



Р. Н. КИРЬЯНОВ

МЕТОДИКА

ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ВЕЩЕСТВА С ПОМОЩЬЮ
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МИКРОСКОПА

ГОИТИ НКТП — ССР
СВЕРДЛОВСК — МОСКВА
1939

Р. Н. КИРЬЯНОВ

549.

МЕТОДИКА

ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
Вещества с помощью поляриза-
ЦИОННОГО МИКРОСКОПА

2286

2674



БИБЛИОТЕКА
Геологического Ин-та
Академии Наук СССР



ГОСУДАРСТВЕННОЕ

ОБЪЕДИНЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СВЕРДЛОВСК

1939

МОСКВА

Книга Р. Н. Кирьянова по методике исследования кристаллического вещества с помощью поляризационного микроскопа представляет собой методически проработанное руководство, предназначенное в основном для студентов, геологов, специалистов в других областях, соприкасающихся с исследованием кристаллического вещества в поляризованном свете, и молодых научных работников, которым оно, по всей вероятности, будет полезно.

В отличие от ряда существующих руководств по кристаллооптике, данное руководство является методическим, в котором, шаг за шагом, излагается решение всех основных практических задач по исследованию кристаллического вещества и определению оптических констант в шлифах с помощью поляризационного микроскопа, что составляет предмет студенческого практикума по микроскопии и обычной, рядовой работы геолога-петрографа.

Ответ. редактор **Б. А. Гаврусевич**

Техн. редактор **Н. А. Дуган**

Сдано в произв. 13/1 1939 г.

Подписано к печати 16/III 1939 г.

Формат 60×92¹/₁₆. 5,5 печ. листа.

7,4 уч.-авт. лис

Свердловское отд. ГОНТИ, № 378

Уполн. Свердловоблита № В—

Тираж 3100

Заказ №

Тип. изд-ва. Свердловоблсполкома „Ур. рабоч.“, Свердловск, ул. Ленина, 47.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга выходит вторым изданием. Первое издание, вышедшее в 1937 г. на средства Свердловского государственного университета, встретило одобрение и быстро разошлось. Многочисленные письма, поступившие автору о высылке книги, говорят о необходимости второго издания. Так как никаких указаний на серьезную огрешность в книге автор не получил, то и изменений в старом издании не ввел. Все замеченные опечатки исправлены. Глава «Краткие основы теории световых явлений в кристаллах» написана вновь. Краткое теоретическое введение к книге написано по совету проф. Д. С. Белянкина.

Мысль написать краткое специальное методическое руководство по кристаллооптике применительно к оптическому исследованию сырья и продуктов огнеупорной и керамической промышленности первоначально возникла у меня по инициативе студентов специальности технологии силикатов Уральского индустриального института, с которыми я вел этот курс в течение ряда лет.

Опыт введения занятий по микроскопии на геологическом факультете Свердловского государственного университета, а также мое участие в различных работах производственного и исследовательского характера убедили меня в необходимости написать *общее методическое руководство* с охватом, в сжатой форме, всех основных задач обычной микроскопической практики и тем самым восполнить тот пробел в русской методической литературе, который в последние годы ощущается особенно остро. Оптические методы исследования кристаллического вещества приобретают все большее и большее значение в различных отраслях нашей промышленности, становясь наряду с другими методами мощным оружием исследователя.

Не говоря о минералого-петрографических исследованиях, последние работы в области металлургии, керамики и т. д. уже дают в этом с достаточной ясностью.

Отсутствие на русском языке *практического* руководства по методике оптических исследований затрудняет усвоение и пользование методом, делает его трудным и мало доступным и нередко ведет просто к грубым ошибкам. Зарекомендовавшие себя общезвестные руководства по кристаллооптике Ф. Ю. Лессинга и Д. С. Белянкина в основном излагают теорию и, к тому же, в настоящее время являются библиографической редкостью.

Единственным распространенным пособием по кристаллооптике служит руководство В. И. Лучицкого («Петрография», т. I) и прекрасная справочная настольная книга горного инженера В. Н. Лодочкина «Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества», в сущности являющаяся единственно полным учебником, содержащим многочисленные практические указания. Однако обилие материала в этой книге, как показывает опыт занимающихся, часто затрудняет пользование ею; к тому же она не охватывает всех методов исследования (нет коноскопии).

Автор предупреждает, что предлагаемое вниманию руководство ни в коем случае не может быть названо полным руководством по кристаллооптике, и само его название «Методы исследования кристаллического вещества с помощью поляризации микроскопа» говорит о содержании и назначении книги. В условиях необходимости быстрого усвоения оптических методов исследования с помощью поляризационного микроскопа наличие соответствующей литературы по кристаллооптике и руководство по методике совершенно необходимо.

Данное руководство охватывает все основные вопросы работы с поляризационным микроскопом как в параллельном (ортоскопия), так и в сходящемся (коноскопия) свете.

Из теоретических вопросов кратко рассматриваются: природа света, световые колебания, поляризация света, интерференционные явления и явления светопреломления в кристаллах. Интерференция в скрещенных николях кратко рассмотрена в разделе, касающемся устройства и действия поляризационного микроскопа. Для отчетливого понимания рассматриваемых явлений совершенно необходимо знание основ физики.

В целях устранения элементов механического восприятия наблюдаемых явлений в сходящемся свете, кратко изложены основные теоретические положения, касающиеся образования интерференционных фигур, явления дисперсии и т. д. Материал изложен сокращенно в той последовательности, в какой он излагается на лекциях при чтении этого курса на геологическом факультете.

Иммерсионный метод, как специальный вид исследования, далеко не обычный в повседневной практической работе, подробно не излагается.

При составлении руководства использована почти вся вышедшая на русском языке литература по кристаллооптике. Из использованных иностранных руководств следует упомянуть книгу А. N. Winchell'a—*Elements of optical mineralogy, part I, New York, 1928* и P. Niggli—*Tabellen zur allgemeinen und speziellen Mineralogie, Berlin, 1928*.

Автор в отдельных случаях старался сохранить форму наиболее простого и удачного изложения того или иного вопроса, излагаемого в отдельных руководствах.

Часть рисунков заимствована из различных как русских, так и иностранных руководств. Многие рисунки автором переработаны или составлены вновь. В конце книги прилагаются

таблицы к компенсатору Берека, а также схема отчета по определению минерала на основании изучения его оптических свойств. К сожалению, из-за технических трудностей издания таблица Мишель-Леви к настоящему руководству не прилагается.

Изданием настоящего пособия мы стремимся дать практическое руководство для изучения микроскопии и за все указания и замечания по таковому будем признательны.

Пермь,
Государственный университет,
декабрь 1938 г.

КРАТКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ СВЕТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ

1. Природа света

В учении о свете известно две принципиально различные теории световых явлений: теория импульсов, или эфирноволновая, предложенная Гюйгенсом, и эмиссионная, или корпускулярная, предложенная Ньютоном. Как тот, так и другой предполагали существование мельчайших световых корпускул. Теория Гюйгенса с течением времени, благодаря работам Юнга и Френеля, вылилась в гениальное обобщение Максвелла (электроманнитные уравнения есть уравнения эфира), и основатель теории светового эфира, считавший корпускулы находящимися в состоянии покоя и рассматривавший распространение света как передачу ударов от частицы к частице, явился предвосхитителем современной электромагнитной теории, объясняющей световые явления как следствие возбуждения в эфире электромагнитных колебаний. Ньютон же считал свет потоком летящих корпускул. Учение об электромагнитных волнах не делает различия между всеми существующими видами лучистой энергии, начиная от космических лучей и кончая радиоволнами. Все дело заключается лишь в разных длинах волн; если для космических лучей длина волны составляет около $0,0005 \text{ \AA}^1$, то для волн радиотелеграфии она достигает 30 км. Длина волн видимых лучей укладывается в диапазоне от 360 до 760 $\mu\mu$ ².

Для целей более простого толкования явлений распространения света в кристаллах используется эфирноволновая теория света. Согласно этой теории передатчиком света является гипотетический эфир, заполняющий все мировое пространство.

2. Световые колебания

Прямые, по которым происходит распространение колебаний эфира, т. е. распространяется свет, называются *световыми лучами*.

Поверхность, построенная на лучах путем соединения всех точек лучей, до которых дошло колебание в данной среде за определенный промежуток времени, называется *волновой поверхностью*. Центром этой поверхности является светящаяся точка.

¹ 1 $\text{\AA} = 10^{-8}$ см.

² 1 $\mu\mu = 0,000001$ мм.

Колебания частиц в эфире, вызывающие появление волн, *поперечны*, т. е. происходят в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волн. Это представление о поперечности колебаний было введено Юнгом и Френелем. Направления, по которым распространяются волны, называются *световыми нормальями*. В применении к обычному свету понятия о световом луче и световой нормали не различимы. В дальнейшем мы узнаем, что направление световых нормалей не всегда совпадает с направлением лучей. Световые колебания являются колебаниями *гармоническими*, т. е. совершающимися через определенные периоды. Колебательное движение частицы мы можем представить себе, как колебательное движение по диаметру AB (фиг. 1) некоторой точки P , представляющей проекцию точки P , движущейся по окружности с некоторой постоянной скоростью. Время, в течение которого точка P обегает полную окружность, или время, в течение которого ее проекция p совершает одно полное колебание $pApBp$, называется *периодом* колебания (T). Величина $\frac{1}{T}$, обратная периоду, называется *частотой* колебаний.

