

Государственный комитет СССР по народному образованию

---

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА  
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА  
ИМ. И.М.ГУБКИНА

---

В.С.КНЯЗЕВ, И.Б.КОНОНОВА

Утверждено  
Советом института  
в качестве учебного пособия

ОСНОВЫ КРИСТАЛЛООПТИКИ  
Конспект лекций  
(раздел курса "Петрография  
общая и осадочных горных пород")

Москва 1989

УДК 548:535

Основы кристаллооптики (раздел курса "Петрография общая и осадочных горных пород"): конспект лекций/ В.С.Князев, И.Б.Коновалова. - М.: МИНГ, 1989, 34 с.

Конспект лекций соответствует разделам программы по кристаллооптике вышеуказанного курса, отличается краткостью изложения и хорошо иллюстрирован. Изложена характеристика оптических свойств кристаллов кубической сингонии. Приведены методика построения поверхностей показателей преломления и оптических индикатрис одноосных и двуосных кристаллов и сводная таблица оптических свойств твердых тел.

Конспект лекций предназначен для студентов специальностей 0802 и 0805.

Издание подготовлено на кафедре литологии и системных исследований литосферы.

Рецензенты: Канд.-геол.-минералог. наук, доц. Р.С. Безбородов  
Канд. геол.-минералог. наук, доц. Д.Б. Искандеров

## ВВЕДЕНИЕ

Конспект лекций по разделу "Основы кристаллооптики" курса "Минералогия и петрография" спец. 0802 и "Минералогия и петрография" спец. 0805 издается впервые. Необходимость его издания вызвана, в первую очередь, увеличением объема самостоятельной работы студентов и сокращением в связи с этим общего числа лекционных занятий по курсу.

В рекомендуемой студентам литературе по петрографии раздел "Основы кристаллооптики" имеется лишь в учебнике Е.А.Кузнецова. С нашей точки зрения, этот материал изложен в учебнике недостаточно подробно и без необходимого количества иллюстраций, что вызывает у студентов значительные трудности при его проработке, особенно при самостоятельном прохождении данного курса. Более подробное изложение кристаллооптики приведено в учебных пособиях, изданных в 50-е и 60-е годы (Белякин Д.С., Петров В.П., Четвериков С.Д., Лодочников В.Н. и др.), которые являются не только библиографической редкостью, но и отличаются большой сложностью и детальностью, значительно выходящей за пределы программы основ кристаллооптики, предусмотренных курсом "Минералогия и петрография".

При подготовке настоящего пособия авторы учитывали, что студенты имеют достаточный объем знаний об общих законах оптики.

## ЛЕКЦИЯ I

### I. Некоторые сведения из оптики

Известно, что в физике существуют две теории света - корпускулярная и волновая. Явления, происходящие при прохождении света через кристаллическую пластинку, проще понять исходя из волновой теории, согласно которой свет представляет собой колебания электрического и магнитного векторов электромагнитной волны. Эти колебания перпендикулярны к направлению распространения световой волны (рис. I), являются периодическими и подчиняются закону синусоиды.

Такие колебания характеризуются следующими параметрами:

1. Период колебания ( $T$ ) - время, за которое взятая точка  $P$  совершит одно полное колебание.

2. Фаза волны ( $\varphi$ ) - направление отклонения от первоначального положения в момент времени " $t$ ".

3. Амплитуда колебания ( $A$ ) - максимальное отклонение т.Р от первоначального положения.

4. Длина волны ( $\lambda$ ) - расстояние, на которое перемещается световая волна за время, равное 1 периоду колебания  $T$ . Измеряется длина волны в ангстремах ( $\text{Å}$ ) или нанометрах (нм), прежнее название - миллимикрон.

$$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}; \quad 1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}.$$

В природе встречаются электромагнитные волны различной длины.

Глаз человека воспринимает волны длиной от 760 нм до 390 нм.

Каждой длине волны соответствует свой цвет.

Так, при  $\lambda = 760$  нм свет имеет темно-красный цвет;

при  $\lambda = 589$  нм - желтый;

при  $\lambda = 517$  нм - зеленый;

при  $\lambda = 486$  нм - синий;

при  $\lambda = 390$  нм - темно-фиолетовый.

За пределами интервала с  $\lambda = 760-390$  нм лежит область волн, не воспринимаемая глазом. Ближайшая к световой часть спектра с  $\lambda > 760$  нм получила название инфракрасной, а с  $\lambda < 390$  нм - ультрафиолетовой.

5. Электромагнитные волны распространяются в различных средах с определенной скоростью, которая называется скоростью света ( $v$ ).

6. При переходе из одной среды в другую луч света меняет свое направление - преломляется. Луч падающий и преломленный находятся

в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным в точке падения.

7. При преломлении изменяется и скорость распространения светового луча.

Отношение скоростей распространения света двух граничащих сред получило название показателя преломления ( $n$ ).

Различают абсолютный и относительный показатели преломления:

$$n_{\text{абс}} = \frac{v_{\text{вакуум}}}{v_{\text{среда}}}; \quad n_{\text{отн}} = \frac{v_1}{v_2}, \quad \text{где}$$

$v_1$  - скорость света среды, из которой луч падает на границу раздела;

$v_2$  - скорость света среды, в которой луч преломляется.

Существует четкая зависимость между скоростью распространения, показателями преломления, величинами углов падения ( $\alpha$ ) и преломления ( $\beta$ ) светового луча (рис.2):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (1), \quad \text{но} \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (2)$$

Отсюда с учетом зависимости (1) следует, что

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \quad (3)$$

В большинстве случаев  $n_{\text{газ}} < n_{\text{жидк.}} < n_{\text{твердые тела}}^*$

Примеры:  $n_{\text{вакуума}} = 1,$   
 $n_{\text{воздуха}} = 1,000292 \sim 1,$   
 $n_{\text{воды}} = 1,33,$   
 $n_{\text{глицерина}} = 1,47,$   
 $n_{\text{стекла}} = 1,5 - 1,9,$   
 $n_{\text{алмаза}} = 2,42.$

Показатели преломления большинства породообразующих минералов лежат в пределах от 1,4 до 1,8.

8. Различают световые лучи естественные и поляризованные. Колебания первых происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения световой волны в различных направлениях, а колебания вторых - в одном строго определенном направлении (рис.3).

\* Имеются жидкости, величины показателей преломления у которых больше, чем у твердых тел.

