



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

«СОГЛАСОВАНО»  
Руководитель ОП  
Геология

Зиньков А.В.

(подпись) (Ф.И.О. рук. ОП)  
«29» июня 2016 г.

«УТВЕРЖДАЮ»  
Заведующий кафедрой  
Геологии, геофизики и геоэкологии  
(название кафедры)

Зиньков А.В.

(подпись) (Ф.И.О. зав. каф.)  
«29» июня 2016 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Кристаллография

**Направление подготовки 05.03.01 Геология**

Профиль «Геология»

**Форма подготовки очная**

курс 2 семестр 3  
лекции 18 час.  
практические занятия 54 час.  
лабораторные работы          час.  
в том числе с использованием МАО лек.          /пр. 36 /лаб.          час.  
всего часов аудиторной нагрузки 72 час.  
в том числе с использованием МАО 36 час.  
самостоятельная работа 72 час.  
в том числе на подготовку к экзамену 36 час.  
контрольные работы (количество)  
курсовая работа / курсовой проект          семестр  
зачет          семестр  
экзамен 3 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ, утвержденного приказом ректора от 4.04.2016 №12-13-592.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры геологии, геофизики и геоэкологии протокол № 14 от «29» 06 2016 г.

Заведующий кафедрой геологии, геофизики и геоэкологии  
проф., к.г.-м.н. А.В. Зиньков  
Составитель (ли): к.г.-м.н., доцент Кемкина Р.А.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ А.В. Зиньков \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## ABSTRACT

**Bachelor's/Specialist's/Master's degree in 05.03.01 Geology**

**Study profile/ Specialization/ Master's Program "Title" - Geology**

**Course title:** *Crystallography*

*The discipline «Crystallography» is included into the basic part of professional cycle (Block 1). The credits of discipline makes 4 test units or 144 hours.*

**Instructor:** *Kemkina Raisa Anatol'evna*

**At the beginning of the course a student should be able to:**

*GC-8. The ability to use the basics of philosophical knowledge for the formation of ideological position;*

*GPC-2. Own ideas about the modern scientific picture of the world based on the knowledge of the basic concepts of philosophy, basic laws and methods of natural Sciences;*

*SPC-2. The ability to get geological information by oneself and use skills of the field and laboratory geological researches for scientific work (in accordance with the orientation (profile) of education).*

**Learning outcomes:** *specific professional competences (SPC-1, SPC-4).*

*SPC-1: The ability to use the knowledge in the field of Geology, Geophysics, Geochemistry, hydrogeology and engineering Geology, Geology and Geochemistry of combustible minerals, environmental Geology for the solution of research tasks (in accordance with the direction (profile) training.*

*SPC-4. The willingness to apply in the practice activity a basic professional knowledge and skills of the geological, geophysical, geochemical, hydrogeological and ecological-geological field works in the solution of production tasks (in accordance with the direction (profile) bachelor program).*

**Course description:** *The course "Crystallography" covers a range of problems related with the study of chemical composition and crystalline structure of the minerals. The crystalline materials are the "primary bricks" constituting the Earth lithosphere. The knowledge of laws of nature concerning formation and destruction of these "primary bricks" is of practical importance. This knowledge will enable students to more confidently navigate in the questions of genesis of minerals and their structure.*

**Main course literature:**

1. Bondarev V.P. *Osnovy mineralogii i kristallografi s elementami petrografi. Uchebnoe posobie. [The bases of mineralogy and crystallography with petrography elements. The manual for high schools]. Moscow: Forum: INFRA-M, 2015, 280 p. (rus). URL: <http://znanium.com/bookread2.php?book=497868>*

2. Kemkina R.A. *Mineralogiya. Uchebno-metodicheskii kompleks. [Mineralogy. Educational methodical complex]. Vladivostok. FEFU, 2008, 310 p. (rus). CHAMO online public access catalog: URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:383314&theme=FEFU>>. 64 instances.*

3. Milyutin A.G. *Geologiya: uchebnik dlya bakalavrov [Milyutin A.G. Geology: a textbook for bachelors]. Moscow: Publisher Yurait, 2014, 543 p. (rus). CHAMO*

online public access catalog, URL:  
<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:710770&theme=FEFU> 5 instances.

4. Bragina V.I. *Cristallographiya, mineralogiya i obogaschenie poleznykh iskopaemykh. Uchebnoe posobie.* [Crystallography, mineralogy and improvement of minerals. The manual]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012, 152 p. (rus). URL: <http://znanium.com/bookread.php?book=492236>

5. Anikina V.I. *Ocnovy kristallographii i defekty kristallicheskogo stroeniya. Praktikum.* [The bases of crystallography and defects of crystal structure. The practical work]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011, 148 p. (rus). URL: <http://znanium.com/bookread2.php?book=441367>

6. Dobrovolsky V.V. *Geologiya, mineralogiya, dinamicheskaya geologiya, petrographiya. Uchebnik dlya vuzov.* [Geology, mineralogy, dynamic geology, petrography. The textbook for High Schools]. Moscow: Vldos, 2004, 319 c. (rus). URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:6594&theme=FEFU>.

**Form of final control:** exam and pass-fail exam.

## **Аннотация дисциплины «Кристаллография»**

Дисциплина «Кристаллография» разработана для студентов 2 курса, обучающихся по направлению подготовки 05.03.01 Геология, профиль «Геология».

Дисциплина «Кристаллография» входит в базовую часть блока 1 Дисциплины (модули) учебного плана. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 часа. Учебным планом предусмотрены лекционные занятия (18 часов), практические занятия (54 часа, включая 36 часов с использованием МАО) и самостоятельная работа (72 часа, в том числе 36 часов на подготовку к экзамену). Дисциплина реализуется на 2 курсе в 3-м семестре.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с изучением химического состава и кристаллического строения минералов. Кристаллическое вещество играет первостепенную роль в строении земного шара. Познание законов природы, относящихся к возникновению и разрушению этих веществ, имеет важнейшее практическое значение. Все эти знания дадут возможность студентам более уверенно ориентироваться в вопросах условий образования и генезиса минералов.

Дисциплина «Кристаллография» логически и содержательно связана с такими курсами, как геохимия, петрография, учение о месторождениях полезных ископаемых, методы изучения вещества, обогащение полезных ископаемых.

**Целью** изучения дисциплины является познание студентами теоретических и методических основ кристаллохимии и кристаллографии.

### **Задачи:**

- обучение студентов практическим навыкам работы с кристаллами, овладение приемами грамотного описания внешней формы и внутреннего (атомного) строения кристаллов, необходимых для правильной интерпретации результатов самостоятельной научной работы и понимания специальной литературы;

- теоретическое и практическое освоение основных понятий и выработка у будущего специалиста комплекса навыков и знаний для использования основных методов анализа, как в области исследования структуры, так и диагностики минералов.

Для успешного изучения дисциплины «Кристаллография» у обучающихся должны быть частично сформированы следующие предварительные компетенции, полученные при изучении курса «Общая геология»:

ПК-2, способность самостоятельно получать геологическую информацию, использовать в научно-исследовательской деятельности навыки полевых и лабораторных геологических исследований (в соответствии с направленностью (профилем) подготовки);

ПК-3, способность в составе научно-исследовательского коллектива участвовать в интерпретации геологической информации, составлении отчетов, рефератов, библиографий по тематике научных исследований, в подготовке публикаций;

ПК-6, готовность в составе научно-производственного коллектива участвовать в составлении карт, схем, разрезов и другой установленной отчетности по утвержденным формам.

В результате освоения дисциплины у студентов частично формируются следующие профессиональные компетенции:

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<b>ПК-1</b> , способность использовать знания в области геологии, геофизики, геохимии, гидрогеологии и инженерной геологии, геологии и геохимии горючих ископаемых, экологической геологии для решения научно-исследовательских задач (в соответствии с направленностью (профилем) подготовки)	Знает	Кристаллографические модели. Порядок и сущность кристаллографических элементов.
	Умеет	Проводить научные исследования в области кристаллографии для выполнения задач минералогии и геологии.
	Владеет	Практическими навыками работы с кристаллами и приемами грамотного описания внешней формы и внутреннего (атомного) строения кристаллов, необходимых для правильной интерпретации результатов самостоятельной научной работы и понимания специальной литературы.
<b>ПК-4</b> , готовность применять на практике базовые общепрофессиональные знания и навыки полевых геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических, нефтегазовых и эколого-геологических работ при решении производственных задач (в соответствии с направленностью (профилем) программы бакалавриата)	Знает	Общепрофессиональные знания и навыки полевых геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических, нефтегазовых и эколого-геологических работ
	Умеет	Организовать полевые геофизические работы: выбрать аппаратуру, разработать методику измерений; обеспечивающие необходимую точность
	Владеет	Методами и способами интерпретации геолого-геофизических данных, в том числе с использованием современного программного обеспечения

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Кристаллография» применяются следующие методы активного/

интерактивного обучения: лекция-беседа, лекция-презентация, проблемная лекция, круглые столы.

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Раздел I. Кристаллическое состояние вещества (4 час.)**

#### **Тема 1. Кристаллическое состояние вещества (2 час.)**

Современные представления о природе минералов. История развития минералогических знаний. Связь минералогии с другими науками. Научное и практическое значение современной минералогии.

Понятие о кристалле, кристаллическом и аморфном веществе. Строение кристаллов. Пространственная решетка. Важнейшие свойства кристаллов (анизотропность, однородность, способность самоограняться).

#### **Тема 2. Возникновение, рост и разрушение кристаллов (2 час.)**

Способы образования кристаллов. Факторы образования минералов. Пререохлаждение и (или) пересыщение расплавов, растворов или газов; преобразование твердых фаз, химические реакции, электрохимические явления, жизнедеятельность организмов. Типы зарождения кристаллов. Кристаллизационная способность вещества.

Модели роста кристаллов. Модель послойного роста с позиций атомно-молекулярного состояния поверхности растущего кристалла. Модель несовершенного роста кристаллов. Дефекты кристаллической решетки. Структурно-химические несовершенства минералов.

Факторы, влияющие на облик кристаллов, и явления, сопровождающие кристаллизацию. Изменение скорости роста граней. Концентрационные потоки. Растворение и регенирация кристаллов. Способы выращивания кристаллов.

### **Раздел 2. Геометрическая кристаллография (9 час.)**

#### **Тема 1. Закон постоянства углов и гониометрия кристаллов (2 час.)**

Закон постоянства углов. Закон Стено-Ломоносова-Ромэ-де Лиля. Отражательные гониометры. Кристаллохимический анализ Е.С. Федорова.

Стереографические проекции. Проекции направлений, проекции плоскостей, осей симметрии. Гномостереографические проекции граней кристаллов. Сферические координаты. Сетка Вульфа.

## **Тема 2. Симметрия кристаллов (3 час.)**

Симметрия кристаллов. Элементы симметрии: центр, плоскости и оси симметрии. Инверсионные оси симметрии. Сложение элементов симметрии. Единичные и симметрично-равные направления в кристаллах. Виды симметрии, категории, сингонии и их признаки. Вывод 32-х видов симметрии. Элементы симметрии, характерные для кристаллов разных сингоний. Определение симметрии реальных кристаллов.

Простые формы кристаллов и их комбинации. Понятие о выводе простых форм. Простые формы низших, средних и высшей сингоний. Разновидности простых форм. Формы реальных кристаллов. Определение простых форм в комбинациях.

## **Тема 3. Учение о кристаллографических символах (2 час.)**

Координатные плоскости и оси. Параметры граней. Закон рациональности параметров (закон Гаюи, или закон целых чисел) как следствие решетчатого строения кристаллов. Индексы и символы граней.

Символы ребер и кристаллографических осей. Координатные системы в кристаллографии и установка кристаллов. Расположение координатных осей и граней в разных сингониях. Геометрические константы кристаллов разных сингоний.

## **Тема 4. Усложненные формы и типы сростаний кристаллов (2 час.)**

Усложненные формы кристаллов. Скелетные кристаллы и дендриты. антискелетные кристаллы. Скрученные и расщепленные кристаллы.

Типы сростаний кристаллов. Закономерные, приближенно-закономерные и незаконмерные сростания. Автоэпитаксические и гетероэпитаксические сростки. Синтаксические и топотаксические вросстки. Типы двойников. Законы двойникования.



### **Раздел 3. Кристаллохимия (5 час.)**

#### **Тема 1. Структура кристаллов (3 час.)**

Общее представление о структуре кристаллов. Свойства пространственных решеток. Элементарные ячейки. Четырнадцать типов пространственных решеток (решетки Бравэ). Особенности симметрии пространственных решёток. Трансляционные элементы симметрии. Трансляционные решётки. Представление о взаимодействии элементов симметрии в кристаллических структурах (сложение переносов). Федоровские (пространственные) группы симметрии. Вывод простейших Федоровских групп. Их расшифровка.

Свойства структурных элементов кристаллов. Типы химических связей в минералах. Атомные и ионные радиусы. Эффективные ионные радиусы В. Гольдшмидта. Координационное число. Значения пределов устойчивости и соответствующих им координационных чисел.

Плотнейшая упаковка шаров. Виды плотнейших упаковок в атомных структурах. Тетраэдрические и октаэдрические пустоты.

#### **Тема 2. Изоморфизм, полиморфизм, политипизм (2 час.)**

Особенности химического состава минералов. Соединения постоянного и переменного состава. Изоморфизм. Изоморфные смеси и изоморфные минералы. Типы изоморфизма. Причины и условия проявления изоморфизма. Изоструктурность.

Виды полиморфизма. Полиморфные превращения, полиморфные модификации. Типы полиморфных превращений. Механизмы полиморфных превращений. Псевдоморфное замещение. Пустотелые псевдоморфозы. Параморфозы. Политипизм. Политипы и их виды.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Практические занятия (54 час.)**

#### **Занятие 1. Понятие о кристалле и кристаллическом веществе (6 час.)**

1. Структура (строение) кристаллического вещества.

2. Свойства кристаллических веществ.
3. Возникновение, рост и разрушение кристаллов.

**Занятие 2. Стереографические проекции (10 час.). (Интерактивное обучение - 6 часов)**

1. Закон постоянства углов.
2. Построение стереографических проекций
3. Сферические координаты.
4. Презентация. Кристаллохимический анализ.

**Занятие 3. Симметрия кристаллов (10 час.). (Интерактивное обучение - 6 часов)**

1. Элементы симметрии кристаллов: центр, плоскости и оси симметрии.
2. Определение формул элементов кристалла на реальных кристаллах.
3. Дискуссия: оси симметрии пятого и выше шестого порядков.

(Интерактивное обучение - 6 часов)

**Занятие 4. Простые формы кристаллов и их комбинации (12 час.)**

1. Простые формы низших, средних и высшей сингоний.
2. Комбинации простых форм.
3. Определение простых форм в комбинациях.

**Занятие 5. Учение о кристаллографических символах (4 час.)**

1. Параметры граней. Закон рациональности параметров
2. Символы ребер и кристаллографических осей.
3. Геометрические константы кристаллов разных сингоний.

**Занятие 6. Усложненные формы и типы сростаний кристаллов (4 час.)**

1. Скелетные кристаллы и дендриты.
2. Типы сростаний кристаллов.
3. Типы двойников.

**Занятие 7. Структура кристаллов (4 час.). (Интерактивное обучение - 24 часа)**

1. Решетки Бравэ.
2. Свойства структурных элементов кристаллов.
3. Плотнейшая упаковка шаров.
4. Описание кристаллических структур многогранников» (Интерактивное обучение - 24 часа)

### **Занятие 8. Изоморфизм, полиморфизм, политипизм (4 час.)**

1. Изоморфные смеси и изоморфные минералы
2. Полиморфные превращения
3. Псевдоморфное замещение.

## **III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Кристаллография» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

## **IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

Оценка успеваемости бакалавров осуществляется по результатам:

-устного опроса при сдаче выполненных индивидуальных заданий;

-выполненных тестовых заданий;

- выполненных контрольных работ;

-во время экзамена. Экзаменационные билеты включают два теоретических вопроса.

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства	
			текущий контроль	промежуточная аттестация

1	Кристаллическое состояние вещества	ПК-1	знает	УО-1. Собеседование.	Вопросы к экзамену №1-№4
			умеет		
			владеет	ПР-1 (Тест № 1)	
2	Методы проектирования кристаллов	ПК-1	знает	УО-1. Собеседование	Вопросы к экзамену №5-№8
			умеет		
			владеет	ПР-2. Контрольная работа 1	
3	Симметрия кристаллов	ПК-1	знает	УО-1. Собеседование	Вопросы к экзамену №9-№16
			умеет		
			владеет	ПР-2. Контрольная работа 2	
4	Простые формы кристаллов и комбинации простых форм. Реальные кристаллы	ПК-4	знает	УО-1. Собеседование	Вопросы к экзамену №17-№27
			умеет		
			владеет	ПР-2. Контрольная работа 3	
5	Структура кристаллов. Учение о кристаллографических символах	ПК-4	знает	УО-1 Собеседование	Вопросы к экзамену №28-№34
			умеет		
			владеет	Контрольная работа 4	
6	Основы кристаллохимии	ПК-4	знает	УО-1 Собеседование	Вопросы к экзамену №35-№44
			умеет		
			владеет		

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

## **V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

1. Бетехтин А.Г. Курс минералогии: учебное пособие: под научн. ред. Б.И. Пирогова и Б.В. Шкурского. 3-е изд., испр. и доп. Москва : Университет, [2014]. – 735 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:733543&theme=FEFU>Режим доступа: НБ ДВФУ - 4 экз.
2. Бондарев В. П. Основы минералогии и кристаллографии с элементами петрографии: Учебное пособие / В.П. Бондарев. - М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 280 с. URL:<http://znanium.com/bookread2.php?book=497868>
3. Кемкина Р.А. Минералогия. УМКД. Владивосток. ДВГТУ. 2008. 310 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:383314&theme=FEFU>. Режим доступа: НБ ДВФУ - 64 экз.
4. Милютин А. Г. Геология : учебник для бакалавров / А. Г. Милютин ; Московский государственный открытый университет. М.: Юрайт, 2014. URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:710770&theme=FEFU> 543 с. Режим доступа: НБ ДВФУ - 5 экз.
5. Егоров-Тисменко, Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия: учебник / Ю. К. Егоров-Тисменко .- 2-е изд. - М. : Университет , 2010. - 587 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:293319&theme=FEFU> Режим доступа: НБ ДВФУ - 3 экз.
6. Брагина В. И. Кристаллография, минералогия и обогащение полезных ископаемых [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. И. Брагина. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. - 152 с. - ISBN 978-5-7638-2647-0. URL: <http://znanium.com/bookread.php?book=492236>
7. Аникина В. И. Основы кристаллографии и дефекты кристаллического строения [Электронный ресурс]: Практикум / В. И. Аникина, А. С. Сапарова. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 148 с. - ISBN 978-5-7638-2195-6. URL: <http://znanium.com/bookread2.php?book=441367>

**Дополнительная литература**  
(печатные и электронные издания)

1. Егоров-Тисменко Ю. К., Литвинская Г. П. Теория симметрии кристаллов.  
<http://students.web.ru/db/msg.html?mid=1163834&uri=index.htm>

2. Ермолов В. А., Ларичев Л. Н., Мосейкин В. В. Геология. Часть I. Основы геологии : Учебник для ВУЗов. - М.: МГУ, Горная книга. 2004. – 598 с. Режим доступа: URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:395738&theme=FEFU>  
Режим доступа: НБ ДВФУ - 13 экз.

### **Нормативно-правовые материалы**

1. ГОСТ 32723 — 2014. Определение минералого-петрографического состава. Москва Стандартинформ 2014. Режим доступа: [http://www.euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ\\_docs/GOST32723.pdf](http://www.euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOST32723.pdf)

### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

1. Гумерова Н.В., Удодов В.П. Геология: Учебное пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2010. - 135 с. Режим доступа:  
<http://window.edu.ru/resource/745/74745/files/posobie-gumerova.pdf>
2. Кристаллографическая и кристаллохимическая База данных для минералов и их структурных аналогов Института экспериментальной минералогии РАН -  
<http://database.iem.ac.ru/mincryst>
3. Неофициальный сервер геологического факультета МГУ  
<http://window.edu.ru/resource/795/4795>
4. [http://klopotow.narod.ru/mineral/gallery/sulfid/galen\\_4.htm](http://klopotow.narod.ru/mineral/gallery/sulfid/galen_4.htm)
5. Российская национальная библиотека [www.nlr.ru](http://www.nlr.ru)

Научные периодические издания:

Геодинамика и тектонофизика. Режим доступа:

<https://e.mail.ru/compose/1450688598000000291/drafts/>

Геология и разведка.

Геология и геофизика.

Геология рудных месторождений.

Доклады Академии наук.

Записки Всероссийского минералогического общества.

Известия Вузов. Геология и разведка.

Отечественная геология;

Разведка и охрана недр

## **Перечень информационных технологий и программного обеспечения**

Видеосистема для демонстрации слайдов с помощью программного приложения Microsoft Power Point.