От частоты колебаний зависит окраска света. Например, если в фиолетовом свете для любой среды частота колебаний составляет $754 \cdot 10^{12}$ колебаний в секунду, то для крайних красных лучей видимого спектра она равна около $394 \cdot 10^{12}$. Наибольшее удаление колеблющейся точки p от ее первоначального положения называется *амплитудой* колебаний (A).

Величина амплитуды зависит от силы удара, получаемого частицей эфира, т. е. от *силы света* (I). $I = k \cdot A^2$, т. е. сила света пропорциональна квадрату амплитуды. Угол отхода частицы от положения равновесия называется *фазой* (φ) колебательного движения.

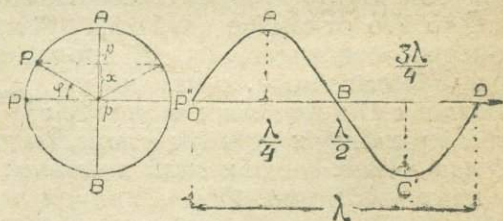
Обозначив через t время, за которое точка P переместилась на угол φ , получим:

$$\varphi : 360 = t : T; \quad \varphi = 360 \cdot \frac{t}{T} = 2\pi \frac{t}{T}.$$

Кривая гармонического колебательного движения представляет собою синусоиду. Таким образом, уравнение гармонического колебательного движения есть уравнение синусоиды:

$$x = A \cdot \sin \varphi, \text{ или } x = A \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Из сказанного ясно, что распространение света и поперечных колебаний можно представить себе как многократное повторение этой кривой за определенный промежуток времени, истекшего с момента начала колебания.



Фиг. 1.

Наикратчайшее расстояние между двумя точками, находящимися в одинаковых фазах, или, что то же, расстояние, на которое распространяется свет в пустоте за время T , называется *длиной волны* (λ). Длина волны измеряется в миллимикронах.

$$\lambda = v \cdot T,$$

где v — скорость распространения света.

Из фиг. 1 следует, что фазы могут выражаться в долях длины волн. Так, например, фазы в точках O и A' отличаются на $\frac{1}{4} \lambda$, в точках O и B — на $\frac{1}{2} \lambda$, в точках O и C' — на $\frac{3}{4} \lambda$, в точках O и D — на λ , и т. д.

Из уравнения $\lambda = v \cdot T$ следует, что от длины волны в одной и той же среде зависит окраска световых лучей; наиболее длинными лучами с $\lambda = 760 \mu$ являются красные лучи, а наиболее короткими с $\lambda = 393 \mu$ — фиолетовые. Эти длины волн приведены для безвоздушного пространства, в котором скорость распространения света для них, как и вообще для лучей различной длины, будет одинаковой и, как известно, равной 300000 км/сек. В газообразных, жидких и твердых телах скорость света для лучей различной длины волны может меняться.

3. Поляризация света

Явление поляризации света было установлено в 1808 г. Малусом на куске исландского шпата. Интересно отметить, что именно это открытие натолкнуло Юнга на путь представления о поперечности колебаний. В противном случае явление оставалось необъяснимым, о чем мы узнаем из дальнейшего. Если при обычном свете колебания частиц эфира совершаются во всех плоскостях, проходящих через луч, в направлениях перпендикулярных к лучу, то при поляризованном свете колебания совершаются только в одной из этих плоскостей. Кроме прямолинейно или плоско поляризованного света, бывает свет поляризованный по кругу или эллипсу, в этом случае говорят о круговой или эллиптической поляризации света.

Плоскость, перпендикулярная плоскости колебаний, называется *плоскостью поляризации*. Поляризация бывает частичная и полная. Отраженный от зеркальных поверхностей изотропных тел свет является частично поляризованным. Степень поляризации зависит от угла падения и отражающего свет вещества. Согласно закону Брюстера $\text{tg} \varphi = n$, где φ — угол падения, при котором происходит полная поляризация в плоскости падения (угол полной поляризации), n — показатель преломления вещества. Полная поляризация света наступает в телах анизотропных, в которых, как мы узнаем из дальнейшего, происходит разложение вступающего в кристалл луча на два, совершающих свои колебания во взаимно перпендикулярных плоскостях. Такая поляризация получила название *поляризации при двупреломлении*. Устройство и действие прибора, основанного на двупреломляющем свойстве кристалла исландского шпата, подробно рассмотрено в главе «Микроскоп и его части».

Наш глаз не может отличить поляризованный свет от неполяризованного.

4. Интерференционные явления

Под интерференционными явлениями мы подразумеваем явления, наступающие при взаимодействии двух или более волн, идущих по одному или почти одному направлению. Это взаимодействие, или интерференция, может выражаться как в усилении света, так как получается новая волна, амплитуда которой равна сумме амплитуд составляющих волн, так и в ослаблении света в силу того, что амплитуда новой волны равна разности амплитуд составляющих волн. Именно это и представляет сложение и разложение световых колебаний. Следует помнить, что при разложении амплитуды некоторого колебания на две составляющих (по принципу параллелограмма) сила света двух новых составляющих волн будет равна силе света первоначальной волны. В кристаллооптике разбирается случай интерференции двух плоско поляризованных волн. При рассмотрении устройства и действия поляризованного аппарата в микроскопе увидим, что из двух получающихся плоско поляризованных волн одна гасится, в силу чего происходит потеря примерно половины силы первоначального света.

Для решения вопроса, когда же будет наступать усиление и ослабление света, необходимо знать величину, на которую одна волна отстает от другой, т. е. на какое число волн или частей волны отличаются их фазы. *Максимальное увеличение амплитуды, т. е. усиление света, происходит тогда, когда разность фаз двух интерферирующих волн равна целому числу волн или четному числу*

полуволн $\frac{2n\lambda}{2}$ (одинаковые фазы). Уменьшение амплитуды, т. е.

ослабление света получается тогда, когда разность фаз двух волн равна нечетному числу полуволн $(2n+1)\frac{\lambda}{2}$ (противоположные фа-

зы). Ясно, что если амплитуды двух интерферирующих с противоположными фазами волн равны, то разность между ними будет равна нулю, и свет гаснет.

Закон интерференции Араго и Френеля гласит: *для интерференции двух прямолинейно поляризованных волн необходимо, чтобы эти две волны происходили из одной и той же прямолинейно поляризованной волны и совершали свои колебания в одной плоскости.* В микроскопе так называемый анализатор и служит для приведения двух взаимно перпендикулярных волн, выходящих из кристалла, в одну плоскость. Далее мы узнаем, что при исследовании кристаллов в так называемых (+) николях, вследствие возникновения в анализаторе разности хода в полволны, максимальное усиление света может происходить лишь тогда, когда разность фаз двух, возникающих в кристалле волн равна $2(n+1)\frac{\lambda}{2}$, и максимальное ослабление — при разности фаз, равной $\frac{2n\lambda}{2}$.

5. Явления светопреломления в кристаллах

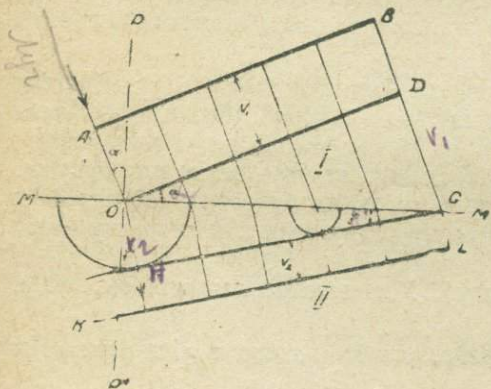
Все кристаллы в отношении явлений светопреломления делятся на оптически *изотропные* и *анизотропные*.

К первым принадлежат как кристаллы кубической системы, так и все аморфные тела. Все изотропные тела характеризуются тем, что в них в *разных направлениях оптические свойства одинаковы*.

К оптически анизотропным телам, т. е. к таким, в которых *свойства меняются с направлением*, принадлежат кристаллы всех прочих систем.

А. Явления светопреломления в изотропной среде

Представим себе две изотропных среды, разграниченных плоскостью *ММ* (фиг. 2). Пусть из первой среды на границу раздела сред падает световой луч *АО*. *АВ* — плоская волна, перемещающаяся в первой среде со скоростью v_1 . С момента, когда плоская волна *АВ* достигнет точки *О*, луч *АО* будет распространяться во второй среде, в то время как колебания по лучу *ВГ* только что достигнут точки *Д*. Если предположить, что вторая среда оптически более плотная, чем первая, то скорость распространения в ней колебаний будет меньше, чем в первой среде. Поскольку световые колебания распространяются в каждой данной среде с одинаковой скоростью, то понятно, что через определенный промежуток времени лучи во второй среде достигнут точек, равноудаленных от точки *О*, являющейся, согласно



Фиг. 2.