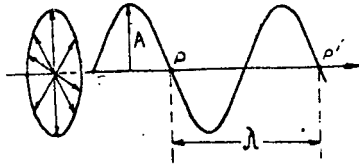


Рис.1. Характер световых колебаний:  $A$  - амплитуда,  $\lambda$  - длина волны

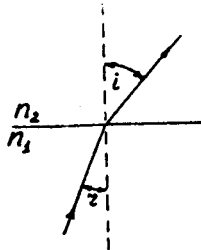


Рис.2. Преломление света на границе двух сред с разными показателями преломления ( $n_1 > n_2$ )

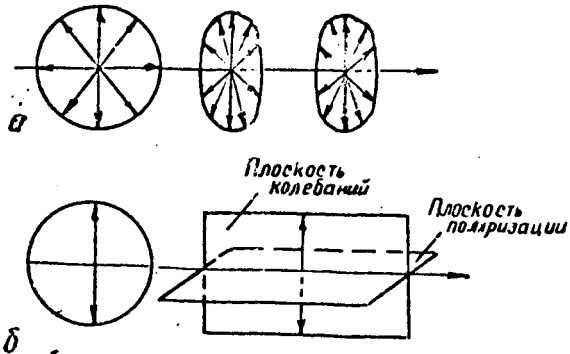


Рис.3. Направление колебаний естественного светового луча (а) и линейно поляризованного (б)

## II. Основы кристаллооптики

### I. Основные отличия оптических свойств кристаллических и некристаллических тел

Оптические явления в кристаллических телах, т.е. твердых телах, в которых атомы, ионы располагаются в определенном порядке и образуют так называемую пространственную решетку, существенно отличаются от оптических явлений в аморфных телах. Наличие кристаллической решетки обуславливает анизотропию многих свойств кристаллов, в том числе и оптических.

Под анизотропией понимается неравносвойственность по различным направлениям в кристаллах.

Во второй половине XVII столетия было открыто одно из важнейших свойств кристаллов - двойное лучепреломление.

Суть этого явления заключается в следующем.

В связи с анизотропией в кристалле всегда имеется направление "наименьшей оптической плотности", по которому будут проходить колебания вошедшего в него неполяризованного луча света.

Пусть  $KK_1$  - направление наименьшей оптической плотности данного кристалла (рис.4);  $OA$  - амплитуда и направление колебания неполяризованного луча света в момент входа в кристалл, распространяющегося со скоростью " $v$ ".

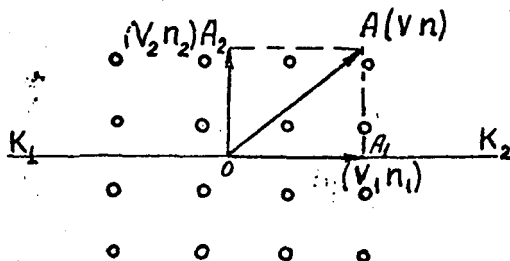


Рис.4. Явление дубреломления в кристалле

Войдя в кристалл, луч изменяет направление колебания на  $OA_1$ , т.е. на направление наименьшей оптической плотности. Согласно правилу параллелограмма возникает вектор  $OA_2$ , соответствующий колебаниям второго луча. Таким образом, в кристалле колеблется 2 луча по направлениям с различной оптической плотностью, а значит, распространяющиеся с разными скоростями (в нашем примере  $v_1 > v_2$ ). Согласно вышеприведенной зависимости (I) эти лучи будут иметь различ-

ные показатели преломления -  $n_1$  и  $n_2$ , причем  $n_1 < n_2$ .

Вывод: луч света, входя в анизотропную среду, разделяется на лучи, колеблющиеся во взаимноперпендикулярных направлениях и имеющие разные " $v$ " и " $n$ ".

Это и называется двойным лучепреломлением или двулучепреломлением. Этим свойством обладают кристаллы средних сингоний - гексагональной, тетрагональной, тригональной и низших - ромбической, моноклиной и триклиной.

Кристаллооптика, как наука об оптических свойствах кристаллического вещества, изучает, в первую очередь, явление двулучепреломления. Количественно оно определяется на основе исследования характера изменения скорости распространения света или показателя преломления по различным направлениям в кристалле.

При изучении оптических свойств минералов с помощью микроскопа наибольшее значение имеет характеристика показателей преломления, поэтому в дальнейшем мы будем касаться вопросов, связанных только с ними.

## 2. Способы измерения показателей преломления

Для определения показателя преломления твердых тел пользуются кристалл-рефрактометром. Прибор позволяет измерять этот важный параметр в различных направлениях и с большой точностью (до тысячных долей единицы).

Основными частями кристалл-рефрактометра являются стеклянное полушарие (а) с известным показателем преломления  $N$  (обычно близким к 1,9), источник монохроматического света (б), помещенный несколько ниже полушария и зрительная труба (в), расположенная с другой его стороны (рис.5) и передающая по лимбу - пластинке с градусными делениями.

Пришлифованная пластина исследуемого вещества или кристалл с гладкими гранями ( $\Gamma$ ) помещают на полушарие, заполнив пространство между ними жидкостью, показатель преломления которой по величине имеет промежуточное значение между показателями преломления стеклянного полушария и измеряемого вещества.

Измерение показателя преломления на кристалл-рефрактометре основано на явлении полного внутреннего отражения при прохождении световой волны из среды более сильно преломляющей ( $N$ ) в среду с меньшим показателем преломления ( $n$ ). В таком случае угол преломления больше угла падения, и при некоторой предельной величине последнего угол преломления становится равным  $90^\circ$  (рис.5).



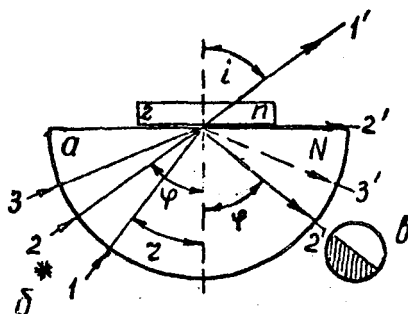


Рис.5. Схема устройства кристалл-рефрактометра и ход лучей в нем:  
 а - стеклянное полушарие с показателем преломления  $N$  ;  
 б - источник монохроматического света;  
 в - поле зрения в зрительной трубе;  
 г - кристаллическая пластинка с показателем преломления  $n$ ;  
 $\varphi$  - предельный угол падения

При дальнейшем увеличении угла падения свет полностью отражается от границы между двумя средами. Наименьший по величине угол, при котором происходит полное внутреннее отражение света, называется предельным углом полного внутреннего отражения ( $\varphi$ ).

При полном внутреннем отражении угол преломления  $i$  (рис.5) равен  $90^\circ$ , а угол падения  $z$  равен предельному углу ( $z = \varphi$ ).

Тогда выражение  $\frac{\sin z}{\sin i} = \frac{n}{N}$  принимает вид:  $\sin \varphi = \frac{n}{N}$  (2), т.к. при  $i = 90^\circ \sin i = 1$ .

Зная значение  $N$  (для рефрактометра величина постоянная) и измерив предельный угол  $\varphi$ , вычисляется показатель преломления исследуемого кристалла  $n$ .

Для определения величины показателя преломления с помощью рефрактометра луч монохроматического света направляется через стеклянное полушарие на границу с пластинкой определяемого минерала. Изображение, наблюдаемое в зрительной трубе, имеет различный характер для минералов с разной структурой.



А. Аморфные тела и кристаллы кубической сингонии.

Для них возможны следующие варианты изображения:



1) угол падения ( $z$ ) меньше предельного угла ( $\varphi$ ) -




лучи света от границы стекло-пластинка исследуемого минерала полностью уходят в пластинку и не попадают а зрительную трубу, ее поле зрения будет темным;

- 2) угол падения больше предельного угла  $\varphi$  - лучи света полностью отражаются от границы, и все поле зрительной трубы освещается равномерно;
- 
- 3) угол падения равен предельному углу  $\varphi$ . При этом поле зрения трубы будет освещено неодинаково - половина светлая, а другая - темная.
- 

Поставив зрительную трубу рефрактометра в положение, когда граница света и тени проходит через точку пересечения нитей, по лимбу определяем значение угла  $\varphi$ .