Информационные справочные системы, возможности которых студенты могут свободно использовать:

Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru/defaultx.asp>;

Электронно-библиотечная система Znanium.com НИЦ "ИНФРА-М" <http://znanium.com/>

Электронная библиотека "Консультант студента" КОНСУЛЬТАНТ СТУДЕНТА - электронная библиотека технического вуза. Доступные рубрики - "Медицина. Здравоохранение"; "Машиностроение"; "Архитектура и строительство" <http://www.studentlibrary.ru/>

•Электронно - библиотечная система образовательных и просветительских изданий в которой собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия. <http://www.iqlib.ru>

•Электронная библиотечная система «Университетская библиотека - online» ЭБС по тематике охватывает всю область гуманитарных знаний и предназначена для использования в процессе обучения в высшей школе, как студентами преподавателями, так и специалистами гуманитариями. [www.biblioclub.ru](http://www.biblioclub.ru)

## **VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Алгоритм изучения дисциплины «Кристаллография», организация и планирование времени:

- прослушивание лекционного материала (18 час.);
- выполнение практических занятий (54 часа).

Последовательность действий обучающегося при выполнении практических занятий.

Знакомство со строением и свойствами кристаллических веществ. Закон постоянства углов

Кристаллографические проекции, сферические координаты. Овладение методикой построения стереографических и гномостереографических проекций.

Изучение элементов симметрии кристаллов (центр, плоскости и оси симметрии); фундаментальных законов кристаллографии, основной закон симметрии – отсутствие осей 5-го и выше 6-го порядков; правил взаимодействия операций симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп, понятий категории, сингонии. Определение формул элементов кристалла на реальных кристаллах.

Изучение морфологии кристаллов. Понятие «простая форма кристаллов». Вывод простых форм кристаллов в группах разных сингоний. Комбинации простых форм. Определение простых форм в комбинациях.

Изучение символов граней и ребер кристаллов. Знакомство с индексами Вейса и Миллера. Индицирование. Изучение закона Гаюи – закона рациональности отношений параметров. Изучение правил выбора единичной грани в кристаллах разных сингоний. Знакомство с законом Вейса - закон зон. Изучение элементарных ячеек (ячеек Бравэ).

Понятие о кристаллической решетке. Устойчивость кристаллической решетки. Атомные (ионные) радиусы. Координация атомов и ионов. Координационные полиэдры. Теория плотнейшей упаковки. Кристаллохимическая структура минералов. Типы пустот.

Химический состав минералов и типы изоморфизма. Явление полиморфизма, политипии, параморфизма, псевдоморфозы. Закономерные и не закономерные срастания кристаллов.

- выполнение письменных работ по написанию 4 тестов, которые охватывают весь курс и рассредоточены по всему курсу (затраты времени – 2 часа);

- выполнение письменных работ по написанию отчетов по выполнению практических работ, завершающих каждый цикл курса и рассредоточенных по всему курсу (затраты времени – 20 часов на все ПР, включая время на СРС);

- выполнение самостоятельной работы (72 часа), которая включает подготовку к экзамену (освоение вопросов к экзамену 36 час.) оценивает



подготовленность студента к практическому курсу; подготовка презентаций и их интерактивное обсуждение на практических занятиях.

1. Полевских Р.И., Кемкина Р.А. Кристаллография: методические указания к лабораторным и самостоятельным работам / - Владивосток: Изд-во ДВПИ, 2005. 26 с.

2. Кемкина Р.А. Минералогия. УМКД. Владивосток. ДВГТУ. 2008. 292 с.

## **VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Занятия проводятся в специализированной лаборатории кафедры геологии, геофизики и геоэкологии.

Освоение дисциплины "Кристаллография и минералогия" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

1. Интерактивная доска, ноутбук (компьютер) и проектор;
2. Коллекция деревянных и пластиковых моделей кристаллических многогранников простых форм кристаллов и комбинаций простых форм кристаллов;
3. Модели пространственных решеток минералов;
4. Эталонная учебная коллекция физических и кристалломорфологических свойств минералов;
5. Коллекция природных сростков кристаллов минералов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДВФУ)

---

---

НАЗВАНИЕ ШКОЛЫ (ФИЛИАЛА)

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ  
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
по дисциплине «Кристаллография»  
Направление подготовки 05.03.01 Геология  
Профиль «Геология»  
Форма подготовки очная**

**Владивосток  
2015**

Самостоятельная работа студента представляет собой процесс целенаправленного активного приобретения студентом новых знаний и умений без непосредственного участия преподавателя.

Возможности самостоятельного изучения студентами данного курса обусловлены, в частности, наличием доступной студентам современной научно-технической литературы по изучаемому курсу, обширной коллекцией минералов, а также макетами простых форм и их комбинаций.

Самостоятельный контроль усвоения знаний в процессе самостоятельной работы по изучению курса «Кристаллография» студенты могут осуществлять путем ответов на вопросы в предлагаемых учебных пособиях и учебно-методических разработках.

### **План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине**

№ п/п	Дата/срок и выполнения	Вид самостоятельной работы	Время на выполнение	Форма контроля
1.	1-13 неделя	Работа с литературой Подготовка презентаций	15 час.	Собеседование  Презентация
2.	4-16 неделя	Подготовка отчетов	10 час.	Отчет о выполнении практической работы

### **Рекомендации по самостоятельной работе студентов**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов включает изучение материалов лекций, подготовка к практическим занятиям, заполнение минералогических таблиц, подготовка к контролирующим тестам, контрольным работам по модулю, подготовка к экзамену.

### **Методические указания к пункту 1 плана-графика СРС «Работа с литературой и подготовка презентаций»**

Цель научиться обобщать литературные данные и в сжатой форме преподносить основные полученные результаты.

Основные требования:

Работа с литературой включает знакомство с основными и дополнительными источниками. В результате собеседования преподаватель выясняет глубину проработки материала и оценивает работу в соответствии с критериями оценки (см. ниже).

Подготовка презентаций осуществляется в соответствии с планом графиком. Каждая тема должна быть раскрыта, в ней необходимо осветить актуальность, цели и задачи проведенного исследования, приведены региональные примеры, выполнено заключение и приведены основные использованные источники, включая литературные и электронные данные с соответствующими ссылками.

Студент (по согласованию с преподавателем) представляет либо лекцию-презентацию, подготовленную в программе PowerPoint, включающую не менее 5-7 слайдов, либо доклад для общей дискуссии и последующего обсуждения.

Критерии оценки.

Оценка выполняется по двухбалльной системе (1 – выполнено, 0 – не выполнено).

### **Методические указания к пункту 3 плана-графика СРС «Подготовка отчета по выполнению практической работы»**

Выполненные задания во время практических работ в лаборатории минералогии по геометрической кристаллографии необходимо подготовить к сдаче в электронном и печатном виде в виде отчета, в который должны входить все выполненные задания.

Критерии оценки.

Оценка для вынесения в систему БРС выполняется по четырехбалльной системе (3 – отлично, 2 – хорошо, 1 – удовлетворительно, 0 - не удовлетворительно).

**Рекомендуется самостоятельно подготовиться к обсуждению перечня вопросов для выполнения текущего контроля «УО-1. Собеседование»**

Основные законы внутреннего строения кристаллов. Симметрия кристаллов Основные свойства кристаллических тел Операции и элементы симметрии Взаимодействие элементов симметрии

Кристаллографические координатные системы Кристаллографические категории, сингонии, классы симметрии. Символы граней и ребер кристаллов Символы граней кристаллов. Закон Гаюи Символы ребер кристаллов. Их определение Закон зон - закон Вейсса.

Главнейшие типы кристаллических структур и их связь с химическим составом веществ и кристаллохимическими особенностями их элементов. Простые формы кристаллов Общие представления Простые формы низшей, средней и высшей категории.

Структурные дефекты в кристаллах: точечные, линейные, поверхностные и объемные дефекты.

Физические свойства кристаллов и их зависимость от внутренней структуры вещества. Физические свойства минералов, диагностика. Связь физических свойств с составом, структурой и условиями образования минералов (типоморфизм). Изоморфизм. Твердые растворы и их распад. Полиморфизм. Политипия.

Критерии оценки.

Оценка выполняется по двухбалльной системе (1 – выполнено, 0 – не выполнено).



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДВФУ)

---

---

НАЗВАНИЕ ШКОЛЫ (ФИЛИАЛА)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**по дисциплине «Кристаллография»**  
**Направление подготовки 05.03.01 Геология**  
**профиль «Геология»**  
**Форма подготовки очная**

**Владивосток**  
**2015**

## Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
<b>ПК-1</b> , способность использовать знания в области геологии, геофизики, геохимии, гидрогеологии и инженерной геологии, геологии и геохимии горючих ископаемых, экологической геологии для решения научно-исследовательских задач (в соответствии с направленностью (профилем) подготовки)	Знает	Кристаллографические модели. Порядок и сущность кристаллографических элементов.
	Умеет	Проводить научные исследования в области кристаллографии для выполнения задач минералогии и геологии.
	Владеет	Практическими навыками работы с кристаллами и приемами грамотного описания внешней формы и внутреннего (атомного) строения кристаллов, необходимых для правильной интерпретации результатов самостоятельной научной работы и понимания специальной литературы.
<b>ПК-4</b> , готовность применять на практике базовые общепрофессиональные знания и навыки полевых геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических, нефтегазовых и эколого-геологических работ при решении производственных задач (в соответствии с направленностью (профилем) программы бакалавриата)	Знает	Общепрофессиональные знания и навыки полевых геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических, нефтегазовых и эколого-геологических работ
	Умеет	Организовать полевые геофизические работы: выбрать аппаратуру, разработать методику измерений; обеспечивающие необходимую точность
	Владеет	Методами и способами интерпретации геолого-геофизических данных, в том числе с использованием современного программного обеспечения

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций		Оценочные средства	
				текущий контроль	промежуточная аттестация
1	Кристаллическое состояние вещества	ПК-1	знает	УО-1. Собеседование.	Вопросы к экзамену №1-№4
			умеет		
			владеет	ПР-1 (Тест № 1)	
2	Методы проектирования кристаллов	ПК-1	знает	УО-1. Собеседование	Вопросы к экзамену №5-№8
			умеет		
			владеет	ПР-2. Контрольная работа 1	

3	Симметрия кристаллов	ПК-1	знает	УО-1. Собеседование	Вопросы к экзамену №9-№16
			умеет	ПР-1 (Тест № 2).	
			владеет	ПР-2. Контрольная работа 2	
4	Простые формы кристаллов и комбинации простых форм. Реальные кристаллы	ПК-4	знает	УО-1. Собеседование	Вопросы к экзамену №17-№27
			умеет	ПР-1 (Тест № 3).	
			владеет	ПР-2. Контрольная работа 3	
5	Структура кристаллов. Учение о кристаллографических символах	ПК-4	знает	УО-1 Собеседование	Вопросы к экзамену №28-№34
			умеет	ПР-2. Контрольная работа 4	
			владеет		
6	Основы кристаллохимии	ПК-4	знает	УО-1 Собеседование	Вопросы к экзамену №35-№44
			умеет	ПР-1 (Тест № 4).	
			владеет		

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели
ПК-1, способность использовать знания области геологии, геофизики, геохимии, гидрогеологии и инженерной	знает (пороговый уровень)	Кристаллографические модели. Порядок и сущность кристаллографических элементов.	знание определений основных понятий кристалломорфологической области исследования; знание фундаментальных законов кристаллографии	- способность определить сингонии и вид симметрии кристаллов;



<p>геологии, геологии и геохимии горючих ископаемых, экологической геологии для решения научно-исследовательских задач (в соответствии с направленностью (профилем) подготовки</p>			<p>знание основных понятий по методам научных исследований в кристаллографии; знание методов научных исследований и определение их принадлежности к научным направлениям; знание источников минералогической информации</p>	<p>- способность применить методы кристаллографического и минералогического исследования, - способность описать схему исследования кристаллографических особенностей руд</p>
	<p>умеет (продвинутый)</p>	<p>Проводить научные исследования в области кристаллографии и для выполнения задач минералогии и геологии.</p>	<p>умение составлять электронные базы данных и библиотечные каталоги кристаллографического профиля, умение применять известные методы научных исследований, умение представлять результаты минералогических исследований учёных по изучаемой проблеме и сопоставлять их с мировыми достижениями</p>	<p>- способность работать с данными кристаллографических каталогов, необходимых для исследований; - способность найти труды по кристаллографии и обосновать объективность применения изученных результатов научных исследований в качестве доказательства или опровержения исследовательских аргументов; - способность применять методы кристалломорфологического исследования для нестандартного решения геологических задач</p>
	<p>владеет (высокий)</p>	<p>Практическими навыками работы с кристаллами и приемами грамотного описания внешней формы и внутреннего строения кристаллов, необходимых для правильной интерпретации результатов</p>	<p>владение терминологией в области кристаллографии и кристаллохимии, владение способностью сформулировать задание по исследованию структуры веществ, чёткое понимание требований, предъявляемых к содержанию и последовательнос</p>	<p>- способность бегло и точно применять терминологический аппарат кристаллографической области исследования в устных ответах на вопросы и в письменных работах, -способность проводить самостоятельные исследования и представлять их результаты на обсуждение на круглых столах, семинарах, научных конференциях. - способность применения знаний кристаллографии в решении минералогических, петрографических и геохимических задач</p>

		самостоятельной научной работы и понимания специальной литературы	ти исследования, владение инструментами представления результатов научных исследований	
ПК-4, готовностью применять на практике базовые общепрофессиональные знания и навыки полевых геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических, нефтегазовых и эколого-геологических работ при решении производственных задач (в соответствии с направленностью (профилем) программы бакалавриата)	знает (пороговый уровень)	Общепрофессиональные знания и навыки полевых геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических, нефтегазовых и эколого-геологических работ.	знание основных категорий кристаллографии и кристаллохимии; знание основных особенности кристаллических веществ и их свойства	- способность использовать для определения минералов в полевых и камеральных условиях весь комплекс знаний о строении вещества
			знание основных понятий по методам кристаллографических исследований; знание основных методов геологических исследований; знание источников информации, раскрывающих методы и подходы к проведению минералогических исследований	- способность раскрыть суть методов кристалломорфологического исследования; -способность самостоятельно сформулировать тему и составить план кристаллографических исследований; - способность обосновать актуальность кристаллографических исследований -способность перечислить источники информации по кристаллографии и кристаллохимии к проведению исследований
	умеет (продвинутый)	Организовать полевые геофизические работы: выбрать аппаратуру, разработать методику измерений; обеспечивающие необходимую точность.	знание применения полученных знаний при решении кристаллографических задач и описании ассоциаций минералов	- способность самостоятельно работать с кристаллами минералов, проводить научные кристаллографические исследования и эти исследования применять при решении практических задач - способность грамотно описывать внешнюю форму и структуру минералов на основе знаний по точечной и пространственной симметрии и фундаментальных законов кристаллографии

	владеет (высокий)	Методами и способами интерпретации геолого-геофизических данных, в том числе с использованием современного программного обеспечения.	владение приемами диагностики минералов, включающими определение их кристалломорфологических, физических свойств, анализ минеральных ассоциаций и химизма среды минералообразования.	- способность бегло и точно применять терминологический аппарат минералогических исследований в устных ответах на вопросы и в письменных работах  - способностью применения полученных минералогических знаний и навыков для успешной профессиональной деятельности и решении практических задач
--	-------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## **Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

### **Оценочные средства для промежуточной аттестации**

#### **Перечень типовых экзаменационных вопросов**

1. Предмет кристаллографии. Практическое значение. Основные понятия.
2. Исторические сведения. Периоды зарождения и развития кристаллографии.
3. Строение кристаллов
4. Свойства кристаллов.
5. Закон постоянства углов. Гониометры.
6. Сферические координаты. Их использование при проецировании кристаллов.
7. Сферические и стереографические проекции кристаллов.
8. Гномостереографические проекции кристаллов.
9. Кристаллографические категории.
10. Кристаллографические сингонии.
11. Кристаллографические классы симметрии.
12. Симметрия, операция симметрии, элементы симметрии.
13. Зеркальная плоскость симметрии. Центр инверсии (центр симметрии).
14. Оси симметрии кристаллов.
15. Основной закон симметрии: отсутствие осей 5-го и выше 6-го порядков.

16. Правила взаимодействия операций симметрии и их использование при выводе 32 кристаллографических точечных групп.
17. Понятие «единичная грань», ее выбор в кристаллах разных сингоний.
18. Простые формы в кристаллах низшей категории.
19. Простые формы в кристаллах средней категории.
20. Простые формы в классах кубической сингонии.
21. Комбинации простых форм кристаллов.
22. Образование и рост кристаллов. Теории роста кристаллов. Регенерация кристаллов.
23. Модель послойного роста кристаллов.
24. Технические методы выращивания кристаллов.
25. Точечные дефекты в кристаллах.
26. Линейные дефекты в кристаллах.
27. Объемные дефекты в кристаллах.
28. Кристаллографические координатные системы. Установка кристаллов.
29. Символы граней и ребер кристаллов.
30. Суть закона Гаюи – закона рациональности отношений параметров граней.
31. Закон Вейса -закон зон. Метод развития зон.
32. Индексы Вейса и Миллера.
33. Понятие о кристаллической решетке. Устойчивость кристаллической решетки.
34. Элементарная ячейка (ячейка Бравэ). 14 типов ячеек Бравэ.
35. Атомные (ионные) радиусы.
36. Координация атомов и ионов. Координационные полиэдры.
37. Теория плотнейшей упаковки.
38. Типы химических связей и их влияние на свойства минералов.
39. Кристаллохимическая структура минералов. Типы пустот.
40. Химический состав минералов и типы изоморфизма.
41. Явление полиморфизма, политипии, параморфизма, псевдоморфозы.

42. Формы роста кристаллов (скелетные, дендритные, нитевидные).

43. Незакономерные сростки кристаллов (сферолиты, друзы, щетки).

44. Закономерные сростки кристаллов (параллельные, эпитаксические, двойники). Геометрический отбор.

### **Оценочные средства для текущей аттестации**

К типовым оценочным средствам для текущей аттестации относятся собеседование (оценка выполняется по двухбалльной системе (1 – выполнено, 0 – не выполнено), контрольные работы и тесты. Их оценка для вынесения в систему БРС выполняется по четырехбалльной системе (3 – отлично, 2 – хорошо, 1 – удовлетворительно, 0 – не удовлетворительно). Чтобы получить оценку 3, необходимо ответить правильно на 15 вопросов, 2 – 13 и 1– 11 правильных ответов. Всего предусмотрено 4 комплекта тестов, каждый из которых включает от 4 до 6 вариантов с 16 вопросами и тремя – четырьмя предлагаемыми ответами на каждый. Тесты составлены по следующим разделам: геометрическая кристаллография; симметрия кристаллов; простые формы кристаллов и комбинации простых форм; символы граней и ребер.