принципу Гюйгенса, центром световых колебаний¹. Поверхность, построенная на этих точках, и будет шаровой поверхностью световой волны с радиусом v_2 . *HG* — преломленная плоская волна.

Из треугольников *DOG* и *OGH* имеем: $\frac{DG}{OH} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$, т. е.

отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скоростей распространения света в соответственных

¹ Принцип Гюйгенса заключается в том, что каждая точка, до которой дошло световое колебание, становится в свою очередь центром световых колебаний. В силу интерференции эти колебания гасятся и проходят только те, которые распространяются по радиусам шаровой поверхности, т. е. свет распространяется прямолинейно во все стороны от светящейся точки. Однако известно, что свет в силу явлений дифракции не всегда распространяется прямолинейно.

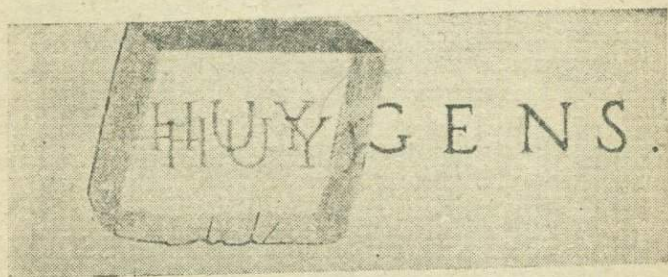
среды и для каждой двух изотропных сред является *величиной постоянной*. Это и есть закон синусов Снеллиуса-Декарта. Эта величина и дает коэффициент преломления второй среды по отношению к первой среде, т. е. *относительный коэффициент преломления*.

Если первая среда будет пустотой, в которой скорость распространения света принимается за единицу, или воздухом, в котором скорость близка к единице, то коэффициент преломления второй среды выразится некоторой абсолютной величиной, обратной скорости в ней. Это и есть так называемый *абсолютный коэффициент преломления* данной среды. Итак коэффициент преломления данной среды есть величина обратная скорости распространения света в этой среде. Коэффициент преломления обозначается буквами N или n и является величиной отвлеченной. Для большинства твердых и жидких тел N больше

$$\text{единицы} \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} > 1 \right).$$

Б. Явления светопреломления в анизотропных телах

Более чем за целое столетие до открытия Малусом явления поляризации света, в 1678 г. Христиан Гюйгенс писал: «Из Исландии, острова, находящегося в Северном море на широте 66° , был привезен кристалл или прозрачный камень, весьма замечательный по своей форме и другим качествам, но более всего по своим странным преломляющим свойствам». Первым обратил внимание на «исландский камень» датский физик Эразм Бартолимус, но изучил его Гюйгенс.



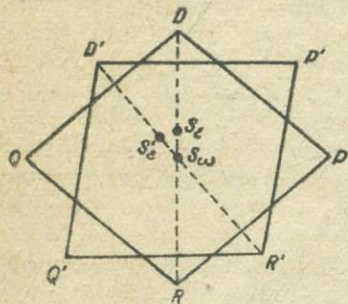
Фиг. 3.

«Странные преломляющие свойства» заключались в том, что каждый луч, входящий в кристалл, раздваивался и каждый из вновь образовавшихся лучей распространялся в кристалле по различным направлениям. По выходе из кристалла эти лучи следовали параллельно друг другу. Различить эти два луча можно хорошо в дымном воздухе. Раздвоение лучей прекрасно можно видеть, если рассматривать через исландский шпат какое-нибудь изображение (фиг. 3). Это явление получило название *двойного лучепреломления* или *двупреломления*.

Дальнейшие исследования Гюйгенса показали, что *один из лучей подчиняется обычным законам преломления и свойства своих с направлением не меняет*, т. е., если пускать первоначальный луч на кристалл в различных направлениях, то изображение, даваемое этим лучом, будет совершенно одинаково. Такой луч называется лучом *обыкновенным* и обозначается ω или o (*ordinarius*).

Другой же луч меняет свои свойства с направлением, и изображение, даваемое этим лучом, каждый раз будет различным.

Такой луч называется лучом *необыкновенным* и обозначается ϵ или e (*extraordinarius*). Его местоположение будет зависеть от направления первоначального луча. Фиг. 4 иллюстрирует сказанное. S_ω — изображение, даваемое обыкновенным лучом, S_ϵ и S'_ϵ — изображения, даваемые необыкновенным лучом при вращении кристалла.



Фиг. 4.

Оказалось, что в кристалле есть такое направление, по которому пущенный луч не раздваивается, т. е. двойного лучепреломления не происходит. Это направление называется *оптической осью*.

При дальнейшем изучении свойств исландского шпата Гюйгенс столкнулся с «удивительным» явлением, природа которого осталась для него тайной. Гюйгенс писал: «Это явление заключается в том, что если взять два куска кристалла и расположить их один над другим, или просто держать на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы грани одного были параллельны граням другого, то луч света AB разделяется в первом кристалле на два пучка BD и BC в результате двух преломлений — правильного и неправильного. Попадая затем во второй кристалл, каждый луч проходит там без дальнейшего деления; но обыкновенный луч DG преломляется согласно обычным законам преломления и идет дальше в виде луча GH , тогда как другой — CE испытывает опять необычное преломление — EF ... удивительно, что лучи CE и DG , падающие на нижний кристалл из воздуха, не раздваиваются, как это происходило с первоначальным лучом AB . Очевидно, луч DG при прохождении в верхнем кристалле теряет какие-то из своих свойств, необходимые для того, чтобы происходило необычное преломление, и аналогично CE теряет свойства, способствующие правильному преломлению...» И далее: «но есть еще один факт, который не соответствует этому заключению. Он заключается в том, что когда два кристалла располагают таким образом, что плоскости, составляющие главное сечение, пересекаются под прямым углом, луч DG , полученный в результате правильного преломления, испытывает в нижнем кристалле только необыкновенное преломление, и наоборот луч CE , испытывавший в верхнем кристалле необыкновенное преломление, в нижнем преломляется обычным образом...»

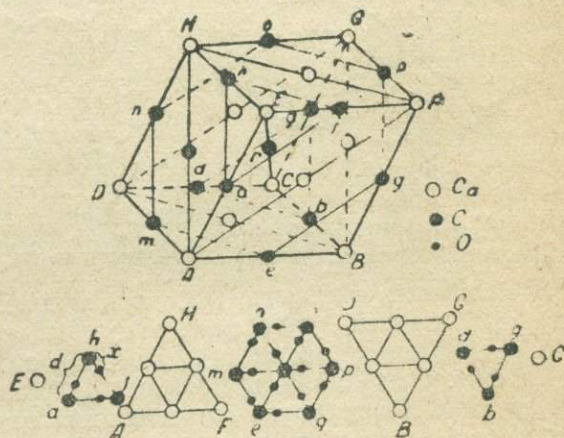
Дело в том, что Гюйгенс ничего не знал о явлении поляризации света. Выше указывалось, что открытое Малусом явление поляризации света заставило Юнга и Френеля пересмотреть свои взгляды на волновую теорию и ввести представление о поперечности световых колебаний, без которого это явление оставалось, с точки зрения старой волновой теории, необъяснимым.

Мы теперь знаем, что световые волны подобно морским — поперечные. Но последние в отличие от первых обладают ограниченным числом направлений колебаний, так, например, вода может опускаться и подниматься, но не перемещаться из стороны в сторону. Вот как раз морские-то волны и дают представление о поляризованном свете. Тайна Гюйгенса в том и заключалась, что возникающие в кристалле два луча — обыкновенный и необыкновенный совершают свои колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, являясь таким образом плоско поляризованными.

Из всего сказанного следует, что *анизотропные тела являются телами двупреломляющими и поляризующими свет.*

Явление поляризации, наблюдаемое в кристаллах, тесно связано с его структурой. Известно, что от расположения атомов в кристалле зависят его свойства. Различные кристаллы обладают различной структурой, а следовательно, и свойствами. Изображенная на фиг. 5 структура исландского шпата CaCO_3 ¹, кристаллизующегося в тригональной системе, наиболее сложная.

Из фиг. 5 видно, что сечение, перпендикулярное главной оси, по сравнению с сечением, проходящим через нее, обладает большей симметрией. Как раз в этом сечении осевые отрезки равны между собой ($a=b=d$). Осевой же отрезок по главной оси будет уже другим. Не удивительно, что скорость распространения света будет зависеть от расположения направления колебаний относительно тех или иных направлений в кристалле. Из сказанного понятно, что, в соответствии со структурой исландского шпата, все колебания, перпендикулярные главной оси, будут одинаковы, т. е. луч, идущий по главной оси, будет рас-



Фиг. 5.

будет одинаковы, т. е. луч, идущий по главной оси, будет рас-

¹ На модели не показаны атомы кислорода, о их расположении можно судить по приводимым на рисунке сечениям.

пространяться с одинаковой скоростью. Все прочие лучи будут распространяться с различной скоростью.

