 6.1.3. Элементы кристаллохимии и кристаллофизики.

6.2. Краткое описание содержания теоретической части разделов и тем дисциплины

Раздел 1. Геометрическая кристаллография.

Подраздел 1.1. Симметрия кристаллов

Тема 1.1.1. Элементы симметрии. Теоремы о сочетании элементов симметрии.

Одним из свойств, присущих кристаллам, является симметрия. **Симметрия** - (от греческого «соразмерность») - закономерная повторяемость **равных** фигур или **равных** частей одной и той же фигуры в пространстве.

Две фигуры называются **равными**, если расстояние между двумя любыми точками одной фигуры равно расстоянию между двумя соответственными точками другой. Вспомогательные геометрические образы, с помощью которых выявляется симметрия, называются **элементами сим-**

метрии. К элементам симметрии относятся центр симметрии, оси и плоскости симметрии.

Центр симметрии – воображаемая точка внутри фигуры, в которой **пересекаются и делятся пополам** все прямые, соединяющие соответственные точки на поверхности фигуры (рис. 1). В формуле симметрии обозначается символом ***C*** (табл. 1).

В многограннике, обладающем центром симметрии, каждой грани отвечает другая грань, равная и параллельная первой.

Плоскость симметрии – воображаемая плоскость, разделяющая фигуру на две **зеркально-равные** части (рис. 2). В формуле симметрии обозначается символом ***P*** (табл. 1).

Плоскости симметрии проходят перпендикулярно граням и рёбрам через их середины или же идут вдоль рёбер, образуя равные углы с одинаковыми гранями и рёбрами.

При подсчёте количества плоскостей симметрии в исследуемой фигуре нужно держать её в одном положении, для того чтобы одну и ту же плоскость не сосчитать несколько раз. В кристаллах количество плоскостей симметрии ограничивается следующими цифрами: одна, две, три, четыре, пять, шесть, семь и девять. Например, в кубе насчитывается девять плоскостей симметрии.

Ось симметрии – воображаемая прямая линия (ось), при вращении вокруг которой на 360° фигура совпадает сама с собой ***n*** раз. Количество совпадений ***n*** – отвечает порядку оси симметрии. Например, если при вращении на 360° вокруг оси фигура совпадает сама с собой через каждые 180° , то есть дважды, то порядок оси симметрии – второй; если – через 120° , то есть трижды, – третий и т.п. В формуле симметрии ось обозначается символом ***L_n*** (табл. 1). В кристаллических многогранниках и их структурах возможны оси симметрии второго, третьего, четвёртого и шестого порядка.

Ось симметрии инверсионная – прямая линия (ось), при повороте вокруг которой на определённый угол и последующем её отражении в центральной точке, фигура совпадает сама с собой. В формуле симметрии обозначается символом ***L_{in}***. Существуют инверсионные оси симметрии четвёртого и шестого порядка.

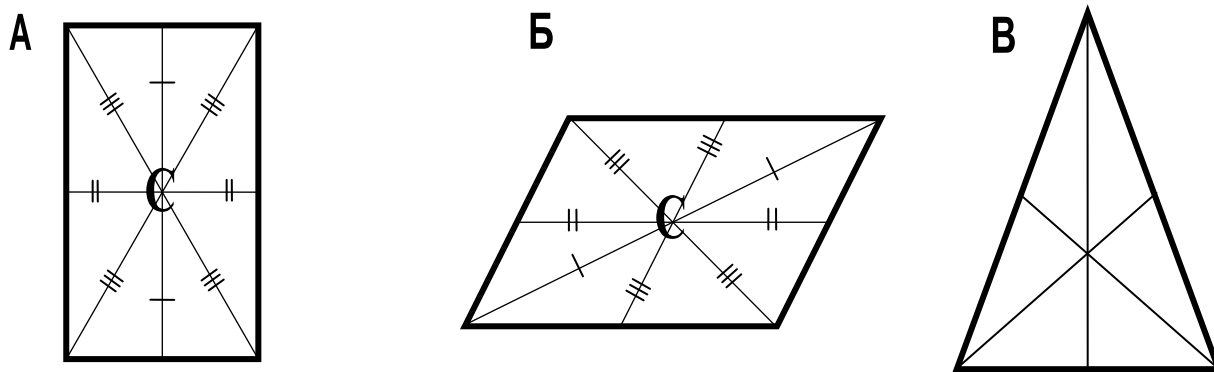


Рис. 1. Фигуры с центром симметрии (А и Б) и без центра симметрии (В)

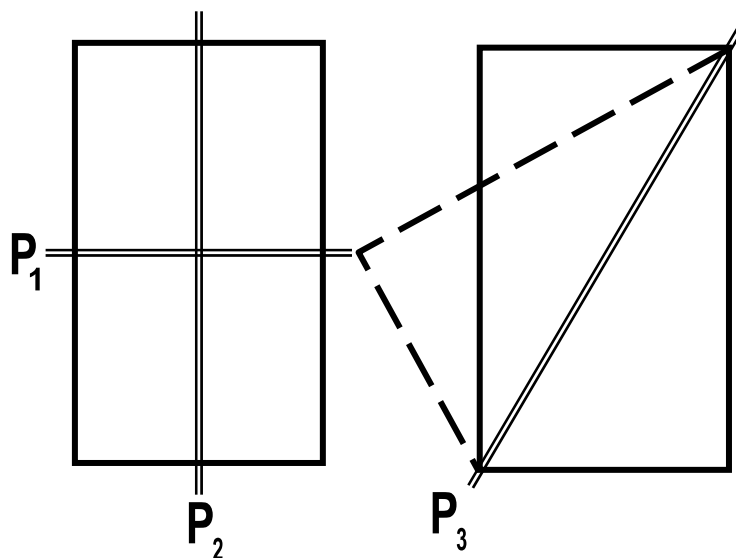


Рис. 2. P_1 и P_2 – следы плоскостей симметрии прямоугольника, P_3 – не является следом плоскости симметрии

Инверсионная ось симметрии четвёртого порядка – совпадает с простой двойной осью симметрии (при отсутствии центра симметрии). Угол поворота - 90° . **Инверсионная ось симметрии шестого порядка** – совпадает с простой тройной осью симметрии при наличии перпендикулярной ей плоскости симметрии ($L_{i6} = L_3 + P$). Угол поворота - 60° .

Оси симметрии могут выходить в центрах граней, в серединах рёбер и в вершинах гранных углов (рис. 3). В кристаллах количество осей симметрии строго закономерно: осей второго порядка может быть одна, три, четыре или шесть, осей третьего порядка может быть одна или четыре, осей четвёртого порядка может быть одна или три, а ось шестого порядка может быть только одна. Так же в единственном числе могут встречаться инверсионные оси четвёртого или шестого порядка.

Полная симметрия кристаллических многогранников описывается в виде формулы симметрии, в которой на первом месте стоят оси симметрии по убыванию порядка (L_6, L_4, L_3, L_2), на втором – плоскости симметрии и на третьем – центр симметрии (если он есть). Перед каждым символом элемента симметрии цифрой указывается его количество. Например, за-

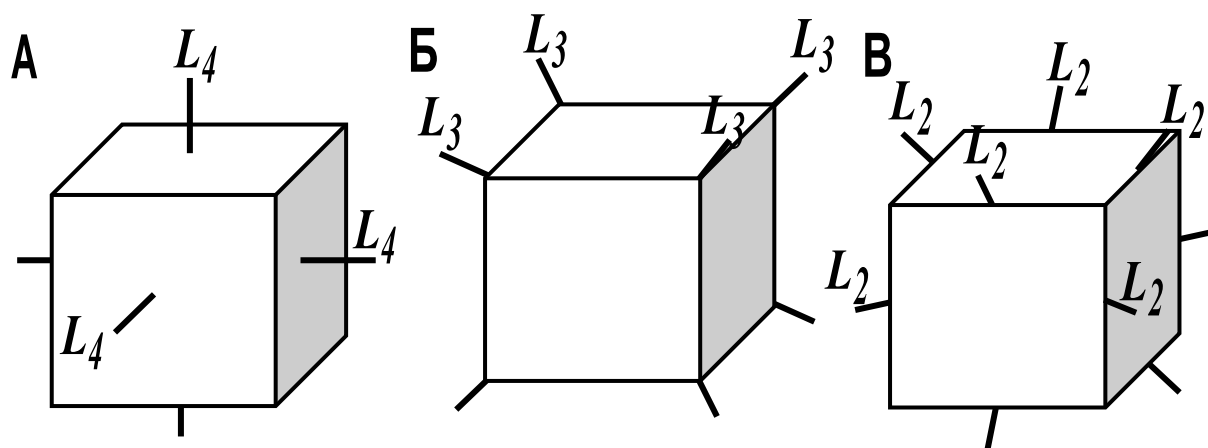
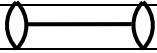
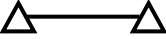
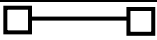
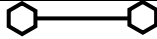


Рис. 3. Положение осей симметрии в кубе: А – три оси четвёртого порядка (в центрах граней), Б – четыре оси третьего порядка (в вершинах гранных углов), В – шесть осей второго порядка (в серединах рёбер)

пись $4L_33L_23PC$ означает, что симметрия модели выявляется с помощью четырёх осей третьего порядка, трёх осей второго порядка, трёх плоскостей и центра симметрии.

Таблица 1 - Обозначение и изображение в проекции элементов симметрии

Элемент симметрии	Обозначение		Изображение в проекции на плоскость	
	в формуле	международное	параллельно плоскости проекции	перпендикулярно плоскости проекции
Центр симметрии	C	1	$C \quad \bullet$	
Плоскость симметрии	P	m		$\parallel = \diagup$
Оси симметрии:	L_n			
второго порядка	L_2	2		
третьего порядка	L_3	3		
четвёртого порядка	L_4	4		
шестого порядка	L_6	6		
Инверсионные оси:	L_i			
четвёртого порядка	L_{i4}	$\bar{4}$		
шестого порядка	L_{i6}	$\bar{6}$		

Существует ряд теорем, позволяющих строго математически вывести все возможные совокупности элементов симметрии.

Теорема 1. Линия пересечения двух плоскостей симметрии есть ось симметрии, причём угол поворота вокруг этой оси в два раза больше угла между плоскостями.

Теорема 2. Точка пересечения чётной оси симметрии L_{2n} с перпендикулярной ей плоскостью симметрии есть центр симметрии C .

Теорема 3. Если есть ось симметрии n -го порядка и перпендикулярная ей ось второго порядка, то всего таких осей должно быть n .

Теорема 4. Если есть ось симметрии n -го порядка и вдоль нее проходит плоскость симметрии, то таких плоскостей имеется n .

Теорема 5. Равнодействующей двух пересекающихся осей симметрии является третья ось, проходящая через точку их пересечения.

Теорема 6. Плоскость, проходящая вдоль четной инверсионной оси симметрии, приводит к появлению оси второго порядка, перпендикулярной инверсионной оси и проходящей по биссектрисе угла между плоскостями.

Тема 1.1.2 Единичные и симметрично равные направления. Вывод тридцати двух видов симметрии.

Единственное, не повторяющееся в кристалле направление называется **единичным**.

Повторяющиеся в кристалле направления, связанные элементами симметрии, называются **симметрично-равными**.

Положение единичных направлений относительно элементов симметрии:

1. В присутствии единичных направлений возможен центр симметрии, лежащий в середине фигуры.
2. Единичное направление может располагаться перпендикулярно плоскости симметрии или быть совмещенным с ней.
3. Единичное направление может располагаться перпендикулярно оси симметрии второго порядка или может быть совмещено с осью любого порядка.

Единичные направления в кристаллах могут либо присутствовать, либо отсутствовать. Соответственно этому и вывод видов симметрии делится на две части.

В первой рассматриваются виды симметрии для кристаллов с единичными направлениями, во второй – для кристаллов без них.

А. Виды симметрии кристаллов, обладающих единичными направлениями. Относящиеся сюда кристаллические многогранники имеют по меньшей мере одно единичное направление. Примем его за исходное. Будем последовательно присоединять к нему элементы симметрии так, чтобы оно оставалось единичным.

1) Единичное направление совпадает с единственной осью симметрии L_n .

L_1, L_2, L_3, L_4, L_6 – примитивные виды симметрии

2) К исходному единичному направлению прибавляется центр симметрии C .

$L_1 + C = C, L_2 + C = L_2PC, L_3 + C = L_3C, L_4 + C = L_4PC, L_6 + C = L_6PC$ – центральные виды симметрии.

3) К исходному единичному направлению прибавляется плоскость симметрии, идущая вдоль него.

$L_1 + P = P, L_2 + P = L_22P, L_3 + P = L_33P, L_4 + P = L_44P, L_6 + P = L_66P$ – планальные виды симметрии.

4) Перпендикулярно исходному единичному направлению присоединяется ось второго порядка.

$L_1 + L_2 = L_2, L_2 + L_2 = 3L_2, L_3 + L_2 = L_33L_2, L_4 + L_2 = L_44L_2, L_6 + L_2 = L_66L_2$ – аксиальные виды симметрии.

5) К исходному единичному направлению прибавляется центр симметрии C и плоскость симметрии, идущая вдоль него

$L_1 + C + P = L_2PC, L_2 + C + P = 3L_23PC, L_3 + C + P = L_33L_23PC, L_4 + C + P = L_44L_25C, L_6 + C + P = L_66L_27PC$ – планаксиальные виды симметрии.

6) Единичное направление совпадает с инверсионной осью симметрии L_{in}

L_{i4}, L_{i6} – инверсионно-примитивные виды симметрии.

7) К исходному единичному направлению прибавляется плоскость симметрии, идущая вдоль него.

$L_{i4}+P = L_{i4}2L_22P, L_{i6}+P = L_{i6}3L_23P$ – инверсионно-планальные виды симметрии.

Б. Виды симметрии кристаллов, не обладающих единичными направлениями.

Из каждого направления выводятся симметрично-равные ему.

1) Совокупность осей симметрии кубического тетраэдра принимаем за примитивный вид симметрии.

$$4L_33L_2$$

2) К исходной совокупности осей симметрии добавляем центр симметрии

$$4L_33L_2+C=4L_33L_23PC – центральный вид симметрии.$$

3) Вдоль осей третьего порядка проводим плоскости симметрии

$$4L_33L_2+P=4L_33L_26P – планальный вид симметрии.$$

4) Добавляем перпендикулярно осям третьего порядка оси второго порядка:

$$4L_33L_2+L_2=4L_33L_26L_2 – аксиальный вид симметрии.$$

5) Добавляем перпендикулярно осям третьего порядка оси второго порядка и центр симметрии:

$$4L_33L_2+L_2+C=4L_33L_26L_29PC – планаксиальный вид симметрии.$$

В результате вывод получено тридцать два вида симметрии – тридцать две совокупности элементов симметрии, возможных для кристаллических многогранников (таблица 2).

Таблица 2 – Тридцать два вида симметрии

Сингония	Название вида симметрии по общей простой форме	Формула	Международное обозначение
триклинная	монокрический	L_1	1
	пинакоидальный	C	-1
моноклинная	диэдрический безосный	P	m
	диэдрический осевой	L_2	2
	призматический	L_2PC	2/m
ромбическая	ромбо-пирамидальный	L_22P	mm
	ромбо-тетраэдрический	$3L_2$	222
	ромбо-дипирамидальный	$3L_23PC$	mmm
тригональная	тригонально-пирамидальный	L_3	3
	ромбоэдрический	L_3C	-3
	дигригонально-пирамидальный	L_33P	3m
	тригонально-трапецоэдрический	L_33L_2	32
	тригонально-скеленоэдрический	L_33L_23PC	-3m

Сингония	Название вида симметрии по общей простой форме	Формула	Международное обозначение
тетрагональная	тетрагонально-пирамидальный	L_4	4
	тетрагонально-дипирамидальный	L_4PC	4/m
	дитетрагонально-пирамидальный	L_44P	4mm
	тетрагонально-трапецоэдрический	L_44L_2	422
	дитетрагонально-дипирамидальный	L_44L_25PC	4/mmm
	тетрагонально-тетраэдрический	$L_{i4} = L_2$	-4
	тетрагонально-скаленоэдрический	$L_{i4}2L_22P = 3L_22P$	-42m
гексагональная	гексагонально-пирамидальный	L_6	6
	гексагонально-дипирамидальный	L_6PC	6/m
	дигексагонально-пирамидальный	L_66P	6mm
	гексагонально-трапецоэдрический	L_66L_2	622
	дигексагонально-дипирамидальный	L_66L_27PC	6/mmm
	тригонально-дипирамидальный	$L_{i6} = L_3P$	-6
	дитригонально-дипирамидальный	$L_{i6}3L_23P = L_33L_24P$	-6m2
кубическая	пентагон-тритетраэдрический	$4L_33L_2$	23
	дидодекаэдрический	$4L_33L_23PC$	m3
	гексатетраэдрический	$4L_33L_26P$	-43m
	пентагон-триоктаэдрический	$3L_44L_36L_2$	432
	гексоктаэдрический	$3L_44L_36L_29PC$	m3m

Тема 1.1.3 Категории и сингонии. Кристаллографические системы осей координат.

Видом симметрии кристаллического многогранника называется полная совокупность его элементов симметрии. Существует 32 вида симметрии.

Сингония - группа видов симметрии, обладающих одним или несколькими сходными элементами симметрии. Существует 7 сингоний: триклинная, моноклинная, ромбическая, тригональная, тетрагональная, гексагональная и кубическая.

В зависимости от числа единичных направлений сингонии объединяются в три категории: низшую, среднюю и высшую (табл. 3).