### **Типовой вариант тестов по основным разделам дисциплины**

#### **Тест № 1**

1. Какие вещества имеют закономерное расположение атомов (ионов) в пространстве?  
а) кристаллические                      б) аморфные                      в) метамиктные
2. Векториальные свойства минералов:  
а) зависят от направления              б) не зависят от направления  
в) не зависят ни от чего
3. Какой минерал имеет ионную кристаллическую решетку?  
а) графит                      б) алмаз                      в) галит
4. Элементами огранения являются:  
а) плоскости                      б) вершины                      в) оси
5. Углы между соответствующими гранями одного и того же минерала:  
а) всегда постоянны                      б) всегда разные  
в) меняются в зависимости от условий образования
6. В кристалле может быть центров симметрии:  
а) 2                      б) 1                      в) в разных по-разному
7. Максимальное число плоскостей симметрии:  
а) 9                      б) 6                      в) 32
8. Элементами симметрии являются:  
а) вершины                      б) оси                      в) узлы решеток

9. Сколько плоскостей симметрии в галените?  
 а) 5                      б) 3                      в) 9
10. Осью симметрии  $L_2$  является ось, при повороте вокруг которой, элементы огранения повторяются через:  
 а)  $180^\circ$                       б)  $90^\circ$                       в)  $120^\circ$
11. Если имеются в кристалле  $L_6$  и  $L_2$ , то осей  $L_2$  будет:  
 а) 2                      б) 6                      в) 12
12. Инверсионные оси бывают:  
 а) 5 порядка                      б) 4 порядка                      в) 2 порядка
13. В планальном виде симметрии отсутствуют:  
 а) плоскости                      б) оси                      в) центр
14. Сколько видов симметрии существует?  
 а) 32                      б) 147                      в) 47
15. Ось симметрии какого порядка проходит через вершину многогранника:  
 а)  $L_5$                       б)  $L_3$                       в)  $L_7$
16. В каком многограннике отсутствует центр симметрии:  
 а) в пирамиде                      б) в призме                      в) в октаэдре

### Тест № 2

1. Сингония –это  
 а) сходноугольность                      б) повторяемость                      в) симметрия
2. Сколько сингоний существует в кристаллографии ?  
 а) 7                      б) 32                      в) 47
3. Какая простая форма находится в комбинации с моноэдром:  
 а) призма                      б) пирамида                      в) тетраэдр
4. Какая сингония входит в низшую категорию:  
 а) тетрагональная                      б) кубическая                      в) триклинная
5. В какой сингонии имеется одна ось симметрии третьего порядка ( $L_3$ ):  
 а) тригональной                      б) тетрагональной                      в) ромбической
6. Кристаллы какой сингонии в поперечнике дают квадрат:  
 а) тригональной                      б) моноклинной                      в) тетрагональной
7. Что означает в переводе с греческого «моно»:  
 а) много                      б) один                      в) десять
8. Количество простых форм в комбинации определяется количеством разновидностей::  
 а) ребер                      б) граней                      в) углов
9. Открытой простой формой является:  
 а) призма                      б) тетраэдр                      в) куб
10. Из какого количества граней состоит моноэдр:  
 а) из двух перпендикулярных                      б) из двух пересекающихся                      в) из одной
11. Какая сингония входит в высшую категорию:  
 а) гексагональная                      б) кубическая                      в) триклинная
12. Сколько простых форм в низшей категории ?  
 а) 25                      б) 7                      в) 15
13. Какая простая форма из низшей категории сохраняется в средней категории ?  
 а) диэдр                      б) ромбический тетраэдр                      в) моноэдр
14. В какой простой форме содержится больше всего граней ?  
 а) пентагон-триоктаэдр                      б) дидодекаэдр                      в) гексоктаэдр
15. В какой сингонии присутствует тетраэдр, образованный четырьмя равнобедренными треугольниками ?  
 а) тетрагональной                      б) ромбической                      в) кубической
16. К какой сингонии относится октаэдр:

- а) кубической                      б) тригональной                      в) тетрагональной

### Тест № 3

1. В вертикальном направлении ионные радиусы с увеличением порядкового номера элемента:  
а) не изменяются                      б) уменьшаются                      в) увеличиваются
2. Модель послойного роста за счет дефектов в кристаллах была предложена:  
а) Косселем                      б) Странским                      в) Леммлейном
3. Графит и алмаз являются:  
а) политипами                      б) полиморфными модификациями                      в) изоморфными
4. Что называется параметрами?  
а) отрезки, отсекаемые гранями                      б) углы между ребрами                      в) вершины
5. В какой сингонии символы граней будут четырехзначные?  
а) гексагональной                      б) кубической                      в) триклинной
6. Кто впервые высказал идею о том, что частицы вещества сложены из шаров?  
а) Гаюи                      б) Федоров                      в) Кеплер
7. В кристаллах какой сингонии единичная грань отсекает отрезки  $a \neq b \neq c$ :  
а) кубической                      б) тригональной                      в) триклинной
8. Какие типы пустот существуют:  
а) октаэдрические                      б) кубические                      в) моноклинные
9. Радиусы катионов одного и того же элемента при увеличении валентности:  
а) увеличиваются                      б) уменьшаются                      в) не изменяются
10. При заполнении пространства гексагональными призмами какая решетка получается?  
а) гранецентрированная                      б) простая (примитивная)                      в) призматическая
11. Сколько способов упаковки частиц в кристалле существует?    а) 2                      б) 3                      в) 5
12. Изоморфизм-это:  
а) замещение одного минерала другим                      б) замена одних химических элементов другими                      в) изменение периодичности чередования слоев
13. Первичные эпитактические срастания возникают в результате:  
а) замещения                      б) кристаллизации                      в) распада твердых растворов
14. Какой символ будет иметь единичная грань, пересекающая только ось x?  
а) (100)                      б) (111)                      в) (010)
15. Какие двойники характерны для касситерита?  
а) коленчатые                      б) карлбадский                      в) шпинелевый
16. Какую форму будут иметь кристаллы уплощенного облика?  
а) призматическую                      б) октаэдры                      в) таблитчатого

## Перечень контрольных заданий

### к выполнению «ПР-2. Контрольная работа»

Преподаватель, на основании анализа моделей многогранников и фондов контрольных образцов (аудитория Е503) выдает материалы для выполнения работ по следующей тематике:

**Контрольная работа 1.** Методы проектирования кристаллов. Задание: Построить на стереографических проекциях направления, заданного сферическими координатами и измерить углы между этими направлениями.

**Контрольная работа 2.** Определение элементов симметрии кристаллов. Задание: На моделях простых форм найти элементы симметрии; составить

формулу симметрии кристалла; определить сингонию каждой модели; построить стереографическую проекцию.

**Контрольная работа 3.** Задание: Определить простые формы кристаллов и комбинации простых форм.

**Контрольная работа 4.** Цель работы: научиться описывать кристаллографические модели и строить упрощенные проекции.

Задание: определить элементы симметрии, число единичных направлений и их расположение, составить формулу элементов симметрии, определить категорию, сингонию и вид симметрии, определить простую форму, построить стереографическую и гномостереографическую проекции, определить символы граней и ребер.





Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования

Дальневосточный федеральный университет

## **ПРАКТИКУМ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИИ**

Учебно-методическое пособие к лабораторным и самостоятельным работам  
по кристаллографии для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки 05.03.01 «Геология», профиль  
«Геология»

Владивосток

Дальневосточный федеральный университет

УДК 548 (076. 5)

М 61

Практикум по геометрической кристаллографии: учебно-методическое пособие к лабораторным и самостоятельным работам / сост. Р.А. Кемкина., И.В. Кемкин; Инженерная школа ДВФУ.-Владивосток: Дальневост.федерал. ун-т, 2017. – 51 с.

Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с программой дисциплины "Кристаллография" и включает шесть лабораторных работ по основным разделам курса: учение о кристаллографических символах, построение стереографических проекций плоскостей и направлений, определение симметрии кристаллов, изучение простых форм и их комбинаций. В каждой работе изложены теоретические основы, даны методические рекомендации по выполнению, указан порядок выполнения работы и задание, а также перечень контрольных вопросов.

Данная работа предназначена для студентов, обучающихся по направлению подготовки 05.03.01 «Геология», профиль «Геология», а также для студентов других специальностей, изучающих вопросы состава Земли.

Отпечатано с оригинал-макета, подготовленного авторами

© ДВФУ, изд-во ДВФУ, 2017

## Введение

Выполнение студентами лабораторных работ по дисциплине «Кристаллография» направлено на обобщение, систематизацию, углубление и закрепление полученных теоретических знаний по конкретным темам дисциплины. Предлагаемый практикум включает шесть лабораторных работ, которые выполняются во время учебных занятий. Допускается окончательное оформление лабораторных работ в домашних условиях. Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить основные теоретические положения по рассматриваемым темам, которые приведены в каждой лабораторной работе. Кроме того, для каждой темы рекомендуется использование дополнительной литературы, способствующей более углубленному усвоению теоретического курса. После выполнения работы студенты составляют отчет и представляют его преподавателю. Преподаватель оценивает отчет по каждой работе по двух балльной системе - «зачет» или «не зачет». Студент, выполнивший все лабораторные задания, представивший отчеты и получивший положительные оценки, допускается до экзамена по дисциплине.

### Лабораторная работа № 1

#### Понятие о кристалле и кристаллическом веществе

**Цель работы:** познакомиться со строением и свойствами кристаллических веществ.

#### Строение кристаллических веществ

Среди всего многообразия минералов различают минералы кристаллического и аморфного строения. Минералы **кристаллического** строения (их около 98%) обладают кристаллической структурой, т.е. строгим закономерным расположением частиц (атомов, ионов) в кристаллической решетке минерала (рис. 1). Твердые тела, в которых материальные частицы расположены беспорядочно, называются **аморфными**. Одним из характерных представителей аморфных минералов является опал.

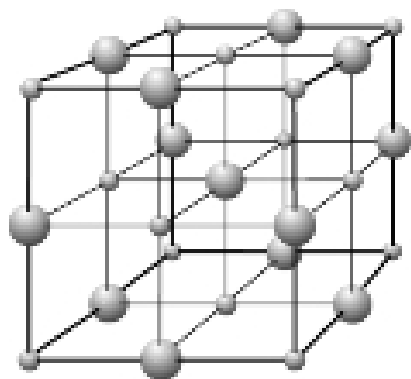
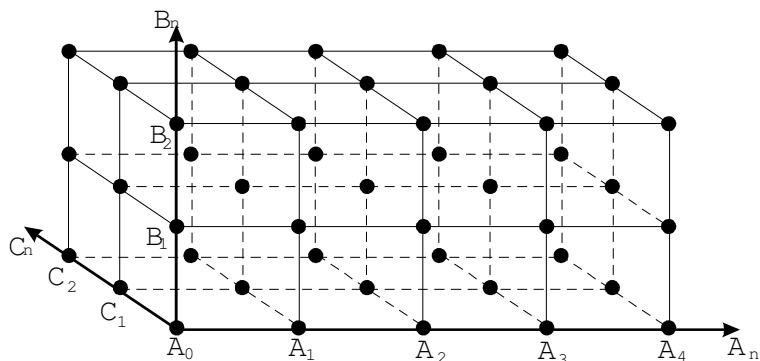


Рис. 1. Кристаллическая решетка минерала

Основные особенности кристаллического вещества определяются его внутренним строением. Структуру (строение) создает взаимное расположение элементарных материальных частиц в пространстве - атомов, ионов, молекул. При этом частицы одного сорта периодически повторяются, располагаясь по параллельным линиям. Эти частицы

можно мысленно соединить прямыми линиями так, что получится некоторая система параллелепипедов, в вершинах которых и будут находиться все однородные частицы. Такая система параллелепипедов, равных друг другу, параллельно расположенных и смежных по целым граням, получила название **пространственной решётки** (рис. 2).

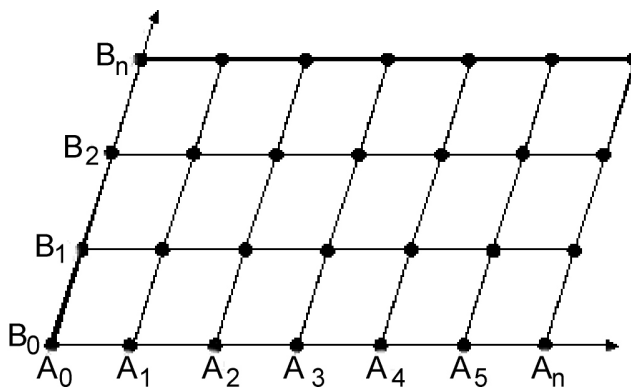


**Рис. 2. Пространственная решётка**

В ней выделяют **узлы** (центры элементарных частиц) – эквивалентные точки, связанные между собой трансляциями (переносами), **узловые ряды** (совокупность узлов, лежащих на одной прямой, рис. 3) и **узловые плоские сетки** (рис. 4). При этом узлы соответствуют вершинам реальных кристаллов, ряды - ребрам, плоскости - граням.



**Рис. 3. Узлы кристаллической решетки ( $A_0, A_1, A_2$  и т.д.) и узловой ряд**



**Рис. 4. Узловая плоская сетка**

Таким образом, кристаллическое вещество имеет строго закономерное решетчатое внутреннее строение. В узлах решетки могут располагаться атомы, ионы или молекулы. В связи с этим выделяются три типа кристаллических решеток - **ионная** - в узлах расположены

ионы (галит), **атомная** - в узлах находятся атомы (алмаз, графит) и **молекулярная** - в узлах располагаются молекулы (органические соединения).

## Свойства кристаллических веществ

Кристаллическое вещество обладает тремя важными свойствами: однородностью, способностью к самоограничению и анизотропностью.

**Однородность (гомогенность)** - свойство физического тела быть одинаковым во всем объеме. Однородность проявляется в том, что два одинаковых элементарных объема кристаллического вещества, одинаково ориентированные в пространстве, но вырезанные в разных точках этого вещества, абсолютно одинаковы по всем своим свойствам. Такое свойство проявляется крайне редко.

**Анизотропность** - особенность однородного тела, заключающаяся в том, что свойства тела одинаковы по параллельным направлениям и неодинаковы по непараллельным направлениям. Классическими примерами анизотропии природных тел являются: а) расщепление кристаллов слюды на тонкие пластинки только в одном направлении; б) двойное лучепреломление у кристаллов прозрачного кальцита (исландского шпата); в) разная твердость в кристалле дистена (на грани, параллельной удлинению кристалла, она равна 4-5, а в поперечном направлении 6-7). Кристаллические тела, обладающие одинаковыми во всех направлениях свойствами, называются **изотропными**.

**Способность к самоограничению** - это способность кристаллического вещества приобретать форму многогранника при свободном росте в соответствующей среде. Например, если выточенный из галита шарик поместить в перенасыщенный раствор поваренной соли, то со временем он примет форму куба. Стекланный же шарик, помещенный в соответствующий силикатный расплав, не изменит свою форму ввиду того, что он представлен аморфным веществом, которое не имеет способности к самоограничению.

Благодаря закономерному расположению атомов в кристаллической решетке многие минералы образуют хорошо выраженные правильные природные многогранники - **кристаллы**. В строении, свойствах и процессах образования кристаллов наблюдаются строгие закономерности, изучением которых занимается кристаллография.

В любом природном кристаллическом многограннике различают его элементы ограничения (ограничения): грани, ребра, вершины, углы. **Грани** - это плоскости, ограничивающие многогранник. **Ребра** - линии пересечения граней. Две пересекающиеся грани образуют **двугранный угол**. **Вершины** - это точки пересечения ребер или схождения тождественных граней.

Все элементы ограничения (ограничения) связаны между собой зависимостью по формуле Эйлера:

$$h + l = r + 2,$$

где: **h** - число граней; **l** - число ребер; **r** - число вершин.

В природных условиях кристаллы одного и того же минерала часто имеют искаженную форму и величину граней, недоразвитые вершины и ребра. При этом величина и форма граней в кристаллах одного и того же минерала могут значительно меняться. Углы же

между соответствующими гранями (и ребрами) кристаллов различных форм одного и того же минерала всегда остаются постоянными. В этом заключается один из основных законов кристаллографии - **закон постоянства углов**, который был открыт в 1669 г. Николой Стено. Этот закон позволил точно характеризовать всякое вещество, встречающееся в виде кристаллов, отличать различные кристаллические вещества по углам многогранников. Измерение двугранных углов кристаллов имеет большое значение для диагностики минералов.

**Задание:**

1. На моделях пространственных решеток минералов определить узлы, узловые ряды, и плоские сетки.
2. Просмотреть основные свойства кристаллических веществ на минералах. Проверьте, как делится толстая пластинка слюды (мусковита или биотита) в разных направлениях, как изменяется твердость у дистена и как изменяется цвет минерала в турмалине.
3. На моделях многогранников (ромбоэдр, октаэдр, ромбододекаэдр и др.) определить элементы огранения (ограничения) и, пользуясь формулой Эйлера проверить соотношение элементов огранки кристаллических многогранников. Результаты занести в таблицу 1.

**Таблица 1**

**Соотношение элементов огранки некоторых многогранников**

Многогранник	Число граней	Число ребер	Число вершин

**Контрольные вопросы**

1. Какие тела называются кристаллическими?
2. Чем отличаются кристаллические тела от аморфных?
3. Что такое пространственная решетка?
4. Перечислите и дайте определение элементам пространственной решетки.
5. Перечислите основные свойства кристаллических веществ.
6. Определите понятия «однородность» и «анизотропия»
7. В чем заключается способность кристаллов самоограняться?
8. Перечислите элементы огранения (ограничения) кристаллов.
9. Что показывает формула Эйлера.
10. Как связаны между собой элементы пространственной решетки и элементы огранения (ограничения)?

## Лабораторная работа № 2

### Учение о кристаллографических символах. Метод кристаллографического индцирования.

**Цель работы:** Овладеть навыками определения кристаллографических осей на модели кристаллического многогранника, определения имеющихся в нем кристаллографических символов граней, узлов и направлений.

#### Кристаллографические символы плоскости

Описание геометрического многогранника путем перечисления элементов симметрии и простых форм не всегда позволяет его полностью охарактеризовать. Для полного описания кристалла необходимо выяснить взаимное положение его граней в пространстве. Для их обозначения применяются **кристаллографические символы**, которые однозначно определяют положение каждой грани кристалла тремя целыми числами относительно некоторых координатных осей и исходной грани, принятой за единичную (масштабную).

Выбор кристаллографических осей и единичной грани называется установкой кристалла. В кристаллографии принята правая система координат (рис. 5), то есть положительными направлениями считаются: для оси X – вперед на наблюдателя, Y – вправо от наблюдателя, Z – вверх. Отрицательными направлениями считаются те, которые отсекаются отрезками, противоположного положительным направления. Для кристаллов тригональной и гексагональной сингоний принимаются оси – X, Y, U, Z, а для остальных сингоний – X, Y, Z. Координатные оси в большинстве случаев совпадают с осями и плоскостью симметрии или перпендикулярами к ней.

Единичная грань всегда имеет символ (111), независимо от того равные или неравные отрезки она отсекает на координатных осях. Если грань пересекает только одну координатную ось, то в символе грани пишется единица (1) на соответствующей этой оси позиции. В символе грани, параллельной одной из координатных осей, индекс, соответствующий этой оси равен нулю (0, см. рис. 6). Например, 001 – грань параллельная

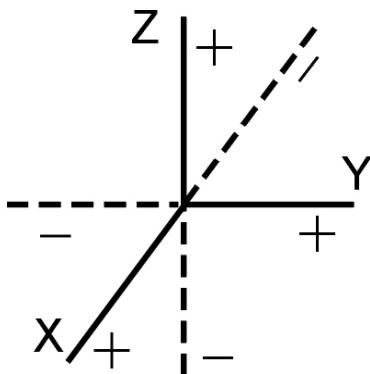


Рис. 5. Кристаллографические оси

кристаллографическим осям x и y и пересекает ось Z. Над символом грани, пересекающей отрицательное направление координатной оси, ставится знак минус (например,  $\bar{1}10$ ). Чем

больший отрезок отсекает грань на координатной оси, тем меньший символ ей соответствует.

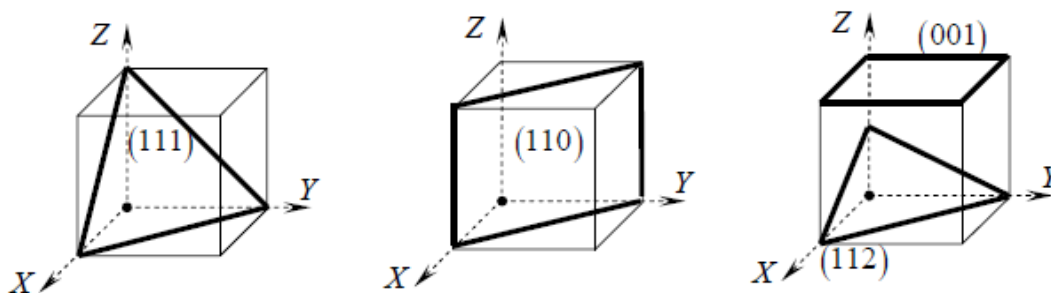


Рис. 6. Символы плоскости в кубических кристаллах

Учение о символах граней основывается на одном из важнейших законов кристаллографии – законе рациональности отношений параметров (закон Гаюи). Закон Гаюи гласит: двойные отношения параметров (рис. 7), отсекаемых двумя любыми гранями кристалла на трех пересекающихся ребрах его, равны отношениям целых и сравнительно малых чисел:

$$\frac{OA_x}{OA_1} : \frac{OB_x}{OB_1} : \frac{OC_x}{OC_1} = p : q : r$$

где:  $OA_x, OB_x, OC_x$  – параметры грани  $A_xB_xC_x$ ;  $OA_1, OB_1, OC_1$  – параметры грани  $A_1B_1C_1$ ;  $p, q, r$  – целые небольшие числа.

Наличие целых чисел объясняется решетчатым строением кристаллов. Ребра кристалла соответствуют рядам кристаллической решетки, грани – плоским сеткам. Плоские сетки (грани), пересекая три ряда решетки (ребра), образуют на них отрезки (параметры), содержащие целые числа промежутков между узлами решетки (элементарными частицами).

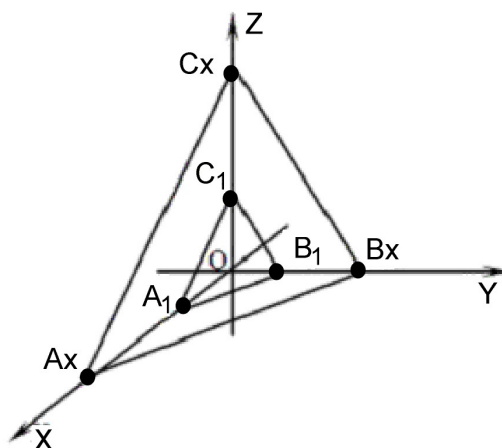


Рис. 7. Параметры граней кристалла и кристаллографические оси: для грани  $A_1B_1C_1$  – параметры  $OA_1, OB_1, OC_1$ ; для грани  $A_xB_xC_x$  – параметры  $OA_x, OB_x, OC_x$

Закон Гаюи связывает внешнюю форму кристаллов с их решетчатым внутренним строением. Для удобства математических преобразований пользуются обратными величинами отношений параметров, получивших название **индексов Миллера**:



$$\frac{OA_1}{OA_x} : \frac{OB_1}{OB_x} : \frac{OC_1}{OC_x} = \frac{1}{p} : \frac{1}{q} : \frac{1}{r} = h : k : l$$

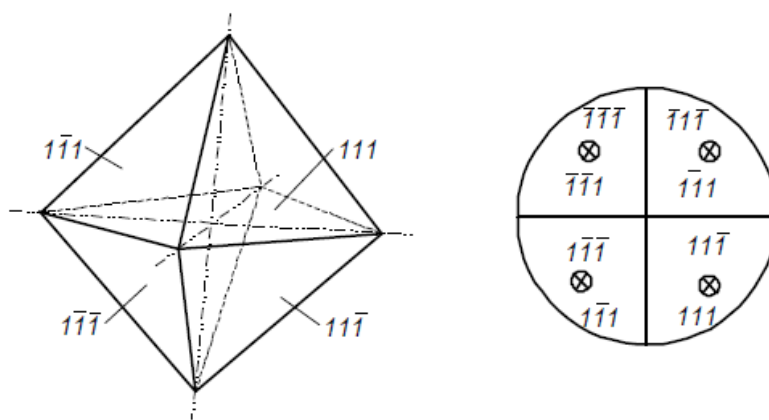
где  $h, k, l$  – целые числа

**Символ грани** записывают  $(hkl)$ , где  $h$  – символ соответствующий оси  $X$ ,  $k$  – символ соответствующий оси  $Y$  и  $l$  – символ соответствующий оси  $Z$ .