Объяснение явления поляризации может быть дано при помощи следующей аналогии. Представим себе металлический стержень эллиптического сечения. Ударив его по плоской стороне, т. е. в направлении малой оси эллиптического сечения, мы услышим звук соответствующего тона; ударим теперь по стержню в направлении длинной оси сечения, звук будет обладать более высоким тоном, нежели в первом случае. Ударив по стержню в направлении, идущем под углом к осям эллиптического сечения, мы не получим среднего тона, а услышим одновременно оба звука, т. е. энергия колебания разделится на две части и распределится в соответствии с геометрической формой сечения. Импульс, возникающий в первом случае, будет двигаться медленнее, чем тот, который возникает во втором случае, и, следовательно, будет от него отставать. Взяв стержень с круглым сечением, мы этого не получим. Энергия световых колебаний аналогично разделяется на две части и распределяется в соответствии со структурными особенностями данного кристалла.

Итак, мы теперь знаем, на примере исландского шпата, о существовании кристаллов, обладающих лишь одним направлением, в котором не происходит двойного лучепреломления, т. е. имеющих одну оптическую ось.

Такие кристаллы называются *оптически одноосными*. К ним относятся кристаллы тетрагональной, тригональной и гексагональной систем.

Оптически одноосные кристаллы делятся на *положительные* и *отрицательные*.

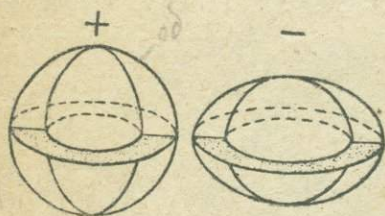
Оптически положительными кристаллами называются кристаллы, в которых скорость распространения обыкновенного луча больше, чем у необыкновенного ($v_o > v_e$).

В оптически отрицательных кристаллах скорость распространения необыкновенного луча больше, чем у обыкновенного ($v_e > v_o$).

В направлении оптической оси $v_o = v_e$.

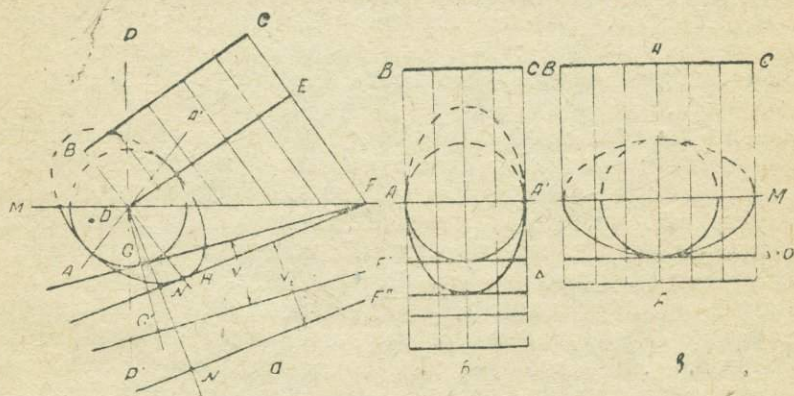
На фиг. 6 изображены сложные поверхности световых волн, или лучевые поверхности Гюйгенса для одноосных положительных и отрицательных кристаллов. Шаровая поверхность построена на скоростях обыкновенных лучей. Поверхность, построенная на скоростях лучей необыкновенных, имеет вид эллипсоида вращения. Явления светопреломления в анизотропной среде хорошо уясняются на примере одноосных кристаллов.

На фиг. 7—а, б, в, показаны различные случаи взаимоотношения падающей плоской волны и оптической оси. Для примера взята среда, в которой $v_e > v_o$. Оптическая ось находится в плоскости падения. На фиг. 7, а, плоская волна BC падает под углом к оптической оси. GH и FH — преломленные обыкновенная и необыкновенная волны. DN — световая нормаль, не совпадающая



Фиг. 6.

с направлением необыкновенного луча DH . Следовательно, в случае падения плоской волны под углом к оптической оси скорости луча необыкновенного и волны необыкновенной не совпадают по величине и направлению. Для исландского шпата—минерала, наиболее сильно двупреломляющего,—это несовпадение составляет $6^{\circ}16'$. Для большинства же порообразующих минералов оно менее 1° . Во всех дальнейших рассуждениях под скоростью света подразумевается скорость волн, а не лучей. На фиг. 7, в,

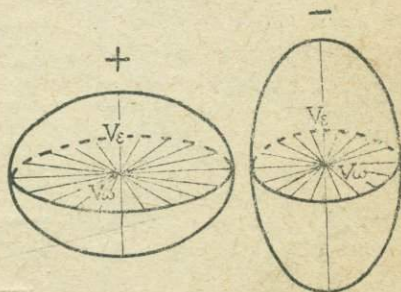


Фиг. 7.

изображен случай падения плоской волны параллельно оптической оси. В этом случае разность хода двух волн будет наибольшей. На фиг. 7, с, плоская волна падает перпендикулярно к оптической оси (луч распространяется по оптической оси), разность хода равна нулю.

Френель предложил строить поверхности на скоростях лучей так, что скорости лучей откладываются не в направлении лучей, как у Гюйгенса, а в направлении колебаний этих лучей, т. е. в направлениях, перпендикулярных лучам. Следовательно, лучи будут распространяться в направлении своих собственных колебаний. Такие поверхности получили название **эллипсоидов упругостей** (скоростей) или эллипсоидов Френеля.

На фиг. 8 изображены эти эллипсоиды для положительных и отрицательных одноосных кристаллов. Сечение, проходящее через оптическую ось, называется **главным сечением** эллипсоида; сечение, перпендикулярное оптической оси,—**круговым**. Из рисунка видно, что если луч распространяется в направлении оптической оси, то его колебания совершаются с одинаковой скоростью в направлениях, перпендикулярных этой



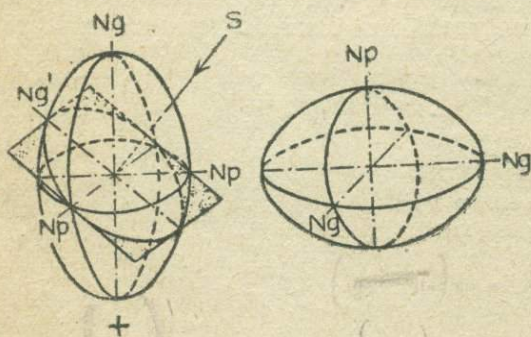
Фиг. 8.

оси, т. е. по радиусам кругового сечения. Если луч распространяется в направлении, перпендикулярном оптической оси, то колебания *двух образующихся лучей* совершаются в направлении осей эллиптического сечения, так что *необыкновенный луч, распространяясь в направлении оптической оси, колеблется в плоскости, проходящей через оптическую ось*, т. е. в плоскости главного сечения. Обыкновенный же луч распространяется в направлении, перпендикулярном оптической оси, и колеблется в плоскости кругового сечения. В случае, когда луч падает под углом к оптической оси, естественно, явление следует рассматривать в плоскости, перпендикулярной лучу; необыкновенный луч в каждом промежуточном направлении будет иметь некоторую промежуточную величину v'_a .

Обобщение всех этих случаев выражается следующим **правилом Френеля**: для нахождения направлений колебаний двух лучей и величин их скоростей нужно разрезать эллипсоид плоскостью, перпендикулярной лучу, тогда направления осей полученного сечения указывают на направления колебаний, а величины полуосей на скорости. Из этого следует, что луч необыкновенный колеблется всегда в плоскости, проходящей через падающий луч и оптическую ось. Луч же обыкновенный колеблется в плоскости ей перпендикулярной, т. е. в плоскости, проходящей через луч и диаметр кругового сечения. Указанное правило распространяется и на следующие рассматриваемые поверхности (фиг. 9).

Флетчер, воспользовавшись френелевским приемом построения поверхностей, предложил строить поверхности не на скоростях лучей, а на величинах им обратных, т. е. на показателях преломления. Поверхности, построенные на показателях преломления, получили название **оптических индикатрис**.

На фиг. 9 изображены оптические индикатрисы положительных и отрицательных одноосных кристаллов. Оптически положительным одноосным кристаллом будет кристалл, для которого $n_e > n_o$, а отрицательным — кристалл, для которого $n_o > n_e$.



Фиг. 9.

Наибольший показатель преломления обозначается N_g или γ , а наименьший N_p или α . Не трудно видеть, что для кристалла одного и того же знака поверхности, построенные на скоростях и показателях преломления, будут взаимно обратными.

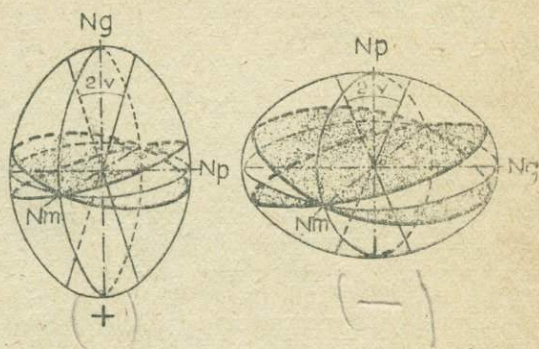
Кристаллы ромбической, моноклинной и триклинной систем являются **оптически двуосными**. В этих кристаллах имеются две оптические оси. Возникающие в них два луча являются *необы-*

кновенными, так как решетки кристаллов этих систем характеризуются неравенством осевых отрезков ($a \neq b \neq c$).