#### Б. Кристаллы средних и низших сингоний

При переходе лучей света из стеклянного полушария рефрактометра в пластинку из кристалла, как отмечалось выше, возникают два луча с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ . Для каждого луча характерна своя величина предельного угла ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ), вследствие чего в зрительной трубе рефрактометра наблюдаются такие варианты освещенности поля зрения:

- 1) поле зрения темное - оба луча, преломляясь, уходят в кристаллическую пластинку;
- 
- 2) все поле зрения одинаково освещенное и светлое - оба луча отражаются от границы;
- 
- 3) освещенность поля зрения в трубе рефрактометра имеет промежуточный характер между первым и вторым вариантом (полутень). Это происходит тогда, когда один луч отразился от границы раздела, а другой, преломившись, уходит в кристаллическую пластинку.
- 

Перемещая зрительную трубу рефрактометра, совмещаем границу между полнью тень-полутень с центром креста нитей и по лимбу считываем величину предельного угла для одного луча ( $\varphi_1$ ); затем добиваемся момента, когда граница полутень (3)-свет (2) будет проходить через точку пересечения нитей, и вновь берем отсчет по лимбу, определяя предельный угол для другого луча ( $\varphi_2$ ).

Подставляя значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  в формулу, определяем величину показателей преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

Следует помнить, что полученные на кристалл-рефрактометре значения показателей преломления соответствуют в определяемом кристалле направлению, параллельному внешней плоскости полусферы рефрактометра, поскольку перед моментом полного внутреннего отражения угол преломления равен  $90^\circ$ , и луч света скользит по поверхности раздела двух сред (рефрактометра и кристалла).

## ЛЕКЦИИ 2 и 3

### Оптические свойства кристаллов различных сингоний

Для характеристики оптических свойств кристаллов различных сингоний используют поверхность показателей преломления (П.Н.П.) и поверхность, которая получила название оптической индикатрисы или короче, индикатриса.

П.Н.П. - это поверхность, построенная на значениях показателей преломления данного кристалла, величина которых в определенном масштабе отложена в направлении распространения световой волны (по ходу луча). Она строится для конкретного кристалла по результатам измерения на рефрактометре показателей преломления в различных направлениях.

Оптическая индикатриса - это поверхность, построенная на значениях показателей преломления, величина которых отложена в определенном масштабе в направлении колебания электрического вектора соответствующей световой волны.

Индикатриса выводится из построенной эмпирически П.Н.П. для данного кристалла с учетом законов колебания лучей света.

#### I. Оптические свойства кристаллов кубической сингонии

Оптические свойства в кристаллах, в том числе и величина показателя преломления " $n$ ", изменяются по закону эллипсоида.

В кристаллах кубической сингонии пространственная решетка характеризуется равенством осевых или единичных отрезков ( $a_0 = b_0 = c_0$ ), вследствие чего в каждом из трех главных взаимно перпендикулярных направлений график изменения показателя преломления имеет вид круга - эллипс с равными полуосями. В таком случае П.Н.П. будет шаром. Отсюда следует - в кристаллах кубической сингонии  $n = const$ .

Аналогичный характер оптических свойств имеет и статически однородные во всех направлениях аморфные тела.

Среди с постоянными во всех направлениях свойствами относят к числу изотропных.

Таким образом, кристаллы кубической сингонии и минералы аморфного строения, для которых  $n = const$  и явление двупреломления отсутствует, относятся к оптически изотропным телам.

## 2. Оптические свойства кристаллов средних сингоний

### 2.1. Поверхность показателей преломления

Разберем построение П.П.П для кристаллов средних сингоний на примере кварца.

Вырежем из его кристалла пластинку, параллельную  $\mathcal{L}_3$  (рис. 6), установим ее на рефрактометр и исследуем характер изменения величины " $n$ " в плоскости, параллельной оси высшего порядка.

Направив луч света  $\parallel \mathcal{L}_3$ , в зрительной трубе рефрактометра увидим одну четкую границу света и тени, которая отвечает  $n_1 = 1,544$ .

Повернув рефрактометр и направив луч света под небольшим углом к  $\mathcal{L}_3$ , в зрительной трубе получим две границы, разделяющие поля: тень-полутень и полутень-свет. Это говорит о наличии в этом направлении двух разных по величине показателей преломления - явление двупреломления.

При дальнейшем повороте рефрактометра границы полей все более расходятся. В плоскости, ориентированной под углом  $45^\circ$  к  $\mathcal{L}_3$  (см. рис. 6б), измеренные показатели преломления равны:  $n_1 = 1,544$  и  $n_2 = 1,549$ ; в плоскости, перпендикулярной  $\mathcal{L}_3$ , получаем  $n_1 = 1,544$  и  $n_3 = 1,553$ . Вращая далее рефрактометр в зрительной трубе, наблюдаем постепенное сближение границ полей, и при повороте на  $180^\circ$  - луч света направлен по  $\mathcal{L}_3$  - снова видим только одну границу, отвечающую  $n_1 = 1,544$ .

Изображая показатели преломления в виде отрезков, пропорциональных их величине, и отложив эти отрезки в направлении распространения света - по ходу луча в кристалле кварца, получаем график изменения  $n$ , который имеет вид эллипса и вписанной в него окружности (рис. 7). Полуоси эллипса пропорциональны  $n_1 = 1,544$  и  $n_3 = 1,553$ , а радиус окружности -  $n_1 = 1,544$ .

Аналогичные результаты измерения показателей преломления получаются в любой пластинке, вырезанной из кристалла кварца  $\parallel \mathcal{L}_3$ .

Определяя характер изменения величины показателя преломления в пластинке, ориентированной  $\perp \mathcal{L}_3$ , при любом направлении луча, в зрительной трубе рефрактометра наблюдаем две границы - тень-полутень и полутень-свет, которые не меняют своего положения. Это говорит о том, что в этой плоскости распространяются два луча, имеющие

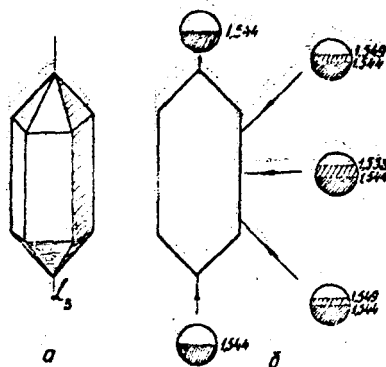


Рис.6. Оптические свойства кристаллов средних сингоний:

а - внешний вид кристалла кварца;

б - изменение величины  $n$  в зависимости от направления распространения света в кварцевой пластинке в разрезе параллельном  $x_3$

постоянные по величине показатели преломления -  $n_1 = 1,544$  и  $n_2 = 1,553$ . График изменения величины показателя преломления, построенный способом, аналогичным указанному выше, имеет вид двух concentrically расположенных окружностей с радиусами, пропорциональными  $n_1$  и  $n_2$ .