Таким образом, кристаллографические индексы плоскости — это три наименьших целых числа, которые обратно пропорциональны числу осевых единиц, отсекаемых плоскостью на координатных осях. В кристаллографической практике метод индексов Миллера получил широкое распространение. Следует иметь в виду, что параллельные грани имеют один и тот же символ, соответствующий грани ближайшей к началу координат.

Иногда индексы плоскости записывают в фигурных скобках  $\{hkl\}$ . Эта запись означает символ совокупности идентичных плоскостей. Такие плоскости проходят через одинаковые узлы в пространственной решетке, симметрично расположены в пространстве и характеризуются одинаковым межплоскостным расстоянием. Так, плоскости октаэдра (рис. 8) в кубической сингонии принадлежат к одной совокупности  $\{111\}$ , они представляют грани октаэдра и имеют следующие индексы:  $\{111\} \rightarrow (111), (\bar{1}11), (1\bar{1}1), (11\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}1), (1\bar{1}\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ . Символы всех плоскостей совокупности находят путем перестановки местами и изменения знаков отдельных индексов.

На законе целых чисел основан метод кристаллографического индицирования, который позволяет определить относительные расположения граней и рёбер кристаллов при



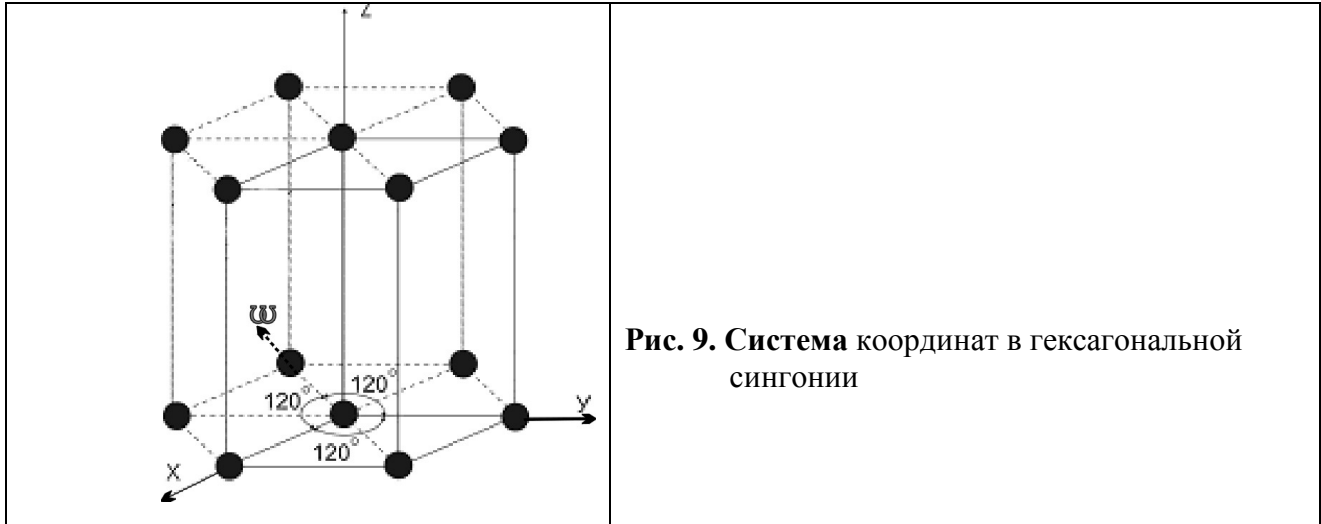
**Рис. 8. Кристаллографические символы октаэдра**

помощи индексов. Для нахождения кристаллографических индексов плоскости находим отрезки, отсекаемые плоскостью на координатных осях (в осевых единицах) и берем обратные значения этих величин. Приводим отношение полученных чисел к отношению трех наименьших целых чисел, полученные три числа заключаем в круглые скобки.

Для примера найдем индексы плоскости, которая отсекает на координатных осях следующие отрезки:  $\frac{1}{3}; \frac{1}{6}; \frac{1}{6}$ . Так как длины отрезков даны в осевых единицах, находим их

обратные значения и берем отношения  $h : k : l = 3 : 6 : 6$ . Сократив на 3, приведем отношение полученных величин к отношению трех целых наименьших чисел:  $h : k : l = 1 : 2 : 2$ . Индексы плоскости берем в круглые скобки (122).

В тригональной и гексагональной сингониях индцирование плоскостей имеет некоторые особенности, так как в них система координат имеет 4 оси: одна вертикальная ( $z$ ) и три горизонтальных ( $x$ ,  $y$ ,  $\omega$ ), параллельных ребрам оснований и составляющих друг с другом угол  $120^\circ$  (рис. 9).



**Рис. 9.** Система координат в гексагональной сингонии

В этих сингониях любая плоскость характеризуется четырьмя индексами ( $hkil$ ), где третий индекс  $i$  соответствует оси  $\omega$  и равен сумме значений  $(h+k)$ , но с противоположным знаком, например,  $(10\bar{1}1)$ .

### Кристаллографические индексы узла

Кристаллографические индексы узла — это его координаты, взятые в долях осевых единиц и записанные в скобках. При этом координата, соответствующая оси  $x$ , обозначается буквой  $u$ , для оси  $y$  —  $v$ , для оси  $z$  —  $w$ . Символ узла записывается в двойных квадратных скобках и имеет вид  $[[uvw]]$ . Символы некоторых узлов в элементарной ячейке показаны на рисунке 10.

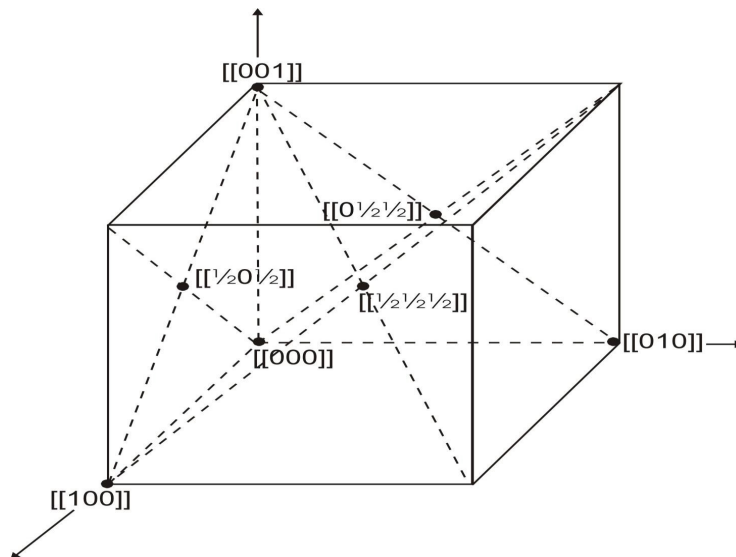


Рис. 10. Некоторые узлы в элементарной ячейке

### Кристаллографические символы направлений (ребер)

Символ направления представляет собой совокупность истинных координат узла, лежащего на данном направлении. Так как все параллельные направления в кристалле равнозначны, то для определения символов ребер всегда можно перенести ребро параллельно самому себе в начало координат. Тогда направление ряда определится двумя точками: началом координат и любым узлом ряда. Символ этого узла принимают за символ ряда и записывают его в квадратные скобки:  $[rst]$ . Индексы в символе могут быть как положительные, так и отрицательные. Таким образом, символ узла характеризует семейство параллельных рядов, один из которых проходит через него, и, соответственно, параллельные ребра кристаллического многогранника.

Символ узловой или кристаллографической плоскости  $(hkl)$  и символ лежащего в этой плоскости узлового ряда или кристаллографического направления  $[rst]$  связаны соотношением  $hr+ks+lt=0$ . Это фундаментальное уравнение, выведенное Вейсом, связывает символы грани и ребра, параллельного этой грани. Пользуясь этим уравнением и зная символы двух граней  $(h_1k_1l_1)$  и  $(h_2k_2l_2)$  можно определить символ ребра, по которому они пересекаются. Для 1-й грани  $-h_1r + k_1s + l_1t = 0$  Для 2-й грани  $-h_2r + k_2s + l_2t = 0$ . Такие расчеты удобно производить методом перекрестного умножения.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc|ccc|c}
 h_1 & & & k_1 & l_1 & & h_1 & k_1 & & l_1 \\
 & & & \swarrow & \searrow & & \swarrow & \searrow & & \\
 & & & & & & & & & \\
 h_2 & & & k_2 & l_2 & & h_2 & k_2 & & l_2
 \end{array} \\
 \hline
 r : s : t = (k_1l_2 - k_2l_1) : (h_2l_1 - h_1l_2) : (h_1k_2 - h_2k_1).
 \end{array}$$

Для примера вычислим символ ребра  $[rst]$ , лежащего на пересечении двух граней  $(121)$  и  $(210)$ . Для этого записываем символ первой грани дважды в одной строке и символ другой грани в другой строке

$$\begin{array}{ccc}
 121121 \\
 210210
 \end{array}$$

Отделяем по вертикали первый и последний столбец и производим перекрестное умножение этих индексов, начиная слева:  $(2*0-1*1) : (1*2-0*1) : (1*1-2*2) = (0-1) : (2-0) : (1-4) = (\bar{1} : 2 : \bar{3})$ . Символ ребра  $[rst]$  будет  $[\bar{1} \ 2 \ \bar{3}]$ .

Выполняя те же действия, можно получить символы грани, исходя из символов двух ребер, если эта грань параллельна двум ребрам или проходит через них.

**Задание:**

1. Получить у преподавателя модель кристалла и произвести его установку относительно кристаллографических осей в соответствии с правилами. Выполнить чертеж фигуры с нанесением кристаллографических осей.
2. Произвести определение символов всех граней и ребер для исследуемого кристалла.
3. Произвести определение символов всех граней куба.
4. Решить следующие задачи:
  - 4.1. Единичная грань кристалла отсекает на координатных осях XYZ отрезки, равные соответственно 3, 3 и 4 см. Определить символ грани, отсекающей на тех же осях отрезки 3, 6 и 6 см.
  - 4.2. Найти индексы плоскости (табл. 2), которая отсекает на координатных осях следующие отрезки (в осевых единицах):
  - 4.3. Определить символы ребер, образованных следующими парами граней (табл. 3):
  - 4.4. Определить символы граней по символам их ребер (табл. 4):

**Таблица 2**

**Варианты контрольных заданий**

№ вар	x	y	z	№ вар	x	y	z
1	1	5	$\frac{1}{2}$	8	4	1	$\frac{1}{2}$
2	$\frac{1}{3}$	2	3	9	$\frac{1}{2}$	6	3
3	2	$\frac{1}{3}$	4	10	2	$\frac{1}{3}$	3
4	1	$\frac{1}{2}$	3	11	4	2	1
5	1	2	3	12	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	6

6	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	2	13	$\frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{2}$
7	3	1	$\frac{1}{2}$	14	$\frac{1}{2}$	3	$\frac{1}{3}$

Таблица 3

**Варианты контрольных заданий**

№	Символы граней		№	Символы граней	
	1	(121)		(211)	7
2	(121)	(112)	8	(012)	(021)
3	(112)	(211)	9	(102)	(201)
4	(123)	(132)	10	(221)	(122)
5	(132)	(231)	11	(321)	(312)
6	(231)	(321)	12	(312)	(213)

Таблица 4

**Варианты контрольных заданий**

№	Символы ребер		№	Символы ребер	
	1	[110]		[011]	7
2	[110]	[101]	8	[101]	[110]
3	[011]	[101]	9	[110]	[011]
4	[101]	[011]	10	[011]	[110]
5	[011]	[101]	11	[210]	[102]
6	[102]	[011]	12	[02]	[210]

**Контрольные вопросы**

1. Что такое кристаллографическая система координат? Как располагаются и обозначаются кристаллографические оси?
2. Сформулируйте закон рациональности отношений параметров.

3. Что такое единичная грань?
4. Как определять символы плоскостей кристаллической решетки?
5. Как обозначаются символы граней простых форм?
6. Понятие и определение индексов узлов решетки
7. Как определяется кристаллографический символ направления?
8. Что такое зона в кристалле?
9. Дайте характеристику символам Миллера.
10. Каким образом определяются индексы Вейса?
11. В чем заключается правило перекрестного умножения?
12. В каких сингониях вводится дополнительный индекс для обозначения символа грани?

### Лабораторная работа № 3

#### Кристаллографические проекции.

#### Решение кристаллографических задач с помощью сетки Вульфа

**Цель работы:** ознакомиться с принципами построения сферических, стереографических и гномостереографических проекций кристаллов; практическое овладение приемами решения кристаллографических задач с помощью сетки Вульфа

#### Кристаллографические проекции

Для получения полной характеристики об огранке кристалла необходимо определить не только элементы его симметрии, но и зафиксировать грани кристалла относительно этих элементов. Для этого используют сферические, стереографические и гномостереографические проекции. Кристаллографические проекции изображают не сам кристалл, а его комплексы (рис. 11): кристаллический и полярный.

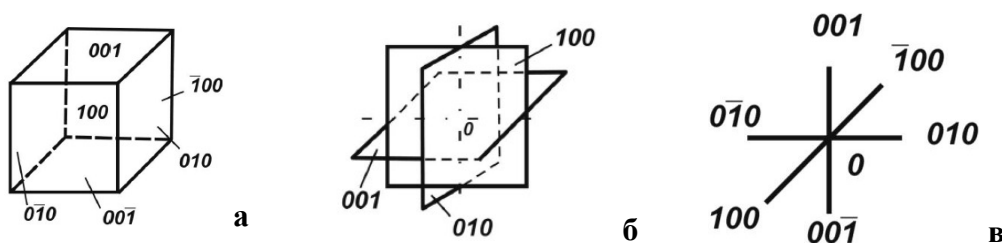
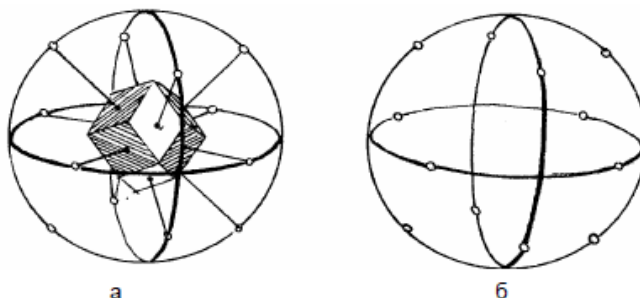


Рис. 11. Куб (а), его кристаллический (б) и полярный (в) комплексы

**Кристаллический комплекс** это совокупность сведенных в одну точку граней (плоскостей) кристалла. Строится путем переноса граней и ребер кристалла параллельно самим себе в единую точку (центр кристалла), в которой они пересекались бы.

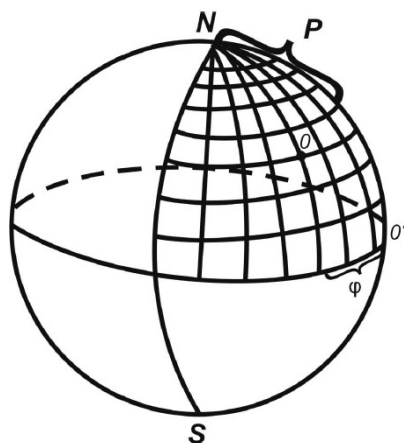
**Полярный комплекс** это совокупность нормалей ко всем граням (плоскостям) кристалла, исходящих из одной точки - центра проекций.

**Сферическая проекция** (рис. 12) представляет собой кристалл, вписанный в сферу произвольного радиуса таким образом, что центр тяжести кристалла совпадает с центром сферы. Перпендикуляры (нормали) к граням кристалла пересекают сферу, образуя на её поверхности точки пересечения, называемые **полюсами граней**.



**Рис. 12. Сферическая проекция ромбододекаэдра: а – сферическая проекция нормалей к граням кристалла; б – отдельная полная сферическая проекция кристалла**

Положение полюсов можно охарактеризовать сферическими координатами (рис. 13): **широтой ( $\rho$ )** или **полярным расстоянием**, которая отсчитывается вдоль любого меридиана от  $0^\circ$  (северный полюс) до  $180^\circ$  (южный полюс) и **долготой ( $\phi$ )** измеряемой по экватору от меридиана, принятого за нулевой, до меридиана, проходящего через заданную точку на сфере. Долгота  $\phi$  отсчитывается по часовой стрелке и изменяется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Прямая, проходящая вертикально через центр сферы, называется **полярной осью**, а точки ее пересечения со сферой – **северным (N) и южным (S) полюсами**. Дуги больших кругов, соединяющих полюса, являются **меридианами**.

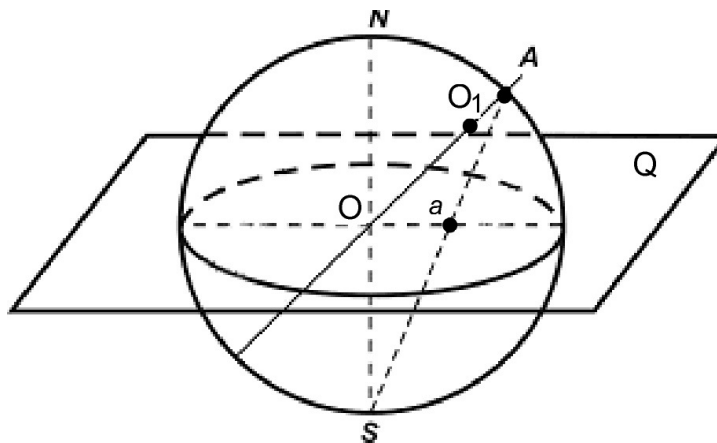


**Рис. 13. Сферические координаты на поверхности сферы**

Сферическая проекция наглядна, но для практического её применения удобнее пользоваться проекцией кристалла на экваториальную плоскость сферы. Для этого выполняют стереографические и гномостереографические проекции.

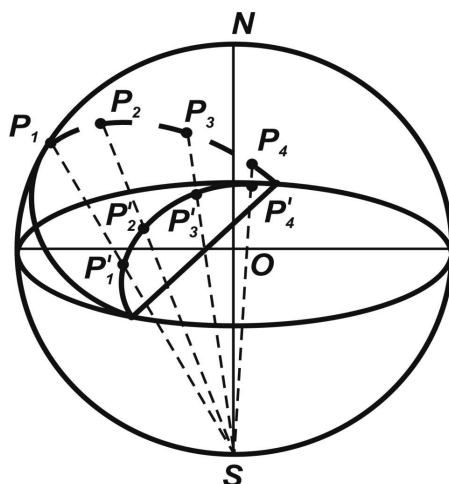
**Стереографическая проекция** строится по кристаллическому комплексу граней кристалла и применяется главным образом для изображения элементов симметрии кристалла, а так же симметрии и анизотропии его физических свойств. Эта проекция позволяет изображать исследуемые объекты на плоскости. За плоскость проекции

выбирается экваториальная плоскость  $P$  (рис. 14), на которую сфера проектируется в виде круга проекций. Чтобы получить стереографическую проекцию направления, его сферическую проекцию (точку, лежащую на сфере проекций) соединяют прямой линией с противоположащим полюсом сферы. Для направления  $OO_1$  точку  $A$  соединяют с южным полюсом  $S$ . Точка пересечения луча  $AS$  с основным кругом проекции (точка  $a$ ) и есть стереографическая проекция направления  $OO_1$ . Таким образом, стереографическая проекция направления изображается **точкой** на основном круге проекций.



**Рис. 14. Стереографическая проекция направления  $OO_1$**

Построение стереографической проекции плоскости производится по тем же законам, что и направления. Плоскость кристаллического комплекса, проходящую через его центр, точку  $O$  продолжают до пересечения со сферой проекций и получают сферическую проекцию плоскости — окружность. Далее переносят сферическую проекцию на основной круг проекции, для чего каждую точку окружности на сфере последовательно соединяют прямой линией с соответствующим полюсом — северным или южным. Геометрическое место точек пересечения этих прямых с плоскостью проекций и есть стереографическая проекция плоскости (рис. 15). Таким образом, стереографическую проекцию плоскости изображают **линиями**.



**Рис. 15. Построение стереографической проекции плоскости**

**Гномостереографическая проекция** строится по полярному комплексу и представляют собой проекцию на плоскость нормалей к граням кристалла. Такую проекцию



удобнее использовать при определении взаимного расположения плоскостей. Принцип построения этой проекции идентичен построению стереографической проекции.

### Решение кристаллографических задач с помощью сетки Вульфа

Для решения количественных задач с использованием стереографических и гномостереографических проекций пользуются координатными градусными сетками, которые представляют собой стереографическую проекцию всей системы меридианов и параллелей, нанесённых на поверхность сферы. Наибольшее применение нашла экваториальная сетка, предложенная русским кристаллографом Ю. В. Вульфом и которая получила его название. Такая сетка представляет собой комбинацию проекций больших (меридианы на сетке) и малых (параллели на сетке) кругов.