Таблица 3 – Характеристика сингоний и категорий

Категория	Сингония	Число единичных направлений	Характерные элементы симметрии
низшая	триклинная	все	L_1, C
	моноклинная	множество	P, L_2, L_2PC
	ромбическая	три	$L_22P, 3L_2, 3L_23PC$
средняя	тригональная	одно	L_3
	тетрагональная	одно	L_4, L_{i4}
	гексагональная	одно	L_6, L_{i3}
высшая	кубическая	нет	$4L_3$

В анизотропной кристаллической среде трёхмерная система координат выбирается в соответствии с симметрией среды. В общем случае – это косоугольная система координат с неодинаковыми масштабными отрезками по осям X, Y и Z (a, b, c).

Кубическая сингония. $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Оси координат должны совпадать с осями четвёртого или второго порядка.

Тетрагональная сингония. $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Ось Z должна совпадать с осью четвёртого порядка, оси X и Y – с осями второго порядка или с перпендикулярами к плоскостям симметрии, идущим вдоль оси четвёртого порядка.

Тригональная и гексагональная сингонии. $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$. Ось Z должна совпадать с осью третьего или шестого порядка, оси X и Y – с осями второго порядка или с перпендикулярами к плоскостям симметрии, идущим вдоль оси третьего или шестого порядка.

Ромбическая сингония. $a \neq b \neq c, c < a < b, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Оси координат должны совпадать с осями второго порядка, или с перпендикулярами к плоскостям симметрии.

Моноклинная сингония. $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$. Ось Y должна совпадать с осью второго порядка, или быть перпендикулярна плоскости симметрии, оси X и Z расположены в плоскости, перпендикулярной оси Y . Их взаимное расположение определяется рёбрами кристалла.

Триклинная сингония. $a \neq b \neq c, c < a < b, \alpha \neq \beta \neq \gamma$. Оси координат выбираются по рёбрам кристалла.

Подраздел 1.2 Формы кристаллов

Тема 1.2.1 Простые формы и комбинации. Простые формы низшей, средней и высшей категорий.

Простая форма – многогранник, все грани которого образованы из одной грани с помощью элементов симметрии, и поэтому все грани простой формы равны по площади и одинаковы по форме.

Простая форма, замыкающая пространство, называется **закрытой** и может существовать самостоятельно. Например, куб (рис. 8). Простая форма, не замыкающая пространства, называется **открытой** и может существовать только в комбинации с другими простыми формами. Например, гексагональная пирамида (рис. 7), если её не ограничить снизу моноэдром, не замыкает пространство. Простая форма, грани которой располагаются косо относительно всех осей и плоскостей симметрии, называется **общей простой формой**. Простая форма, грани которой или перпендикулярны, или параллельны хотя бы одной оси или плоскости симметрии, или же расположены симметрично относительно двух или нескольких одинаковых осей или плоскостей симметрии, называется **частной простой формой**. В каждом виде симметрии может быть только одна общая простая форма. В других видах симметрии эта же простая форма занимает частное положение. Наоборот, частные формы данного вида симметрии в других видах могут присутствовать либо тоже как частные, либо как общие.

Сочетания простых форм называются **комбинациями**. Они не могут быть выведены из одной исходной грани, поэтому характерным признаком комбинации является то, что в ней присутствуют грани, различные по форме и размеру.

Изучение простых форм начинается с наиболее простых случаев, то есть с форм низших сингоний. Чем проще симметрия, чем меньше элементов входит в формулу симметрии вида, тем «проще» будет простая форма, и наоборот.

Низшая категория

К низшей категории относятся триклинная, моноклинная и ромбическая сингонии. Общим характерным признаком для них является отсутствие осей симметрии высшего порядка, преобладание открытых форм, относительная простота комбинаций. В низшей категории возможно 7 простых форм: моноэдр, диэдр, пинакоид, ромбическая призма, ромбическая пирамида, ромбическая дипирамида, ромбический тетраэдр (табл. 4, рис. 4).

Призма, пирамида и дипирамида в поперечном сечении образуют ромб. Форма грани тетраэдра отвечает разностороннему треугольнику. Закрытыми простыми формами являются только ромбическая дипирамида и ромбический тетраэдр.

Триклинная сингония. Возможные простые формы – моноэдр (L_1) и пинакоид (C). В качестве примеров триклинной сингонии из минералов можно привести альбит, олигоклаз, аксинит.

Моноклинная сингония. Возможные простые формы – диэдры (L_2, P), пинакоиды (P, L_2PC), ромбическая призма (L_2PC). В виде симметрии L_2PC

все грани, параллельные или перпендикулярные плоскости симметрии, – пинакоиды, остальные – ромбические призмы.

Таблица 4 – Простые формы низших сингоний

Число одинаковых граней	Взаимное расположение граней	Названия простых форм
1	-	Моноэдр
2	Грани параллельны	Пинакоид
2	Грани пересекаются	Диэдр
4	Грани попарно (через одну) параллельны	Ромбическая призма
4	Все грани пересекаются в одной точке	Ромбическая пирамида
4	Грани непараллельны и не все пересекаются в одной точке	Ромбический тетраэдр
8	Грани непараллельны и не все пересекаются в одной точке	Ромбическая дипирамида

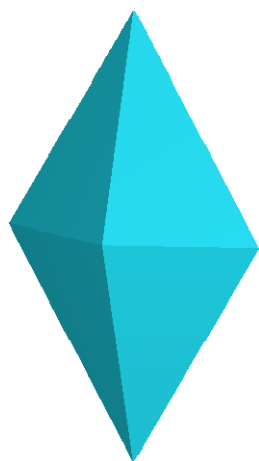
Ромбическая сингония. В состав этой сингонии входят три вида: $3L_2$, L_22P и $3L_23PC$. Общая простая форма для вида $3L_2$ – ромбический тетраэдр, форма, состоящая из четырёх граней, имеющих форму разносторонних треугольников. Для вида L_22P общей простой формой является ромбическая пирамида, частными – ромбическая призма, пинакоид, диэдр и моноэдр. Вид $3L_23PC$ - ромбическая дипирамида, ромбическая призма и пинакоид.

В целом для низших сингоний характерно: 1) отсутствие осей симметрии выше второго порядка; 2) преобладание открытых форм; 3) относительная простота комбинаций. При решении вопроса о присутствии или отсутствии того или иного элемента симметрии следует внимательно осмотреть все грани, иногда присутствие одной грани меняет всю картину.

Простые формы средней категории

Только в средней категории возможны: трапецоэдры (форма грани – четырёхугольник (рис. 5), скаленоэдры (форма грани – треугольник (рис. 9) и ромбоэдр (форма грани – ромб). Трапецоэдры бывают правые и левые и различаются по расположению неравных рёбер одной из верхних граней: если длинное ребро справа – трапецоэдр правый, если слева – левый.

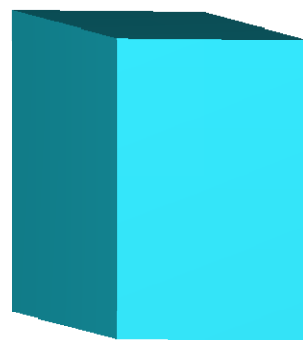
Так же как и в низшей категории, в средней существуют призмы, пирамиды и дипирамиды, главное отличие которых – характер поперечного сечения (рис. 5, 6). Так же в средней категории в тетрагональной сингонии существует тетрагональный тетраэдр, в отличие от ромбического, форма его грани отвечает равнобедренному треугольнику.



**Ромбическая
дипирамида**

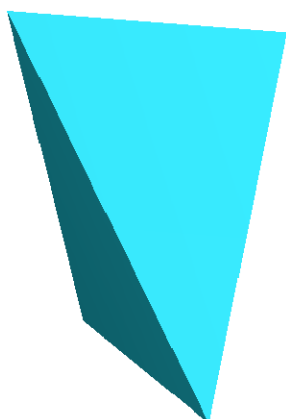
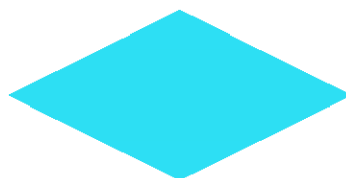


**Ромбическая
пирамида**

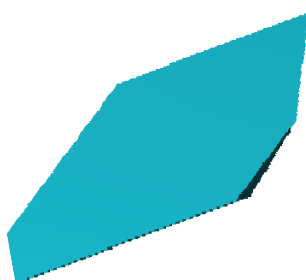


**Ромбическая призма и
пинакоид**

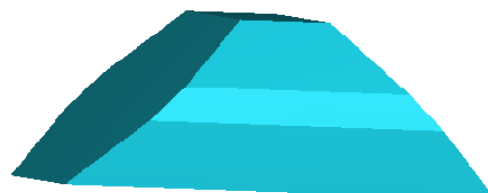
Вид сверху



**Ромбический
тетраэдр**



Моноэдр



**Диэдры осевые и
моноэдры**

Рис. 4. Простые формы низшей категории.

Дипирамиды встречаются главным образом в видах, где есть плоскость симметрии, перпендикулярная главной оси. Трапецоэдры наблюдаются в том случае, когда, кроме оси симметрии высшего порядка, присутствуют только оси второго порядка, ни плоскостей, ни центра симметрии нет. Признаком наличия инверсионной оси служит симметричность верхней и нижней половин, не связанная плоскостью симметрии.

Названия простых форм, количество граней и их положение относительно оси высшего порядка (главной оси симметрии) даны в табл. 5.

Тетрагональная сингония. В состав тетрагональной сингонии входят 7 видов симметрии (табл. 2). Для вида L_4 общей простой формой является тетрагональная пирамида, частными – тетрагональная призма и моноэдр. Общей простой формой для вида L_4PC является тетрагональная дипирамида, частные простые формы – тетрагональная призма и пинакоид.

В виде L_44P появляются новые формы – дитетрагональные. Это формы, имеющие в сечении, перпендикулярном к главной оси, дитетрагон (рис. 5, 6).

Такое название носит фигура, полученная из тетрагона (квадрата), каждая сторона которого заменена двумя равными сторонами. В дитетрагоне углы равны через один.

В рассматриваемом виде возможны следующие формы: дитетрагональная пирамида (общая форма), тетрагональная пирамида, дитетрагональная призма, тетрагональная призма, моноэдр. Общая простая форма вида L_44L_2 – тетрагональный трапецоэдр, частные – пинакоид, тетрагональная призма, тетрагональная дипирамида и дитетрагональная призма.

В наиболее богатом элементами симметрии виде L_44L_25PC общей простой формой является дитетрагональная дипирамида, частными: тетрагональная дипирамида, дитетрагональная призма, тетрагональная призма, пинакоид.

Оставшиеся два вида имеют в качестве главной оси инверсионную ось четвёртого порядка. В первом из них эта ось присутствует одна: $L_{i4}(=L_2)$ и общей простой формой будет тетрагональный тетраэдр, а частными – тетрагональная призма и пинакоид.

Во втором ($L_{i4}2L_22P=3L_22P$) инверсионная ось сочетается с двумя осями второго порядка и параллельными ей плоскостями. Общая простая форма этого вида – тетрагональный скаленоэдр, частные – тетрагональный тетраэдр, тетрагональная дипирамида, дитетрагональная и тетрагональная призмы и пинакоид.

Тетрагональная сингония является типичной для средних сингоний, и указанные для её простых форм особенности целиком можно перенести на гексагональную и тригональную сингонии, в которых встречается много сходных простых форм (призмы, пирамиды, дипирамиды, трапецоэдры), но есть и оригинальные. В частности – ромбоэдр.

Тригональная сингония

Вид симметрии L_3 : общая простая форма – тригональная пирамида, частные: тригональная призма, моноэдр.

Вид симметрии L_33L_2 : тригональный трапецоэдр (общая простая форма), частные ромбоэдр, тригональная дипирамида, дитригональная призма, гексагональная призма, тригональная призма, пинакоид. К этому виду симметрии относится широко распространенный минерал низкотемпературный кварц.

Вид симметрии L_33P : общая простая форма – дитригональная пирамида, частные: тригональная пирамида, гексагональная пирамида, дитригональная призма, тригональная призма, гексагональная призма, моноэдр.

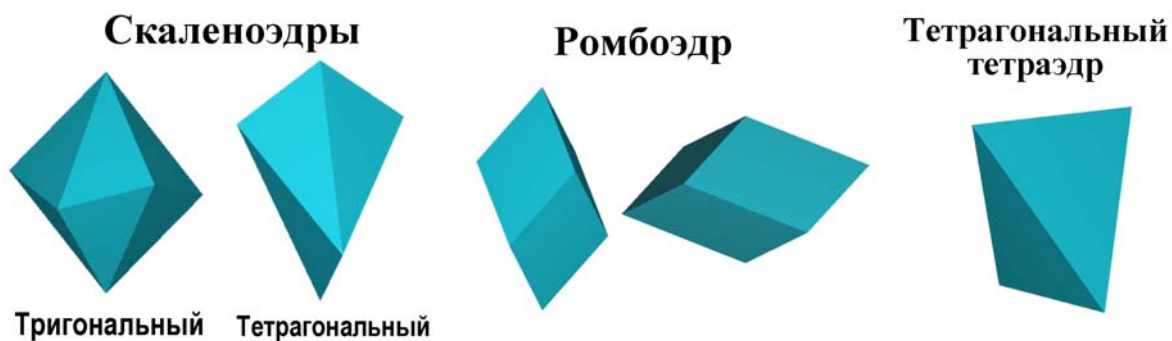
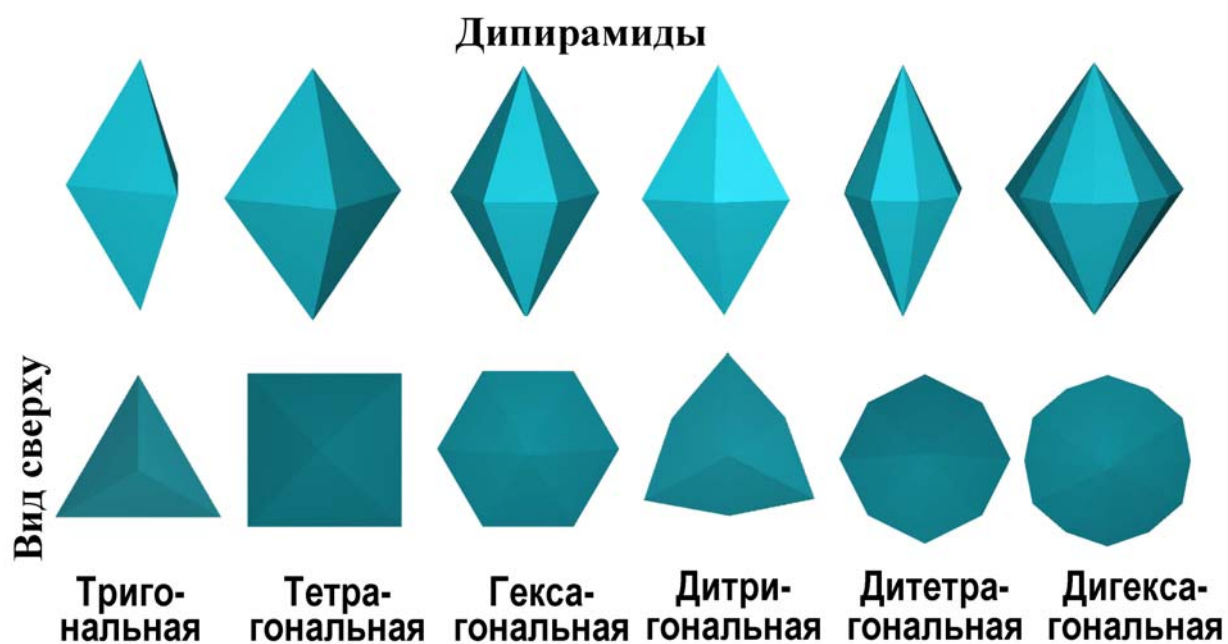
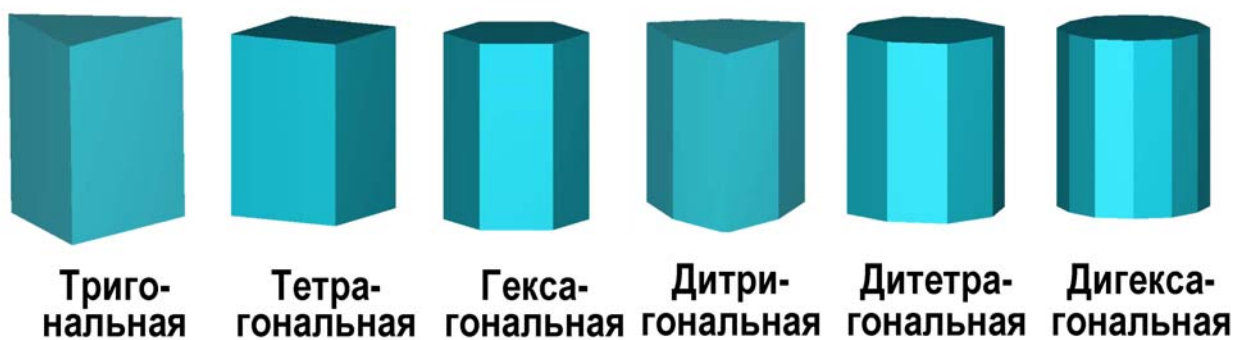


Рис. 5. Закрытые простые формы средней категории.