Поверхность, построенная на скоростях, или показателях преломления, является *трехосным эллипсоидом*.

Двуосные кристаллы также делятся на *положительные* и *отрицательные*. Средний показатель преломления обозначается N_m или β .

На фиг. 10 изображена оптическая индикатриса положительного и отрицательного двуосных кристаллов. Угол между оптическими осями называется *углом оптических осей* и обозначается через $2V$; он может изменяться от 0 до 90° . Перпендикулярно оптическим осям располагаются круговые сечения. Главных сечений эллипсоида три: $NgNp$, $NgNm$, $NmNp$. Главное сечение $NgNp$ называется *плоскостью оптических осей*, так как в нем лежат оптические оси. Ось Nm всегда перпендикулярна плоскости оптических осей. Оптически положительным кристаллом называется кристалл, в котором биссектрисой острого угла $2V$ будет большая ось эллипсоида — Ng . В оптически отрицательных кристаллах биссектрисой острого угла будет меньшая ось эллипсоида — Np .



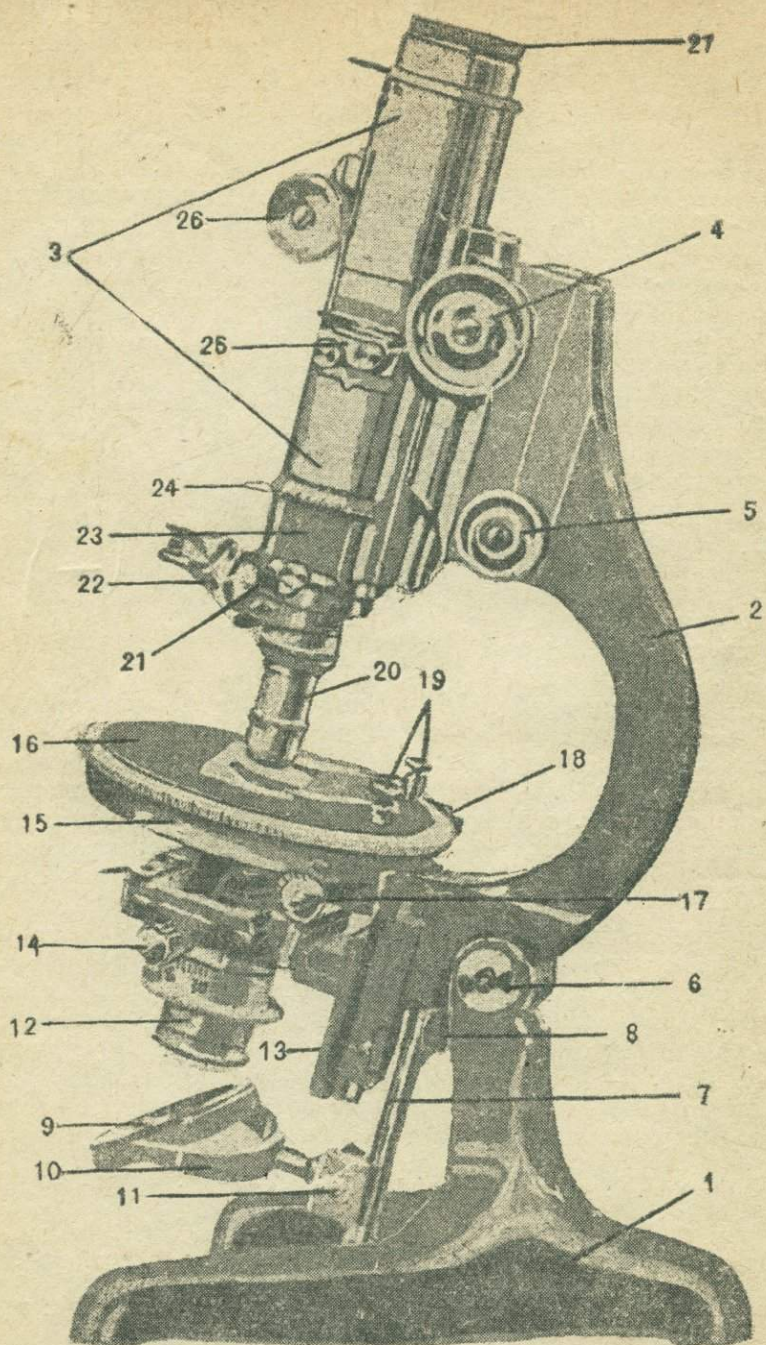
Фиг. 10.

Волновая поверхность двуосных кристаллов была выведена из индикатрисы позднее. Для примера возьмем индикатрису положительного кристалла и будем рассуждать следующим образом. Для рассмотрения вопроса достаточно воспользоваться тремя главными сечениями. Возьмем сечение $NgNp$ и пустим луч¹ по оси Ng . Для этого луча колебания совершаются в плоскости главного сечения $NmNp$. Останемся лишь на тех колебаниях, которые совершаются по осям Nm и Np . Скорости по направлению этих осей будут: $v_m = \frac{1}{N_m}$; $v_p = \frac{1}{N_p}$. Эти скорости мы можем представить в виде двух векторов графически. Далее пустим луч по оси Np , колебания которого будут происходить в плоскости $NgNm$ со скоростями по осям эллипсоида: $v_g = \frac{1}{N_g}$

$v_m = \frac{1}{N_m}$. Полагая, что скорости изменяются непрерывно, по-

¹ Следует иметь в виду, что все векторы оптической индикатрисы дают коэффициенты преломления волн, а не лучей. Коэффициенты же преломления волн и лучей, как мы знаем, различны. Одинаковые они будут лишь в направлении осей эллипсоида.

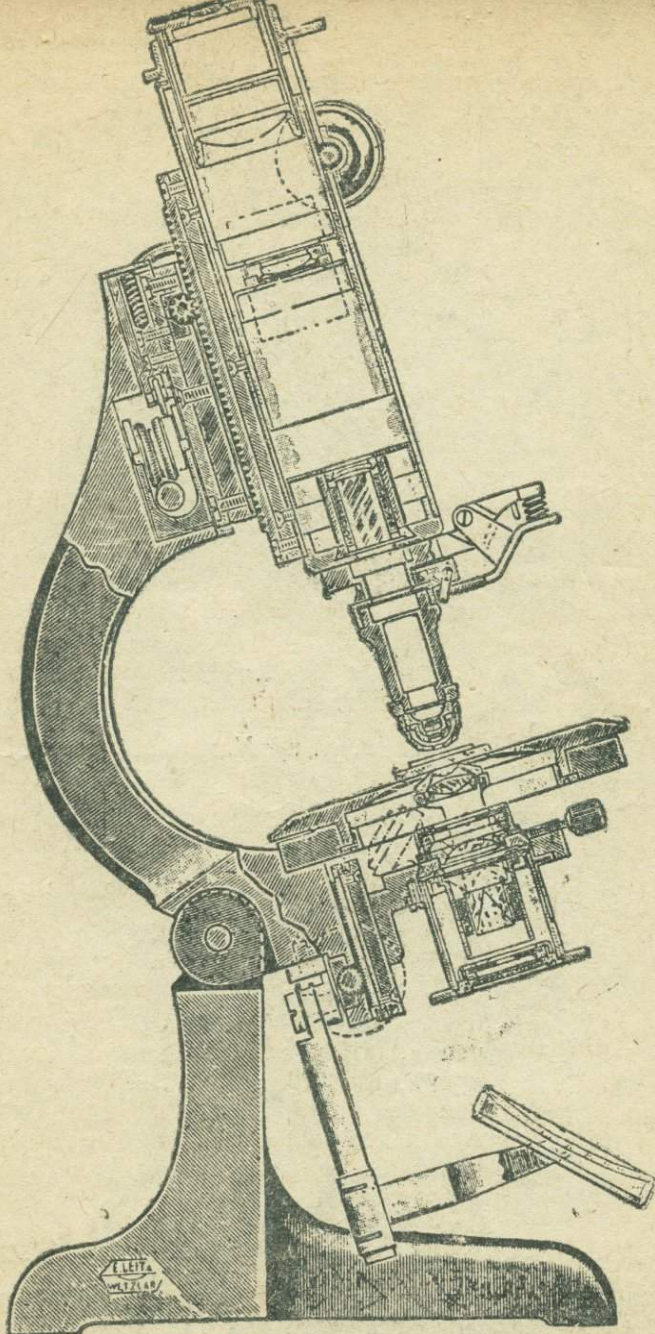
2674



Фиг. 13. Поляризационный микроскоп

- 1 — подставка.
 2 — рукоятка.
 3 — тубус.
 4 — винт, перемещающий тубус.
 5 — микрометрический винт.
 6 — шарнир.
 7 — поддерживающий зеркало рычаг.
 8 — ось вращения рычага.
 9 — зеркало.