Сетка Вульфа (рис. 16) чертится на круге диаметром 20 см, линии меридианов и параллелей проводятся через два градуса. Положение любой точки на сетке Вульфа определяется двумя сферическими координатами – долготой  $\varphi$  и полярным расстоянием  $\rho$ .

Как было уже отмечено выше, координата  $\varphi$  меняется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , а координата  $\rho$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , причем, отсчет  $\rho$  при  $0^\circ < \rho < 90^\circ$  ведется от центра сетки по одному из ее диаметров к основному кругу и при  $90^\circ < \rho < 180^\circ$  от основного круга к центру.

Все работы выполняются на кальке, которая кладется на шаблон сетки и в центре крестиком отмечается центр проекции, это и будет нулевая точка. Затем на основном (периферийном) круге сетки по часовой стрелке черточкой отмечаются азимутальные углы (долгота). На правом конце экватора сетки ставят нулевую точку. По этим точкам всегда можно кальку путем концентрического вращения привести в начальное положение. Построения на кальке производятся только простым карандашом. При этом надо всегда следить за тем, чтобы крестик на кальке совпадал с центром на сетке, а правый конец экватора сетки с горизонтальной черточкой.

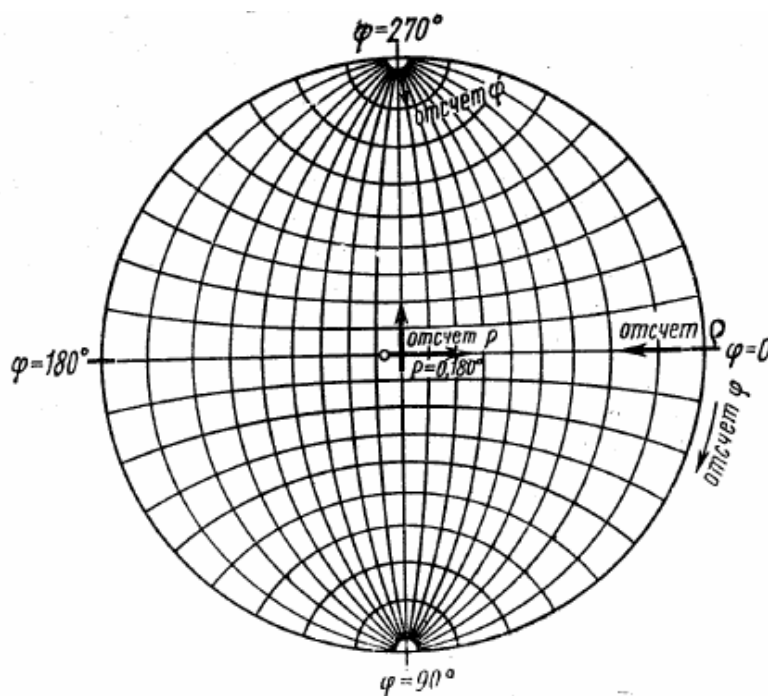


Рис. 16. Сетка Вульфа и направление отсчета координат на ней

При решении задач следует помнить, что верхние грани кристалла принято обозначать точками, обведёнными маленькой окружностью, точки, стереографические проекции направлений, лежащих в нижнем полушарии отмечаются крестиком. В случае, если грани накладываются, то крестик вписывается в кружок. Рядом с проставленной точкой пишется номер (или буква) грани.

### Примеры решения задач

**Задача 1.** Построить стереографические проекции двух направлений со сферическими координатами  $\varphi_1, \rho_1$  и  $\varphi_2, \rho_2$ .

Решение:

1) Наложить кальку на сетку Вульфа. Отметить крестиком центр кальки и горизонтальной черточкой правый конец экватора.

2. По кругу проекций от горизонтальной черточки (нулевого индекса) по часовой стрелке отсчитываем первую сферическую координату – заданный угол  $\varphi$  и отмечаем результат на внешнем круге вспомогательным штрихом.

3) Концентрическим вращением кальки вокруг центра проекций совмещаем вспомогательный штрих с концом ближайшего диаметра сетки и по этому диаметру от центра проекций ( $\rho = 0$ ), отсчитать заданный угол  $\rho$  и поставить точку. Она и будет стереографической проекцией направления, заданного сферическими координатами  $\varphi$  и  $\rho$ . Возвращаем кальку в исходное положение.

В случае, если полярное расстояние какого-либо направления больше  $90^\circ$ , стереографическая проекция будет расположена в нижней полусфере. Отсчет  $\rho$  будет производиться от центра проекций в направлении круга и обратно — от круга к центру. Такая проекция обозначается крестиком.

**Задача 2 (обратная).** Определить сферические координаты направления, заданного стереографической проекцией.

Решение:

1. Вращением кальки приводим заданную точку (стереографическую проекцию направления) на ближайший диаметр сетки.

2. По этому диаметру от центра сетки до заданной точки отсчитываем сферическую координату  $\rho$  и отмечаем вспомогательной точкой на круге проекций тот конец диаметра, в направлении которого лежит наша точка.

3. Приводим кальку в исходное положение и по кругу проекций отсчитываем сферическую координату  $\varphi$  от нулевого индекса по часовой стрелке до вспомогательной черточки. Это и будут сферические координаты направления.

**Задача 3. Провести дугу большого круга через две точки, нанесенные на круг проекций при решении задачи 1.**

Решение:

1. Вращая кальку, добиваемся того, чтобы обе заданные точки 1 и 2 оказались на одной из вспомогательных меридиональных дуг сетки Вульфа.
2. Провести на кальке карандашом этот меридиан, который и будет являться дугой большого круга.
3. Возвращаем кальку в исходное положение.

*Примечание:* Если заданные точки представляют собой гномостереографические проекции граней, то найденная дуга большого круга является гномостереографической проекцией ребра, по которому пересекаются эти грани; если же точки - стереографические проекции ребер, то найденная дуга будет являться стереографической проекцией грани, в плоскости которой лежат эти ребра.

**Задача 4. Измерить угловое расстояние ( $\alpha$ ) между двумя точками, заданными их стереографическими проекциями при решении задачи 1.**

Угловые расстояния на сфере измеряются по дугам больших кругов, т.е. по ее вспомогательным меридианам или экватору.

Решение:

Если обе точки лежат на одной половине сферы, то решение задачи выполняется в следующей последовательности:

1. Вращаем кальку вокруг центра проекций и совмещаем точки 1 и 2 с одной из меридиональных дуг сетки Вульфа (задача 3).
2. По этой меридиональной дуге отсчитываем количество градусов, заключённых между точками 1 и 2 – это и будет угловое расстояние между двумя точками.  
В том случае, если точки лежат в разных полусферах:
  1. Поворачиваем кальку так, чтобы точки попали на меридианы, симметричные относительно центра сетки.
  2. Отсчитываем угол по одному меридиану от точки до полюса, а по другому от полюса до точки.
  3. Складываем полученные углы.

*Примечание:* Если заданные точки являются стереографическими проекциями направлений или гномостереографическими проекциями плоскостей, то найденный угол соответствует углу между этими направлениями или плоскостями.

**Задача 5. Найти полюс дуги большого круга (проведенной в задаче 2) и определить его сферические координаты.**

Полюс дуги большого круга это точка, равноотстоящая от всех точек дуги на  $90^\circ$ .

Решение:

1. Накладываем кальку на сетку и вращением кальки вокруг центра проекций совмещаем дугу большого круга (задача 3) с одним из меридианов.

2. Отсчитываем угол  $90^\circ$  от точки пересечения дуги с экватором по направлению к центру сетки.

3. Отмечаем кружком найденную точку – это и будет полюс дуги большого круга.

Для определения координат полюса воспользуемся обратной задачей 2.

*Примечание:* Если заданная дуга — стереографическая проекция плоскости, то найденный полюс является стереографической проекцией нормали к этой плоскости, т.е. гномостереографической проекцией плоскости.

**Задача 6 (обратная).** По заданному полюсу найти дугу большого круга, отвечающую его экватору.

Решение:

1. Вращаем кальку и приводим заданный полюс на горизонтальный диаметр сетки.

2. Отсчитываем по горизонтальному диаметру в направлении центра сетки  $90^\circ$  (перейдя за него) и обводим проходящую здесь меридиональную дугу.

Эта и будет искомой экваториальной дугой относительно заданного полюса.

*Примечание:* Если заданный полюс выражает гномостереографическую проекцию грани, то найденная экваториальная дуга соответствует стереографической проекции той же грани. Если заданный полюс представляет стереографическую проекцию ребра, то найденная дуга отвечает его гномостереографической проекции.

Обратите внимание на решение задач 5 и 6, так как они содержат механизм переходов от стереографической проекции к гномостереографической и обратно.

**Задача 7.** Найти точку, диаметрально противоположную данной.

Две точки называются диаметрально противоположными, если они лежат на концах одного и того же диаметра сферы.

Решение:

1. Вращением кальки вокруг центра проекций приводим точку на один из диаметров сетки, отсчитываем по нему ее расстояние до центра.

2. Отсчитываем это же расстояние от центра в противоположную сторону и находим искомую точку, отмечаем крестиком, так как она лежит в нижнем полушарии.

**Задача 8.** Найти угол  $\beta$  между двумя дугами больших кругов (дуги (точки 1, 2) и (точки 1, 3)).

Решение:

Есть два способа решения этой задачи.

1 способ.

1. Вращением кальки совмещаем точку пересечения дуг (в данном случае – точку 1, которая является вершиной измеряемого угла) с линией экватора.

2. От этой точки по линии экватора в центр проекций отсчитываем  $90^\circ$  и проводим дугу.

Количество градусов, заключённое в этой дуге между точками пересечения с ней двух заданных дуг (1, 2) и (1, 3) и является величиной искомого угла  $\beta$ .

2 способ. Дело в том, что искомый угол  $\beta$  равен дополнительному углу  $\alpha$  между полюсами двух больших кругов. В этом случае находим полюсы этих дуг (дуги (1, 2) и (1, 3)) и определяем угол  $\alpha$  между ними (см. задачу 3), а затем находим угол  $\beta$ , который равен  $\beta = 180 - \alpha$ .

*Примечание.* Если заданные дуги больших кругов являются стереографическими проекциями граней, то измеренный угол представляет собой угол между гранями.

### Задание:

Используя исходные данные (согласно варианта, табл. 5) решить следующие задачи:

1. Построить стереографические проекции направлений 1, 2 и 3, заданных сферическими координатами  $\varphi$  и  $\rho$  (таблица).
2. Определить сферические координаты стереографических направлений, заданных преподавателем.
3. Провести дуги больших кругов через точки (1 и 2) и (1 и 3).
4. Измерить угол  $\alpha$  между точкам 1 и 2 и 1 и 3.
5. Построить полюса больших кругов, заданных точками (1 и 2) и (1 и 3), и найти их сферические координаты  $P_{(1,2)}$  и  $P_{(1,3)}$ .
6. По заданному преподавателем полюсу найти дугу большого круга, отвечающую его экватору.
7. Найти точки, диаметрально противоположные точкам 1, 2, 3, обозначив их цифрой со штрихом и определить их координаты.
8. Найти угол между двумя дугами больших кругов (дуги (1, 2) и (1, 3)).
9. Результаты проведенных построений и измерений; таблицу граничных углов оформить в виде отчета.

Таблица 5

Сферические координаты направлений (варианты контрольных заданий)

№ Варианта	Координаты направлений (в град <sup>0</sup> )					
	1		2		3	
	$\varphi$	$\rho$	$\varphi$	$\rho$	$\varphi$	$\rho$
1	77	63	65	41	55	45
2	149	24	136	85	272	36
3	95	69	267	49	181	68
4	179	45	253	25	95	25
5	42	89	121	53	198	56
6	42	90	307	79	165	38
7	61	75	43	13	156	78
8	127	74	234	12	62	32
9	143	82	96	63	273	25
10	96	71	26	24	165	59

### Контрольные вопросы

1. Для чего используются кристаллографические проекции?
2. Чем кристаллический комплекс отличается от полярного комплекса?

3. Какие типы проекций кристалла знаете?
4. Каков принцип построения сферической проекции?
5. Что представляет собой стереографическая проекция кристалла?
6. В чем преимущества стереографических проекций перед другими видами проекций?
7. Назовите сферические координаты и дайте им характеристику.
8. В каких интервалах могут меняться значения сферических координат?
9. По какому комплексу строится гномостереографическая проекция?
10. Для чего используется сетка Вульфа?
11. Что собой представляют сетка Вульфа?
12. Как найти точку по заданным сферическим координатам?
13. Как измерить угловое расстояние между двумя точками?
14. Что называется дугой большого круга?

#### **Лабораторная работа № 4**

##### **Определение элементов симметрии и классов симметрии**

##### **на моделях кристаллических многогранников.**

**Цель работы:** на моделях кристаллов научиться определять элементы симметрии, составлять формулы симметрии, определять сингонию, категорию и вид симметрии.

#### **Симметрии кристаллов**

Симметричная фигура состоит из закономерно повторяющихся равных частей. Такая закономерная повторяемость элементов ограничения (ребер, граней, углов) называется **симметрией**. Закономерную повторяемость можно заметить, если: 1) рассечь кристалл плоскостью симметрии; 2) вращать его вокруг определенной оси; 3) сопоставить расположение элементов ограничения кристалла относительно точки, лежащей внутри него.

Воображаемые плоскости, прямые линии и точки, с помощью которых можно обнаружить симметрию, называются **элементами симметрии**. К ним относятся центр, плоскость и оси симметрии.

#### **Центр симметрии**

**Центром симметрии (С)** или центром инверсии (от лат. «инверсио» – переворачиваю) называется точка внутри кристалла (рис. 17), от которой в диаметрально противоположных направлениях на равных расстояниях располагаются одинаковые элементы ограничения (параллельные грани, ребра, вершины).

Кристаллы могут иметь или не иметь центра симметрии, но если он есть, то только один. При наличии центра симметрии в кристалле каждой грани отвечает другая грань, равная и параллельная (или обратно параллельная) первой. Для нахождения центра симметрии кладем модель многогранника на стол. Если этой грани есть равная и параллельная (или обратно параллельная) грань, то многогранник обладает центром симметрии. Таким образом проверяется каждая грань кристалла, если хотя бы для одной грани нет равной и параллельной, центр симметрии в данном многограннике отсутствует.

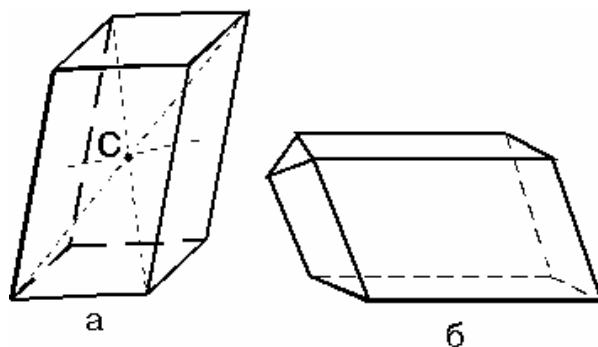


Рис. 17. Кристаллы с центром симметрии (а) и без него (б)

### Плоскость симметрии

**Плоскость симметрии (P)** - это такая плоскость, которая делит фигуру на две зеркально-равные части (рис. 18). Подобно отражению предмета в зеркале, все точки тела, лежащие по одну сторону такой плоскости, повторяются на равном расстоянии по другую сторону ее.

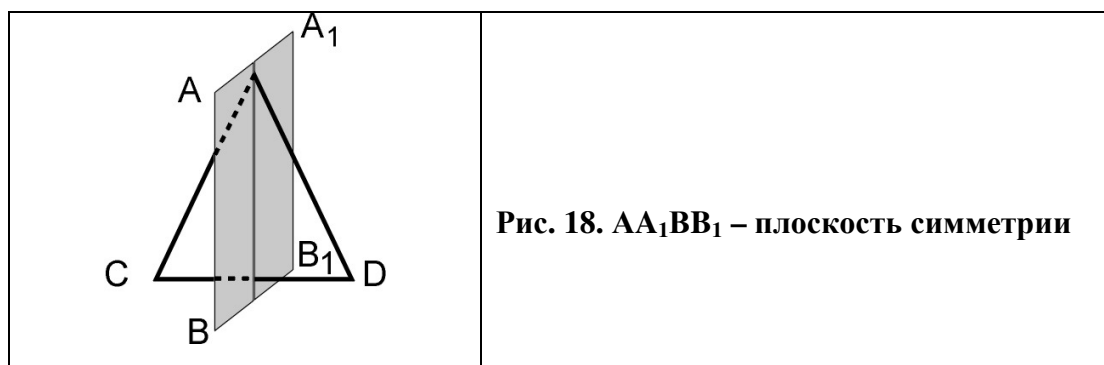


Рис. 18.  $AA_1BB_1$  – плоскость симметрии

Плоскость симметрии не является обязательным для всех многогранников элементом симметрии. В некоторых кристаллах ее нет (микроклин). В кристаллических многогранниках может быть одна, две, три, четыре, пять, шесть, семь и девять плоскостей симметрии. Восьми или более девяти плоскостей симметрии в конечных кристаллических многогранниках не бывает. На рисунке 19 показан кристалл кубической формы (галит, пирит, галенит), который имеет максимальное число плоскостей симметрии - девять.

Относительно элементов ограничения кристалла плоскости симметрии могут располагаться следующим образом:

- проходить через середины граней перпендикулярно им (рис. 19, а);
- проходить вдоль ребер, образуя равные углы с одинаковыми гранями и ребрами (рис. 19, б и в);
- лежать перпендикулярно ребрам (рис. 19, г).

При нахождении плоскостей симметрии и их подсчете многогранник необходимо держать неподвижно в одном положении, для того чтобы одну и ту же плоскость не сосчитать несколько раз и мысленно рассекать его на равные части.

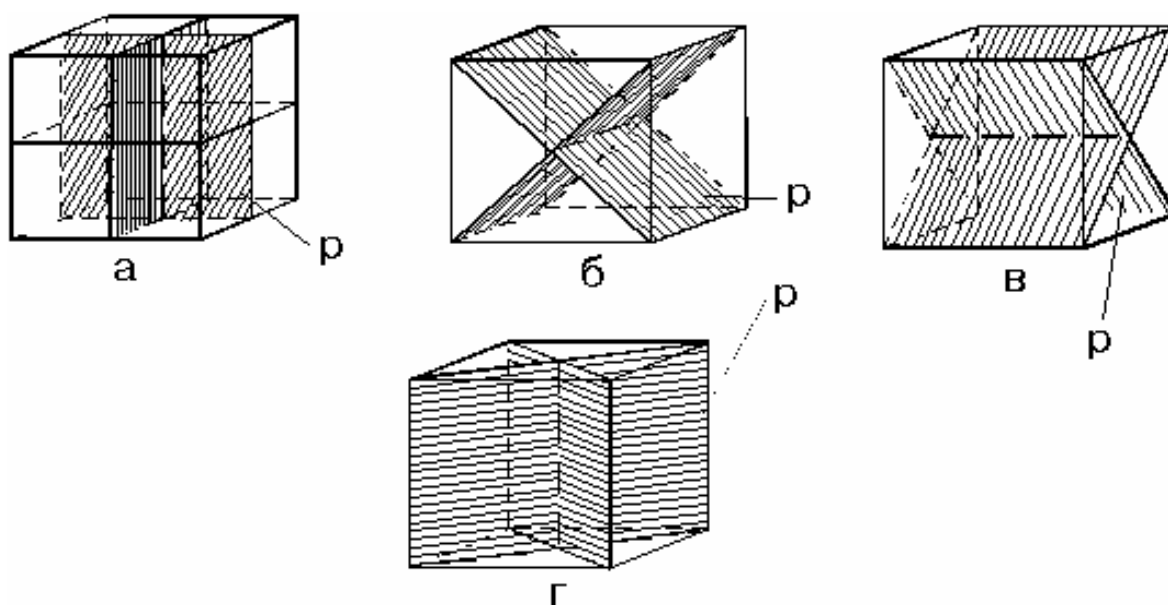


Рис. 19. Плоскости симметрии (P) в кристалле кубической формы: а - плоскости симметрии проходят перпендикулярно через середины граней многогранника; б, в, г - плоскости симметрии проходят через два параллельных ребра многогранника, но не перпендикулярны ни одному из ребер

### Оси симметрии

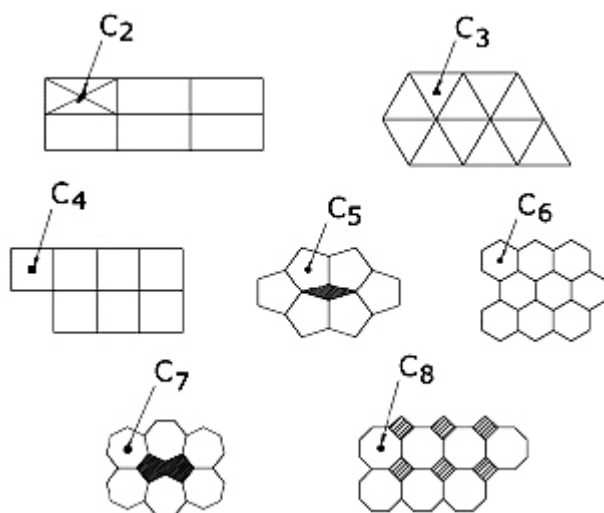
**Осью симметрии (L)** - называется прямая линия, при вращении вокруг которой на  $360^\circ$  все элементы ограничения кристалла совмещаются с равными им, а весь кристалл, как бы, совмещается сам с собой. Число самосовмещений  $n$  называется порядком оси. Минимальный угол, на который нужно повернуть кристалл до самосовмещения, называется **элементарным углом поворота**  $\alpha$ . Порядок оси связан с углом  $\alpha$  следующим образом:  $n = 360^\circ : \alpha$ .