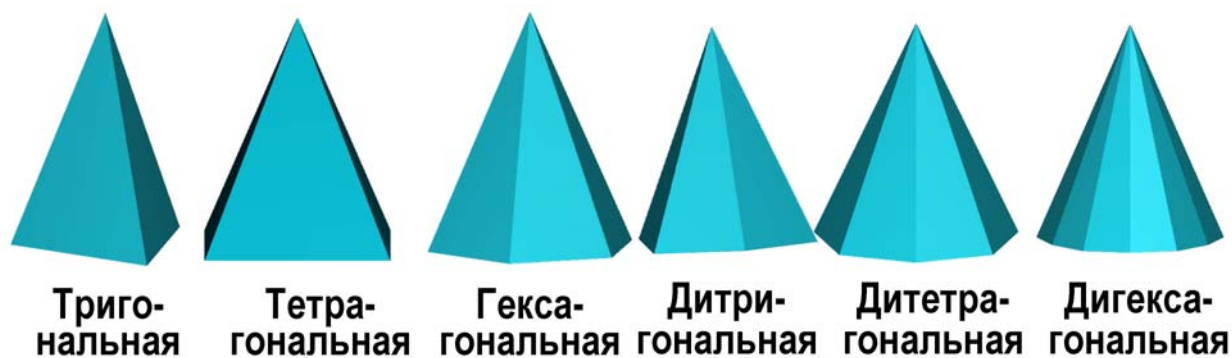
Комбинации пинакоида и призмы



Характер поперечного сечения призм



Комбинации моноэдра и пирамиды



Характер поперечного сечения пирамид



Рис. 6. Открытые простые формы средней категории.

Таблица 5 – Простые формы средней категории сингоний

Расположение граней относительно главной оси симметрии (единичного направления)		Число одинаковых граней	Названия простых форм
Грани перпендикулярны главной оси		1	Моноэдр
		2	Пинакоид
Грани параллельны главной оси		3	Тригональная призма
		4	Тетрагональная призма
		6	Гексагональная призма
		6	Дитригональная призма
		8	Дитетрагональная призма
		12	Дигексагональная призма
Грани пересекают главную ось в одной точке		3	Тригональная пирамида
		4	Тетрагональная пирамида
		6	Гексагональная пирамида
		6	Дитригональная пирамида
		8	Дитетрагональная пирамида
		12	Дигексагональная пирамида
Грани пересекают главную ось в двух точках	нижние грани расположены точно под верхними	6	Тригональная дипирамида
		8	Тетрагональная дипирамида
		12	Гексагональная дипирамида
		12	Дитригональная дипирамида
		16	Дитетрагональная дипирамида
		24	Дигексагональная дипирамида
	нижняя пара граней расположена симметрично между двумя парами верхних	8	Тетрагональный скаленоэдр
		12	Тригональный скаленоэдр
	нижняя грань расположена несимметрично относительно двух верхних	6	Тригональный трапецоэдр
		8	Тетрагональный трапецоэдр
		12	Гексагональный трапецоэдр
	нижняя грань расположена симметрично между двумя верхними	4	Тетрагональный тетраэдр
		6	Ромбоэдр

Вид симметрии L_3C : общая простая форма – ромбоэдр, частные: гексагональная призма, пинакоид. Представителей мало.

Вид симметрии L_33L_23PC : общая простая форма – дитригональный скаленоэдр, частные: ромбоэдр, гексагональная дипирамида, дигексагональная призма, гексагональная призма, пинакоид.

Этот вид имеет большое число представителей, как среди минералов,

так и среди искусственно полученных соединений. К нему относится известный минерал кальцит (CaCO_3).

Гексагональная сингония

Вид симметрии L_6 : общая простая форма – гексагональная пирамида, частные: гексагональная призма и моноэдр. Вид не богат представителями.

Вид симметрии L_66L_2 : общая простая форма – гексагональный трапецоэдр (правый и левый), частные: гексагональная дипирамида, дигексагональная призма, гексагональная призма, пинакоид.

Вид симметрии L_6PC : общая простая форма – гексагональная дипирамида, частные: гексагональная призма и пинакоид.

Вид симметрии L_66P : общая простая форма – дигексагональная пирамида, частные: дигексагональная призма, гексагональная призма, моноэдр.

Вид симметрии L_66L_27PC : общая простая форма – дигексагональная дипирамида, частные: гексагональная дипирамида, дигексагональная призма, гексагональная призма, пинакоид. Один из наиболее богатых представителями класс гексагональной сингонии.

Вид симметрии L_3P : общая простая форма – тригональная дипирамида, частные: тригональная призма и пинакоид.

Вид симметрии L_33L_24P : общая простая форма – дитригональная дипирамида, частные: гексагональная дипирамида, тригональная дипирамида, дитригональная призма, гексагональная призма, тригональная призма, пинакоид.

Для последних двух видов и одного вида тетрагональной сингонии (L_{i4}) долгое время не было известно реальных представителей. В начале 20 века были найдены для L_3P фосфорнокислое серебро и для L_33L_24P – минерал бенитоит.

Простые формы кубической сингонии

Характерным признаком кубической сингонии является присутствие нескольких осей высшего порядка, в том числе обязательно - четырёх осей третьего порядка. Все простые формы этой сингонии закрытые и не встречаются больше ни в одной сингонии (за исключением тетраэдра, но грань тетраэдра кубической сингонии представляет собой равносторонний треугольник).

В основу номенклатуры простых форм кубической сингонии положены, с одной стороны, число граней, а с другой, название форм, из которых путём их усложнения получают остальные. К таким исходным формам (табл. 6, рис. 7) относятся тетраэдр, гексаэдр, октаэдр, пентагон-додекаэдр и ромбододекаэдр. Из первых трёх форм путём увеличения количества граней получаем новые простые формы.

Из тетраэдра, утроив его грани, можно получить, двенадцатигранник - тритетраэдр. Но можно построить три тритетраэдра – с треугольными, четырёхугольными и пятиугольными гранями: тригон-тритетраэдр, тетрагон-тритетраэдр и пентагон-тритетраэдр (табл. 6).

Если усестерить грань тетраэдра, можно получить тригон-гексатетраэдр.



Тетраэдр



Октаэдр



Гексаэдр



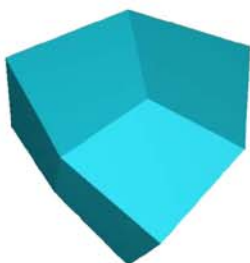
Тригон-тритетраэдр



Тригон-триоктаэдр



Тригон-тетрагексаэдр



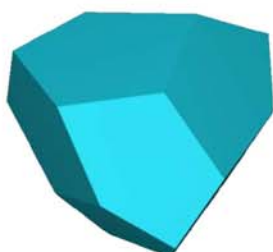
Тетрагон-тритетраэдр



Тетрагон-триоктаэдр



Пентагон-додэкаэдр



Пентагон-тритетраэдр



Пентагон-триоктаэдр



Дидодэкаэдр



Тригон-гексатетраэдр



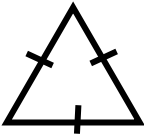
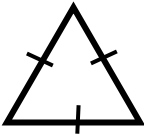
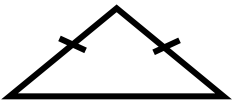
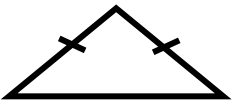
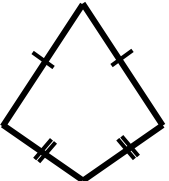
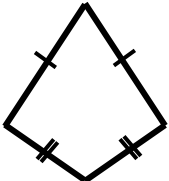
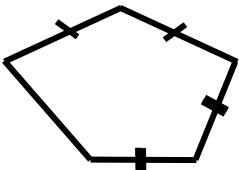
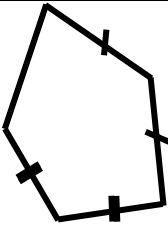
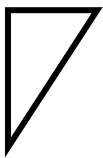
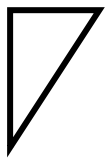
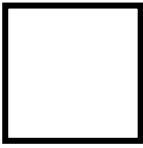
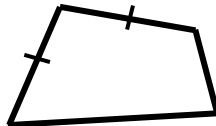
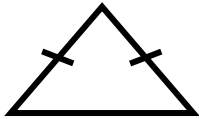
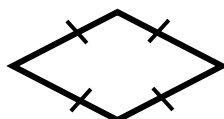
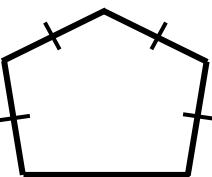
Тригон-гексоктаэдр



Ромбо-додэкаэдр

Рис. 7. Простые формы высшей категории.

Таблица 6 – Простые формы кубической сингонии

Число одинаковых граней	Очертание грани	Название простой формы	Число одинаковых граней	Очертание грани	Название простой формы
4		Тетраэдр	8		Октаэдр
12		Тригон-тритетраэдр	24		Тригон-триоктаэдр
12		Тетрагон-тритетраэдр	24		Тетрагон-триоктаэдр
12		Пентагон-тритетраэдр	24		Пентагон-триоктаэдр
24		Гексатетраэдр	48		Гексоктаэдр
6		Гексаэдр	24		Дидодекаэдр
24		Тетрагексаэдр	12		Ромбо-додекаэдр
12		Пентагон-додекаэдр			

Утраивая грани октаэдра, можно получить аналогичную серию производных как у тетраэдра: тригон-триоктаэдр, тетрагон-триоктаэдр и пентагон-триоктаэдр. Ушестерив грани октаэдра, приходим к единственному сорокавосмиграннику – тригон-гексоктаэдру.

Из гексаэдра получается только одна производная форма, представляющая собой учетверённый гексаэдр, – тригон-тетрагексаэдр. На каждой грани как бы появляется четырёхгранная пирамида.

Из пентагон-додекаэдра путём удвоения его граней выводится дидодекаэдр.

Из ромбододекаэдра никаких производных не получают. Так в кубической сингонии возможны 15 простых форм.

Рассмотрим распределение простых форм кубической сингонии по видам симметрии.

Вид симметрии $4L_33L_2$: общая простая форма – пентагон-тритетраэдр, частные – тетрагон-тритетраэдр, тригон-тритетраэдр, тетраэдр, пентагон-додекаэдр, ромбододекаэдр, гексаэдр.

Существуют правые и левые разновидности пентагон-тритетраэдра. Различить их можно следующим образом: если взять модель двумя пальцами, прикладывая их к двум вершинам с выходами однозначных концов осей симметрии третьего порядка, то видно, что от одной вершины к другой идёт ломаная линия из трёх рёбер. Если нижнее ребро отклонено вправо от средней линии, то мы имеем перед собой правую форму, если влево, то левую.

Вид симметрии $4L_33L_23PC$: общая простая форма – дидодекаэдр, частные – тригон-триоктаэдр, тетрагон-триоктаэдр, октаэдр, пентагон-додекаэдр, ромбододекаэдр, гексаэдр.

Вид симметрии $4L_33L_26P$: общая простая форма – тригон-гексатетраэдр, частные – тетрагон-тритетраэдр, тригон-тритетраэдр, тетраэдр, тригон-тетрагексаэдр, ромбододекаэдр, гексаэдр.

Вид симметрии $3L_44L_36L_2$: общая простая форма – пентагон-триоктаэдр, частные – тригон-триоктаэдр, тетрагон-триоктаэдр, октаэдр, тригон-тетрагексаэдр, ромбододекаэдр, гексаэдр. Существуют правые и левые пентагон-триоктаэдры, различить их между собой можно следующим образом: ставим модель так, чтобы одна из осей четвёртого порядка была расположена вертикально, другая – справа налево, а третья направлена на наблюдателя. Между вершиной, смотрящей вверх и обращенной к наблюдателю, расположена ломаная линия, состоящая из трёх рёбер. Если первое верхнее ребро отклонено вправо от средней линии, то пентагон-триоктаэдр – правый, если – влево, то пентагон-триоктаэдр – левый.

Вид симметрии $3L_44L_36L_29PC$: общая простая форма – тригон-гексоктаэдр, частные – тригон-триоктаэдр, тетрагон-триоктаэдр, октаэдр, тригон-тетрагексаэдр, ромбододекаэдр, гексаэдр. Этот вид обладает самой высокой степенью симметрии возможной для форм роста кристаллов.

При анализе комбинаций простых форм кубической сингонии могут возникнуть некоторые сложности, так как несколько простых форм обладают одинаковым количеством граней. Поэтому при разборе комбинаций

простых форм кубической сингонии необходимо пользоваться схемами расположения простых форм на проекциях (рис. 8 и 9). Но перед этим необходимо определить вид симметрии модели, этому может помочь таблица 6.

Таблица 6 – Определение вида симметрии кубических кристаллов.

Есть P			Нет P	
есть L_4	нет L_4		есть L_4	нет L_4
	есть C	нет C		
Планаксиальный	Центральный	Планальный	Аксиальный	Примитивный

Чтобы разобраться в комбинациях кубической сингонии, обратим внимание на положение граней отдельных простых форм относительно элементов симметрии. Для этого на одну и ту же проекцию наносим элементы симметрии и простые формы. Для планаксиального и аксиального вида симметрии это сделано на рис. 8. Проекции граней гексаэдра (1) совпадают с выходами осей четвертого порядка, граней октаэдра (2) – с выходами осей третьего порядка, ромбододекаэдра (3) – с осями второго порядка. Грани тетрагексаэдра (4) лежат между осями четвертого и второго порядка в одном поясе с гранями гексаэдра и ромбододекаэдра, находящимися в точках выхода этих осей. Грани тетрагон-триоктаэдра (5) лежат между осями четвертого и третьего порядка, грани тригон-триоктаэдра (6) – между осями третьего и второго порядка. Грани гексоктаэдра или пентагон-триоктаэдра (в зависимости от вида симметрии) (7) лежат внутри сферических треугольников, вершинами которых являются выходы осей четвертого, третьего и второго порядка. Рассмотрим один из треугольников в котором стоит цифра 7 и построим схему, которая поможет разобраться в комбинациях планаксиального вида симметрии.

Предположим, что в модели нами найдены элементы симметрии $3L_4 4L_3 6L_2 9PC$. Если в ней есть грань, перпендикулярная к оси L_4 , то это грань гексаэдра; если есть грань, перпендикулярная к L_3 , то это октаэдр; грань, перпендикулярная к L_2 , должна принадлежать ромбододекаэдру. Проверяем определение, сосчитав имеющиеся на модели одинаковые грани; их число должно совпадать с числом граней найденной простой формы, то есть для гексаэдра 6, для октаэдра 8, для ромбододекаэдра 12. Если грань лежит в поясе $L_4 L_3$, то это тетрагон-триоктаэдр; если в поясе $L_3 L_2$, то это тригон-триоктаэдр; и если в поясе $L_2 L_4$ – тригон-тетрагексаэдр. Опять проверяем правильность определения, считая число одинаковых граней – их должно быть по 24. Когда в модели есть грань, которая не укладывается ни в одно из перечисленных положений, то эта грань должна принадлежать гексоктаэдру – число граней 48.

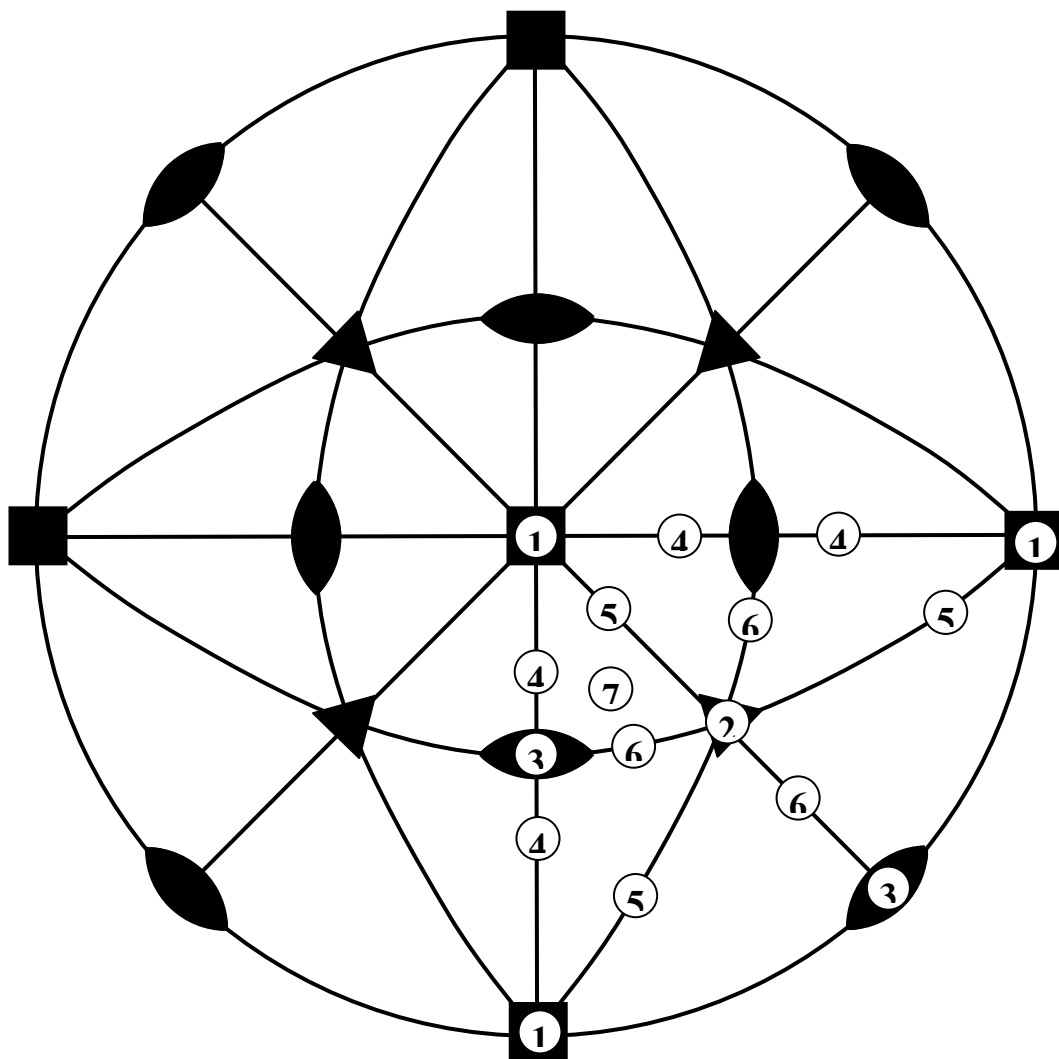


Рис. 8. Схема для разбора простых форм кубической сингонии на проекции для видов симметрии $3L_44L_36L_29PC$ и $3L_44L_36L_2$.