Переходя от плоскостного изображения к пространственному, получаем П.П.П., который представляет собой шар с радиусом, пропорциональным  $n_1 = 1,544$ , вписанный в эллипсоид вращения с полуосями, пропорциональными  $n_1 = 1,544$  и  $n_2 = 1,553$  (рис.8).

Подобный характер П.П.П. присущ ряду других минералов, кристаллизующихся в гексагональной, тетрагональной и тригональной сингонии. Изменяются только величины показателей преломления. Однако для другой группы минералов средних сингоний П.П.П. имеет вид эллипсоида вращения, вписанного в шар (рис.9).

При сравнении П.П.П. для этих двух групп минералов видно:

- а) в том и другом случае имеются два показателя преломления, из которых один постоянный по величине ( $n_o$ ), а второй - переменный ( $n_e$ );
- б) в первой группе минералов  $n_e$  всегда больше  $n_o$ , а во второй -  $n_o$  больше  $n_e$ .

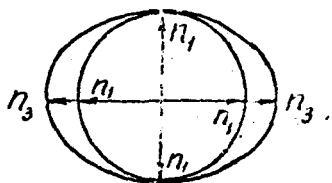


Рис.7. График изменения величины показателя преломления в кварце в сечении параллельном  $\lambda_3: n_1 = n_o = 1,544, n_3 = 1,553$

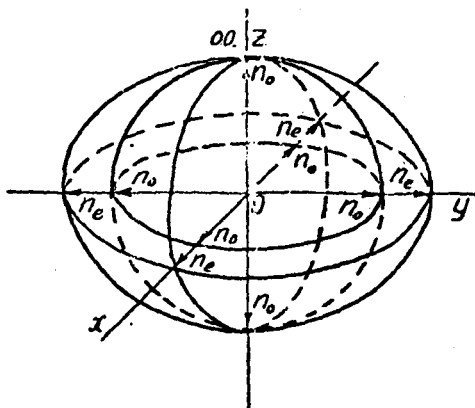


Рис.8. Поверхность показателей преломления кварца ( $n_e > n_o$ )

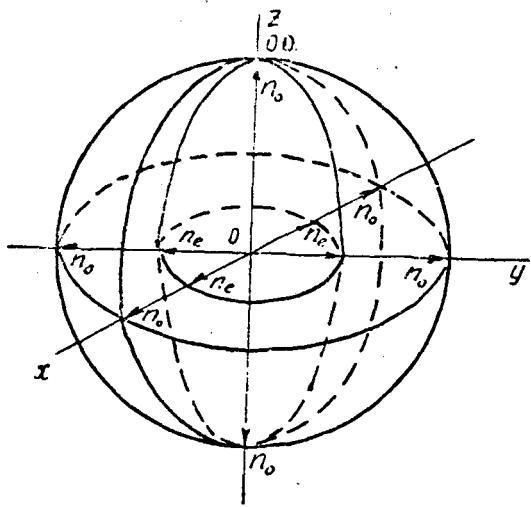


Рис. 9. Поверхность показателей преломления оптически отрицательных кристаллов средних сингоний ( $n_e < n_o$ )

На основании всего вышесказанного о характере оптических свойств кристаллов средних сингоний можно сделать следующие выводы:

1. В кристаллах наблюдается двойное лучепреломление, т.е. они относятся к оптически анизотропным телам.

2. Один из  $n$  имеет постоянную величину ( $n_o$ ), а другой изменяется от значения, равного  $n_o$ , до некоторого  $max$  или  $min(n_e)$ .

Луч света, имеющий  $n = const$ , носит название обыкновенного, и его показатель преломления обозначается  $n_o$  или  $N_o$ .

Луч света, величина показателя преломления которого меняется в зависимости от направления распространения световой волны ( $n \neq const$ ), принято называть необыкновенным и обозначать  $n_e$  или  $N_e$ .

3. В кристаллах существует одно направление, в котором не происходит двойного лучепреломления ( $n_e = n_o$ ). Оно называется оптической осью. В кристаллах средних сингоний оптическая ось (0.0.) совпадает с осью симметрии высшего порядка ( $L_2, L_4$  или  $L_3$ ) и является осью вращения эллипсоида. Поэтому кристаллы этих сингоний

относятся к оптическим одноосным (рис.8,9).

4. Разность величин показателей преломления называется силой двупреломления ( $\Delta$ ).

$$\Delta = n_e - n_o,$$

$\Delta$  - величина переменная,

$\Delta = 0$  в направлении, параллельном О.О.,

$\Delta = \max$  в направлении, перпендикулярном О.О.,

Пример.  $\Delta$  кварца = 1,553 - 1,544 = 0,009.

5. По типу П.П.П. кристаллы средних сингоний подразделяются на:

а) оптически положительные:

$$n_e > n_o; \quad \Delta = n_e - n_o \quad - \text{величина положительная;} \\ (\text{например, кварц})$$

П.П.П. представляет собой эллипсоид вращения, в который вписан шар;

б) оптически отрицательные:

$$n_e < n_o; \quad \Delta = n_e - n_o \quad - \text{величина отрицательная.} \\ (\text{например, кальцит})$$

П.П.П. представляет собой эллипсоид вращения, вписанный в шар.

## 2.2. Оптическая индикатриса

При изучении оптических свойств кристаллов необходимо учитывать не только направление распространения световой волны (ход луча), но и направление световых колебаний.

Как известно, колебания световой волны происходят в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения этой волны. Чтобы увязать важные для оптической характеристики кристаллов свойства - величину показателя преломления и направление колебаний электрического вектора соответствующей волны, строится поверхность, получившая название оптической индикатрисы.

Эта поверхность, как отмечалось выше, строится на величинах показателей преломления, отложенных в определенном масштабе в направлении колебаний светового луча.

При построении индикатрисы надо твердо помнить следующее:

а) колебания несобственного луча ( $n_e$ ) совершаются в плоскости  $\perp$ -ой к направлению его распространения и одновременно в плоскости, проходящей через падающий луч и оптическую ось кристалла (рис. 10);



б) колебания обыкновенного луча с показателем преломления  $n_o$  совершаются в плоскости  $\perp$ -ой направлению распространения световой волны и одновременно в плоскости  $\perp$ -ой колебаниям  $n_e$  (см. рис.10).

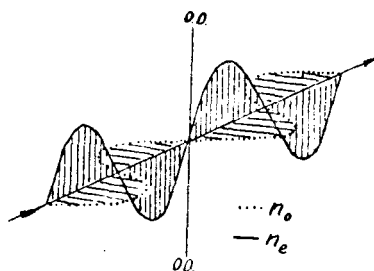


Рис.10

Направления колебаний световых лучей: необыкновенного ( $n_e$ ) и обыкновенного ( $n_o$ )

Построение индикатрисы одноосного положительного кристалла

Для построений оптической индикатрисы используются П.П.П. и приведенные выше правила колебаний лучей.

Как отмечалось выше, к положительным кристаллам относятся те, у которых  $n_e > n_o$  и П.П.П. для них имеет вид шара, вписанного в эллипсоид вращения.

Проведем в П.П.П. координатные направления  $X, Y, Z$  (рис. 8), расположенные под углом  $90^\circ$  друг к другу (ось  $Z$  совпадает с  $O.O$ ).