В зависимости от того, сколько раз совмещаются элементы ограничения, в кристаллах выделяются оси симметрии второго, третьего, четвертого и шестого порядков; их иначе



называют соответственно двойными, тройными, четверными и шестерными осями симметрии. Порядок оси указывается цифрой внизу (или вверху) буквы L ( $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_6$ ).

Ось  $L_1$  равносильна отсутствию элементов симметрии, поэтому она не применяется в символике Бравэ. Таким образом, основной закон кристаллографии гласит: *в кристаллографии невозможны оси пятого и выше шестого порядков*. Это обусловлено решетчатым строением кристаллов. Плоская сетка кристаллической решетки состоит из соприкасающихся без зазоров параллелограммов, что несовместимо с наличием осей пятого и выше шестого порядков (рис. 20).



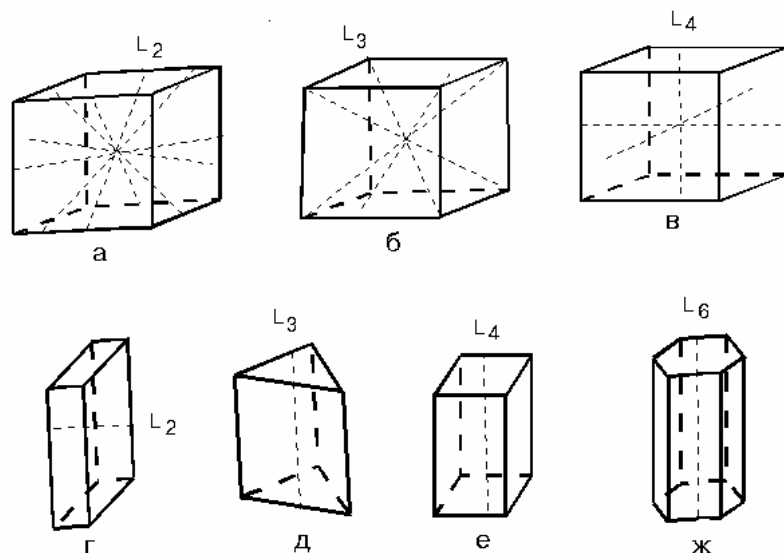
**Рис. 20. Иллюстрация невозможности существования в кристаллах осей симметрии порядков пятого и выше шестого на примере плоской сетки.**

**Осью симметрии второго порядка  $L_2$**  является такая ось, при повороте вокруг которой элементы ограничения кристалла повторяются два раза, т. е. через  $180^\circ$  (рис. 21).

**Осью симметрии третьего порядка  $L_3$**  является ось, при повороте вокруг которой элементы ограничения кристалла повторяются через каждые  $120^\circ$  или три раза за полный оборот (рис. 21).

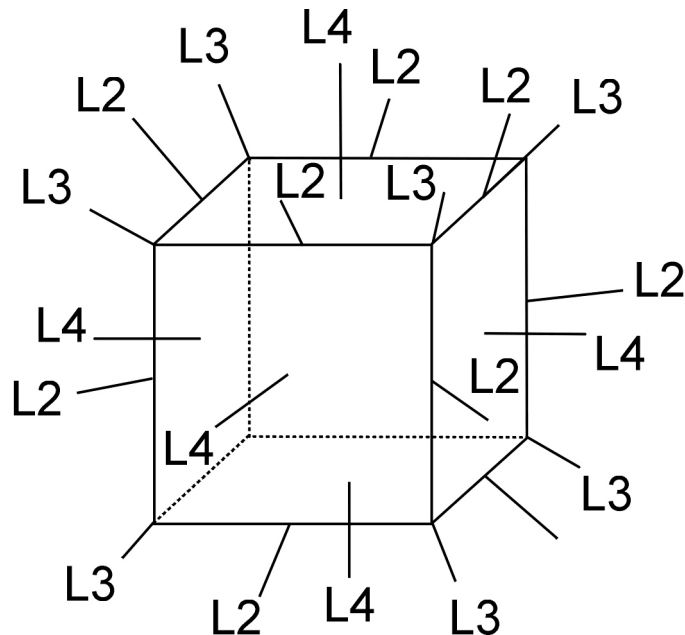
**Осью симметрии четвертого порядка  $L_4$** , или четверной, является такая ось, при повороте вокруг которой элементы ограничения кристалла повторяются четыре раза за полный оборот, через  $90^\circ$  (рис. 21).

**Осью симметрии шестого порядка  $L_6$** , или шестерной, является такая ось, при повороте вокруг которой элементы ограничения кристалла повторяются шесть раз, т. е. через  $60^\circ$  (рис. 21).



**Рис. 21. Многогранники с осями симметрии (L) второго (а,г), третьего (б, д), четвертого (в, е), и шестого (ж) порядков**

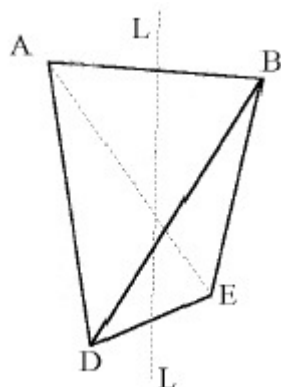
Максимальное число осей до  $3L_4$ ,  $4L_3$  и  $6L_2$  отмечается в- кубе (рис. 22).



**Рис.22. Оси симметрии в кубе**

Кроме простых осей симметрии еще выделяют инверсионные оси четвертого и шестого порядков. Их обозначают  $L_{i4}$ ,  $L_{i6}$ .

**Инверсионной осью  $L_i$**  называется такая прямая линия, при повороте вокруг которой на некоторый угол с последующим (или предварительным) отражением в центральной точке фигуры как в центре инверсии фигура совмещается сама с собой (рис. 23).



**Рис. 23. Тетрагональный тетраэдр. Инверсионная ось  $L_i$**

Инверсионная ось  $L_i$  является совокупностью простой оси и центра симметрии (инверсии), действующих совместно. Являясь составной частью инверсионной оси, центр симметрии (инверсии) в кристаллах, содержащих такие оси, отсутствует.

*При определении осей симметрии помните:*

1. Через вершины многогранника могут проходить любые оси симметрии.
2. В центрах граней перпендикулярно им могут выходить любые оси; при этом симметрия грани должна соответствовать порядку оси. Например, ось  $L_4$  не может проходить через центр треугольной грани.
3. В серединах ребер могут выходить только оси  $L_2$ .
4. Инверсионные оси необходимо искать, после того как найдены другие элементы симметрии.

Определение элементов симметрии упрощается при учете положений, определяющих возможные комбинации элементов симметрии в многогранниках:

1.  $L_6$  может присутствовать только в единичном направлении.
2. Если одновременно имеются оси  $L_6$  и  $L_2$ , то они должны быть перпендикулярны друг другу; а число осей  $L_2$  обязательно равно 6 ( $6L_2$ ).
3. При наличии осей  $L_3$  число их равно 4 ( $4L_3$ ).
4. Ось  $L_4$  присутствует или в единственном числе, или в количестве трех взаимно перпендикулярных осей ( $3L_4$ ).
5. При наличии в кристалле  $4L_3$ , расположенных вдоль диагоналей куба, с ними обязательно сочетаются или  $3L_2$ , или  $3L_4$ , перпендикулярные граням куба.
6. При наличии в кристалле  $4L_3$  и  $3L_4$  обязательно должны быть также  $6L_2$  (соединяющие попарно середины противоположных ребер куба).

7. Если же в кристалле только одна  $L$  и одна  $P$ , то они должны обязательно быть взаимно перпендикулярны.

8. При наличии оси симметрии и проходящих через нее плоскостей симметрии число плоскостей должно быть таким, каков порядок (наименование) оси, например: в кубе имеются оси  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ , через которые проходят плоскости симметрии  $P$ . Следовательно, сумма плоскостей в кубе равна  $3+2+4=9$ .

9. Инверсионные оси также могут находиться в кристаллах либо в единичном числе, либо в комбинации с осями  $L_2$ , перпендикулярными к ним, и плоскостями симметрии, проходящими через  $L_i$ .

10. Плоскость симметрии и перпендикулярная ей ось симметрии четного порядка обуславливают появление центра инверсии. Любое сочетание двух из указанных элементов симметрии вызывает обязательное наличие третьего элемента. Например, плоскость симметрии и центр определяют присутствие оси четного порядка, ось четного порядка и центр - плоскость симметрии, перпендикулярную оси.

Таким образом, максимально возможное число каждого из элементов симметрии, которыми может обладать кристаллический многогранник, приведено ниже:

Центров симметрии	1
Поворотных осей симметрии второго порядка	6
третьего порядка	4
четвертого порядка	3
шестого порядка	1
Инверсионных осей симметрии третьего порядка	4
четвертого порядка	3
шестого порядка	1
Зеркальных плоскостей симметрии	9

### Формула элементов симметрии

Совокупность элементов симметрии кристалла записывается в определённой последовательности: сначала оси высших порядков, затем оси низшего порядка, потом плоскости, и в последнюю очередь – центр (при его наличии) симметрии. Например, у куба —  $3L_44L_36L_29PC$ , у гексагональной призмы —  $L_66L_27PC$ . Такая система обозначений предложена Бравэ.

Однако, эта формула симметрии, с одной стороны, содержит избыточную информацию об элементах симметрии, а с другой стороны в ней нет никаких указаний на взаимное расположение элементов симметрии. Поэтому для удобства вместо таких громоздких формул употребляются условные международные обозначения классов симметрии (символы Германа-Могена). Международные обозначения содержат до трех

символов, обозначающих основные элементы симметрии, порядок записи которых определяет их взаимное расположение. Не вошедшие в международное обозначение элементы симметрии легко могут быть найдены при помощи определенных правил. В международной символике приняты следующие обозначения:

$n$  – ось симметрии  $n$ -порядка ( $n = 1, 2, 3, 4, 6$ );

$\bar{n}$  – инверсионная ось симметрии  $n$ -порядка ( $n = 3, 4, 6$ );

$m$  – плоскость симметрии;

$nm$  – ось симметрии  $n$ -го порядка и  $n$  плоскостей симметрии, проходящих вдоль нее;

$n/m$  – ось симметрии  $n$ -го порядка и перпендикулярная ей плоскость симметрии;

$n2$  – ось симметрии  $n$ -го порядка и  $n$  осей 2-го порядка, ей перпендикулярных;

$(n/m)m = n/mm$  – ось симметрии  $n$ -го порядка и плоскости  $m$ , параллельные и перпендикулярные ей

Правила записи международных символов классов симметрии приведены в таблице 6.

Таблица 6

**Правила записи международных символов  
классов симметрии кристаллов**

Сингония	Позиция в символе		
	1-я	2-я	3-я
Триклинная	Только один символ, соответствующий любому направлению в кристалле		
Моноклинная	Единственная ось 2 или плоскость $m$ по оси $Y$ (1-я установка) или по оси $Z$ (2-я установка)		
Ромбическая	Ось 2 или плоскость $m$ вдоль $X$	Ось 2 или плоскость $m$ вдоль $Y$	Ось 2 или плоскость $m$ вдоль $Z$
Тригональная и гексагональная	Главная ось симметрии	Оси 2 или $m$ вдоль $X, Y, U$	Диагональные оси 2 или плоскости $m$
Тетрагональная	Главная ось симметрии	Оси 2 или $m$ вдоль $X, Y$	
Кубическая	Координатные элементы симметрии	Оси 3	Диагональные элементы симметрии

**Единичные и симметрично-равные направления**

Единственное, не повторяющееся в кристалле направление называется **единичным**. Например, единичным направлением является ось 6-го порядка в шестигранной призме или пирамиде, ось 4-го порядка в четырехгранной призме или пирамиде. Повторяющиеся в кристалле направления, связанные элементами симметрии, называются **симметрично-равными**. Например, ось 4-го порядка в кубе или октаэдре уже не единичная, т.к. таких осей три.

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.

4. Единичные направления в кристаллах могут либо присутствовать, либо отсутствовать.

### Классы симметрии, сингонии и категории кристаллов

В кристаллографии для наименования различных понятий часто пользуются греческими словами или их корнями. Наиболее употребляемы следующие:

моно -	один, одно	дека -	десять
поли -	много	додека -	двенадцать
ди -	два, дважды	эдра -	грань
три -	три, трижды	(гон) гониа-	угол
тетра -	четыре	планум -	плоскость
пента -	пять	пинакос -	доска, таблица
гекса -	шесть	син -	сходно
окта -	восемь	клина -	наклон

**Классом симметрии** называется полная совокупность элементов симметрии кристаллического многогранника. Известный русский кристаллограф А.В. Гадолин первым теоретически доказал, что существует всего 32 класса симметрии кристаллов.

В зависимости от преобладания того или иного элемента симметрии они делятся на следующие виды (табл. 7):

- *примитивный* – элементы симметрии в кристалле либо отсутствуют, либо кристалл характеризуется только наличием осей симметрии;

- *центральный* – характеризуется обязательным присутствием центра симметрии и нескольких других элементов симметрии;

- *аксиальный* – характеризуется присутствием только осей симметрии разных порядков;

- *планальный* – характеризуется обязательным присутствием плоскостей симметрии и отсутствием центра симметрии;

- *планаксиальный* – характерно присутствие всех элементов симметрии (оси, плоскости, центр) с максимальным количеством плоскостей и осей симметрии;

- *инверсионно-примитивный* – характеризуется присутствием инверсионно-поворотных осей симметрии в единичном количестве и отсутствием других элементов симметрии;

- *инверсионно-планальный* – характеризуется присутствием наряду с инверсионно-поворотными осями симметрии обычных осей симметрии второго порядка и плоскостей симметрии.

Таблица 7

Симметрия кристаллов

Категория	Сингония	Вид симметрии						
		Примитивный	Центральный	Планальный	Аксиальный	План-аксиальный	Инверсионно-примитивный	Инверсионно-планальный
Низшая	Триклинная	—	C	—	—	—	—	—
	Моноклинная	—	—	P	L <sub>2</sub>	L <sub>2</sub> PC	—	—
	Ромбическая	—	—	L <sub>2</sub> 2P	3L <sub>2</sub>	3L <sub>2</sub> 3PC	—	—
Средняя	Тригональная	L <sub>3</sub>	L <sub>3</sub> C	L <sub>3</sub> 3P	L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> 3PC	—	—
	Тетрагональная	L <sub>4</sub>	L <sub>4</sub> PC	L <sub>4</sub> 4P	L <sub>4</sub> 4L <sub>2</sub>	L <sub>4</sub> 4L <sub>2</sub> 5PC	L <sub>i4</sub> (= L <sub>2</sub> )	L <sub>i4</sub> (= L <sub>2</sub> )2L <sub>2</sub> 2P
	Гексагональная	L <sub>6</sub>	L <sub>6</sub> PC	L <sub>6</sub> 6P	L <sub>6</sub> 6L <sub>2</sub>	L <sub>6</sub> 6L <sub>2</sub> 7PC	L <sub>i6</sub> = L <sub>3</sub> P	L <sub>i6</sub> 3L <sub>2</sub> 3P = L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> 4P
Высшая	Кубическая	4L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub>	4L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> 3PC	4L <sub>3</sub> 3L <sub>2</sub> (3L <sub>i4</sub> )6P	3L <sub>4</sub> 4L <sub>3</sub> 6L <sub>2</sub>	3L <sub>4</sub> 4L <sub>3</sub> 6L <sub>2</sub> 9PC	—	—

Все виды симметрии распределены по сингониям. **Сингония** — это группа классов симметрии, обладающих одним или несколькими сходными элементами симметрии (с обязательным учетом осей симметрии высшего, т.е. выше второго, порядка) при одинаковом числе единичных направлений.

Различают семь сингоний: триклинную, моноклинную, ромбическую, тригональную, тетрагональную, гексагональную и кубическую, которые объединены в три категории: низшую, среднюю и высшую. Данные о категориях, сингониях и классах симметрии кристаллов приведены в таблицах 7 и 8.

**Низшая категория** содержит несколько единичных направлений и не содержит осей порядка выше двух. К низшей категории относятся три сингонии - триклинная, моноклинная, ромбическая.

Таблица 8

Категории, сингонии и классы симметрии кристаллов

Категория	Сингония	Число единичных направлений	Число классов симметрии	Классы симметрии
Низшая	Триклинная	Все	2	$1 (L_1); 1 (C)$
	Моноклинная	Множество	3	$m (P); 2 (L_2); 2/m (L_2PC)$
	Ромбическая	3	3	$mm (L_22P); 222 (3L_2); mmm (3L_23PC)$
Средняя	Тригональная	1	5	$3 (L_3); 32 (L_33L_2); 3m (L_33P); 3 (L_3); 3m (L_33L_23P = L_33L_23PC)$
	Тетрагональная	1	7	$4 (L_4); 422 (L_44L_2); 4mm (L_44P); 4/m (L_4PC); 4/m mm (L_44L_25PC); 42m (L_42L_22P); 4(L_4)$
	Гексагональная	1	7	$6 (L_6); 622 (L_66L_2); 6mm (L_66P); 6/m (L_6PC); 6/m mm (L_66L_27PC); 6m2 (L_63L_23P); 6 (L_6 = L_3P)$
Высшая	Кубическая	0	5	$23 (3L_24L_3); m3 (3L_24L_33PC); 432 (3L_44L_36L_2); m3m (3L_44L_36L_29PC); 43m (3L_44L_36P)$

К триклинной сингонии относятся наименее симметричные кристаллы, у которых есть только центр симметрии или нет никакой симметрии (микроклин, плагиоклазы, волластонит).

К моноклинной сингонии принадлежат кристаллы, у которых есть одна плоскость симметрии, или одна ось симметрии второго порядка  $L_2$ , или оба эти элемента вместе и центр симметрии (гипс, ортоклаз, вольфрамит).

К ромбической сингонии принадлежат кристаллы, имеющие до трех осей симметрии второго порядка и до трех плоскостей симметрии, а также могут иметь центр симметрии. (сера, барит, антимонит).

**Средняя категория** содержит одно единичное направление, совпадающее с единственной осью симметрии порядка выше двух. Сингонии - тригональная, тетрагональная и гексагональная.

Кристаллы тригональной сингонии имеют одну ось симметрии третьего порядка  $L_3$ , до трех осей симметрии второго порядка  $3L_2$ , до трех плоскостей симметрии  $3P$  и центр симметрии  $C$  (кальцит, доломит, магнезит, кварц, корунд). В поперечном сечении развитые кристаллы тригональной сингонии дают треугольник.

Кристаллы тетрагональной сингонии имеют ось четвертого порядка, до четырех осей второго порядка  $4L_2$ , до пяти плоскостей симметрии  $5P$ , центр симметрии. В поперечном сечении идеально развитые кристаллы тетрагональной сингонии дают квадрат (касситерит, скаполит).



Кристаллы гексагональной сингонии имеют одну ось симметрии шестого порядка  $L_6$ , до шести осей симметрии второго порядка  $6L_2$ , до семи плоскостей симметрии  $7P$  и центр симметрии  $C$ . Сечения, перпендикулярные шестерной оси, в идеально развитых кристаллах дают правильные шестиугольники (апатит, нефелин).

**Высшая категория** не содержит единичных направлений и имеет несколько осей симметрии порядка выше двух. В высшей категории присутствует только одна сингония – кубическая. Кристаллы кубической сингонии наиболее симметричны. Они имеют четыре оси третьего порядка  $4L_3$ , до трех осей четвертого порядка  $3L_4$ , до шести осей симметрии второго порядка  $6L_2$ , до девяти плоскостей симметрии  $9P$  и центр симметрии  $C$  (пирит, галенит, гранат).

### **Закон распределения кристаллов по сингониям (Закон Е.С. Федорова - П. Грота)**

В результате работ, проведенных русским ученым Е.С. Федоровым и немецким кристаллографом П. Гротом, были выявлены закономерности, устанавливающие связь между химическим составом и симметрией кристаллов: *простому химическому составу вещества соответствует высокая симметрия его кристаллов*. Чем сложнее состав, тем обычно ниже симметрия кристаллов. Так, минералы имеющие простой химический состав, такие как, самородные (золото, серебро, медь, платина и др.) кристаллизуются в кубической сингонии, и напротив, минералы сложного состава, такие как силикаты (биотит, каолин, полевые шпаты), кристаллизуются в низших сингониях.

В природе преобладают минералы сложного состава. Распределение минералов по категориям следующее (%): низшая - 57,5, средняя - 28,5, высшая - 14.