Цифрами обозначены проекции граней простых форм:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 – гексаэдр | 2 – октаэдр |
| 3 – ромбододекаэдр | 4 – тетрагексаэдр |
| 5 – тетрагон-триоктаэдр | 6 – тригон-триоктаэдр |
| 7 – пентагон-триоктаэдр ($3L_44L_36L_2$) | 7 – гексоктаэдр ($3L_44L_36L_29PC$) |

Если бы, определяя формулу симметрии, мы нашли вид $3L_44L_36L_2$, то все предыдущее остаётся в силе, кроме последней формы, на место которой надо поставить пентагон-триоктаэдр.

Такую же схему можно составить и для оставшихся трёх видов симметрии (рис. 9) кубической сингонии. Отличие заключается в том, что в них место L_4 занимают L_2 , а $6L_2$ отсутствуют, но мы воспользуемся теми направлениями, которые эти $6L_2$ занимали в первом случае, то есть биссектрисами углов $L_4 L_4$. Положение этих биссектрис можно найти на проекции, поделив угол между осями второго порядка пополам.

При изучении кристаллов кубической сингонии так же необходимо учитывать следующее. В пентагон-триоктаэдре сложно найти оси второго порядка. Рассматривая модели этой формы, необходимо обращать внимание

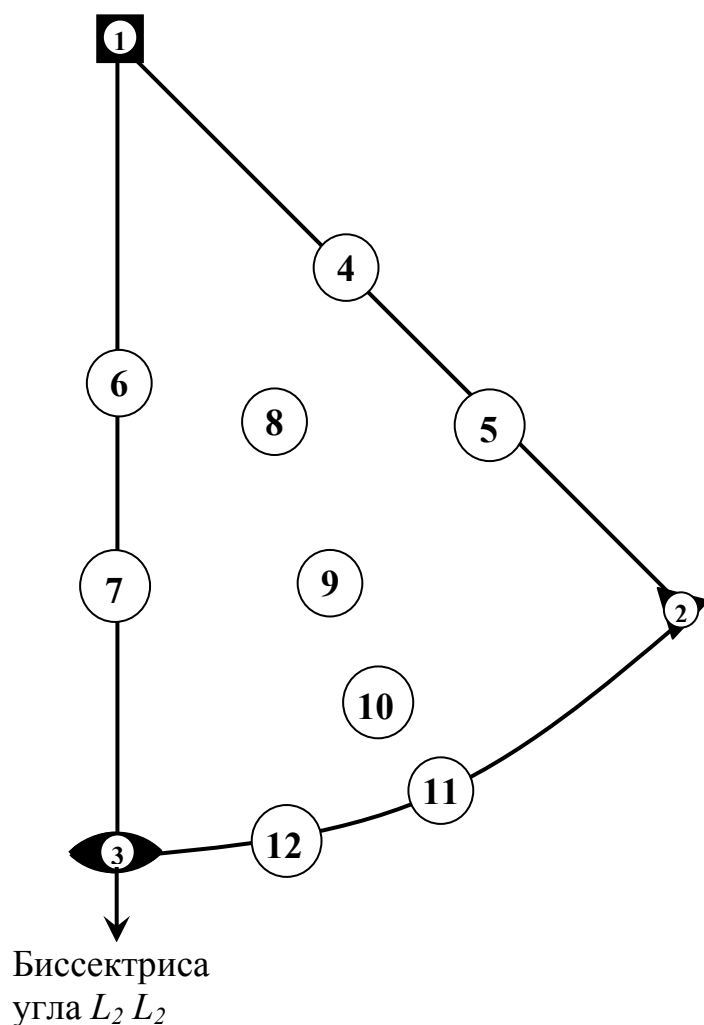


Рис. 9. Схема для разбора простых форм кубической сингонии на проекции для видов симметрии $4L_33L_2$, $4L_33L_26P$ и $4L_33L_23PC$.

Цифрами обозначены проекции граней:

- 1 – гексаэдр
- 2 – тетраэдр ($4L_33L_26P$ и $4L_33L_2$);
2 – октаэдр ($4L_33L_23PC$)
- 3 – ромбододекаэдр (для всех видов)
- 4 – тригон-тритетраэдр ($4L_33L_26P$ и $4L_33L_2$)
- 5 – тетрагон-триоктаэдр ($4L_33L_23PC$)
- 6 – пентагон-додокаэдр ($4L_33L_23PC$ и $4L_33L_2$)
- 7 – тетрагексаэдр ($4L_33L_26P$)
- 8 – гексатетраэдр ($4L_33L_26P$)
- 9 – дидодокаэдр ($4L_33L_23PC$)
- 10 – пентагон-тритетраэдр ($4L_33L_2$)
- 11 – тригон-триоктаэдр ($4L_33L_23PC$)
- 12 – тетрагон-тритетраэдр ($4L_33L_26P$ и $4L_33L_2$)

на то, что в ней имеются рёбра трёх различных типов: одни пересекаются в точках

выхода оси L_4 , другие в точках выхода L_3 ; в серединах рёбер третьего вида, которые не пересекаются в этих осях, и лежат выходы осей второго порядка. В пентагон-тритетраэдре два типа рёбер – одни пересекаются в точках выхода осей L_3 , другие в них не пересекаются, в их серединах выходят три взаимно перпендикулярные оси L_2 .

С моделями простых форм и их комбинациями можно познакомиться в ауд. Е-309 и в электронном виде – на компьютере ауд. Е-305 (Программа d3dCrystall ©Maxim Sattarov).

Тема 1.2.2 Кристаллографические символы граней кристаллов

Закон рациональных отношений параметров (закон Гаюи) гласит: двойные отношения параметров, отсекаемых двумя любыми гранями кристаллов на трёх пересекающихся ребрах равны отношениям целых и сравнительно малых чисел.

$$\frac{OA_2}{OA_1} : \frac{OB_2}{OB_1} : \frac{OC_2}{OC_1} = p : q : r$$

Закон целых чисел дает возможность численно охарактеризовать взаимное расположение граней кристалла.

Символ грани выражается тремя целыми числами, представляющими собой отношения трех дробей, числителем которых являются параметры единичной грани, а знаменатели соответствуют параметрам заданной грани.

$$\frac{1}{OA_2} : \frac{1}{OB_2} : \frac{1}{OC_2} = \frac{OA_1}{OA_2} : \frac{OB_1}{OB_2} : \frac{OC_1}{OC_2} = h : k : l$$

где h, k, l – целые числа

Символ грани записывают (hkl)

h – символ соответствующий оси X

k – символ соответствующий оси Y

l – символ соответствующий оси Z

Положение любой грани в пространстве можно определить тремя целыми числами, если за координатные оси принять направление трёх не параллельных рёбер кристалла и одну из граней в качестве единичной (масштабной).

1. Единичная грань всегда имеет символ (111) , независимо от того равные или неравные отрезки она отсекает на координатных осях
2. В символе грани, параллельной одной из координатных осей, индекс, соответствующий этой оси равен 0.
3. Над символом грани, пересекающей отрицательное направление координатной оси, ставят знак минус.
4. Чем больший отрезок отсекает грань на координатной оси, тем меньший символ ей соответствует.

Например грани куба характеризуются следующими символами (рис. 10): (100) , (010) , (001) , $(0\bar{1}0)$, $(\bar{1}00)$, $(00\bar{1})$.

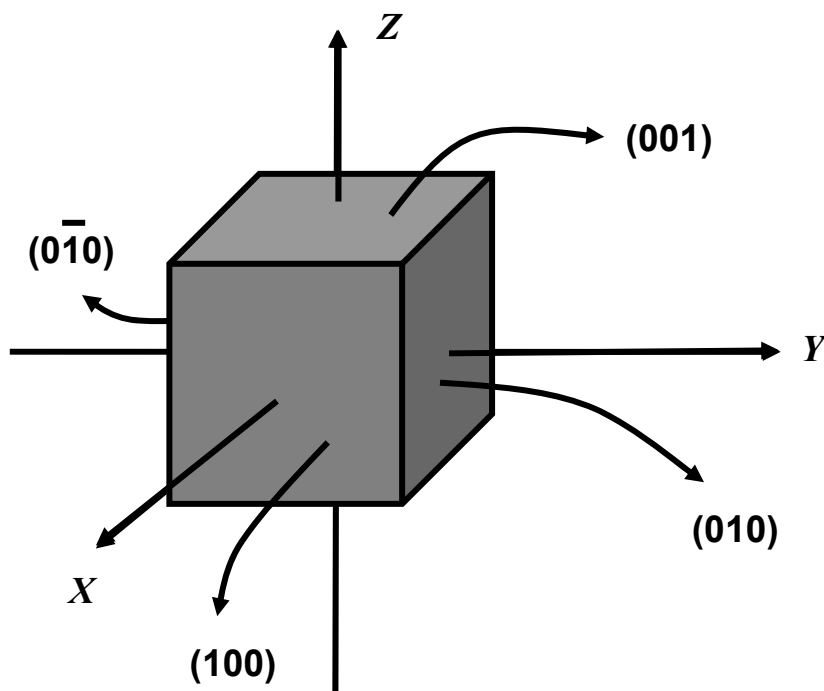


Рис. 10. Символы граней куба.

Символы граней простых форм низшей категории.

Пинакоиды – $\{001\}$, $\{100\}$, $\{010\}$

Моноэдры – $\{001\}$, $\{100\}$, $\{010\}$, $\{010\}$, $\{101\}$

Ромбические призмы – $\{110\}$, $\{101\}$, $\{011\}$, $\{hk0\}$, $\{h0l\}$, $\{0kl\}$

Ромбические дипирамиды и пирамиды – $\{111\}$, $\{hkl\}$

Символы граней простых форм тетрагональной сингонии.

Пинакоид – $\{001\}$, моноэдры – $\{001\}$, $\{001\}$.

Тетрагональные призмы $\{100\}$, $\{110\}$, $\{hk0\}$.

Тетрагональные пирамиды и дипирамиды $\{101\}$, $\{111\}$, $\{hkl\}$.

Тетрагональные тетраэдры $\{111\}$, $\{111\}$, $\{hkl\}$.

Тетрагональные скаленоэдры и трапецоэдры – $\{hkl\}$.

Символы граней простых форм тригональной и гексагональной сингоний.

Пинакоид – $\{0001\}$

Моноэдры – $\{0001\}$, $\{0001\}$

Призмы – $\{1010\}$, $\{1120\}$, $\{hki0\}$

Пирамиды и дипирамиды – $\{1011\}$, $\{1121\}$, $\{h0hl\}$, $\{hh2hl\}$, $\{hkil\}$

Трапецоэдры и скаленоэдры – $\{hkil\}$

Ромбоэдры – $\{h0hl\}$, $\{hh2hl\}$, $\{hkil\}$

Символы граней простых форм кубической сингонии.

Тетраэдр $\{111\}$

Гексаэдр $\{100\}$

Октаэдр $\{111\}$

Ромбо-додекаэдр $\{110\}$

Пентагон-додекаэдр $\{hk0\}$

Тетрагексаэдр $\{hk0\}$

Все остальные $\{hkl\}$

Тема 1.2.3 Особенности морфологии реальных кристаллов в природных условиях и зависимость морфологии кристаллов, минералов от условий их образования

Появление разновидностей простых форм связано с тем, что:

- Под названием одной простой формы нередко объединяются многогранники, отличающиеся по своей симметрии.
- Существуют энантиоморфные разности.

Всего существует 146 кристаллографических разновидностей простых форм из них:

- 21 пинакоид
- 11 гексагональных призм
- 10 моноэдров и т. д.

С учётом энантиоморфных – 193 разновидности.

Кристалл, ограниченный свойственными ему и достаточно хорошо развившимися гранями, называется идиоморфным.

Кристалл, не имеющий четких граней, называется ксеноморфным.

Реальные грани кристаллов далеки от математических плоскостей. На них при внимательном рассмотрении почти всегда обнаруживаются следы

имевших место процессов роста или растворения в виде бугорков, ямок, вихрицальных образований, штрихов и т.п.

Эти и другие подобные им усложнения на поверхностях граней принято называть скульптурой граней.

Изучение гранных скульптур дает информацию об особенностях строения и роста кристаллов.

Грани каждой простой формы характеризуются собственной скульптурой, что позволяет отличать грани разных простых форм друг от друга.

Исследование кристаллических многогранников различных минералов показывает, что асимметричное развитие граней одной той же простой формы во многом зависит от положения и ориентировки кристаллов на месте их образования. Например, грани кристалла, обращенные вверх и вниз, развиваются неодинаково. Причина неравномерного развития верхних и нижних граней связана с различием условий питания граней.

Кроме того, нижние и верхние грани могут различаться еще характером своих поверхностей.

Согласно принципу П.Кюри симметрия окружающей среды как бы отпечатывается на формирующемся в ней объекте. При этом элементы симметрии среды накладываются на внешнюю симметрию данного объекта. последний в результате сохраняет только элементы своей симметрии, совпадающие с элементами симметрии среды.

Кристаллы, растущие на вертикальных стенках полостей, с косоориентированной главной осью симметрии, нередко характеризуются ложной симметрией типа Р. Это связано с тем, что совокупность поднимающихся по вертикали питающих струек характеризуется наличием плоскостей симметрии, перпендикулярных к стенке породы. Одна из таких плоскостей, совпадающая с серединой прикрепленного к стенке кристалла, и отпечатывается на его облике.

Учет ложной симметрии и ложных форм на реальных кристаллах дает понятие об особенностях питающей среды и делает возможным суждение о направлении питающих потоков.

Влияние универсального принципа симметрии является чисто внешним, налагающим свою печать лишь на наружную форму природных тел. внутреннее строение их и многие детали остаются вне его влияния.

Исследования такого рода явлений представляю большой интерес, так как позволяют детально анализировать процессы формирования природных тел, а в том числе и кристаллов и их скоплений.

Раздел 2. Структурная кристаллография

Подраздел 2.1. Основы учения о структуре кристаллов

Пространственная решетка.

Построение решетки: Примем узел A_0 за исходный узел решётки. Пусть ближайший к нему узел A_1 находится на расстоянии a . Продолжим прямую $A_0 A_1$, получив серию узлов $A_2, A_3, A_4, \dots, A_n$, расположенных вдоль этой прямой. Совокупность узлов, лежащих вдоль прямой и повто-

ряжущихся через равные промежутки, называется рядом пространственной решетки. Параметр a является промежутком ряда или трансляцией ряда.

Пусть узел B_1 лежит в плоскости чертежа, но вне прямой $A_0 A_n$, на расстоянии b . Продолжив прямую $A_0 B_1$, найдём на ней серию узлов $B_2, B_3, B_4, \dots, B_n$ с промежутком b .

Проведём через узлы $B_1, B_2, B_3, B_4, \dots, B_n$ прямые, параллельные первому ряду.

Соответственно через узлы $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_n$ проводим прямые, параллельные второму ряду. Совокупность узлов, расположенных в одной плоскости и находящихся в вершинах системы равных параллелограммов, параллельно ориентированных и смежных по целым сторонам называется плоской сеткой.

Берём относительно исходного узла A_0 ближайший узел C_1 , не лежащий в плоскости построенной сетки $A_n A_0 B_n$. Пусть $A_0 C_1 = c$.

Продолжив прямую $A_0 C_1$, найдём на ней серию узлов $C_2, C_3, C_4, \dots, C_n$ с промежутком c .

Проведём через каждый узел последнего ряда плоские сетки, параллельные первой сетке $A_n A_0 B_n$.

Получаем три системы плоских сеток, образующих совокупность параллелепипедов.

Пространственная решётка – совокупность узлов, расположенных в пространстве и находящихся в вершинах системы равных параллелепипедов, параллельно ориентированных и смежных по целым граням.

Пространственная решетка – трёхмерная система эквивалентных узлов.

Форма кристаллов - следствие упорядоченного расположения в кристаллах атомов, образующих кристаллическую решётку

Типы решеток (ячеек) Браве.

Условия выбора параллелипипедов повторяемости:

1. Симметрия элементарной ячейки должна соответствовать симметрии кристалла.
2. Элементарная ячейка должна содержать максимально возможное число прямых углов или равных углов и равных рёбер.
3. Элементарная ячейка должна иметь минимальный объём.

Исходя из этих принципов, выбираем форму элементарных ячеек для каждой сингонии.