I. Направим световой луч по оси  $X$ .

На рис.8 видно, что он разделяется на два луча. Согласно приведенным выше правилам, луч  $n_e$  колеблется в плоскости  $ZOY$  и одновременно в плоскости падающего луча и  $O.O$ , т.е. в плоскости  $ZOX$ . Направлением, находящимся одновременно в этих двух плоскостях, является ось  $Z$ . Следовательно, луч с показателем преломления  $n_e$  будет колебаться по оси  $Z$ .

Колебания луча с показателем преломления  $n_o$  проходят в плоскости  $ZOY$  и  $\perp$ -но направлению колебания луча  $n_e$ , т.е. в плоскости  $XOY$ . Линия пересечения этих плоскостей - ось  $Y$  будет направлением колебания луча  $n_o$ .

Отложив в направлении колебаний луча  $n_e$  и  $n_o$  их значения в определенном масштабе, получаем изображение сечения оптической индикатрисы, проходящего через  $O.O$ . Показатели преломления в индикатрисе принято обозначать  $N_e$  и  $N_o$  (рис.11а).

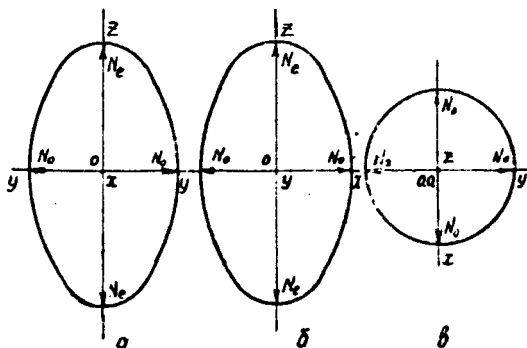


Рис.11. Направление колебаний световых лучей:

- а) в плоскости  $\perp$ -ой оси  $X$ ,
- б) в плоскости  $\perp$ -ой оси  $Y$ ,
- в) в плоскости  $\perp$ -ой оси  $Z$

2. Направим световой луч по оси  $Y$ . П.П.П. (см.рис.8).

Рассуждая так же, как и в первом случае, получаем, что луч с показателем преломления  $n_e$  колеблется одновременно в плоскостях  $ZOX$  и  $ZOY$ , т.е. по оси  $Z$ , а луч с показателем преломления  $n_o$  в плоскостях  $XOY$  и  $XOZ$ , т.е. по оси  $X$ .

Отложив по оси  $X$  значение  $n_o$ , а по  $Z - n_e$ , получаем сечение оптической индикатрисы, перпендикулярное оси  $Y$ . По виду оно аналогично полученному для случая, когда луч света направлен по оси  $X$  (рис.11б).

3. При прохождении светового луча в направлении оси  $Z$  П.П.П. (по  $O.O.$ ) он не испытывает двойного лучепреломления ( $n_e = n_o$ ), колебания его совершаются в плоскости  $XOY$  и в любом направлении имеют значение  $N_o$ .

Таким образом, сечение оптической индикатрисы в плоскости  $\perp$ -ой  $Z$  ( $XOY$ ) будет иметь вид окружности с радиусом  $N_o$  (рис.11в).

Вывод: построенная на полученных сечениях пространственная фигура - оптическая индикатриса одноосного положительного кристалла - представляет собой эллипсоид вращения, вытянутый по оси вращения (рис.12).

Проведя точно такие построения для кристаллов оптически одноосных, но отрицательных, мы получим индикатрису в виде эллипсоида вращения, сплюснутого по оси вращения, т.к. в этом случае  $N_e < N_o$  и  $N_e$  совпадает с меньшей полуосью эллипсоида (рис.13).

При сравнении П.П.П. и поверхности оптической индикатрисы видно, что вторая не только устанавливает связь между величиной показателя преломления и направлением колебания соответствующей волны, но и является геометрически более простой, чем П.П.П.

С помощью индикатрисы данного кристалла можно определять в любом направлении распространения световой волны величину показателей преломления и направление световых колебаний.

Для этого  $I$ -но к заданному направлению распространения света проводит плоскость, пересекающую индикатрису. В большинстве случаев она имеет вид эллипса (рис.12,13).

По этому эллипсу мы можем определить свойства луча:

1. Оси эллипса указывают направления колебаний лучей

$$N'_e \text{ и } N'_o.$$

2. Величины полуосей пропорциональны величине показателей преломления ( $n'_e$  и  $n'_o$ ).

3. Сила двойного лучепреломления в заданном направлении равна:

$$\Delta' = n'_e - n'_o.$$

$\max \Delta$  будет наблюдаться для луча, который распространяется  $I$ -но к вертикальной оси эллипсоида, т.е. к  $O.O.$ , где  $n_e$  в оптически положительных кристаллах отвечает максимальному значению, а в оптически отрицательных - наименьшему.

$\Delta = \min = 0$  для луча, который распространяется  $II$ -но вертикальной оси эллипсоида ( $N_e = N_o$ ), т.е. параллельно  $O.O.$

4. Из уже рассмотренного ранее известно, что направление, по которому  $N_e = N_o$  и  $\Delta = 0$ , является оптической осью кристалла.

Итак, в индикатрисе одноосных кристаллов  $O.O.$  совпадает с осью вращения эллипсоида, которая перпендикулярна к круглому сечению индикатрисы.

Кратко повторим изложенное выше.

Оптические свойства одноосных кристаллов

(сингонии средней категории)

Положительные (+)

Отрицательные (-)

I. Все кристаллы средних сингоний являются оптически анизотропными телами и обладают двойным лучепреломлением.

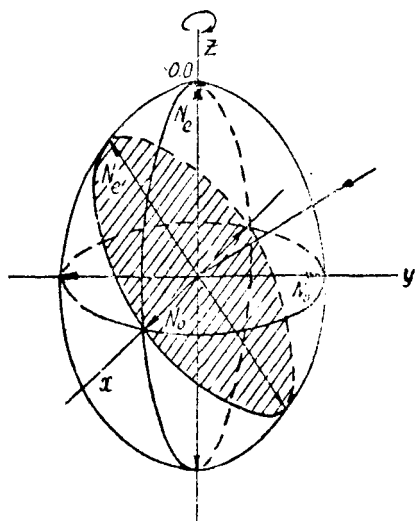


Рис.12. Индикатриса одноосного положительного кристалла

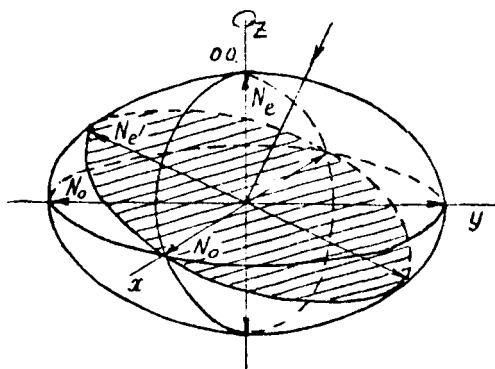


Рис.13. Индикатриса одноосного отрицательного кристалла

2. Во всех кристаллах - одна оптическая ось, совпадающая с осью вращения индикатрисы и кристаллографическими осями  $L_0, L_1, L_2$
3. Кристаллы характеризуются двумя показателями преломления:
  - $n_e$  - необыкновенный, переменный по величине;
  - $n_o$  - обыкновенный, имеющий постоянную величину, не зависимо от направления.