- 10 — вилка, в которой укреплено зеркало.
 11 — муфта, перемещающаяся по рейке рычага.
 12 — поляризатор.
 13 — рейка, движущаяся вдоль оптической оси микроскопа, к которой прикреплен конденсор.
 14 — рукоятка, перемещающая линзу Лава.
 15 — неподвижная круглая металлическая

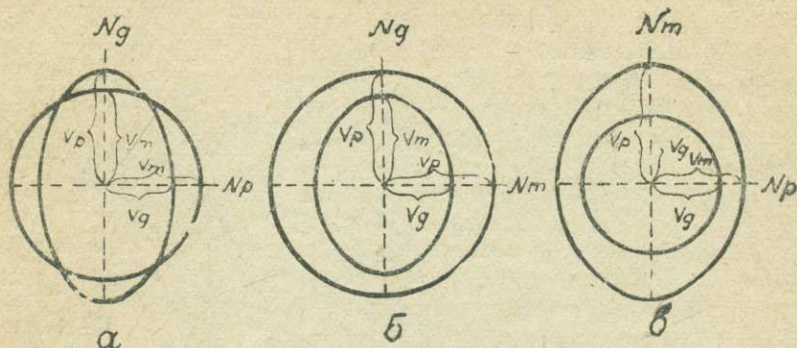


фирмы E. Leitz Wetzlar (модель CM)

- пластина, наглухо соединенная с рукоятью 2.
 16 — предметный столик.
 17 — зажимной винт столика.
 18 — винт.
 19 — клеммы.
 20 — объектив.
 21 — отверстие для вставления компенсационных приборов.

- 22 — пружинные щипцы, посредством которых укрепляется объектив.
 23 — анализатор.
 24 — рукоятка, вращающая анализатор.
 25 — линза Бертрана.
 26 — винт, перемещающий линзу Бертрана вдоль оптической оси микроскопа.
 27 — окуляр.

лучаем изображенное на фиг. 11, а, сечение в плоскости искомой волновой поверхности, соответствующее сечению $NgNp$ оптической индикатрисы.



Фиг. 11.

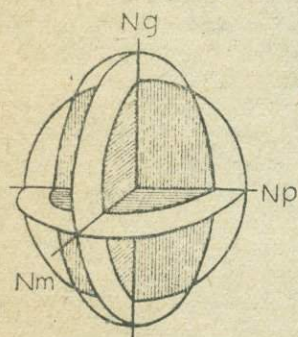
Точно так же рассуждая, выведем сечения волновой поверхности, соответствующие сечениям $NgNm$ и $NmNp$ оптической индикатрисы. Взяв сечение $NgNm$ и пуская луч по Ng , имеем:

$$v_g = \frac{1}{Ng}; \quad v_m = \frac{1}{Nm}. \quad \text{Пустив луч по } Nm, \text{ получаем: } v_g = \frac{1}{Ng};$$

$$v_p = \frac{1}{Np}. \quad \text{Сечение изображено на фиг. 11, б.}$$

$$\text{Для сечения } NmNp \text{ находим: } v_g = \frac{1}{Ng};$$

$$v_p = \frac{1}{Np] \text{ и } v_g = \frac{1}{Ng}; v_m = \frac{1}{Nm}. \quad \text{Сечение}$$



Фиг. 12.

изображено на фиг. 11, в. Складывая эти сечения, получаем поверхность, изображенную на фиг. 12. Гамильтон обратил внимание на вогнутости этой поверхности и вывел явления внутренней и внешней конической рефракции, нами здесь не рассматриваемые.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП И ЕГО ЧАСТИ¹

Поляризационный микроскоп представляет собой прибор, посредством которого мы исследуем кристаллическое вещество в поляризованном свете. Собственно оптическая система прибора предназначена для увеличения исследуемого объекта.

Обратимся к описанию отдельных частей микроскопа (фиг. 13).

¹ Подробнее описание микроскопа и назначение его отдельных частей см. в книге В. Н. Лодочкикова «Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества».

1. Окуляры состоят из системы линз, укрепленных в полом металлическом цилиндре, который вставляется в верхнее отверстие тубуса микроскопа. К микроскопу обычно прилагается несколько окуляров Гюйгенса (№№ 1, 2, 3, 4, 5). На расстоянии ясной видимости от глазной линзы в окуляре расположена стеклянная пластинка с нанесенными на ней двумя взаимно перпендикулярными нитями; последние предназначены для определения направления колебаний николей, а также различных измерений под микроскопом. Иногда вместо стеклянной пластинки в окулярный цилиндр, на таком же расстоянии, вставляется кольцо с натянутыми нитями. На окулярах обычно указывается их собственное увеличение.

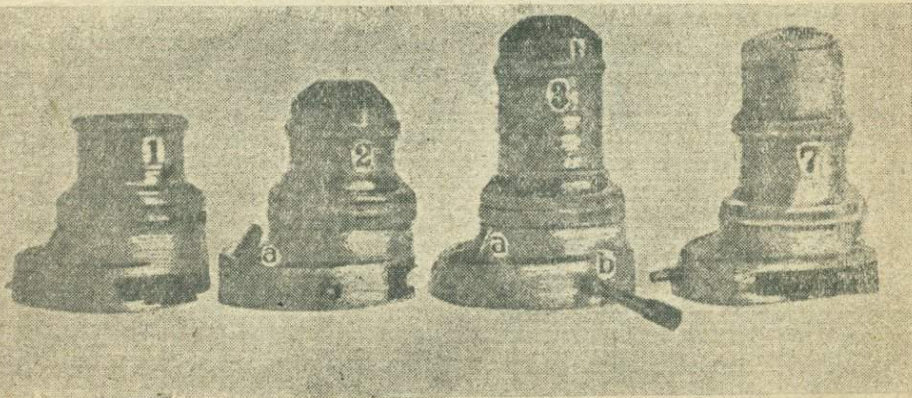


Фиг. 14.

2. Объективы также состоят из системы линз, вставленных в металлическую оправу. Предметное или объективное увеличительное стекло обращено к предметному столику микроскопа. К микроскопу обычно прилагаются объективы №№ 1, 2, 3, 5, 7, а также иммерсионный объектив (фиг. 16).

В зависимости от различных конструкций микроскопов существуют разные способы укрепления объектива в нижней части тубуса. В микроскопах фирмы E. Leitz Wetzlar объектив укрепляется посредством специальных пружинных щипцов.

*Вставив объектив и зажав его щипцами, необходимо убедиться, правильно ли он вставлен, т. е. вошел ли штифтик *a* объектива в специальное углубление объективных пружинных щипцов. В верхней металлической обойме объективов имеются центрировочные винты *b*.*



Фиг. 15.

3. Линза Бертрана представляет собой простую линзу и относится к увеличительной оптической системе прибора. Предназначена для передачи окуляру изображений (при исследованиях в сходящемся свете), получающихся в объективах и расположенных ближе к ним, чем те, которые увеличиваются только одним окуляром. В целях получения более ясного изображения, в микроскопах фирмы E. Leitz Wetzlar (модели AM, GM, CM) линза Бертрана может перемещаться вдоль оптической оси микроскопа посредством специального кремальерного винта (см. фиг. 13).



Фиг. 16.

4. Зеркало микроскопа представляет собой простой осветительный прибор, предназначенный для освещения исследуемого объекта. Состоит из двух отражающих свет зеркал — плоского и вогнутого. Первым пользуются в том случае, когда

нужно получить пучок параллельных лучей от отдаленного источника света (дневной свет из окна, лампа на потолке и т. п.); вторым — когда источник света расположен близко (например, лампа), в этом случае лучи отклоняются от параллельности, давая расходящийся пучок.

5. Диафрагмы предназначены для регулирования освещения. Одна из них — ирис-диафрагма — расположена над поляризатором. Изменение диаметра отверстия достигается перемещением соответствующей рукоятки. Другая расположена над линзой Бертрана (в микроскопах более простых конструкций обычно отсутствует). Иногда объективы и окуляры имеют также диафрагмы. Кроме ирис-диафрагмы употребляется накладная диафрагма, представляющая собой пластинку с небольшим отверстием; предназначается для наблюдения интерференционных фигур (по методу Лазо).

6. Предметный столик представляет собой круглый металлический диск, вращающийся в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа, с нанесенными на нем делениями от 0 до 360° по часовой стрелке. Вплотную к диску столика прикреплен нониус, благодаря которому точность отсчетов составляет 6'. Винтом 18 (см. фиг. 13) столик может быть укреплен неподвижно. В столике имеется два отверстия, без нарезки, в которые вставляются металлические клеммы (лапки), удерживающие на столике шлиф. Кроме этих отверстий, имеются еще два отверстия с резьбой, предназначенные для укрепления федоровского столика. *При работе следует быть внимательным и не вставлять клеммы в нарезные отверстия.*

7. Поляризационный аппарат, его устройство и действие. Собственно поляризационная часть прибора состоит из двух призм (Николя или Аренса),¹ одна из которых расположена

¹ По имени их изобретателей.