Форма элементарной ячейки для кубической сингонии соответствует кубу: $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

В тетрагональной сингонии за вертикальные рёбра ячейки принимают период идентичности в направлении, параллельном оси четвертого порядка, а за горизонтальные рёбра – две равные и взаимно перпендикулярные трансляции, лежащие в плоскости, перпендикулярной к этой оси. Отсюда следует, что форма элементарной ячейки для тетрагональной сингонии соответствует тетрагональной призме с пинакоидом: $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

В тригональной сингонии ячейкой, удовлетворяющей условиям Браве,

является ромбоэдр, ребра которого расположены под косым углом к главной оси симметрии третьего порядка. При этом: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$.

В гексагональной сингонии за элементарную ячейку принимают не параллелепипед, а особую ячейку в форме гексагональной призмы с пинакоидом. Такая ячейка состоит из трех параллелепипедов, параметры которых соответствуют: $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$, повернутых друг относительно друга на 120° .

В ромбической сингонии ребра ячейки выбираются параллельно трем осям второго порядка или параллельно одной оси второго порядка и перпендикулярно двум плоскостям симметрии. Все эти трансляции взаимно перпендикулярны, и следовательно, не равны друг другу.

Форма элементарной ячейки в ромбической сингонии отвечает комбинации трех пинакоидов ("кирпичик"): $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

В моноклинной сингонии за ребро b принимают трансляцию, параллельную единственной оси второго порядка или нормали к плоскости симметрии. Двумя другими ребрами ячейки, в данном случае a и c , служат неравные между собой трансляции, лежащие в плоскости, перпендикулярной к оси второго порядка или в плоскости симметрии.

Форма элементарной ячейки в моноклинной сингонии так же отвечает комбинации трех пинакоидов: $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$.

В триклинной сингонии вследствие отсутствия осей и плоскостей симметрии ребра параллелепипеда совмещаются с любыми тремя трансляциями решетки.

В результате получается ячейка в форме косоугольного параллелепипеда (так же комбинация трех пинакоидов) с неравными ребрами: $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$.

Кроме примитивных ячеек, в которых узлы расположены лишь по вершинам, Браве выделяет, базоцентрированные, объемноцентрированные и гранецентрированные ячейки.

Базоцентрированная решетка – узлы расположены по вершинам и в центрах двух взаимно параллельных граней ячейки – обозначается C .

Объемноцентрированная решетка – узлы расположены по вершинам и в центре ячейки – обозначается I .

Гранецентрированная решетка – узлы расположены по вершинам и в центрах всех граней ячейки – обозначается F .

Исходя из симметрии всего существует 14 ячеек Браве (табл. 7)

Таблица 7 – Четырнадцать решеток Браве.

Сингония	Примитивная	Базоцентрированная	Объемноцентрированная	Гранецентрированная
Триклинная	+			
Моноклинная	+	+		

Сингония	Примитивная	Базоцентрированная	Объемно-центрированная	Гранецентрированная
Ромбическая	+	+	+	+
Тригональная	+			
Тетрагональная	+		+	
Гексагональная	+			
Кубическая	+		+	+

Подраздел 2.2. Элементы симметрии бесконечных фигур

К числу элементов симметрии бесконечных фигур, помимо восьми элементов симметрии (центра, плоскости и шести осей) принадлежат еще трансляции (переносы), плоскости скользящего отражения и винтовые оси – второго, третьего, четвертого и шестого порядка.

Комбинируя элементы симметрии бесконечных фигур можно вывести 230 пространственных групп симметрии. Пространственная группа симметрии – совокупность всех возможных элементов симметрии кристаллической структуры.

Обозначение пространственных групп с помощью символов Германа-Могена:

Первой буквой обозначается тип решетки: P , R , C , F , I

Далее следуют символы операций симметрии:

$1, 2, 3, 4, 6$ – поворотные оси,

$2_1, 3_1, 3_2, 4_1, 4_2, 4_3, 6_1, 6_2, 6_3, 6_4, 6_5$ – винтовые оси

m – зеркальная плоскость симметрии;

a, b, c, n, d – плоскости скользящего отражения.

Примеры обозначений:

- Группа **$P432$** - характеризуется примитивной элементарной ячейкой и обладает поворотными осями симметрии
- Группа **$Cmc2_1$** - характеризуется базоцентрированной элементарной ячейкой, зеркальной плоскостью симметрии, плоскостью скользящего отражения и винтовой осью второго порядка с трансляцией на $\frac{1}{2}$ ячейки.
- Группа **$Fd3m$** - характеризуется гранецентрированной элементарной ячейкой, диагональной плоскостью скользящего отражения, поворотной осью третьего порядка, и идущей вдоль неё зеркальной плоскостью симметрии

Раздел 3. Элементы кристаллохимии и кристаллофизики

Подраздел 3.1 Основные положения кристаллохимии

Кристаллохимия изучает связь между структурой кристаллов и их хи-

мическими, физическими и геометрическими свойствами. Эта наука изучает как закономерности внутреннего строения кристаллического вещества, отражением которого является геометрически правильная внешняя форма кристаллов, так и проблемы связи между строением кристаллов и их химическим составом, с одной стороны, и структурой и физическими свойствами – с другой, поскольку на основе лишь химического состава, без знания атомного строения, нельзя понять многие свойства кристаллов.

Химический состав минералов – это фундаментальная характеристика, от которой в значительной степени зависят многие их физические свойства.

Простому химическому составу вещества соответствует высокая симметрия его кристаллов, чем сложнее состав, тем обычно ниже симметрия.

Кристаллическая структура твердого вещества – конфигурация составляющих ее частиц (атомов, ионов и молекул). Основными строительными элементами в структурах являются атомы.

Размер атома – радиус – главный кристаллохимический фактор, который определяет периодичность кристаллических построек, размер элементарной ячейки, длину химической связи.

Атомными или ионными радиусами являются минимальные расстояния, на которые центры атомных или ионных сфер могут приближаться к сферам соседних атомов или ионов.

Радиусы

Атомные, нм	Ионные, нм
O – 0,060	O²⁻ – 0,136
Cl – 0,107	Cl⁻ – 0,181
S – 0,104	S²⁻ – 0,182
Fe – 0,126	Fe²⁺ – 0,080
Na – 0,186	Fe³⁺ – 0,067
Mn – 0,129	Na⁺ – 0,098
	Mn²⁺ – 0,091
	Mn³⁺ – 0,070
Al – 0,143	Mn⁴⁺ – 0,052
	Al³⁺ – 0,057

1. Радиусы анионов всегда больше радиусов атомов тех же элементов.
2. Радиусы катионов всегда меньше радиусов атомов тех же элементов.
3. С повышением заряда элемента радиус иона уменьшается.
4. В пределах одного вертикального ряда периодической системы элементов радиусы ионов с одинаковым зарядом увеличиваются с возрастанием атомного номера.

Тема 3.1.1 Координационное число и координационные многогранники.

Координационное число атома или иона – это число ближайших соседних атомов или ионов противоположного знака.

Координационный многогранник – геометрическая фигура, полученная при соединении центров этих частиц.

Величина координационного числа и форма координационного многогранника определяются пределами устойчивости структуры, которые зависят от соотношения радиусов анионов (R_a) и катионов (R_k):

Координационное число	Координационный многогранник	R_a/R_k
2	гантель	0 – 0,15
3	треугольник	0,15-0,22
4	тетраэдр	0,22-0,41
6	октаэдр	0,41-0,73
8	гексаэдр	0,73-1
12	кубооктаэдр	1

Вопросы, связанные с координацией атомов, имеют большое значение благодаря влиянию их на решение проблемы теоретического определения атомных расположений в кристаллических структурах, проблемы устойчивости соединений, проблемы химической связи и т.д.

Кроме того, координационные многогранники принимаются за основную характеристику при классификации природных химических соединений.

Координационные многогранники могут использоваться для изображения кристаллических структур в виде полиэдров.

Тема 3.1.2 Типы плотнейших упаковок шаров.

Упаковка, характеризующаяся двумя оригинальными слоями А и В, то есть, в которой нечётные и чётные слои лежат точно друг над другом, называется гексагональной плотнейшей упаковкой (рис. 10).

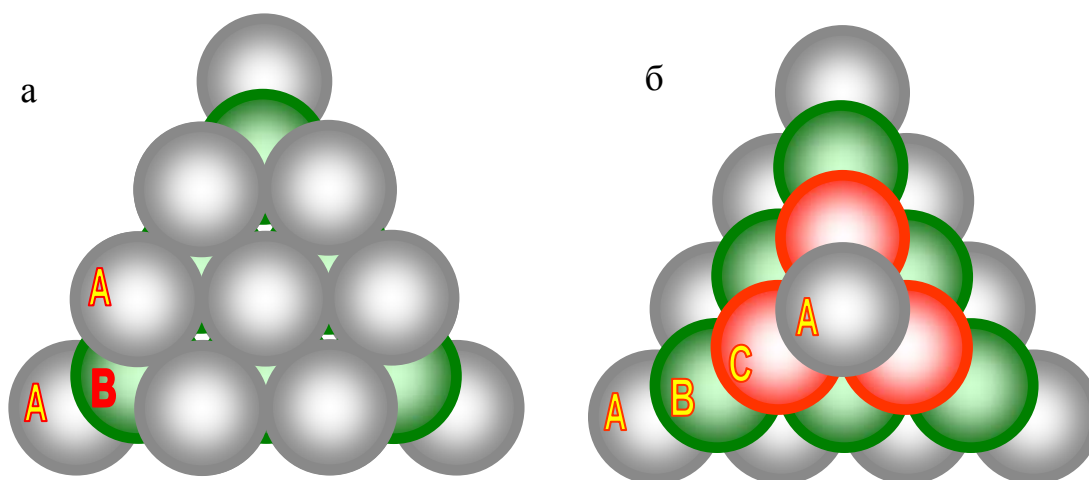


Рис. 10. Типы плотнейших упаковок: а – гексагональная, б - кубическая.

Формула .../AB/AB/...

Упаковка, характеризующаяся тремя оригинальными слоями А, В и С, то есть, в которой четвёртый слой повторяет первый, пятый – второй, шестой – третий и т. д., называется кубической плотнейшей упаковкой (рис. 10).

Формула .../ABC/ABC/...

Десятки простых веществ имеют структуры, соответствующие обеим разобранным упаковкам.

Плотнейшая кубическая упаковка характеризует структуры меди, серебра, золота и т.д.

Все остальные (по природе – гексагональные) плотнейшие упаковки называются многослойными.

Многие химические соединения могут рассматриваться как упаковки обычно более крупных атомных сфер, в пустотах между которыми находятся более мелкие сферы.

В связи с этим нельзя ограничиться лишь выяснением слойности упаковки, необходимо еще остановиться на пустотах, заключенных между шарами, образующими плотнейшие упаковки.

Пустоты плотнейшей упаковки. На шары приходится 74 % упаковки, на пустоты – 26 %. Существует два рода пустот – тетраэдрические и октаэдрические. На n шаров плотнейшей упаковки приходится n октаэдрических пустот и $2n$ – тетраэдрических.

Более крупные компоненты химических соединений могут укладываться в структурах порой по весьма однообразным законам плотнейших упаковок. Различия между отдельными структурами заключаются не столько в них, сколько в количестве и качестве заполненных пустот упаковок.

Тема 3.1.3 Структуры кристаллов

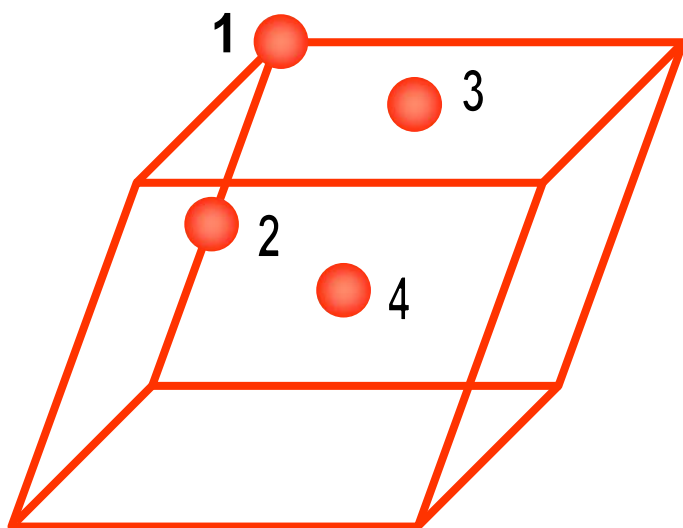
План описания структуры кристаллов.

1. Определение сингонии, вида симметрии
2. Определение типа решётки Бравэ
3. Определение типа химической связи
4. Подсчет количества структурных единиц в элементарной ячейке
5. Определение координационного числа и координационного многогранника

Число структурных (формульных) единиц (Z) - это число атомов каждого сорта (химического элемента), приходящихся на одну элементарную ячейку.

Подсчет числа структурных единиц в одной элементарной ячейке:

1 – частица расположена в вершине ячейки, от этой частицы ячейке принадлежит $1/8$.



2 – частица расположена на середине ребра ячейки, от этой частицы ячейке принадлежит $1/4$.

3 – частица расположена в центре грани ячейки, от этой частицы ячейке принадлежит $1/2$.

4 – частица расположена в центре ячейки, эта частица целиком принадлежит ячейке. На неё приходится 1 структурная единица.

Описание структур минералов.

Структура галита.

1. Кубическая сингония, планаксиальный вид симметрии.
2. Две кубические гранецентрированные ячейки сдвинутые одна относительно другой на половину ребра ячейки.
3. Ионный тип химической связи.
4. Количество структурных единиц $Z = 4$.
5. Координационное число натрия – 6, координационное число хлора – 6, координационный многогранник – октаэдр.

Структура меди.

1. Кубическая сингония, планаксиальный вид симметрии.
2. Кубическая гранецентрированная ячейка.
3. Металлический тип химической связи.
4. Количество структурных единиц $Z = 4$.
5. Координационное число меди – 12, координационный многогранник – кубоктаэдр.

Структура алмаза.

1. Кубическая сингония, планальный вид симметрии.
2. Кубическая гранецентрированная ячейка
3. Ковалентный тип химической связи
4. $Z = 8$
5. Координационное число – 4, координационный многогранник - тетраэдр.

Подраздел 3.2 Основные положения кристаллофизики

В последние десятилетия роль физики в развитии современной техники неизмеримо возросла. Особое значение приобрела такая область этой науки, как физика твердого тела, занимающаяся исследованием материалов, которые благодаря своим уникальным свойствам — полупро-

водниковым, лазерным, оптическим, пьезоэлектрическим, пьезоэлектрическим и т. д. — широко используются в полупроводниковой технике, квантовой электронике и т. п. Современное приборостроение немислимо без самого широкого использования природных и синтетических материалов, в частности кристаллов. Бурно расширяющиеся области использования и применения физических свойств кристаллов способствуют превращению современной физики кристаллов — кристаллофизики — в самостоятельную быстро развивающуюся научную дисциплину.

Например, кристаллы корунда и алмаза благодаря исключительно высокой твердости используются в буровой технике в качестве абразивов; высокая теплопроводность алмаза позволяет использовать его при изготовлении теплоотводов; графит благодаря малой твердости применяется как смазочный материал, а также для изготовления карандашей; замечательные пьезоэлектрические свойства кварца и турмалина находят широкое применение в электротехнике и радиотехнике; гранаты используются в качестве элементов быстродействующих ЭВМ; кристаллы кальцита и флюорита из-за особых оптических свойств применяются при конструировании оптических приборов; слюда мусковит в прошлом заменяла оконные стекла, а в настоящее время используется как прекрасный изоляционный материал. Таких примеров можно привести множество.

Физика твердого тела занимается изучением структуры и физических свойств твердых тел, устанавливает зависимость этих свойств от атомной структуры вещества, разрабатывает методы получения и исследования новых кристаллических материалов, обладающих заданными характеристиками. И очень часто именно кристаллография оказывается той азбукой, без которой невозможно приступить к изучению твердого тела и его свойств. Особенно важны знания (хотя бы в самых общих чертах) главнейших физических свойств кристаллов для геологов, ибо многие физические свойства лежат в основе диагностики — распознавания минералов.

Физические свойства кристаллов определяются в первую очередь природой химических элементов, входящих в их состав, т. е. большую роль играет тип химической связи. Кроме того, проявление тех или иных физических свойств связано с геометрическим характером структуры, т. е. с взаимным расположением атомов в кристаллической структуре минералов, а также с несовершенствами структур реальных кристаллов, отражающих условия их образования. В зависимости от колебаний химического состава физические свойства одного и того же вещества могут варьировать в более или менее широких пределах.

Самой характерной особенностью физических свойств кристаллов является их симметрия и анизотропия. Анизотропная среда характеризуется зависимостью измеряемого свойства от направления измерения. Вследствие периодичности и симметрии внутреннего строения кристаллов в них обнаруживается ряд свойств, невозможных в изотропных телах. Задачей кристаллофизики, т. е. раздела кристаллографии, посвященного изучению физических свойств кристаллов, является изучение общих симметричных закономерностей физических свойств, изучение взаимосвязи физических

свойств кристаллов и их строения, а также зависимости этих свойств от внешних воздействий. Анизотропные физические свойства кристаллов чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям. Поэтому, подбирая и комбинируя те или иные воздействия, можно создавать кристаллы с уникальными, необычными свойствами, которые используются в источниках, приемниках, преобразователях и усилителях различных видов энергии.