4. $n_e > n_o$	4. $n_e < n_o$
5.	- сила двойного лучепреломления.

6. Поверхность показателей преломления является двойной поверхностью: шар и эллипсоид вращения.
7. Шар вписан в эллипсоид.

7. Эллипсоид вписан в шар.

Радиус шара во всех кристаллах соответствует  $n_o$ , а полуосями эллипсоида являются  $n_o$  и  $n_e$ .

8. Индикатриса представляет собой эллипсоид вращения, в котором с осью вращения всегда совпадает  $N_e$ , а радиусом кругового сечения является  $N_o$ .

9. С осью вращения совпадает большая полуось.

9. С осью вращения совпадает меньшая полуось.

Индикатриса вытянута по оси вращения

Индикатриса сплюснута по оси вращения

10. Оптическая ось совпадает с направлением большего показателя преломления.

10. Оптическая ось совпадает с направлением меньшего показателя преломления.

#### ЛЕКЦИЯ 4

Оптические свойства кристаллов низших сингоний (ромбической, моноклинной, триклинной)

В кристаллах низших сингоний характер изменений показателей преломления в различных направлениях более сложный, чем в кристаллах средних сингоний, т.к. для этой группы соотношение единичных или осевых отрезков имеет вид:  $a \neq b \neq c$ . Если из кристалла ромбической, моноклинной или триклинной сингонии вырезать пластинку, сориентировав ее ребра по главным кристаллографическим направлениям - осям координат  $X, Y, Z$  - и исследовать характер изменения  $n$  в различных направлениях с помощью рефрактометра, то окажется, что эти кристаллы характеризуются не дву-

ма, в тремя значениями  $n$ , причем ни один из них не является постоянным по величине во всех направлениях. Показатели преломления для кристаллов чистых сингоний обозначаются  $n_g, n_m, n_p$ .

$n_g$  - наибольший по величине;

$n_m$  - средний по величине;

$n_p$  - наименьший по величине.

Второй особенностью кристаллов этой группы является наличие в них двух направлений, распространяясь по которым световой луч не испытывает двойного лучепреломления ( $n = \text{const}, \Delta = 0$ ), а такое направление, как уже отмечалось, называется оптической осью.

Вывод: кристаллы низших сингоний оптически двуосны.

#### 4.1. Поверхность показателей преломления двуосных кристаллов

Для построения П.П.П. воспользуемся пластинкой, вырезанной из кристалла ромбической сингонии (рис.14) так, чтобы одна пара граней была // первому пинаклову (100), другая - // второму пинаклову (010), а третья - третьему пинаклову (001).

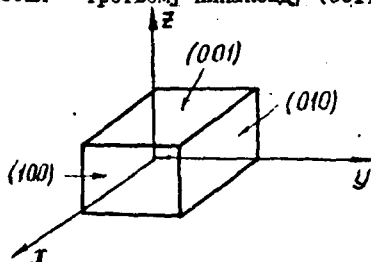


рис.14. Кристаллическая пластинка, грани которой ориентированы по координатным направлениям

Поместив пластинку на кристалл-рефрактометр, исследуем характер изменения  $n$ .

В любом сечении кристалла в поле зрения трубы рефрактометра наблюдается две границы, соответствующие двум различным по величине показателям преломления. Так же как и у кристаллов средних сингоний, одна граница будет неподвижна, а другая подвижна.

График изменения показателей преломления в трех координатных сечениях будет следующим:

разрез // (010) - неподвижной в поле зрения трубы рефрактометра является граница, соответствующая наибольшему показателю преломления, а переменная дает два значения меньших по величине показателя преломления; график изменения величины показателей преломления имеет вид окружности, внутри которой расположен эллипс, не касающийся окружности ни в одной точке (рис.15а); радиус окружности, соответствующий  $\max n$ , ствечает  $n_g$ , а полуоси эллипса - большая  $n_m$ , меньшая -  $n_p$ ,

разрез // (001) — неподвижной в рефрактометре является граница, соответствующая меньшему показателю преломления  $n_p$ , а двум другим будут соответствовать крайние положения границы в поле зрения трубы  $n_g$  и  $n_m$ . Характер изменения  $n$  в этом сечении графически изображен на рис. 15б: окружность с радиусом, пропорциональным  $n_p$ , расположена концентрически внутри эллипса, полуоси которого соответствуют  $n_g$  и  $n_m$ ;

разрез // (100) — в этом разрезе постоянным по величине является  $n_m$ , а  $n_g$  и  $n_p$  соответствуют крайним значениям переменного показателя преломления; график изменения величин  $n$  в данном разрезе имеет вид окружности радиуса  $n_m$  и эллипса с полуосями  $n_g$  и  $n_p$  (рис. 15в); окружность пересекается эллипсом в 4-х точках, линии, соединяющие диаметрально противоположные точки, отвечают направлениям, где не будет наблюдаться двойного лучепреломления, т.е. оптических осей (0,0).

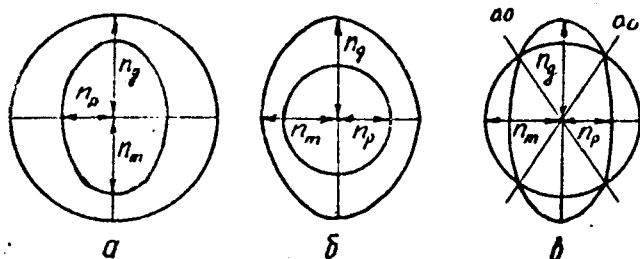


Рис. 15. Графики изменения величины показателей преломления в кристалле нижней сингонии: а — разрез // грани (010), б — разрез // грани (101), в — разрез // грани (100)

Таким образом, кристаллы низших сингоний имеют две оптические оси и поэтому, как уже отмечалось выше, относятся к оптически двуосным.

Угол, составленный оптическими осями, называется углом оптических осей и обозначается через  $2V$ .

На основании графиков, полученных для трех главных сечений кристалла, строится П.П.П. двуосного кристалла, которая имеет вид сложной поверхности 4-го порядка (рис. 16).

Следует отметить, что в кристаллах различных минералов, относящихся к низшим сингониям, виды графиков изменения показателей преломления в разрезах, ориентированных относительно осей координат аналогично вышеприведенным, будут иметь другой характер.

Выводы:

1. Постоянного по величине  $n$  во всех сечениях нет, все показатели -  $n_g, n_m, n_p$  - переменные;  
 $n_g$  - наибольший по величине,  
 $n_m$  - средний по величине,  
 $n_p$  - наименьший по величине.