между зеркалом и исследуемым объектом, а другая—между объективом и окуляром. Нижняя призма, предназначенная для получения поляризованного света, проходящего затем через кристаллическую пластинку, получила название поляризатора.

Верхняя призма, предназначенная для анализирования происходящих явлений, называется анализатором.

Поляризатор укреплен в металлическом полом цилиндра, вставленном в другой неподвижный цилиндр и свободно в нем вращающийся. На неподвижном цилиндре нанесена черта, с которой при вращении николя совпадают 0, 90, 180-ое деления, нанесенные на вращающейся цилиндрической оправе поляризатора.

В верхней части неподвижного цилиндра расположена длиннофокусная собирательная линза-коллектор, предназначенная для сосредоточивания света на исследуемом объекте. Анализатор представляет собой коробку, вдвигающуюся в тубус в направлении, перпендикулярном оптической оси микроскопа, с укрепленной в ней призмой, которая в некоторых микроскопах может вращаться вокруг оси, параллельной оптической оси микроскопа. Желая скрестить николи, вводим коробку в тубус микроскопа; когда коробки выдвинута из тубуса,— николи не скрещены.

Призмы изготовляются из прозрачных, бесцветных кристаллов исландского шпата¹.

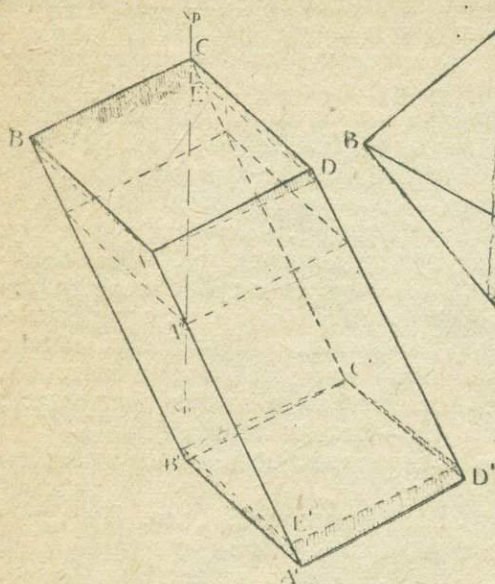
Разберем устройство и действие призмы Николя. Из кристалла исландского шпата выкальвается спайный ромбоэдр так, чтобы его длинные ребра были в 3,495 раза длиннее коротких, или в 2,774 раза длиннее короткой диагонали (фиг. 17). Затем концевые грани ромбоэдра² подшлифовываются таким образом, чтобы длинные ребра ромбоэдра AA' и CC' составляли с вновь полученными искусственными гранями $ABED$ и $C'B'E'D'$ соответственно 68° и 112° . Далее ромбоэдр распиливается, как показано на фиг. 18, и склеивается канадским бальзамом. Плоскость, проходящая через длинные ребра AA' и CC' ,— главное сечение (одна из плоскостей симметрии). Направление $A'C$ в кристалле есть оптическая ось Np . На фиг. 19 изображена призма Николя в разрезе, параллельном главному сечению. Готовый николю укрепляется в соответствующей металлической оправе. В верхнюю и нижнюю часть цилиндрической оправы вставляются предохранительные стекла. Обратимся к действию призмы. Пусть на нижнюю грань призмы под углом 22° к ее нормали (фиг. 20) падает пучок лучей³ естественного света, совершающего свои колебания во всех плоскостях, проходящих через направление луча. Входя в кристаллическую среду исландского шпата, луч распадается на два луча: обыкновенный (o) и необыкновенный (e), совершающих свои колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Первый из них колеблется в плоскости, перпендикулярной

¹ Исландский шпат представляет собой прозрачную разновидность известкового шпата— $CaCO_3$. Кристаллизуется в тригональной системе, в классе дитригонального скаленоиэдра. Спайность весьма совершенная по $(10\bar{1}1)$. Тв. 3. Уд. вес 2,7.

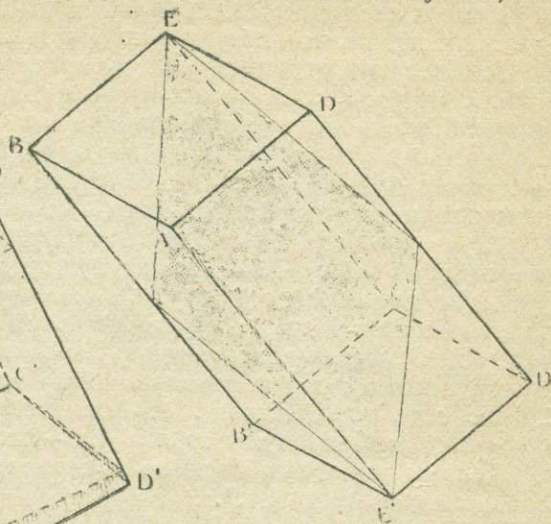
² Ребра ромбоэдра, лежащие в плоскостях симметрии, составляют с гранями соответственные углы— $70^\circ 52'$ и $109^\circ 8'$.

³ Частично поляризованных при отражении от облаков, зеркала и т. п.

главному сечению, т. е. в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка, второй колеблется в плоскости главного сечения, т. е. в плоскости рисунка. Показатель преломления обыкновенного луча $n_o = 1,658$, а необыкновенного $n_e' = 1,536^1$.

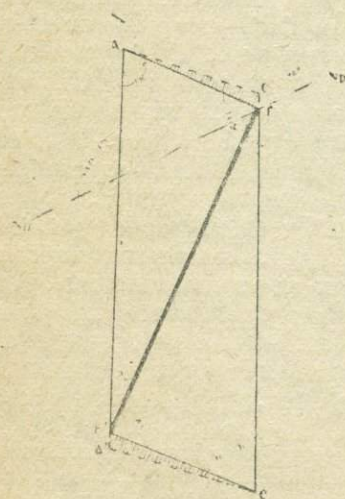


Фиг. 17.

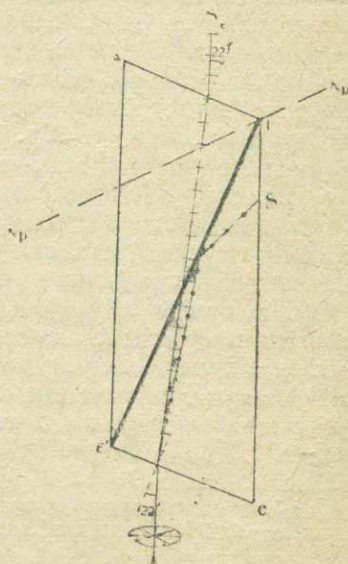


Фиг. 18.

Показатель преломления канадского бальзама 1,537. При таких соотношениях в показателях преломления *обыкновенный луч*,



Фиг. 19.



Фиг. 20.

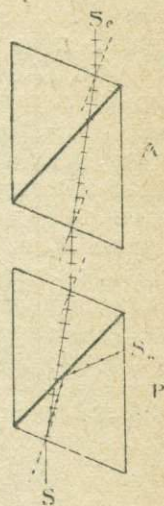
¹ В данном направлении в кристалле; вообще же $n_e = 1,489$.

идущий из среды оптически более плотной ($n_0 = 1,658$) в среду менее плотную ($n_{к.б} = 1,537$), претерпевает полное внутреннее отражение от слоя канадского бальзама и поглощается черной оправой призмы. Соблюдение второго условия, необходимого для полного внутреннего отражения луча, — нахождение угла его падения достигается вышеуказанными подшлифовками.

Необыкновенный луч, имеющий показатель преломления, мало отличающийся от такого же канадского бальзама, проходит почти не преломляясь (однородная среда) и, выходя из поляризатора под тем же углом 22° к его нормали, совершает свои колебания в одной плоскости, параллельной главному сечению николя.

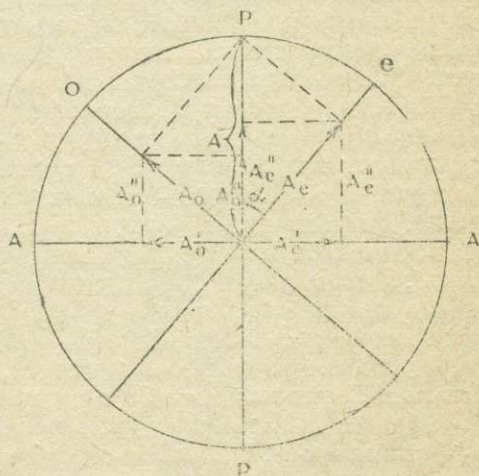
При прохождении обычного света через николь и при вращении последнего вокруг оси цилиндрической оправы, в которую он заключен, мы всегда будем видеть освещение, по силе равное приблизительно половине первоначального.

Возьмем систему поляризатор — анализатор и посмотрим, что произойдет в том случае, если мы будем вращать один из николей. Выходящий из P (поляризатора) необыкновенный луч совершает свои колебания в одной плоскости. Если сверху мы поместим другой николь A (анализатор) в параллельном положении (фиг. 21), то луч, входя в него, пойдет по тому же направлению, в каком он вышел из P , на том простом основании, что среда и все прочие условия остались такими же, как и в P . Другими словами, мы как бы надставили верхнюю половину поляризатора.