Проявление ряда физических свойств, таких как масса, плотность, теплоемкость, температура плавления и др., зависит от межатомных расстояний в структурах кристаллов. В этом случае кристалл можно рассматривать как прерывистую (дискретную) среду. Однако в отношении целого ряда макроскопических свойств, таких как тепло- и электропроводность, оптические и другие свойства, можно отвлечься от дискретного микропериодического строения и рассматривать кристаллическое вещество как сплошную однородную анизотропную среду, ибо в этом случае мы будем оперировать расстояниями и объемами, значительно превышающими параметры, а следовательно, и объем элементарных ячеек кристаллических структур. Поэтому с некоторой степенью приближения можно считать, что, поскольку свойства кристалла одинаковы во всем его объеме, во всех его точках, кристалл как однородная среда характеризуется неизменностью (инвариантностью) физического свойства по отношению к трансляциям. Но поскольку проявление многих физических свойств зависит от направления в кристалле, то кристалл можно считать сплошной анизотропной средой. В этом случае физические свойства, проявляющиеся в определенном направлении, не зависят от трансляций (переносов). Это позволяет симметрию физических свойств описывать с использованием точечных групп симметрии — кристаллографических или предельных.

Когда мы говорим о симметрии кристаллов, то невольно абстрагируемся от их физической сущности, принимая во внимание только внешнюю форму, т. е., по сути дела, рассматриваем симметрию геометрических фигур. Симметрию материальных фигур изучил П. Кюри. Он показал, что симметрия материальных фигур описывается бесконечным числом точечных групп, которые в пределе стремятся к семи предельным группам симметрии.

Предельными точечными группами - группами Кюри - названы точечные группы, содержащие оси бесконечных порядков. При этом каждая предельная группа является надгруппой соответствующих точечных групп симметрии. Всего существует семь предельных групп, каждую из которых можно проиллюстрировать одной из геометрических фигур.

Связь между точечной симметрией кристалла и симметрией его физических свойств сформулировал немецкий физик Ф. Нейманн (1798-1895) в фундаментальном постулате кристаллофизики: материал в отношении физических свойств обнаруживает симметрию того же рода, что и его кристаллографическая форма. Это положение известно как принцип Нейманна.

Найденный Нейманном закон фактически означал начало распро-

странения идеи симметрии на физические свойства, т. е. изучение физических свойств с помощью симметрии.

Ученик Ф. Нейманна немецкий физик В. Фойгт (1850-1919) существенно уточнил указанный принцип и сформулировал его следующим образом: группа симметрии любого физического свойства должна включать в себя все элементы точечной группы симметрии кристалла. Отсюда можно сделать вывод, что симметрия физического свойства не может быть ниже точечной группы симметрии кристалла. Принцип Нейманна указывает лишь на возможность, но не обязательность проявления определенного физического свойства у данного кристалла, т. е. является необходимым, но не достаточным условием. Используя этот принцип, можно, с одной стороны, зная группу симметрии кристалла, предсказать его возможные физические свойства и, с другой стороны, зная физические свойства, установить, у кристаллов каких классов симметрии они возможны.

Наряду с принципом Нейманна, связывающим симметрию свойства и симметрию кристалла, в кристаллофизике «работает» и принцип Кюри — принцип диссимметрии (принцип суперпозиции), рассматривающий взаимодействие симметрии кристалла с симметрией среды, в которой он развивается: при наложении нескольких явлений различной природы в одной и той же системе их диссимметрии складываются, т. е. кристалл под внешним воздействием изменяет свою точечную симметрию таким образом, что в группе симметрии его внешней формы сохраняются лишь те элементы симметрии, которые являются общими для групп симметрии как самого кристалла, так и воздействий, взятых отдельно'.

Этот принцип позволяет определить симметрию кристалла, подвергнутого внешнему воздействию.

Своими работами П. Кюри безгранично расширил понятие симметрии, рассматривая последнюю как состояние пространства.

Скалярные, векторные и тензорные свойства

Симметрия всех физических объектов, явлений и свойств может быть проиллюстрирована геометрическими образами, каждый из которых обладает своей собственной симметрией. Для их описания используются скалярные, векторные и тензорные величины. Отсюда и свойства соответственно подразделяются на скалярные, векторные и тензорные.

Скалярными называются физические свойства, величина которых не зависит от направления, в котором они определяются. Например, это плотность тела, его масса, теплоемкость, модуль сжатия, температура плавления и др. Аналитически скалярные величины задаются одним числом. Поскольку скалярное свойство одинаково во всех точках кристалла и не зависит от направления, геометрическим образом, иллюстрирующим симметрию этого свойства, будет сфера, симметрия которой описывается одной из предельных групп — mm .

Векторными являются простейшие направленные величины, такие как сила и напряженность электрического поля и др. Векторные свойства возникают в кристалле как анизотропной среде при скалярном — изотропном — воздействии на него, т. е. воздействии, не зависящем от направления.

Например, вектор a определенной длины и направления, описывающий некоторую физическую величину и остающийся неизменным в любой системе координат, может быть задан его проекциями — компонентами этого вектора a_1, a_2, a_3 — на координатные оси X, Y, Z . Иначе говорят о разложении вектора a по базису XYZ .

Тензорные свойства — это следующие по сложности (после векторных) направленные физические величины, описываемые в некоторой системе координат. Если одна векторная величина b является функцией другой a , то в простейшем случае они связаны линейной зависимостью: $b = s \times a$. То есть в общем случае в анизотропных средах, например в кристаллах, связь между этими векторами (a и b) зависит от их направления. При этом каждая компонента вектора b является линейной функцией каждой компоненты вектора a и может быть выражена системой линейных уравнений.

Плотность

Плотность вещества — фундаментальное физическое свойство, определяемое как масса единичного объема вещества, выраженная в граммах на кубический сантиметр. Зависит плотность от типа кристаллической структуры вещества, его химического состава, коэффициента упаковки атомов, валентностей и радиусов слагающих ее частиц.

Изменяется плотность и с изменением температуры и давления, так как эти факторы вызывают расширение или сжатие вещества.

Зависимость плотности от структуры вещества можно продемонстрировать на примере трех модификаций Al_2SiO_5 :

андалузита ($\rho = 3,14-3,16$ г/см³);

силлиманита ($\rho = 3,23-3,27$ г/см³);

кианита ($\rho = 3,53-3,65$ г/см³).

С увеличением коэффициента упаковки кристаллической структуры возрастает плотность вещества. Так, при полиморфном переходе углерода — графита в алмаз — с изменением координационного числа атомов углерода с 3 до 4 соответственно повышается и плотность от 2,2 до 3,5 г/см³.

Плотность реальных кристаллов обычно меньше, чем расчетная плотность (идеальных кристаллов) из-за присутствия дефектов в их структурах. Плотность алмаза, например, колеблется в пределах 2,7-3,7 г/см³. Таким образом, по уменьшению реальной плотности кристаллов можно судить о степени их дефектности.

Плотность меняется и с изменением химического состава вещества при изоморфных замещениях — при переходе от одного члена изоморфного ряда к другому. Например, в ряду оливинов $(Mg, Fe^{2+})_2[SiO_4]$ плотность возрастает по мере замены катионов Mg^{2+} на Fe^{2+} от $\rho = 3,22$ г/см³ у форстерита Mg_2SiO_4 до $\rho = 4,39$ г/см³ у фаялита $Fe^{2+}_2SiO_4$. Именно вследствие изоморфных замещений большинство минералов не имеют точных значений плотности. Поэтому, построив для определенного ряда соединений график зависимости плотности от процента изоморфных примесей, по значению плотности можно определить количество замещенных атомов одного элемента другим.

Симметрия плотности как скалярного свойства соответствует симметрии неподвижного шара, и в отношении этого свойства кристаллы ведут себя как однородные изотропные среды. Используется это свойство при обогащении руд – флотации.

Механические свойства кристаллов

К свойствам, зависящим от направления в кристалле, относятся такие механические свойства, как твердость, упругость, пластичность, спайность. Под механическими свойствами понимают способность тел реагировать на механические воздействия – сжатие, растяжение, сдвиг, разрушение. Все эти свойства зависят от строения кристаллов и степени их дефектности.

Твердость

Под твердостью подразумевается степень сопротивления кристалла внешнему воздействию. Для приближенного определения твердости пользуются целым рядом методов, основанных на царапании одного кристалла другим. В 1824 г. австрийский минералог Ф. Моос (1773-1839) предложил достаточно обоснованную 10-балльную шкалу относительной твердости минералов (табл. 7).

Полученные таким образом результаты являются весьма приближенными. Однако даже с помощью этого метода можно подметить анизотропию твердости у кристаллов некоторых веществ. Наиболее точные сведения о твердости можно получить с помощью специальных приборов — твердометров, или склерометров, где алмазная пирамидка вдавливается под определенной нагрузкой в образец, и по глубине фигуры вдавливания определяется абсолютная твердость в кг/мм^2 .

Твердость не является физической постоянной. Ее величина зависит не только от изучаемого материала, но и от условий измерения. Доказана зависимость твердости от строения кристаллов – типа структуры, коэффициента упаковки (удельного веса), заряда образующих кристалл ионов. Например, различную твердость (по шкале Мооса) двух полиморфных модификаций CaCO_3 – кальцита и арагонита – 3 и 4 соответственно можно объяснить разной плотностью их структур:

для структуры кальцита с $K\text{Ч}_{\text{Ca}} = 6 - \rho = 2,72 \text{ г/см}^3$,

для структуры арагонита с $K\text{Ч}_{\text{Ca}} = 9 - \rho = 2,94 \text{ г/см}^3$.

Таблица 7. Шкала твердости по Ф. Моосу

Минерал	Относительная твердость по Моосу	Абсолютная твердость, кг/мм^2 *
Тальк	1	2,4
Галит	2	36
Кальцит	3	109
Флюорит	4	189
Апатит	5	536

Минерал	Относительная твёрдость по Моосу	Абсолютная твёрдость, кг/мм ² *
Полевой шпат	6	795
Кварц	7	1120
Топаз	8	1427
Корунд	9	2060
Алмаз	10	10 060

* Твёрдость, определенная методом вдавливания па твердометре.

В ряду одинаково построенных кристаллов твёрдость возрастает увеличением зарядов, а следовательно, и уменьшением размеров катионов. Присутствие же в структурах достаточно крупных анионов типа F⁻, OH⁻, молекул H₂O понижает твёрдость. Например, для изоструктурных минералов гематита Fe₂O₃ ($r_{\text{Fe}} = 0,78 \text{ \AA}$) и корунда Al₂O₃ ($r_{\text{Al}} = 0,57 \text{ \AA}$) значения твёрдости соответственно равны 5-6 и 9, но твёрдость гиббсита Al(OH)₃ в структуре которого замена трех атомов O²⁻ на 3(OH)⁻-группы сопровождается компенсационной заменой 2Fe³⁺ на Al³⁺, существенно понижена - до 3 по сравнению с 9 корунда.

Поскольку грани разных простых форм кристаллов часто обладают различной ретикулярной плотностью, они могут различаться по своей твёрдости. Например, для граней топаза твёрдость 7,5 соответствует граням базового пинакоида, а твёрдость 8 – граням призмы. Наибольшей твёрдостью в структуре алмаза обладают грани октаэдра (111), имеющие большую ретикулярную плотность по сравнению с гранями куба (100). Даже в пределах одной и той же грани твёрдость может изменяться весьма существенно, что зависит от расстояний между атомами в том или ином направлении. Эта особенность учитывается ювелирами при обработке драгоценных камней. Так, для грани (100) алмаза наиболее выгодными направлениями для шлифовки оказываются [010] и [001] по сравнению с направлениями [011] или [011].

Наиболее резко выражена анизотропия твёрдости у триклинных кристаллов дистена (=кианита) Al₂SiO₅. Так, для грани (010) в направлении [001] твёрдость равна 6, перпендикулярно [001] - 7.

Если значения твёрдости по разным направлениям на грани кристалла показать в виде векторов в определенном масштабе, то, соединив их концы, получим так называемую розетку твёрдости, симметрия которой будет отражать симметрию данной грани. Например, симметрия розеток твёрдости на грани куба - 4тг и на грани октаэдра - 3т

Механические деформации

Прочность кристалла определяется его способностью реагировать на удар, раздавливание, растягивание, сжатие, разрезание и т. д. При воздействии на кристалл внешней растягивающей нагрузки расстояние между атомами увеличивается и их равновесное положение в кристалле нарушается. Это приводит к нарушению равенства сил притяжения и от-

талкивания, характерного для равновесного состояния атомов в кристаллической структуре, и возникновению внутренних сил, стремящихся вернуть атомы в первоначальное равновесное положение. Величина этих сил, рассчитанная на единицу площади поперечного сечения кристалла, называется напряжением.

Упругие деформации. При малых смещениях атомов деформация является обратимой и полностью снимается при снятии нагрузки. Такую деформацию называют упругой деформацией. А напряжение, которое выдерживает образец, не давая еще остаточной деформации после снятия нагрузки, называется пределом упругости.

При непрерывном увеличении внешней нагрузки непрерывно растут внутренние напряжения и деформация. По достижении некоторого предела, характерного для каждого материала, наблюдается либо разрушение кристалла (в этом случае материал является хрупким), либо возникновение пластической деформации (остаточной деформации), не исчезающей после снятия внешней нагрузки.

Напряжение, при котором начинается заметное течение тела, называется пределом текучести.

Для характеристики упругости используется коэффициент упругости (коэффициент линейного сжатия или растяжения) $k = l/P$, т. е. изменение длины кристалла (l) под воздействием определенного давления (P). Часто используется величина, обратная коэффициенту упругости, — модуль Юнга:

$$E = 1/k.$$

Если отложить от какой-либо точки внутри кристалла величины коэффициентов растяжения (или сжатия) в виде векторов и соединить их концы, то полученная поверхность, часто весьма сложной формы, — поверхность коэффициентов растяжения (сжатия) — укажет на возникшие в кристалле деформации. Симметрия такой поверхности будет характеризовать симметрию данного физического свойства, описываемого тензором четвертого ранга и будет связана с симметрией кристалла: либо выше его симметрии, либо равна (принцип Нейманна). Для аморфных тел поверхность коэффициентов растяжения (или сжатия) имеет форму шара.

Особенно велика упругость у кристаллов алмаза. Поэтому мельчайшие кристаллики алмаза легко потерять, так как они «отпрыгивают» от металлических предметов, дерева, бумаги.

Описывается свойство упругости тензором четвертого ранга.

Пластические деформации. При деформациях, превышающих, как правило, десятые доли процента, после снятия нагрузки кристалл не возвращается в исходное состояние. Такая пластическая деформация наблюдается у разных веществ при различных нагрузках. При этом степень деформации до разрушения кристалла может изменяться в широких пределах - от нескольких единиц до сотен процентов. Кристаллы, у которых такие деформации очень малы, называются хрупкими. В результате пластической деформации одна часть структуры смещается относительно другой параллельно определенным атомным сеткам без разрыва. Если ориен-

тация смещенных частей кристалла сохраняется, то такая деформация называется скольжением. В противном случае, т. е. при изменении взаимной ориентации соседних блоков, могут образоваться двойники смещения.

Способность кристалла к пластической деформации определяется прежде всего характером сил химической связи между его структурными элементами.

Ковалентная связь, обладающая строгой направленностью, резко ослабляется уже при незначительных смещениях атомов относительно друг друга. При сдвиге эта связь разрушается раньше, чем атомы успевают установить ее с другими своими соседями. Поэтому кристаллы с ковалентным типом связи (например, Sb, Bi, As, Se и др.) не проявляют способности к пластической деформации.

Металлическая связь, не имеющая направленного характера, наоборот, меняется очень слабо при тангенциальных смещениях атомов относительно друг друга. Поэтому возможны весьма значительные смещения (на тысячи атомных расстояний) одних частей структуры относительно других. Это определяет высокую степень пластичности металлов. Характерная для многих металлов ковкость — не что иное, как проявление пластической деформации. Причем скольжение легче всего происходит в направлениях, параллельных слоям плотнейших упаковок структур металлов. Наиболее ковкими являются те металлы, структуры которых построены по закону кубической плотнейшей упаковки, имеющей четыре направления плотноупакованных слоев. Менее ковкие металлы с гексагональной плотнейшей упаковкой — с одним направлением плотнейших слоев. Случай скольжения неплотных слоев наименее благоприятен. Так, среди полиморфных модификаций железа α -Fe и γ -Fe ковкостью почти не обладают (α -решетка Браве), тогда как γ -Fe (с кубической плотнейшей упаковкой) — ковкий металл, так же как Si, Pt, Au, Ag и др.

Ионная связь занимает промежуточное положение между металлической и ковалентной. Она не столь направлена, как ковалентная, но и не столь гибка, как металлическая. Типичные ионные кристаллы NaCl, CaF₂, CaTe и др. такие же хрупкие, как кристаллы с ковалентной связью. Но в то же время они обладают достаточно высокой пластичностью. Скольжение в них протекает по определенным кристаллографическим направлениям. Это объясняется тем, что в структуре кристалла (например, кристалла NaCl) можно выделить сетки (110), образованные либо одними ионами Na⁺, либо ионами Cl⁻. При пластической деформации одна плоская сетка передвигается относительно соседней таким образом, что ионы Na⁺ скользят вдоль ионов Cl⁻. Разноименность зарядов ионов в соседних сетках препятствует разрыву, и они остаются параллельными своему исходному положению. Скольжение вдоль этих плоскостей (слоев) протекает при минимальном нарушении в расположении атомов и является поэтому наиболее легким. Скольжение отдельных блоков структуры кристаллов галита NaCl под действием приложенного напряжения (P) происходит по плоскости, которую называют плоскостью скольжения.

Изучение пластических деформаций кристаллов имеет большое зна-

чение для понимания различных геологических процессов. В частности, одной из причин течения ледников можно считать деформации скольжения в гексагональных кристаллах льда, происходящие параллельно базопинакоидальным атомным сеткам под действием давления вышележащих ледяных толщ; аналогично может быть объяснено перетекание больших масс каменной соли в земной коре.