2. Сила двойного лучепреломления по координатным направлениям равна:

$$\Delta_1 = n_g - n_m,$$

$$\Delta_2 = n_m - n_p,$$

$$\Delta_3 = n_g - n_p, \quad \text{причем } \Delta_3 = \max.$$

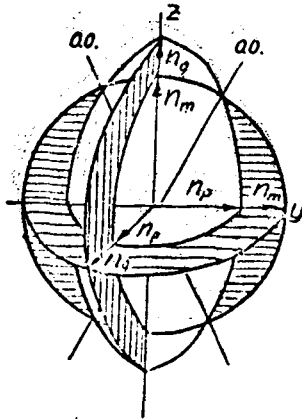


Рис.16. Поверхность показателей преломления двусного кристалла (поверхность Френеля)



3. Направление с  $\Delta = \max$ , т.е. направление, в котором лежат  $n_g$  и  $n_p$ , располагается  $\perp$ -но к плоскости, в которой лежат  $0,0$ .
4. Направлений, в которых  $\Delta = 0$  - два, т.е. оптических осей два, следовательно, кристаллы низших сингоний оптически двуосные.
5.  $\oplus$   $\ominus$

$$n_g - n_m > n_m - n_p \quad n_g - n_m < n_m - n_p$$

6. Угол оптических осей  $- 2V$  подсчитывается по формуле:

$$\operatorname{tg} V_{Ng} = \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}$$

7. Для определения величины  $n$  и  $\Delta$  для светового луча в каком-то заданном направлении проводим в П.П.П. линию, соответствующую направлению его распространения, расстояния от точек пересечения луча с поверхностью до центра П.П.П. будут пропорциональны величинам  $n (n_g, n_m, n_p)$ , расстояния между поверхностями отвечают  $\Delta$ .

#### 4.2. Оптическая индикатриса двуосных кристаллов

Построение индикатрисы для оптически двуосных кристаллов проводится по тому же принципу, что и для одноосных: на величинах показателей преломления, отложенных в направлении световых колебаний  $\mathbf{E}$ , соответствующих световых волн.

Рассмотрим последовательно 3 координатных сечения П.П.П.

1) Сечение, перпендикулярное оси  $Y$ . Свет, распространяющийся по оси  $Z$ , характеризуется показателями  $n_g$  и  $n_m$  (см. рис. 16). Поскольку колебания  $\mathbf{E}$  поперечны, то в этом направлении не могут колебаться ни  $N_g$ , ни  $N_m$ , а только  $N_p$ .

По той же самой причине, в горизонтальном направлении (по оси  $X$ ) может колебаться только  $N_m$ .

Таким образом, сечение индикатрисы, перпендикулярное оси  $Y$ , будет иметь вид эллипса с полуосями  $N_p$  и  $N_m$  (рис. 17а).

2) Сечение, перпендикулярное оси  $Z$  (см. рис. 16). В этом сечении в одном направлении распространяются лучи с показателями  $n_g$  и  $n_p$ , а в другом -  $n_m$  и  $n_p$ . Рассуждая так же, как и при построении сечения, перпендикулярного оси  $Y$ , получаем, что в первом направлении по оси  $X$  колеблется луч с показателем преломления  $N_m$ , а во втором (по оси  $Y$ ) - луч  $N_g$ . Следова-

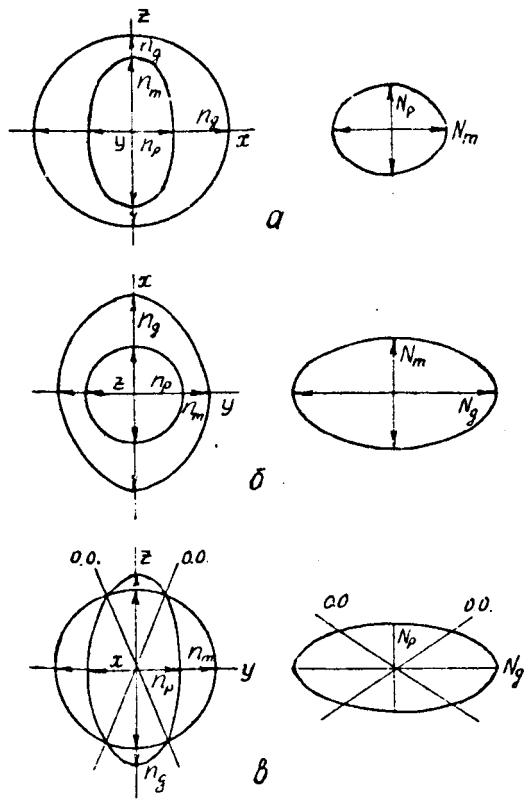


Рис. 17. Сечения П.П.П. и индикатрисы двусного кристалла:

- а)  $\perp$  - ое  $y$ ,
- б)  $\perp$  - ое  $z$ ,
- в)  $\perp$  - ое  $x$

тельно, и это сечение индикатрисы будет иметь вид эллипса с полуосями  $N_m$  и  $N_g$  (рис.17б).

3) Проведя аналогичные построения для сечения, перпендикулярного оси X, получим третье сечение индикатрисы (рис.17в), которое представляет собой эллипс с полуосями  $N_p$  (ось Z) и  $N_g$  (ось Y).

На полученных трех главных сечениях можно построить индикатрису, которая будет иметь вид трехосного эллипсоида с полуосями  $N_g$ ,  $N_m$ ,  $N_p$  (рис.18).

Свойства индикатрисы кристаллов низших сингоний.

1. Индикатриса - геометрически трехосный эллипсоид, все координатные сечения которого - эллипсы.

2. Величины полуосей пропорциональны величинам показателей преломления  $N_g$ ,  $N_m$ ,  $N_p$ .

3. Сила двойного лучепреломления соответствует разнице величин показателей преломления по координатным направлениям:

$$\Delta_1 = N_m - N_p;$$

$$\Delta_2 = N_g - N_m;$$

$$\Delta_3 = N_g - N_p = \max.$$

4. Если последовательно проводить сечения индикатрисы через ось  $N_m$ , то одно из них будет иметь вид окружности с радиусом  $N_m$ .

Следовательно,  $\Delta$  в этом разрезе равна нулю, т.е. луч света, колеблющийся в этой плоскости, не претерпевает двойного лучепреломления. Направление распространения данного луча совпадает с перпендикуляром к указанной плоскости и является, согласно данному выше определению, оптической осью в кристалле.

В построенной индикатрисе имеется второе круговое сечение, в котором колеблются лучи с одинаковыми по величине показателями преломления и  $\Delta = 0$ , а значит, перпендикулярно к нему также располагается оптическая ось (рис.18 а,б).

Таким образом, кристаллы низших сингоний - ромбической, моноклинной и триклинной - имеют две оптические оси (оптически двуосные), которые перпендикулярны к круговым сечениям индикатрисы.

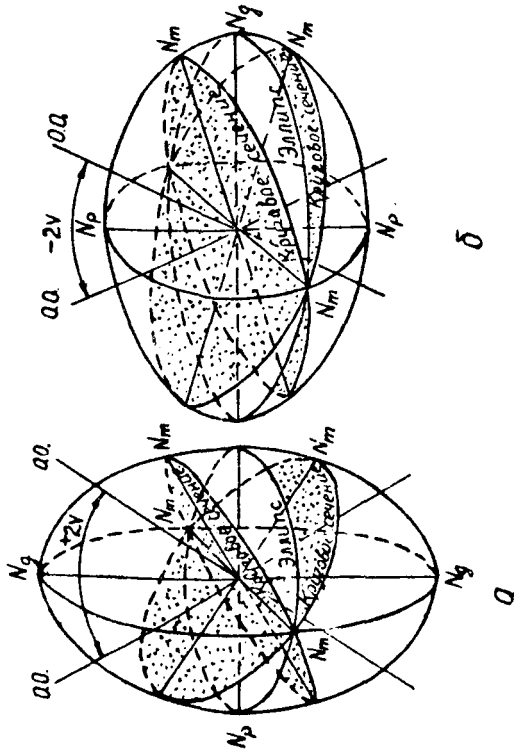


Рис.18. Индикатрисы двуосного кристалла: а - положительного, б - отрицательного

5. Оптические оси располагаются в плоскости индикатрисы  $N_g N_p$ , перпендикулярной к  $N_m$ . Ось индикатрисы  $N_m$  получила название оптической нормали.