### **Задание**

1. На модели, выданного преподавателем кристаллического многогранника, определить все имеющиеся элементы симметрии.
2. На основе найденных элементов симметрии вывести формулу симметрии.
3. По характерным элементам симметрии определить категорию и сингонию кристалла.
4. По формуле симметрии определить класс симметрии кристалла, записать его название.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение симметрии кристаллов.
2. Какие элементы симметрии возникают при рассмотрении геометрически правильных многогранников?
3. Что такое центр симметрии и как он определяется?
4. Как определить плоскость симметрии?
5. Перечислите возможные оси симметрии в кристаллических многогранниках, их количество и порядок.
6. Назовите возможные места выходов осей симметрии из кристаллических многогранников.
7. Охарактеризуйте инверсионные оси симметрии.
8. Сформулируйте основной закон симметрии кристаллов.
9. Дайте определение понятиям «категория» и «сингония».

10. Назовите и охарактеризуйте три категории.
11. Сколько существует сингоний? Дайте характеристику каждой.
12. Что такое класс симметрии?
13. Каковы основные признаки кристаллов низшей категории?
14. Каковы основные признаки кристаллов средней категории?
15. Каковы основные признаки кристаллов высшей категории?
16. Какие направления в кристаллах относятся к единичным?
17. Какие направления в кристаллах являются симметрично-равными?

## Лабораторная работа № 5

### Проекция элементов симметрии и граней кристалла

**Цель работы:** развить навыки изображения элементов симметрии и граней кристаллических многогранников в стереографических и гномостереографических проекциях.

#### Проекция элементов симметрии кристалла

Элементы симметрии (центр, плоскости и оси) кристаллов изображаются в стереографических проекциях. Перед тем, как начать построение проекции, необходимо определить формулу симметрии. Для удобства проектирования центр тяжести кристалла мысленно совмещаем с центром сферы проекций, тогда все элементы симметрии будут проходить через центр сферы. Кроме этого, кристаллы ориентируются относительно плоскости проекций и относительно наблюдателя по определенным правилам выбора кристаллографических осей.







Установка триклинных кристаллов, не имеющих ни осей, ни плоскостей симметрии, произвольна. В моноклинных кристаллах единственная ось симметрии  $L_2$  располагается горизонтально, параллельно наблюдателю, а плоскость симметрии — вертикально и направлена на наблюдателя. В ромбических кристаллах одна из осей симметрии  $L_2$  устанавливается всегда вертикально, другая идет на наблюдателя, а третья — слева направо.

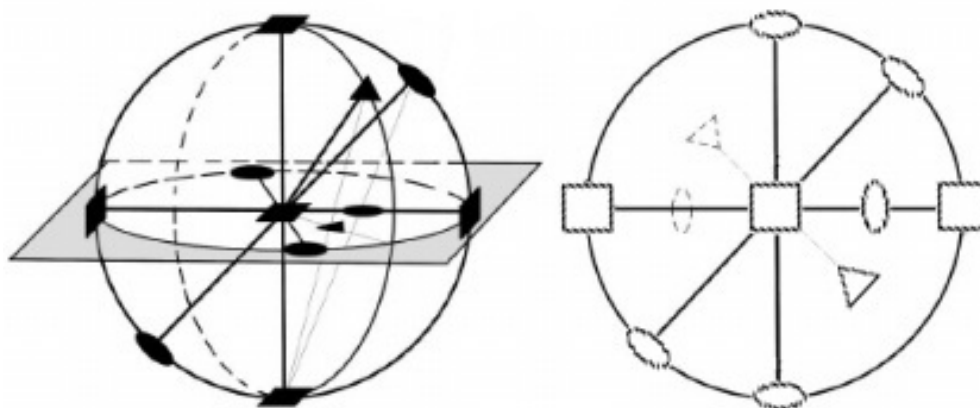
В кристаллах сингоний средней категории главные оси симметрии ( $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_6$ ) всегда вертикальны. Для тригональной и гексагональной сингоний применяется 4-х-осная система координат (в предыдущей лабораторной работе такая система рассматривалась), однако установка полиэдра в целом происходит по тем же правилам.

В кристаллах кубической сингонии имеются взаимно перпендикулярные оси симметрии  $3L_4$ ,  $4L_3$  или  $3L_2$ ; одна из них всегда вертикальна, другая направлена на наблюдателя, а третья — слева направо.

Для построения стереографической проекции рисуется окружность (круг проекции), на которую наносится графическое отображение элементов симметрии. В зависимости от расположения осей в пространстве вертикально расположенная ось симметрии обозначается соответствующим символом по центру круга проекции; горизонтально-расположенная ось симметрии обозначается соответствующими 2-мя символами на окружности проекции;

наклонно-расположенная ось симметрии обозначается символом внутри круга проекции. Эти символы соединяются одиночной линией (рис. 24).

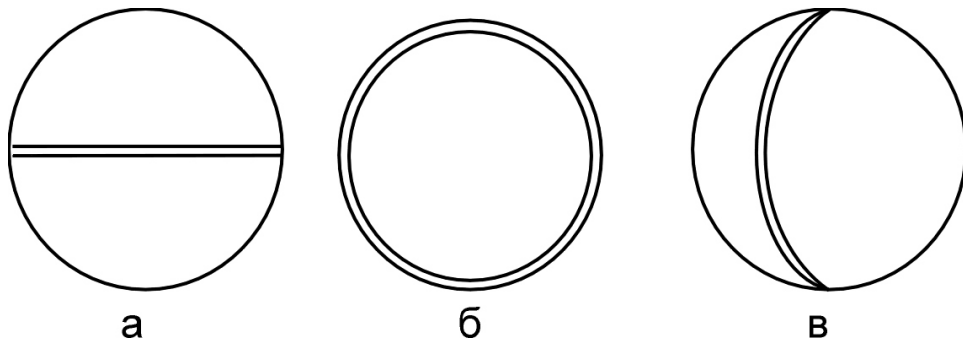
<p>В качестве обозначений применяют следующие символы осей:</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;">  <span>L2</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;">  <span>L3</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;">  <span>L4</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;">  <span>L6</span> </div> </div>	<p>Для инверсионных осей применяют совмещения символов:</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;">  <span>Li 4</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;">  <span>Li 6</span> </div> </div>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



**Рис. 24. Обозначение осей симметрии в сфере (слева) и на плоскости проекции (справа)**

Обозначения  $L_2$  могут встречаться в центре, на окружности и внутри круга проекции;  $L_3$  – либо по центру, либо внутри круга проекции;  $L_4$  – либо в центре, либо на окружности проекции;  $L_6$  – только в центре.

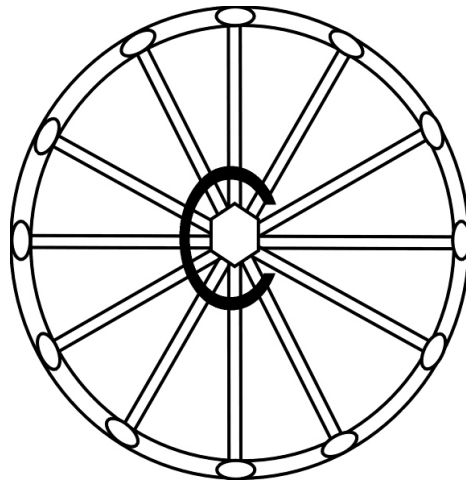
Проекции плоскостей симметрии на чертежах принято изображать двойными линиями (рис. 25). Если плоскость симметрии занимает вертикальное положение, то её стереографическая проекция изображается двойной линией, отвечающей одному из диаметров круга проекций (рис. 25 а). Горизонтальная плоскость симметрии, совпадающая с плоскостью проекций, обозначается двойной окружностью (рис. 25 б), а проекция косо расположенная в плоскости симметрии обозначаются удвоенными дугами (рис. 25 в).



**Рис. 25. Стереографические проекции плоскостей симметрии**

Центр симметрии при наличии обозначается буквой «С» по центру круга проекции.

На рисунке 26 в качестве примера построения стереографической проекции приведена проекция гексагональной призмы с формулой симметрии  $L_66L_27PC$ .



**Рис. 26. Стереографическая проекция гексагональной призмы**

Стереографические проекции плоскостей симметрии всех видов симметрии приведены в таблице 9.

**Таблица 9**

**Стереографические проекции элементов симметрии 32 видов**

Класс						
примитивный	инверсионно-примитивный	центральный	аксиальный	планальный	Инверсионно-планальный	аксиально-центральный

### Проекция граней кристалла

Грани кристалла проектируются на гномостереографических проекциях. Для проектирования центр кристалла следует совместить с центром сферы, через центр сферы провести перпендикуляр к грани и соединить его с лучом зрения S или N (см. лабораторную работу № 3). Точка пересечения зрения с кругом проекций и будет являться гномостереографической проекцией грани (рис. 27).

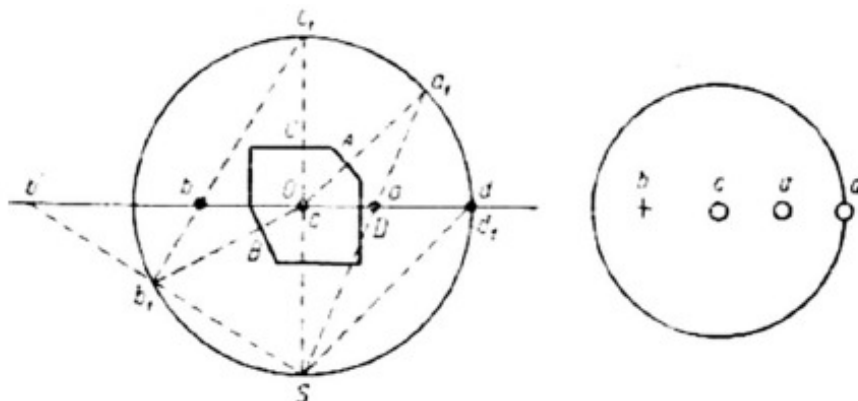
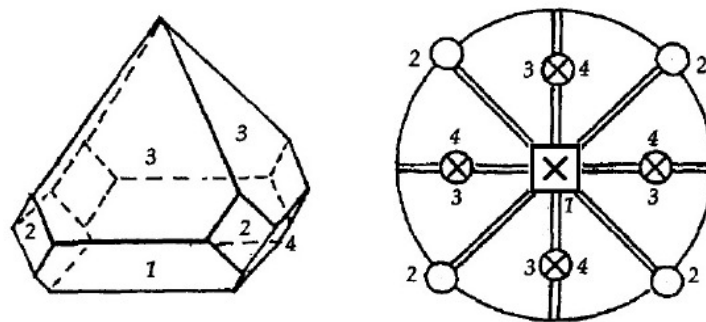


Рис. 27. Проекция полюсов граней на горизонтальную плоскость проекции

Горизонтальная плоскость делит шар проекции на две половины – верхнюю и нижнюю, следовательно, грани могут располагаться в верхнем и нижнем полушарии, возможны случаи, когда грани с обеих полусфер проецируются в одну точку. Для этого выработаны следующие обозначения полюсов граней: крестиком (+) – проекции расположенные в нижнем полушарии, кружочком (○) – проекции расположенные в верхнем полушарии. Если грани с обеих полусфер проецируются в одну точку, то крестик, вписанный в кружочек (⊗).

Горизонтальные грани на гномостереографических проекциях кристаллов отображаются точками, совпадающими с центром круга проекций, вертикальные - расположены на окружности круга проекций, наклонные - внутри круга проекций. Чем больше наклон грани (плоскости), тем дальше от центра круга проекций расположена отображающая ее точка. Пример гномостереографической проекции изображен на рисунке 28.



**Рис. 28. Гномостереографическая проекция кристалла**

### Задание

На модели кристаллического многогранника, полученного у преподавателя:

1. Определить все элементы симметрии и составить его формулу симметрии.
2. Изобразить схему модели кристаллического многогранника (используя принятую для соответствующей сингонии установку — координатную систему), на которой подписать все грани и отметить элементы симметрии (здесь и далее все зарисовки и подписи выполнять простым карандашом).
3. Изобразить стереографическую проекцию элементов симметрии.
4. Изобразить гномостереографическую проекцию граней кристалла.

### Контрольные вопросы

1. На каких проекциях изображаются элементы симметрии, а на каких грани кристалла?
2. Как ориентируются кристаллы относительно плоскости проекций и относительно наблюдателя?
3. Для кристаллов каких сингоний применяется 4-х-осная система координат?

4. Как обозначаются элементы симметрии и грани кристаллов на проекциях?

## Лабораторная работа № 6

### Простые формы кристаллов и их комбинации

**Цель работы:** ознакомиться с простыми формами кристаллов и научиться определять простые формы и их комбинации на моделях многогранников.

Внешние формы даже у кристаллов одной сингонии весьма разнообразны, хотя обладают одинаковым набором элементов симметрии. Поэтому, для полной характеристики морфологии кристалла недостаточно ограничиваться одними элементами симметрии, а необходимо также принимать и внешний вид кристалла. По внешнему виду кристаллы разделяются на простые формы и комбинации простых форм.

#### Простые формы

**Простой формой** называется многогранник, все грани которого образованы из одной грани с помощью элементов симметрии, и поэтому все грани простой формы равны по величине и одинаковы по форме. Примерами простых форм служат куб, октаэдр, ромбоэдр и другие. Общее число простых форм ограничено и равно 47. Разнообразие геометрических форм, которое присуще природным многогранникам, объясняется комбинацией множества простых форм в них.

Среди простых форм есть открытые и закрытые формы (рис. 29). **Открытая** простая форма не образует замкнутой в пространстве фигуры. Она участвует только в комбинации с другими простыми формами. К открытым формам относятся: моноэдр, диэдр, пинакоид, призма, пирамида. **Закрытая** простая форма образуется замыкающимися в пространстве тождественными гранями (гексаэдр, октаэдр).

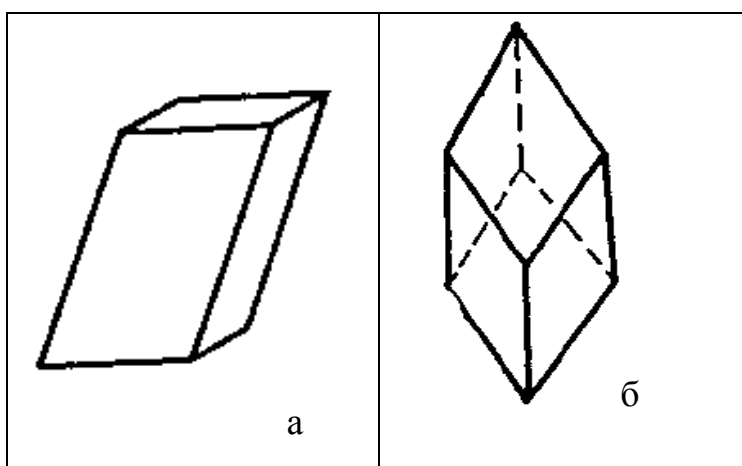
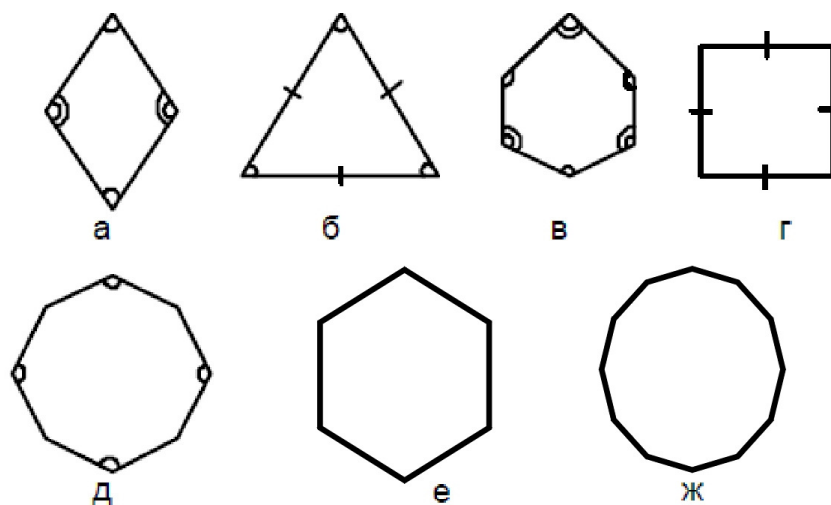


Рис. 29. Открытые (а) и закрытые (б) простые формы

#### Простые формы сингоний низшей категории

Названия большей части простых форм низшей и средней категории содержат два признака: первый указывает на форму основания или сечения (рис. 30), а второй – на общее название фигуры (призма, пирамида, дипирамида и т.д.).



**Рис. 30. Правильные многоугольники: а – ромб; б – тригон (равносторонний треугольник); в – дитригон (удвоенный равносторонний треугольник); г – тетрагон (квадрат); д– дитетрагон (удвоенный квадрат); е – гексагон (правильный шестиугольник); ж – дигексагон (удвоенный шестиугольник)**

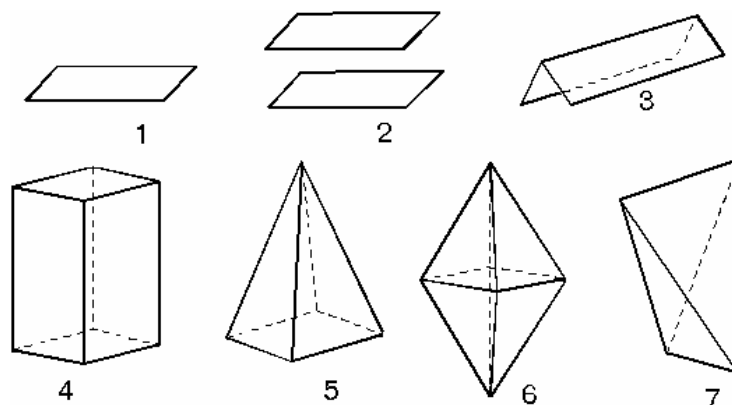
В низшей категории встречаются 7 простых форм (рис. 31):

**1 - моноэдр** («одногранник» - простая форма, состоящая из одной грани); **2 - пинакоид** (простая форма, состоящая из двух параллельных граней); **3 - диэдр** (простая форма, состоящая из двух пересекающихся граней); **4 - ромбическая призма** (простая форма, состоящая из четырех граней, в которой грани попарно параллельны, а поперечное сечение - ромб); **5 - ромбическая пирамида** (простая форма, состоящая из четырех граней, пересекающихся в одной точке; основание пирамиды - ромб); **6 - ромбическая дипирамида** (двойная пирамида - закрытая простая форма, образованная двумя пирамидами, как бы сложенными своими основаниями); **7- ромбический тетраэдр** (закрытая простая форма, образованная четырьмя треугольниками; в сечении - ромб).

При определении простой формы низшей категории необходимо учитывать:

1. Моноэдр, пинакоид и диэдр встречаются только в комбинациях.
2. Моноэдр и пинакоид встречаются во всех трех сингониях низшей категории.
3. В триклинной сингонии могут быть только моноэдры и пинакоиды.
4. Диэдры и ромбические призмы свойственны моноклинной и ромбической сингонии.
5. Ромбическая пирамида и дипирамида встречаются только в ромбической сингонии.





**Рис. 31. Простые формы низшей категории: 1 - моноэдр; 2 - пинакоид; 3-диедр; 4 - ромбическая призма; 5 - ромбическая пирамида; 6 - ромбическая дипирамида; 7 - ромбический тетраэдр**

### Простые формы сингоний средней категории

В средней категории встречаются **25 простых форм** (рис. 32, табл. 10):

**8 - тригональная призма** (простая форма, состоящая из трех граней, параллельных  $L_3$ , и имеющая в сечении треугольник); **9 - тетрагональная призма** (многогранник, состоящий из четырех граней, параллельных  $L_4$ , образующий в сечении квадрат); **10 - гексагональная призма** (простая форма, состоящая из шести граней, параллельных  $L_6$ , образующая в сечении шестиугольник); **11 - 13 - призмы** (состоящие из удвоенного числа граней по сравнению с предыдущими формами); **14 - тригональная пирамида** (многогранник, состоящий из трех граней, пересекающихся на  $L_3$ , имеющий в основании правильный треугольник); **15 - тетрагональная пирамида** (фигура, состоящая из четырех граней, пересекающихся на  $L_4$ , образующая в основании правильный четырехугольник); **16 - гексагональная пирамида** (многогранник, состоящий из шести граней, пересекающихся на  $L_6$ , имеющий в основании правильный шестиугольник); **17-19 - пирамиды** (состоящие из удвоенного числа граней по сравнению с предыдущими простыми формами); **20 - тригональная дипирамида; 21 - тетрагональная дипирамида; 22 - гексагональная дипирамида; 23-25 - дипирамиды** с удвоенным числом граней; **26 - ромбоэдр** (простая форма из шести граней в виде ромба - перекошенный куб); **27-29 - трапецоэдры** (многогранники, похожие на дипирамиды, но отличающиеся от них смещением нижней половины по отношению к симметричной верхней); **30 - тетрагональный тетраэдр** (фигура, состоящая из равнобедренных треугольников); **31 - тетрагональный скаленоэдр** (простая форма, имеющая грани в виде разносторонних треугольников); **32 - дитригональный скаленоэдр** (многогранник, образованный путем удвоения граней ромбоэдра).

При определении простой формы средней категории необходимо помнить:

1. Из рассмотренных выше форм сохраняются лишь две - моноэдр и пинакоид.
2. Пирамида всегда находится в комбинации с моноэдром;

3. Ромбоэдр принадлежит только к тригональной сингонии.