Изучение ориентации плоскостей скольжения в деформированных кристаллах горных пород может дать сведения о палеонапряжениях данного участка земной коры.

В процессе деформирования твердых тел их внутренняя энергия возрастает. По существу, это энергия остаточных напряжений, возникающих в упруго напряженных участках кристаллической структуры. Повышение внутренней энергии приводит к возникновению и развитию в кристалле процессов, стремящихся вернуть его в равновесное состояние, таких, например, как рассасывание внутренних напряжений вследствие перемещения атомов искаженных областей структуры в свои равновесные положения. Этот процесс протекает без видимого изменения структуры и называется «отдых». С другой стороны, снятие напряжения сопровождается интенсивно развивающимся процессом рекристаллизации, когда в кристалле возникают и растут новые кристаллы, свободные от внутренних напряжений. Центры этих кристаллов зарождаются в наиболее искаженных областях структуры. В результате этого процесса монокристалл переходит в поликристаллическое состояние. Скрытая энергия при этом выделяется в виде тепла.

Тепловые свойства кристаллов

Если теплоемкость — это скалярное свойство, не зависящее от направления, то теплопроводность — свойство, изменяющееся по закону эллипсоида, — описывается тензором второго ранга.

Теплопроводность — явление переноса тепла, зависящее от симметрии кристалла, легко иллюстрируется простым опытом, предложенным Г. Сенармоном. Если прикоснуться нагретой иглой к грани кристалла, предварительно покрытой тонким слоем воска, то форма образовавшейся фигуры плавления укажет на симметрию этой грани. Разновидность этого метода была предложена в свое время В. К. Рентгеном. Подышав на кристалл, увидим, что на поверхности его граней образуется тонкая пленка влаги. Если после этого прикоснуться к грани разогретой проволокой, то вокруг точки прикосновения возникнет сухая область, которая становится видимой после опыления поверхности порошком ликоподия. На любой грани (любом сечении) кубического кристалла фигурой плавления окажется круг, так же как и на главных сечениях, перпендикулярных главному особому направлению кристаллов средней категории. Фигуры плавления на всех остальных гранях и сечениях кристаллов средней категории будут иметь эллипсоидальную форму. В кристаллах низшей категории форму круга будут иметь фигуры плавления в сечениях, перпендикулярных лишь двум направлениям.

Приведенные выше опыты позволяют представить объемные поверх-

ности, характеризующие значения теплопроводности в разных направлениях внутри кристаллов. Так, если мысленно поместить точечный источник тепла внутрь кристалла и по разным направлениям отложить в виде векторов значения теплопроводности, то концы векторов образуют замкнутые изотермические поверхности в форме сферы для кубических кристаллов, эллипсоида вращения для кристаллов средней категории и трехосного эллипсоида — для кристаллов низшей категории. На основании этого можно сделать вывод об изотропности кубических кристаллов (как и аморфных тел) в отношении этого физического свойства и анизотропности кристаллов средней и низшей категорий.

Рекордной теплопроводностью, в пять-шесть раз превышающей теплопроводность меди, обладают кристаллы алмаза. Благодаря этому свойству кристаллы алмаза широко используются в приборостроении в качестве теплоотводов.

Анизотропия теплопроводности тесно связана со структурой кристаллических веществ. Так, наиболее плотным атомным сеткам и рядам соответствуют большие значения теплопроводности. Поэтому понятна разница в величинах теплопроводности в слоистых и цепочечных кристаллах в разных направлениях. Например, в структуре графита теплопроводность в плоскости атомной сетки в несколько раз превышает теплопроводность в перпендикулярном слоем направлении, тогда как для ленточных силикатов (например, амфиболов) большая теплопроводность соответствует направлению вытянутости Si-O-лент вдоль оси c структуры кристаллов.

Теплопроводность зависит также от степени совершенства кристаллов. Так, у более дефектных природных кристаллов она заметно ниже, чем у синтетических. Кроме того, вещества в аморфном состоянии обладают более низкой теплопроводностью, чем того же состава кристаллы. Например, теплопроводность стекла значительно ниже теплопроводности кристаллов кварца. Это объясняет использование кварцевого стекла для изготовления химической посуды, не растрескивающейся при быстром нагревании или охлаждении.

Расширение кристаллических тел при нагревании связано с особенностями теплопроводности. Если изотропные кристаллы кубической сингонии расширяются во всех направлениях равномерно, то кристаллы низшей и средней сингоний — неравномерно, что приводит к изменению углов между соответствующими гранями.

Оптические свойства кристаллов

Каждое вещество с определенной кристаллической структурой характеризуется своеобразными оптическими свойствами, знание которых часто может иметь решающее значение при диагностике. Оптические свойства тесно связаны с кристаллической структурой твердого тела, его симметрией. Рассмотрим наиболее характерные оптические свойства кристаллов.

В отношении оптических свойств все вещества можно разделить на оптически изотропные и анизотропные. К первым относятся аморфные те-

ла и кристаллы высшей категории, ко вторым — остальные кристаллы. В оптически изотропных средах световая волна, представляющая собой совокупность поперечных гармонических колебаний электромагнитной природы, распространяется с одинаковой скоростью во всех направлениях. В оптически анизотропных средах скорости распространения волны в разных направлениях могут быть различны.

Электромагнитные колебания естественного света происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения луча. Поскольку скорость распространения света обратно пропорциональна плотности среды, то при переходе света из одной среды в другую происходит преломление лучей, т. е. их отклонение от первоначального направления. Это явление связано с различными скоростями световых лучей в различных средах и характеризуется величиной, называемой показателем преломления, показывающей, во сколько раз скорость света в одной среде отличается от скорости света в другой. Если одна из сред — вакуум, то такая величина называется абсолютным показателем преломления. Абсолютный показатель преломления всегда > 1 , поскольку среда

скорость света в пустоте наибольшая. Показатели преломления большинства твердых тел лежат в пределах от 1,4 до 2. Например, для алмаза $n = 2,42$, для воздуха $n = 1,0003$.

Луч света, идущий перпендикулярно поверхности двух сред, не испытывает преломления. В том случае, если свет из среды с большим показателем преломления попадает в среду с меньшим показателем преломления под углом, превышающим предельный, то наблюдается полное внутреннее отражение. На явлении полного внутреннего отражения основан целый ряд оптических приборов — рефрактометров (приборов для измерения показателей преломления), призмы Николя.

Сверкание — световая игра на гранях бриллианта — с одной стороны, обязано высокому показателю преломления алмаза, с другой — специальной огранке кристалла, способствующей неоднократно полному внутреннему отражению падающего на него луча, при котором бриллиант способен отражать практически все падающие на него лучи света. А поскольку показатели преломления для лучей разной длины в средах различны, то благодаря дисперсии наблюдается вся цветовая гамма.

Электропроводность

Электропроводность описывается тензором второго ранга. Все вещества можно разделить на проводящие электрический ток (проводники), полупроводники и диэлектрики (изоляторы).

В электропроводящих кристаллах, помещенных в электрическое поле, возникает электрический ток — перенос электрического заряда. Причем в большинстве случаев связь между плотностью тока (j) и напряженностью электрического поля (E) линейная, подчиняется закону Ома (см. параграф 7.2) и в однородных изотропных электропроводящих кристаллах выражается простой пропорциональностью: $j = \sigma \cdot E$, где σ — коэффициент электропроводности (электропроводимости), зависящий от рода и температуры проводника.

В монокристаллах направления векторов j и E в общем случае не совпадают. Коэффициент α зависит от направления тока в кристалле, и характеристической поверхностью (индикатрисой) для него будет эллипсоид, форма и ориентация которого соответствуют симметрии кристалла: для кристаллов низшей категории индикатрисой электропроводности будет трехосный эллипсоид, т. е. кристаллы имеют три главных коэффициента электропроводности; для кристаллов средней категории — эллипсоид вращения с двумя главными коэффициентами электропроводности; для кристаллов высшей категории — сфера с одним главным коэффициентом электропроводности. Таким образом, в отношении электропроводности кристалл выступает как непрерывная однородная среда.

Кристаллы-диэлектрики, при обычных условиях не проводящие ток (ионные и ковалентные кристаллы), можно наэлектризовать путем различных воздействий на них: трением, давлением, облучением, нагреванием и т. д. С практической точки зрения наибольший интерес для кристаллографической диагностики и технического применения представляет электризация при изменении температуры и механических деформаций.

Пироэлектрический эффект

Изменение спонтанной поляризации с колебанием температуры приводит к специфическому для анизотропных кристаллов явлению — пироэлектрическому эффекту — возникновению разноименных зарядов на противоположных концах кристалла. Это явление, открытое случайно на кристаллах турмалина, попавшего в горячую золу и притянувшего частицы золы лишь одним своим концом, было наглядно и весьма эффективно подтверждено опытом Кундта в 1883 г., который опылял нагретый кристалл турмалина (с симметрией $3m$) смесью порошка серы и сурика (Pb_3O_4), пропущенной через шелковое сито. По-разному наэлектризованные при трении о шелк частицы этих минералов притягиваются к различным концам кристалла турмалина (отвечающим концам оси 3-го порядка), подтверждая этим появление противоположных зарядов на концах нагретого кристалла. Знание знаков заряда порошков — «-» у серы и «+» у сурика позволило установить характер электризации турмалина. При охлаждении такого кристалла знаки зарядов меняются на противоположные. И поскольку скалярное воздействие на кристалл (нагрев, охлаждение) само по себе не обуславливает проявление векторного свойства, то симметрия полярного свойства должна быть заложена в самом кристалле. Поэтому пироэлектрический эффект, как векторное свойство, может возникнуть лишь в диэлектрических кристаллах с единственным полярным направлением — направлением (вектором), противоположные концы которого не могут быть совмещены ни одной операцией данной группы симметрии. Таким образом, пироэлектрический эффект может возникнуть в кристаллах, относящихся к одному из десяти полярных (гемиморфных) классов симметрии: $1, 2, 3, 4, 6, t, tt_2, 3t, 4tt, 6tt$.

Кроме турмалина пироэлектрическим эффектом обладают кристаллы обыкновенного сахара, винной кислоты, кристаллизующиеся в классе 2 моноклинной сингонии. Пироэлектрические кристаллы широко использу-

ются для изготовления чувствительных приемников инфракрасного излучения, датчиков ударных волн, измерителей напряжения и изменений температуры с высокой точностью и др.

Пироэлектрические свойства кристаллов тесно связаны с пьезоэлектрическими свойствами, так как проявление пироэффекта сопровождается увеличением объема кристаллов при нагревании, т. е. упругими деформациями.

Пьезоэлектрический эффект

Другое интересное явление связано с электризацией диэлектриков — возникновением электрической поляризации под действием механических напряжений. Любопытно также обратное явление — деформация кристалла под действием электрического поля.

Пьезоэлектрический эффект, описываемый тензором третьего ранга, — это совокупность явлений, прямо пропорционально связывающих механические напряжения (растяжения или сжатия), описываемые тензором второго ранга, с электрическим полем (поляризацией) — векторным свойством. Величины возникших зарядов пропорциональны приложенной к кристаллу силе. Знак заряда при этом зависит от типа кристаллической структуры. Поскольку пьезоэлектрический эффект характеризуется полярным вектором и проявляется под воздействием центросимметричного (неполярного) тензора напряжений второго ранга, то это свойство возникает только в кристаллах, лишенных центра инверсии, т. е. имеющих полярные направления и принадлежащих к одному из 20 ацентричных классов симметрии.

Ярким примером проявления пьезоэлектрического свойства являются кристаллы кварца SiO_2 (пространственная группа $P3_2$) с одним неполярным направлением вдоль оси 3-го порядка, в структуре которых множество полярных направлений, три из которых параллельны трем осям 2Т. Вдоль этих осей 2-го порядка и наблюдается пьезоэффект, а сами направления называются электрическими осями. Структура кварца построена из кремнекислородных спиралей, закрученных вокруг осей 3-го порядка. Схематическая проекция одной из спиралей на плоскость (0001) структуры минерала показана. Сжатие такой спирали вдоль одной из полярных осей 2-го порядка приводит к смещению атомов Si и O^{2-} с образованием электрических диполей и появлению разноименных зарядов на поверхностях, перпендикулярных направлению сжатия. Растяжение вдоль этого же направления приводит к смене знаков заряда. Если же кварцевую пластинку, вырезанную перпендикулярно оси 2-го порядка, поместить в переменное электрическое поле, то она начнет вибрировать — то сжиматься, то расширяться (за 1 сек. совершается до 105 колебаний), т. е. играть роль колебательного контура высокого качества. Благодаря этому свойству кварцевые пластины нашли широкое применение в радиоэлектронике в качестве стабилизаторов частот в радиоаппаратуре, для генерации и приема ультразвуковых волн и т. д.

К настоящему времени изучены сотни веществ, кристаллы которых обладают пьезоэлектрическими свойствами. Кроме кварца и турмалина

наиболее распространенными пьезоэлектриками являются кристаллы сегнетовой соли, тертраты калия, сульфата лития.

Магнитные свойства кристаллов

Магнитные свойства — это способность тел взаимодействовать с магнитным полем, т. е. намагничиваться при помещении их в магнитное поле. Мерой намагниченного состояния вещества служит магнитный момент единицы объема, или намагниченность. В зависимости от величины магнитной восприимчивости различают диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные и антиферромагнитные кристаллы.

Магнитные свойства всех веществ зависят не только от особенностей их кристаллической структуры, но и от природы слагающих их атомов (ионов), т.е. магнетизм определяется электронным строением оболочек и ядер, а также орбитальным движением вокруг них электронов (спинами).

На первоначальное вращательное движение электронов вокруг ядра накладывается дополнительное вращательное движение, в результате чего атом получает дополнительный магнитный момент. При этом если все электроны с противоположными спинами в атоме сгруппированы попарно, то магнитные моменты электронов оказываются скомпенсированными и их суммарный магнитный момент будет равен нулю.

При внесении диамагнетика в магнитное поле результирующие магнитных моментов электронов с противоположными спинами будут антипараллельны вектору напряженности магнитного поля, и поэтому диамагнетики будут выталкиваться из магнитного поля. Магнитная восприимчивость таких кристаллов отрицательна и очень мала.

К диамагнетикам относятся благородно-газовые элементы, металлы 5-подгрупп — Cu, Ag, Au, Zn, Cd, большинство ионных кристаллов — NaCl, CaF₂, а также вещества с преобладающей ковалентной связью — Bi, Sb, Ga, графит. В кристаллах со слоистыми структурами магнитная восприимчивость для направлений, лежащих в слое, значительно превышает таковую для перпендикулярных направлений.

Поскольку при заполнении электронных оболочек в атомах электроны стремятся быть неспаренными, существует большое количество веществ, магнитные моменты электронов в атомах которых расположены беспорядочно и при отсутствии внешнего магнитного поля в них не происходит самопроизвольная ориентация магнитных моментов. Суммарный магнитный момент, обусловленный несвязанными попарно и слабо взаимодействующими друг с другом электронами, будет постоянным, положительным или несколько большим, чем у диамагнетиков. Такие атомы называются магнитными, а вещества соответственно — парамагнетиками. Например, это пирит FeS₂, переходные металлы — Pt, Ti, Sc, Pd, Dy и др. При внесении парамагнетика в магнитное поле разориентированные спины приобретают некоторую ориентировку, в результате чего наблюдаются три типа упорядочения некомпенсированных магнитных моментов — три типа явлений: ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

Ферромагнитными свойствами обладают вещества, магнитные моменты атомов (ионов) которых направлены параллельно друг другу, в ре-

зультате чего внешнее магнитное поле может усилиться в миллионы раз. Причем параллельная ориентация магнитных моментов сохраняется после удаления внешнего магнитного поля, т.е. вещества становятся постоянными магнитами. А так как ориентирующему действию магнитного поля препятствует тепловое движение, то с повышением температуры намагниченность уменьшается и исчезает вовсе при определенной температуре (в точке Кюри). Вещества при этом становятся парамагнитными. Название этой группы — ферромагнетики - связано с присутствием в ней элементов группы железа – Fe, Ni, Co.

Если магнитные моменты отдельных атомов антипараллельны и равны, то суммарный магнитный момент атомов равен нулю (с учетом температуры). Такие вещества называются антиферромагнетиками. К ним относятся оксиды переходных металлов — MnO, NiO, CoO, FeO, многие фториды, хлориды, сульфиды, селениды и др.

При неравенстве антипараллельных моментов атомов структуры кристаллов суммарный момент оказывается отличным от нуля и такие структуры обладают спонтанной намагниченностью. Этот некомпенсированный антиферромагнетизм называют ферримагнетизмом. Подобным свойством обладают соединения со структурным типом шпинели - ферриты (например, $\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$, минералы группы граната).

Магнитные свойства минералов широко используются в технике, а также представляют значительный интерес при решении минералогенетических, кристаллохимических и геофизических задач.

Магнитные свойства горных пород определяются содержанием и ориентировкой в них минеральных зерен с различными магнитными характеристиками. Любая горная порода, осадочная или магматическая, в момент своего образования приобретает намагниченность по направлению и по величине магнитного поля Земли данного конкретного времени в данной точке планеты. Однажды приобретенная намагниченность породы при благоприятных условиях сохраняется длительное время. Если вырезать из горной породы ориентированный в пространстве образец и измерить его остаточную намагниченность, то можно установить направление остаточных силовых магнитных линий той эпохи, в которой сформировалась данная порода, и, как следствие, вычислить положение геомагнитного полюса. Проводя замеры следов магнитного поля в массовом порядке в горных породах различных возрастов и на разных континентах, можно выявить эволюцию магнитного поля Земли, как бы реконструировать его историю.