6. На рис. 18а, б видно, что оси индикатрисы  $N_g$  и  $N_p$  являются биссектрисами углов  $2V$ . Причем одна из них является биссектрисой острого угла ( $2V < 90^\circ$ ), а другая - тупого ( $2V > 90^\circ$ ). Осм индикатрисы получили соответственно названия: первая - острой биссектрисы, вторая - тупой.

7. Оптический знак кристалла определяется по указанной выше формуле Майяра:

а) если  $\text{tg } \nu_{N_g} = \sqrt{\frac{N_m - N_p}{N_g - N_m}} < 1$ , кристалл положительный ( $N_g - N_m > N_m - N_p$ );

б) если  $\text{tg } \nu_{N_g} > 1$  - отрицательный ( $N_g - N_m < N_m - N_p$ ).

Рассчитав по этой формуле величину угла  $2V$ , получаем, что в оптически положительных кристаллах острой биссектрисой является  $N_g$  (рис. 18а), а в отрицательных -  $N_p$  (рис. 18в).

В кристаллах ромбической сингонии имеют 3 координатных оси, чаще всего совпадающие с кристаллографическими осями (с  $X_2$ ). Индикатриса для кристаллов этой сингонии трехосный эллипсоид. Установлено, что во всех кристаллах ромбической сингонии оси индикатрисы всегда совпадают с кристаллографическими осями, но для одних кристаллов с осью  $X$  совпадает ось индикатрисы  $N_g$ , с осью  $Y$  -  $N_m$ , с осью  $Z$  -  $N_p$ , для других - с осью  $X$  -  $N_p$ , с осью  $Y$  -  $N_g$ , с осью  $Z$  -  $N_m$  и т.д.

Например: в кристалле оливина -  $X - N_g$ ,

$Y - N_p$ ,

$Z - N_m$ ;

в кристалле топаза -  $X - N_p$ ,

$Y - N_m$ ,

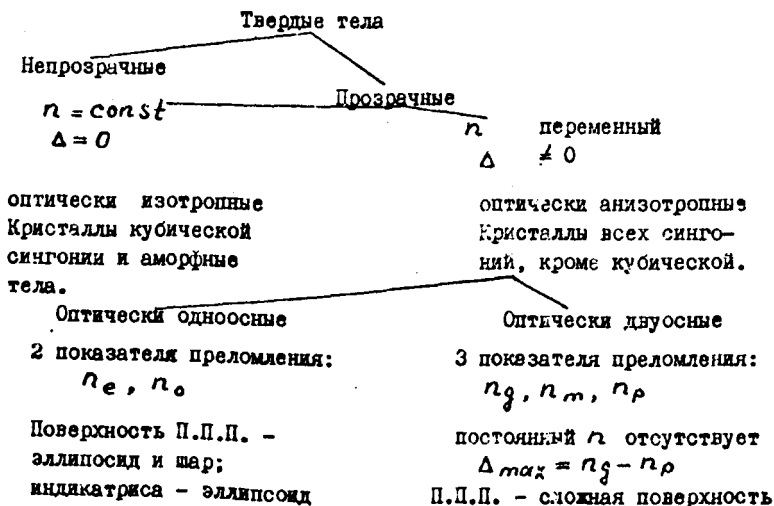
$Z - N_g$ .

Кристаллы моноклинной сингонии имеют только одну  $X_2$ , и ее направление отвечает одной из координат-

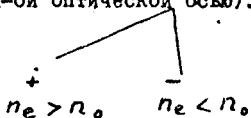
ных осей. С этой последней совпадает одна из осей индикатрисы, а две других составляют с координатными осями тот или иной угол, величина которого различна для кристаллов разных минералов.

В кристаллах триклинной сингонии, где отсутствуют какие-либо элементы симметрии, кроме центра, направления осей индикатрисы и координатных осей не совпадают.

### ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

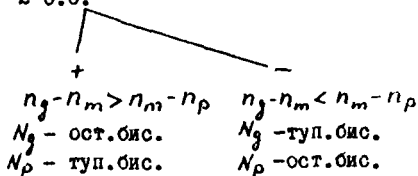


вращения с полуосями  $N_e$  и  $N_o$  (с одним круговым сечением - I-ой оптической осью).



К этой группе относятся кристаллы средних сингоний (гексагональной, тетрагональной, тригональной)

4-го порядка;  
индикатриса - трехосный эллипсоид с полуосями  $N_g, N_m, N_p$ ; имеется 2 круговых сечения и 2 0.0.



К этой группе относятся кристаллы низших сингоний - ромбической, моноклинной, триклинной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусова О.Н., Михина В.В. Общий курс петрографии. - М.: Недра, 1972.
2. Кочурова Р.Н. Основы практической петрографии. ЛГУ, 1977
3. Кузнецов Е.А. Краткий курс петрографии магматических и метаморфических пород. ЛГУ, 1977
4. Оникиенко С.К. Методика исследования породообразующих минералов в прозрачных шлифах. М.: Недра, 1971.



СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение. . . . .	3
Лекция I. . . . .	4
I. Некоторые сведения из оптики. . . . .	4
II. Основы кристаллооптики. . . . .	7
I. Основные отличия оптических свойств кристаллических и некристаллических тел. . . . .	7
2. Способы измерения показателей преломления. . . . .	8
А. Аморфные тела и кристаллы кубической симгонии. . . . .	9
Б. Кристаллы средних и низших симгоний. . . . .	10
Лекция 2 и 3 . . . . .	11
Оптические свойства кристаллов различных симгоний. . . . .	11
I. Оптические свойства кристаллов кубической симгонии. . . . .	11
2. Оптические свойства кристаллов средних симгоний. . . . .	12
2.1. Поверхность показателей преломления. . . . .	12
2.2. Оптическая индикатриса. . . . .	16
Лекция 4 . . . . .	21
Оптические свойства кристаллов низших симгоний. . . . .	21
4.1. Поверхность показателей преломления двуосных кристаллов. . . . .	22
4.2. Оптическая индикатриса двуосных кристаллов . . . . .	26

**В.С.Князев, И.Б.Кононова**

**Основы кристаллооптики**  
**(раздел курса "Петрография общая и осадочных горных пород")**

**Конспект лекций**

**Редактор И.А.Исакова**  
**Корректор И.М.Худякова**  
**Св.тем.план, 1989, №7**

---

Подписано в печать 6.3.89 г.	Л - 19573
Формат 60x90/16	Уч.-над.л. 2.4
Тираж 160	Заказ 139
	Цена 8 коп.

---

**Отдел оперативной полиграфии МИНГ им.И.М.Губкина**