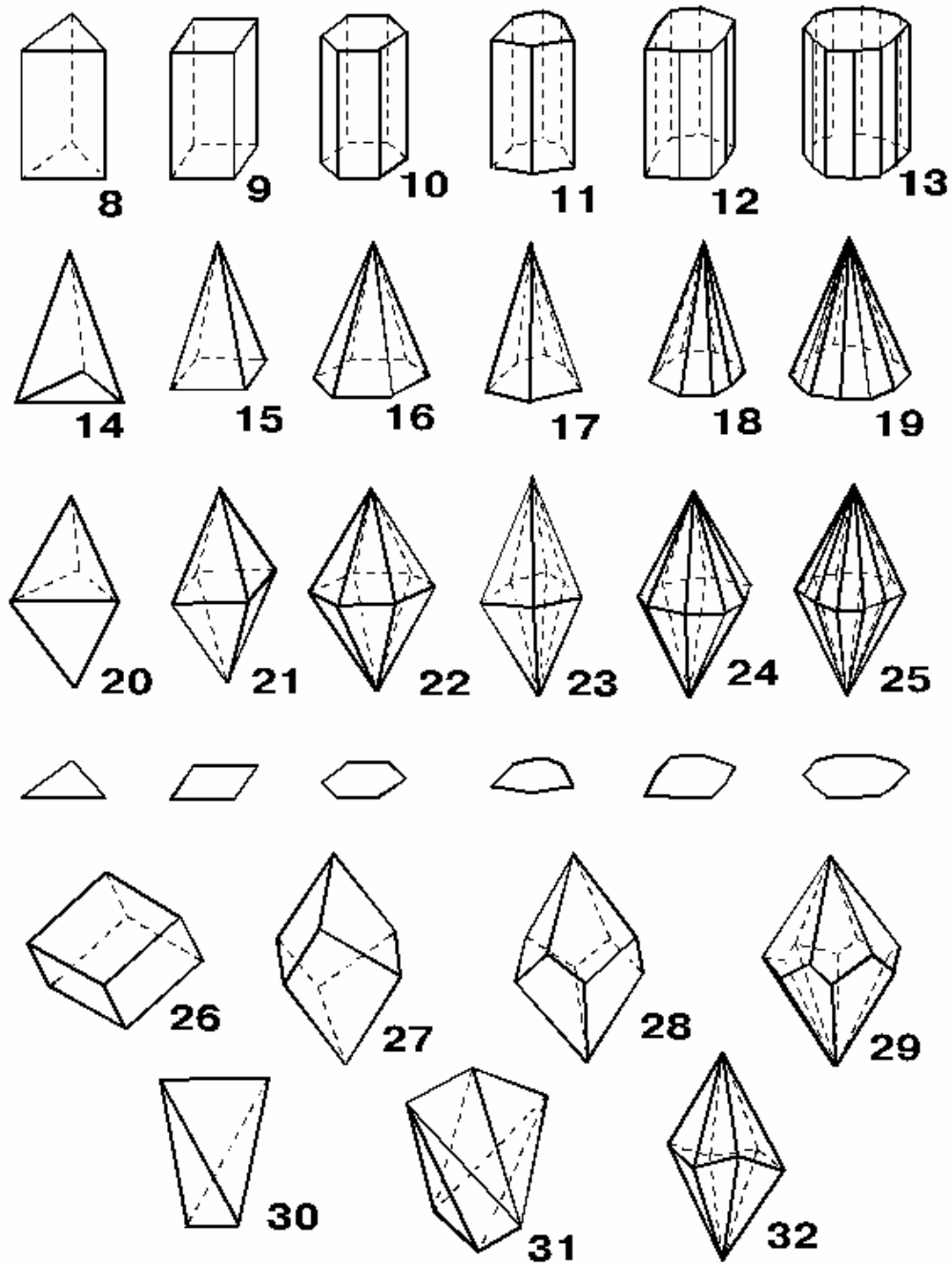


Рис. 32. Простые формы средней категории сингонии: 8-13-призмы (8-тригональная, 9-тетрагональная, 10-гексагональная, 11- дитригональная, 12-дитетрагональная, 13-дигексагональная); 14-19-пирамиды (14-тригональная, 15-тетрагональная, 16-гексагональная, 17-дитригональная, 18-дитетрагональная, 19-дигексагональная); 20-25-дипирамиды (20-тригональная, 21-тетрагональная, 22-гексагональная, 23-дитригональная, 24-дитетрагональная, 25-дигексагональная); 26-ромбоэдр; 27-29-трапецоэдры (27-тригональный, 28-тетрагональный, 29-гексагональный); 30-тетрагональный тетраэдр; 31-32-скаленоэдры (31-тетрагональный, 32-тригональный)

## Важнейшие простые формы средней категории

Расположение граней относительно главной оси $L_3$ $L_4 L_6$	Сечение	Число граней	Название простых форм
Грани, параллельные главной оси	Треугольник	3	Тригональная призма
	Квадрат	4	Тетрагональная призма
	Шестиугольник	6	Гексагональная призма
Грани пересекают главную ось в одной точке	Треугольник	3	Тригональная пирамида
	Квадрат	4	Тетрагональная пирамида
	Шестиугольник	6	Гексагональная пирамида
Грани пересекают главную ось в двух точках. Нижние грани расположены точно под верхними	Треугольник	6	Тригональная дипирамида
	Квадрат	8	Тетрагональная дипирамида
	Шестиугольник	12	Гексагональная дипирамида
Грани пересекают главную ось в двух точках. Нижняя грань лежит симметрично между двумя верхними	Ромб	6	Ромбоэдр

## Простые формы сингоний высшей категории

Высшая категория представлена одной сингонией - *кубической*.

Названия большинства производных простых форм кристаллов кубической сингонии строятся по следующей схеме: сначала характеризуется *форма грани*: *тригон* (треугольная), *тетрагон* (четырёхугольная) и т.д., затем фиксируется *количество граней*, заменивших исходную грань основной простой формы (три) и указывается *название простой формы*, на основе которой выводится полученная производная форма (тетраэдр, октаэдр). Таким образом, в основу номенклатуры простых форм кубической сингонии положены число граней и их форма (табл. 11).

В кубической сингонии встречаются **15 простых форм** (рис. 33)

Исходными формами простых форм кубической сингонии являются три простые формы: **33 - тетраэдр**, состоящий из четырех равносторонних треугольников (в отличие от тетрагонального тетраэдра - все грани которого в виде равнобедренного треугольника и

ромбического тетраэдра, все грани которого разносторонние треугольники); **38 – куб (гексаэдр)** - форма, состоящая из шести квадратов и **43 – октаэдр** - форма, состоящая из восьми равносторонних треугольников, четырех вверху и четырех внизу. Остальные 12 форм являются производными тетраэдра (34-37), гексаэдра (39-42) и октаэдра (44-47).

Так, утроив грань тетраэдра (рис. 34) получим 12-гранник, при этом; если грань в форме треугольника (*тригона*) - получаем *тригон-три-тетраэдр*, если грань в форме четырехугольника (*тетрагона*) - получаем *тетрагон-три-тетраэдр*, если в виде пятиугольника (*пентагона*) - *пентагон-три-тетраэдр*. Грань тетраэдра, переведенная в общее положение приведет к образованию 24-гранника и получим *тригонгексатетраэдр (гексатетраэдр)*.

**Таблица 11**

**Простые формы кубической сингонии**

Число граней	Контуры граней	Названия простых форм
4	Правильный треугольник	Тетраэдр
12	Треугольник	Тригон-тритетраэдр
12	Четырехугольник	Тетрагон-тритетраэдр
12	Пятиугольник	Пентагон-тритетраэдр
24	Равносторонний треугольник	Гексатетраэдр
8	Правильный треугольник	Октаэдр
24	Равнобедренный треугольник	Тригон-триоктаэдр
24	Четырехугольник	Тетрагон-триоктаэдр
24	Пятиугольник	Пентагон-триоктаэдр
48	Разносторонний треугольник	Гексаоктаэдр
6	Квадрат	Куб (гексаэдр)
12	Ромб	Ромбододекаэдр
12	Пятиугольник	Пентагон-додэкаэдр
24	Равнобедренный треугольник	Тетрагексаэдр
24	Четырехугольник	Дидодекаэдр

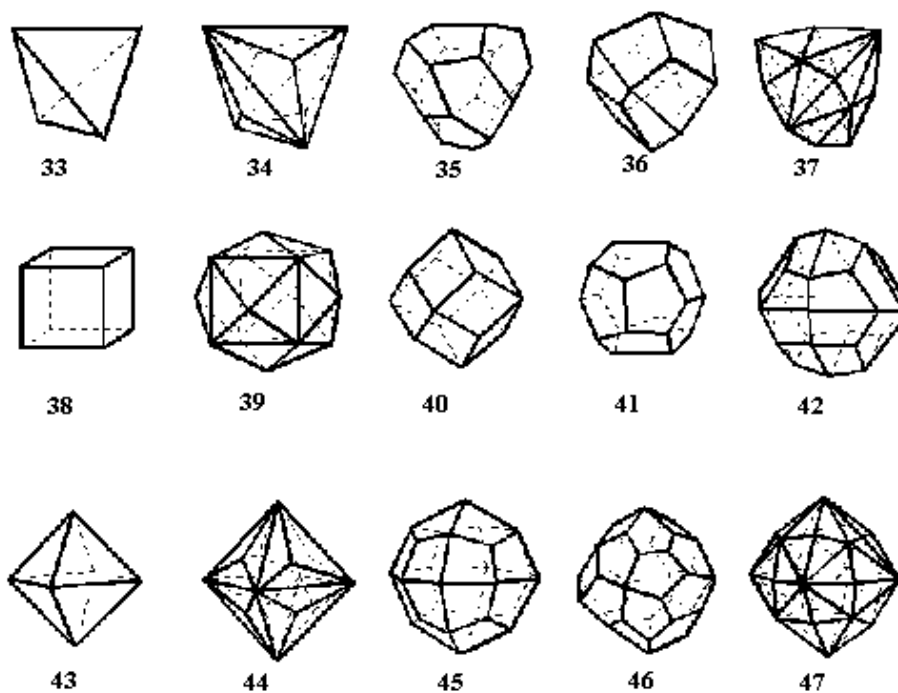


Рис. 33. Простые формы кубической сингонии: 33 - тетраэдр; 34 – тригон-три-тетраэдр; 35 – пентагон-три тетраэдр; 36 – тетрагон-три-тетраэдр; 37 - гексатетраэдр; 38 - гексаэдр; 39 - тетрагексаэдр; 40 – ромбододекаэдр; 41 – пентагон-додэкаэдр; 42 - дидодекаэдр; 43 - октаэдр; 44 - тригон-три-октаэдр; 45 –тетрагон-три-октаэдр; 46 - пентагон-три-октаэдр; 47 – гексаоктаэдр



Рис.34. Расположение граней тетраэдра (а) и ее производных форм: тригон-три-тетраэдра (б) и тетрагон-три-тетраэдра

Утроив грань октаэдра получим 24-гранник, при этом; если грань в форме треугольника (*тригона*) - получаем *тригон-три-октаэдр*, если грань в форме четырехугольника (*тетрагона*) - получаем *тетрагон-три-октаэдр*, если в виде пятиугольника (*пентагона*) - *пентагон-три-октаэдр*. Грань тетраэдра, переведенная в общее положение приведет к образованию 48-гранника и получим *тригонгексаоктаэдр* (*гексаоктаэдр*).

Разделив грань куба на четыре части получим 24-гранник – *тетрагексаэдр*, а на 2 части - 12-гранник – *пентагондодокаэдр*, при этом грань в виде пятиугольника (пентагона). Если разделим грань пятиугольника в пентагондодокаэдре еще на 2 части получим 24-гранник - пентагондодокаэдр. Если грань в виде ромба и их 12-получим – *ромбододокаэдр*.

При определении простых форм кубической сингонии необходимо помнить следующее:

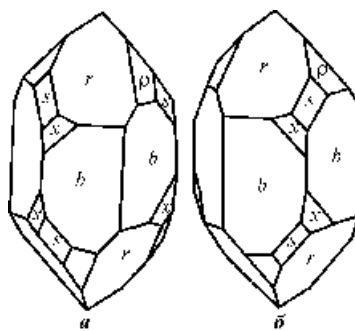
1. Ни одна из простых форм низшей и средней категории в кубической сингонии не встречается.
2. Все простые формы здесь закрытые.
3. Гексаоктаэдр встречается практически только в комбинациях с другими простыми формами кубической сингонии.

### Разновидности простых форм

Одна и та же простая форма может встречаться в разных классах симметрии. Поэтому, естественно, грани одной (по названию) формы могут отличаться по своей симметрии. Например, моноэдр может быть реализован в десяти различных классах, а гексаэдры, как отметил А.В. Шубников, могут иметь различную по симметрии штриховку граней в соответствии с пятью видами симметрии кубической сингонии.

Многие простые формы имеют две разновидности: правую и левую, например ромбические тетраэдры (рис. 35), все трапецоэдры (рис. 36) и др. Отличить правый кристалл от левого можно по маленьким граням трапецоэдра и дипирамиды, которые у правого кристалла повернуты вправо, у левого – влево. В большинстве природных кристаллов этих граней нет, чаще всего кварц бывает огранен лишь призмой и двумя ромбоэдрами, и тогда только по огранке отличить правый кристалл от левого уже не удастся. Комбинационные многогранники также бывают правые и левые (рис. 37).

	
<p><b>Рис. 35. Правый и левый ромбические тетраэдры</b></p>	<p><b>Рис. 36. Правый и левый тригональные трапецоэдры</b></p>



**Рис. 37. Правый и левый кристаллы кварца**

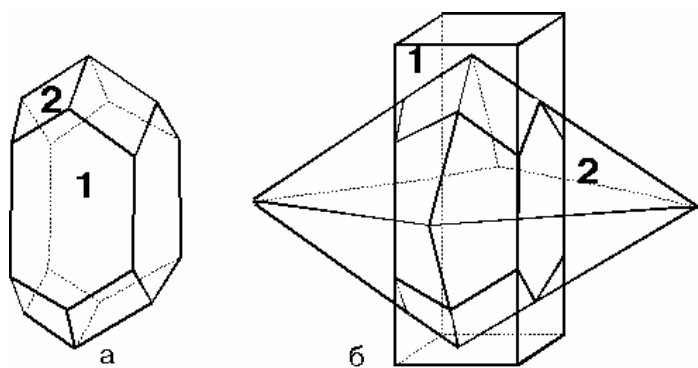
Учет симметрии простых форм, а следовательно, и их физических свойств увеличивает общее число простых форм с 47 до 146, а учет еще наличие левых и правых (энантиоморфных) пар - до 193.

### **Комбинации простых форм**

**Комбинацией** называется сочетание двух или нескольких простых форм. Количество простых форм в комбинации равно числу видов граней в кристалле. 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. Комбинаций простых форм может быть неограниченное количество. В комбинации может присутствовать несколько простых форм одного названия (например, три пинакоида, два диэдра, две призмы и т.д.).

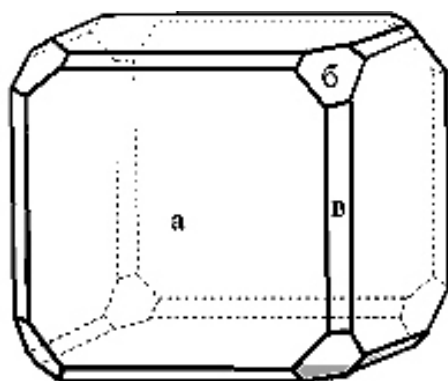
При определении простых форм в комбинации необходимо помнить следующее:

1. Количество простых форм равно числу видов граней, составляющих данный многогранник.
2. Все грани одной исследуемой простой формы необходимо мысленно продолжить до взаимного пересечения, не обращая внимания на грани других форм, входящих в комбинацию (рис. 38). Эту операцию следует произвести с каждой простой формой в комбинации.
3. В комбинациях очертания граней одной простой формы, как правило, искажены за счет развития граней других простых форм.
4. Открытые формы могут встречаться только в комбинациях, а закрытые как в виде самостоятельных многогранников, так и в комбинациях.



**Рис. 38. Реальный многогранник (а), представляющий собой комбинацию тетрагональной призмы (1) и тетрагональной дипирамиды (2), и пример его зарисовки (б)**

В качестве примера на рисунке 39 приведена комбинация граней гексаэдра, октаэдра и ромбододекаэдра.



**Рис. 39. Комбинация граней гексаэдра (а), октаэдра (б) и ромбододекаэдра (в)**

### Задание

1. Просмотреть модели простых форм кристаллических многогранников.
2. Для каждой модели кристаллического многогранника, полученного у преподавателя:
  - определить количество граней, их форму, сечение;
  - дать название простой формы;
  - указать сингонию, категорию и вид симметрии кристалла;
  - определить открытые и закрытые формы.
3. На моделях комбинаций, выданных преподавателем, определить количество простых форм и дать их название.

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой простые формы кристаллов?
2. Чем отличаются открытые и закрытые простые формы?



3. Какие простые формы возможны: в низшей категории, в средней категории и в высшей категории?
4. Чем отличается тетраэдр кубической сингонии от тетрагонального и ромбического тетраэдра?
5. Какие простые формы встречаются только в триклинной сингонии?
6. В каких сингониях встречаются ромбоэдр и ромбододекаэдр?
7. Какие простые формы переходят из низшей сингонии в среднюю?
8. Какие простые формы являются основами простых форм кубической сингонии?
9. Что означает название простой формы тригон-три-октаэдр?
10. Что такое комбинации простых форм?
11. Как определить количество простых форм в комбинации?

### **Лабораторная работа № 6**

#### **Описание модели кристаллического многогранника**

**Цель работы:** научиться правильно описывать симметрию и форму кристаллов.

Данная лабораторная работа является завершающей, в которой должны быть отображены все свойства кристаллических веществ.

Описание модели кристаллического многогранника выполняется по предлагаемой схеме:

1. Определить элементы симметрии и записать формулу симметрии.
2. Указать единичные направления (если имеются) и их расположение.
3. Установить категорию, сингонию и симметрию.
4. Определить число простых форм и дать название каждой простой форме с указанием открытой, закрытой формы.
5. Выполнить рисунок кристалла.
6. На рисунке указать выходы кристаллографических осей.
7. Построить стереографическую и гномостереографическую проекции кристалла (можно обе проекции выполнить на одном круге проекций).
8. Записать символы граней и простых форм.

#### **Пример описания комбинационных кристаллов**

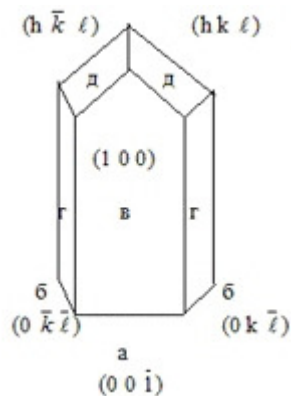
1.  $L_22P$ .

2. Три единичных направления: одно параллельно  $L_2$ , другие два перпендикулярны двум плоскостям симметрии.

3. Ромбическая сингония, низшая категория, планальный вид.

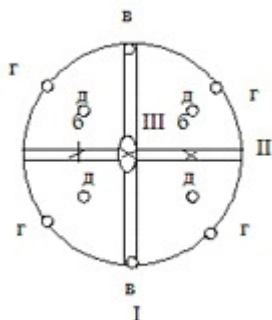
4. Пять простых форм (рис. 39): а) моноэдр открытая, б) диэдр открытая, в) пинакоид открытая, г) призма ромбическая открытая, д) пирамида ромбическая открытая.

5.



6.  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ;  $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ ; а: 1: с.

7.



8. а) моноэдр  $\{00\bar{1}\}$ , б) диэдр  $\{0kl\}$ , в) пинакоид  $\{100\}$ , г) ромбическая призма  $\{hk0\}$ , д) ромбическая пирамида  $\{hkl\}$ .

### Задание

По предложенной схеме описать модель кристаллического многогранника, полученного у преподавателя. Результаты анализа предоставить в виде отчета.

### Библиографический список

Аникина В. И. Основы кристаллографии и дефекты кристаллического строения [Электронный ресурс]: Практикум / В. И. Аникина, А. С. Сапарова. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 148 с.

Булах А.Г. Минералогия с основами кристаллографии/ А.Г. Булах.-М.: Недра, 1989.

Егоров-Тисменко, Ю. К. Кристаллография и кристаллохимия: учебник / Ю. К. Егоров-Тисменко .- 2-е изд. - М. : Университет , 2010. - 587 с.

Нардов В.В. Практическое руководство по геометрической кристаллографии/ В.В. Нардов. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1974.

Попов Г.М., Шафрановский И.И. Кристаллография. 5-е изд. – М.: Высш. шк., 1972.–352 с.

Шафрановский, И.И. Краткий курс кристаллографии И.И. Шафрановский, В.Ф. Алявдин. М.: Высш. шк., 1984.

## Содержание

Введение

Лабораторная работа № 1. Понятие о кристалле и кристаллическом веществе

Лабораторная работа № 2. Учение о кристаллографических символах. Метод кристаллографического индицирования

Лабораторная работа № 3. Кристаллографические проекции. Решение кристаллографических задач с помощью сетки Вульфа

Лабораторная работа № 4. Определение элементов симметрии и классов симметрии на моделях кристаллических многогранников

Лабораторная работа № 5. Проекция элементов симметрии и граней кристалла

Лабораторная работа № 6. Описание модели кристаллического многогранника

Библиографический список