6.3.Краткое описание лабораторных работ

6.3.1. Перечень рекомендуемых лабораторных работ

Лабораторная работа № 1. *Определение элементов симметрии кристалла. Формула симметрии кристаллических многогранников.*

Лабораторная работа № 2. *Простые формы низшей категории сингоний.*

Лабораторная работа № 3. *Простые формы средней категории сингоний.*

Лабораторная работа № 4. *Простые формы кубической сингонии.*

Лабораторная работа № 5. *Анализ комбинаций простых форм низшей и средней категорий сингоний.*

Лабораторная работа № 6. *Анализ комбинаций простых форм кубической сингонии.*

Лабораторная работа № 7. *Решение кристаллографических задач на сетке Вульфа.*

Лабораторная работа № 8. *Проектирование и графическое вычисление кристаллов. Форстерит.*

Лабораторная работа № 9. *Проектирование и графическое вычисление кристаллов. Кварц.*

6.3.2. Методические указания по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа № 1. *Определение элементов симметрии кристалла. Формула симметрии кристаллических многогранников.*

Цель задания: определение элементов симметрии кристалла, составление формулы симметрии.

Содержание задания: в моделях многогранников выявляется симметрия с помощью вспомогательных геометрических образов (элементов симметрии), подсчитывается их количество и записывается формула симметрии.

Лабораторная работа № 2. *Простые формы низшей категории сингоний.*

Цель задания: изучение простых форм низшей категории.

Содержание задания: определение простых форм низшей категории среди моделей многогранников по ряду признаков.

Лабораторная работа № 3. *Простые формы средней категории сингоний.*

Цель задания: изучение простых форм средней категории.

Содержание задания: определение простых форм средней категории среди моделей многогранников по ряду признаков.

Лабораторная работа № 4. *Простые формы кубической сингонии.*

Цель задания: изучение простых форм средней категории.

Содержание задания: определение простых форм высшей категории среди моделей многогранников по ряду признаков.

Лабораторная работа № 5. *Анализ комбинаций простых форм низшей и средней категорий сингоний.*

Цель задания: распознавание простых форм низшей и средней категорий в комбинациях.

Содержание задания: определение количества и названия простых форм в комбинациях.

Лабораторная работа № 6. *Анализ комбинаций простых форм кубической сингонии.*

Цель задания: распознавание простых форм высшей категорий в комбинациях.

Содержание задания: определение количества и названия простых

форм в комбинациях.

Лабораторная работа № 7. *Решение кристаллографических задач на сетке Вульфа.*

Цель задания: изучение методики решения кристаллографических задач с помощью сетки Вульфа.

Содержание задания: построение стереографических проекций полюсов граней, определение углов и сферических координат.

Лабораторная работа № 8. *Проектирование и графическое вычисление кристаллов. Форстерит.*

Цель задания: диагностика кристалла по данным гониометрических измерений.

Содержание задания: на основе построения стереографической проекции кристалла с помощью сетки Вульфа, проведение графического вычисления и диагностики кристалла.

Лабораторная работа № 9. *Проектирование и графическое вычисление кристаллов. Кварц.*

Цель задания: диагностика кристалла по данным гониометрических измерений.

Содержание задания: на основе построения стереографической проекции кристалла с помощью сетки Вульфа, проведение графического вычисления и диагностики кристалла.

На лабораторных работах изучаются модели кристаллических многогранников, находящиеся в аудитории Е-309, для которых составляются формулы симметрии, проводится разбор комбинаций простых форм и дается полное описание моделей под контролем преподавателя.

При изучении симметрии моделей описание дается согласно следующему порядку:

1. Сочетание элементов симметрии (формула симметрии).
2. Число единичных направлений и их расположение.
3. Название вида симметрии.
4. Сингония.
5. Категория.

При изучении комбинаций простых форм описание дается согласно следующему порядку:

1. Вид симметрии.
2. Число единичных направлений и их расположение.
3. Название вида симметрии, сингония, категория.
4. Простая форма или комбинация (нужное подчеркнуть).
5. Число простых форм в комбинации.
6. Название простых форм.

При проектировании кристаллов описание модели дается согласно следующему порядку:

1. По модели или по рисункам определяется симметрия кристалла.
2. Определяется комбинацией каких простых форм составлен

кристалл.

3. Выбирают установку кристалла – расположение элементов симметрии относительно осей координат.
4. Выбирают единичную грань.
5. Проектируют положения полюсов граней кристалла, используя данные гониометрических измерений.
6. После построения проекции кристалла проводят графическое вычисление констант и символов его граней.

6.4. Краткое описание практических занятий

Практические занятия не предусмотрены

6.4.1. Перечень практических занятий (наименования, темы)

Методические указания по выполнению заданий на практических занятиях

6.5. Краткое описание видов самостоятельной работы

6.5.1. Общий перечень видов самостоятельной работы

1. Проектирование сочетаний элементов симметрии.
2. Графический вывод простых форм различных видов симметрии.
3. Проектирование и графическое вычисление минерала по вариантам

6.5.2. Методические рекомендации для выполнения для каждого задания самостоятельной работы

Самостоятельная работа выполняется студентом во вне аудиторное время, по вариантам заданий из Методических указаний к лабораторным и самостоятельным работам.

Отчет представляется в виде пояснительной записки, в которой содержатся необходимые сведения о ходе работы, и графического приложения (на отдельном листе формата А4), которое выполняется карандашом или роллером.

1. Проектирование сочетаний элементов симметрии.
Заданное формулой сочетание элементов симметрии необходимо изобразить в проекции на плоскость, в соответствии с таблицей 1 "Методических указаний...".
2. Графический вывод простых форм различных видов симметрии.
Для двух видов симметрии осуществляется графический вывод возможных видов симметрии, в соответствии с рекомендациями, данными в "Методических указаниях...".
3. Проектирование и графическое вычисление минерала
Для выбранного варианта самостоятельного задания осуществляется проектирование кристалла с помощью сетки Вульфа, в соответствии с рекомендациями, данными в "Методических указаниях...".

6.5.3. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Кристаллография: Метод. указания к лабораторным и самостоятельным работам. Составитель Т. Б. Колотилина. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 66 с.

7. Применяемые образовательные технологии

При реализации данной программы применяются образовательные технологии, описанные в табл. 2.

Таблица 2 - Применяемые образовательные технологии

Технологии	Виды занятий					
	Лекции	Лабр. р.	Практ./Сем.	СРС	Курсовой проект	
Слайд - материалы	+	+		+		
Виртуальное моделирование	+	+				
Работа в команде						
Игра						
Проблемное обучение						
Проектный метод						
Исследовательский метод						
Тренинг		+				
Другие методы						
Применение метода указывать знаком +						

При применении других образовательных технологий ниже дать их краткую характеристику.

7. Контрольно-измерительные материалы и оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

7.1. Краткое описание контрольных мероприятий, применяемых контрольно-измерительных технологий и средств.

Качество подготовки специалиста оценивается рейтинговой системой.

7.2. Описание критериев оценки уровня освоения учебной программы.

Суммарный балл по итогам семестра 60-100. Семестровый балл 20-40. Самостоятельная работа –30 баллов.

Зачетный балл 15-30.

7.3. Контрольно измерительные материалы для итоговой аттестации по дисциплине.

Контрольные вопросы и тестовые задания.

Вопросы к зачёту:

1. Кристалл и кристаллическое вещество: определение и основные свойства
2. Пространственная решетка и ее параметры.

3. Закон рациональных отношений параметров.
4. Структурные типы $NaCl$ и алмаза.
5. Типы плотнейших упаковок шаров.
6. Понятие о виде симметрии, сингонии и категории
7. Единичные и симметрично-равные направления, ориентировка единичного направления относительно элементов симметрии.
8. 32 класса симметрии кристаллов, принципы вывода.
9. Символы граней, понятие о единичной грани
10. Кристаллографические оси координат, установка кристаллов различных сингоний
11. Понятие о простой форме кристалла и о комбинациях простых форм, частные и общие простые формы
12. Простые формы низшей категории и их обобщающие символы
13. Простые формы средней категории и их обобщающие символы
14. Простые формы высшей категории и их обобщающие символы
15. Закон постоянства углов и его значение
16. Симметрия и элементы симметрии кристаллов
17. Типы ячеек (решеток) Браве
18. Теоремы о сочетании элементов симметрии.
19. Координационное число и координационные многогранники
20. Физические и механические свойства, связанные со структурой кристалла

Тестовые задания:

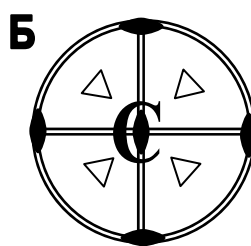
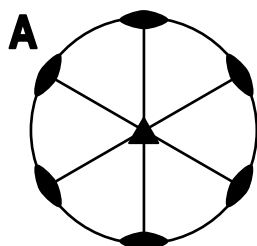
ВОПРОС № 1. Какая категория характеризуется только одним единичным направлением

Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа

Варианты ответов:

1. низшая
2. **средняя**
3. высшая
4. ни одна из перечисленных

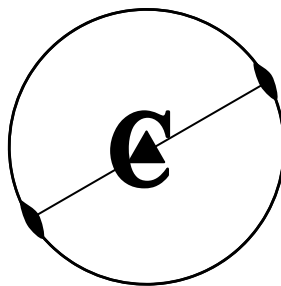
ВОПРОС № 2. На каком из рисунков изображен вид симметрии соответствующей средней категории



Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа

Варианты ответов: 1. А 2. Б 3. ни на одном

ВОПРОС № 3. Дорисовать недостающие элементы симметрии на основании теорем о сочетании элементов симметрии.



ВОПРОС № 4. Какие простые формы не возможны в виде симметрии L_4

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. моноэдр
2. **пинакоид**
3. тетрагональная призма
4. **ромбическая пирамида**
5. **тетрагональный скаленоедр**
6. тетрагональная пирамида
7. **тетрагональный тетраэдр**

ВОПРОС № 5. Какими свойствами обладает кристаллическое вещество?

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. **способность к самоограничению**
2. **однородность**
3. асимметричность
4. **закономерное внутреннее строение**
5. непостоянная температура плавления и кристаллизации

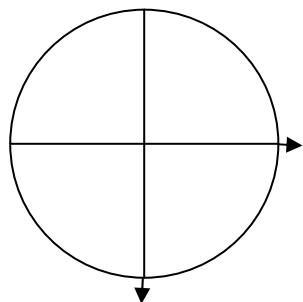
ВОПРОС № 6. Какие из перечисленных простых кристаллографических форм не встречаются в низшей категории

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. моноэдр
2. диэдр
3. **ромбоэдр**
4. **октаэдр**
5. пинакоид
6. **тетрагональная пирамида**
7. ромбическая призма

ВОПРОС № 7. Нарисовать проекцию граней пинакоида, если его обобщающий символ $\{001\}$



ВОПРОС № 8. Как называется тип ячейки Браве, в которой частицы расположены в вершинах и центрах всех граней

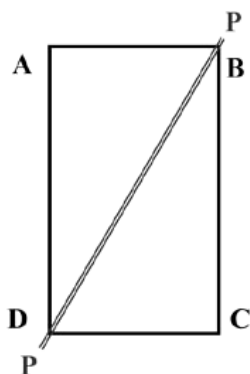
Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа

Варианты ответов:

1. примитивная
2. **гранецентрированная**
3. объемноцентрированная
4. базоцентрированная
5. такой ячейки не существует

ВОПРОС № 9. Является ли плоскость PP на рисунке - плоскостью симметрии фигуры ABCD?

Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа



Варианты ответов:

1. Да
2. Нет
3. Не знаю

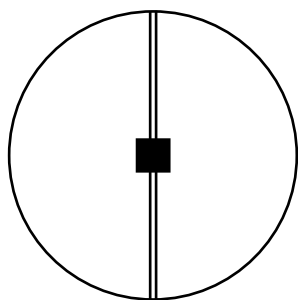
ВОПРОС № 10. Какими свойствами обладает кристаллическое вещество?

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. неоднородность
2. анизотропия
3. симметричность
4. закономерное внутреннее строение
5. постоянная температура плавления и кристаллизации

ВОПРОС № 11. Дорисовать недостающие элементы симметрии на основании теорем о сочетании элементов симметрии.



ВОПРОС № 12. Какие простые формы возможны в виде симметрии L_2

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. моноэдр
2. пинакоид
3. тригональная призма
4. ромбическая дипирамида
5. диэдр
6. ромбическая призма
7. ромбический тетраэдр

ВОПРОС № 13. В какой категории единичные направления все, множество или их несколько

Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа

Варианты ответов:

1. низшая
2. средняя
3. высшая
4. ни в одной из перечисленных

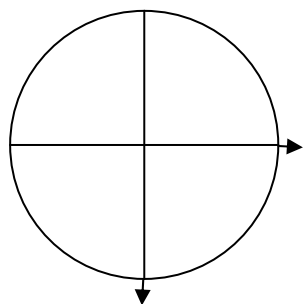
ВОПРОС № 14. Выберите, какие простые кристаллографические формы встречаются в низшей категории

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. моноэдр
2. тетрагональная пирамида
3. ромбическая дипирамида
4. октаэдр
5. тригональный скаленоэдр
6. ромбический тетраэдр
7. тригон-гексатетраэдр

ВОПРОС № 15. Нарисовать проекцию тетрагональной призмы, если её обобщающий символ $\{110\}$.



ВОПРОС № 16. Выберите, какие простые кристаллографические формы встречаются в средней категории

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. ромбододекаэдр
2. пинакоид
3. тригональный трапецоэдр

4. тригональная призма
5. диэдр осевой
6. ромбоэдр
7. тригон-тритетраэдр
8. ромбическая призма

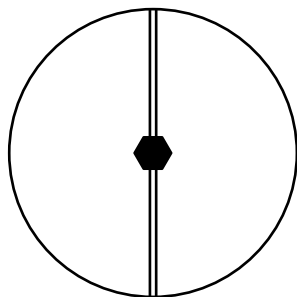
ВОПРОС № 17. Как называется простая кристаллографическая форма средней категории, грани которой параллельны оси высшего порядка

Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа

Варианты ответов:

1. пинакоид
2. пирамида
3. ромбоэдр
4. призма
5. дипирамида
6. трапецоэдр

ВОПРОС № 18. Дорисовать недостающие элементы симметрии на основании теорем о сочетании элементов симметрии.



ВОПРОС № 19. Какие простые формы не возможны в виде симметрии L_3

Тип вопроса: Выбор возможных правильных ответов

Варианты ответов:

1. моноэдр
2. пинакоид
3. гексагональная призма
4. тригональная пирамида
5. тригональный трапецоэдр
6. ромбоэдр
7. тригональная призма

ВОПРОС № 20. Сколько единичных направлений характерно для тригональной сингонии

Тип вопроса: Выбор единственно правильного ответа

Варианты ответов:

1. одно
2. все
3. множество
4. три
5. ни одного

8. Рекомендуемое информационное обеспечение дисциплины

8.1. Основная учебная литература

1. Егоров-Тисменко Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия. М.: КДУ. 2010. – 592 с.
2. Урусов В.С., Ерёмин Н.Н. Кристаллохимия. Краткий курс. М.: МГУ, 2010. – 256 с.

8.2. Дополнительная учебная и справочная литература.

1. Егоров-Тисменко Ю. К. Руководство к практическим занятиям по кристаллографии: Учебное пособие. – М.: МГУ, 2010. 208с.

8.3. Электронные образовательные ресурсы:

Не предусмотрено

8.3.1. Ресурсы ИрГТУ, доступные в библиотеке университета или в локальной сети университета .

Ресурсы сети Интернет

9. Рекомендуемые специализированные программные средства

1. Программа создания анимированных моделей простых кристаллических форм d3dCrystall (свободно распространяемая).

10. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Преподавание дисциплины осуществляется в специализированной аудитории Е-309, которая обеспечена необходимыми наглядными пособиями (плакаты), наборами моделей кристаллических многогранников, моделями кристаллических структур минералов и типов решеток Браве.

Приложение к программе (обязательное) – календарно-тематический план

Программа составлена в соответствии с образовательным стандартом высшего профессионального образования (ГОС-2).

Программу составил:

ФИО, должность, ученая степень и ученое звание разработчика

Колотилина Т.Б., доцент, к.г.-м.н., доцент

“13” мая 2011 г.

(подпись)

Программа включает результаты научных исследований:

ФИО, должность, ученая степень и ученое звание

“ ” 20__ г.

(подпись)

Программа составлена при участии:

ФИО, место работы, должность, ученая степень и ученое звание

“ ” 20__ г.

Программа согласована

с сотрудниками ООО «Восточно-Саянская никелевая компания»

Должность работника, ответственного за согласование программы

Генеральный директор

/П.А. Мехоношин/ “13” мая 2011 г.

(подпись)

Программа согласована

с кафедрами: «Геммологии»

Зав. кафедрой

/Лобацкая Р.М. / “ ” 20__ г.

(подпись)

Программа одобрена на заседании кафедры

Геологии и геохимии полезных ископаемых

Протокол № 8 от “20” мая 2011 г.

Зав. кафедрой /Семинский Ж.В./ “20” мая 2011 г.

(подпись)

Руководитель ООП /Вераззин В.И./ “ ” 20__ г.

Программа одобрена на заседании Методической комиссии

Института недропользования

Протокол № 5 от “20” 05 2011 г.

/ФИО/ “ ” 20__ г.