Фиг. 21.

Из сказанного следует, что при параллельном положении николей (—) мы видим свет. При повороте верхнего николя A на 90° относительно P , колебания последнего не будут пропущены николем A , и мы будем наблюдать темноту. Следовательно, при скрещенном положении николей (+) свет гасится верхним николем. Итак, при повороте одного николя относительно другого, мы через каждые 90° будем наблюдать чередование света и темноты, другими словами, при полном обороте будет наблюдаться два раза свет и два раза темнота. Кратко рассмотрим явления, происходящие в том слу-



Фиг. 22.

чае, когда между (+) николями в монохроматическом (однородном) свете помещена кристаллическая пластинка. Поляризованный свет с колебаниями PP , входя в кристаллическую среду k , распадается на два взаимно перпендикулярных колебания, принадлежащих двум различным волнам, распространяющимся с некоторой разностью хода. Входя в A , каждая из них, в свою очередь, спять распадается на две. Сущность явления легко уяснить из фиг. 22. Пусть e и o — колебания двух волн, выходящих из кристаллической пластинки и вступающих в A в направлении перпендикулярном чертежу. α — угол, образованный колебаниями волн, выходящих из поляризатора, с колебаниями в кристаллической пластинке. A_e и A_o — амплитуды колебаний этих двух волн, A — их равнодействующая. Каждое из колебаний с амплитудой A_e и A_o , входя в анализатор, распадается, в свою очередь, на два новых колебания с амплитудами A_e', A_e'' и A_o', A_o'' . Два из них A_e'' и A_o'' поглощаются в анализаторе, испытывая полное внутреннее отражение. Волны с амплитудами A_e' и A_o' совершают свои колебания в противоположных фазах, т. е. от-

личающихся на $\frac{1}{2}\lambda$. Из чертежа следует:

$$\begin{aligned} A_e &= A \cdot \cos \alpha; & A_o &= A \cdot \sin \alpha; \\ A_e' &= A_e \cdot \sin \alpha; & A_o' &= A_o \cdot \cos \alpha; \end{aligned}$$

откуда находим:

$$\begin{aligned} A_e' &= A \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha; \\ A_o' &= A \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha; \\ A_e' &= -A_o'. \end{aligned}$$

Из этого следует, что, при прохождении света через систему поляризатор — кристалл — анализатор, в случае, когда направления колебаний в кристаллической пластинке не совпадают с направлениями колебаний николей, в анализаторе получатся две волны с равными и противоположными амплитудами, совершающими свои колебания в одной плоскости и с одной и той же скоростью. Согласно закону Араго и Френеля, эти два колебания интерферируют. Выведенное нами равенство $A_e' = -A_o'$ указывает на то, что к разности хода, возникающей в пластинке, прибавляется полволны возникшей в анализаторе, независимо от длины волны того или иного цвета, вступающей в анализатор. При интерференции в белом свете происходит окрашивание света, так как из него исчезают цвета, полуволна которых заключена четное число раз в возникшей в кристалле разности хода, и усиливаются цвета, полуволна которых заключается нечетное число раз в этой разности хода.

Из всего сказанного вытекает, что анализатор предназначен для приведения колебаний в одну плоскость.

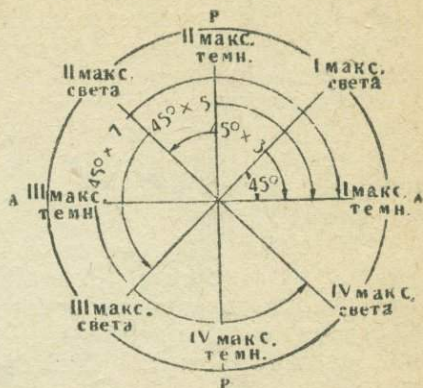
Обратимся к вопросу, что произойдет, если мы будем вращать в (+) николях двупреломляющую анизотропную пластинку. Исследуем формулу: $A_e' = A \cos \alpha \cdot \sin \alpha$. При значении $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ A_e' превращается в 0, т. е. будет наблюдаться максимум темноты. При значениях $\alpha = 45^\circ, 45^\circ \times 3, 45^\circ \times 5, 45^\circ \times 7$. A_e' имеет максим. значения, т. е. будет наблюдаться максимум освещения. Сказанное легко уясняется из фиг. 23. Итак, при

вращении кристаллической пластинки в (+) николях, чередуясь между собою, четыре раза будет наблюдаться максимум темноты и четыре раза максимум света.

8. Линза Лазо представляет собой простую собирающую линзу (или систему линз), предназначенную для получения пучка сходящихся лучей. Располагается над поляризатором (фиг. 24) и по желанию может быть выключена посредством рукоятки, прикрепленной к рамке, на которой укреплена.

Зеркало, поляризатор и линза Лазо (конденсор), при помощи кремальеры, могут свободно перемещаться под столиком микроскопа в направлении, параллельном оптической оси тубуса.

Система: зеркало + поляризатор + объектив + анализатор + окуляр, представляет собой так называемый ортоскоп, т. е. прибор, посредством которого исследуется кристаллическое вещество в параллельном свете. Исследования могут производиться как с анализатором, так и без него. Включение линзы Лазо и короткофокусного объектива превращает ортоскоп в каноскоп, т. е. прибор, предназначенный для исследования кристаллического вещества в сходящемся свете.

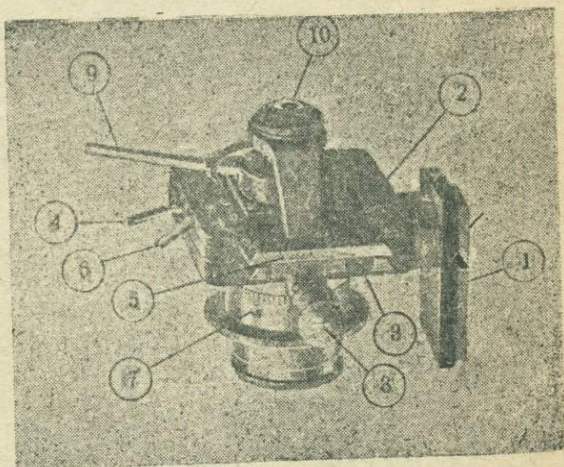


Фиг. 23.

ПОВЕРКИ МИКРОСКОПА

Прежде чем приступить к работе, необходимо убедиться, исправен ли микроскоп, и в случае обнаружения недостатков таковые устранить.

К числу главнейших оптических недостатков микроскопа следует отнести:



Фиг. 24.

- 1 — рейка, движущаяся вдоль оптической оси микроскопа.
- 2 — металлическая пластинка, наглухо скрепленная с рейкой 1.
- 3 — металлическая пластинка, движущаяся в направлении \perp оптической оси конденсора, к которой прикреплен поляризатор.
- 4 — зажим для металлической пластинки 3.
- 5 — вторая металлическая пластинка, движущаяся в направлении \perp оптической оси конденсора, к которой прикреплены ирис-диафрагма и линза Лазо.
- 6 — зажим для металлической пластинки 5.
- 7 — поляризатор.
- 8 — рукоятка, перемещающая линзу Лазо.
- 9 — рукоятка ирис-диафрагмы.
- 10 — линза Лазо.

1) Наблюдающееся иногда двупреломление в объективах, по всей вероятности возникающее при вставлении линзы объектива в металлическую оправу на фабрике. Иногда аналогичным недостатком обладают также и окуляры.

2) Несовпадение оптической оси конденсора с оптической осью линз объектива.

К числу легко устранимых недостатков относятся:

1) Наличие эксцентриситета, выражающегося в несовпадении оптической оси тубуса микроскопа с осью вращения предметного столика; устранение последнего достигается центрировкой объектива¹.

2) Нескрещенность николей.

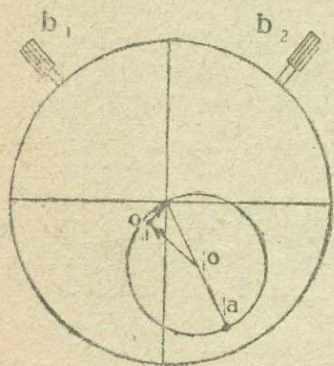
3) Параллакс нитей окулярного креста.

4) Неустированность окулярного креста.

5) Неизвестное направление колебаний, пропускаемых поляризатором (положение главного сечения микроскопа).

1. Центрировка²

Вставив желаемый объектив (особенно важно центрировать объективы № 5, 7) при выключенном анализаторе, фокусируем микроскоп на какое-нибудь мелкое зернышко в шлифе и, приведя последнее в пересечение нитей окулярного креста, вращаем предметный столик микроскопа. Если микроскоп центрирован, зерно не должно смещаться; в противном случае оно опишет некоторую окружность, радиус которой зависит от величины эксцентриситета. Центр O этой окружности и будет центром вращения столика (фиг. 25).



Фиг. 25.

Необходимо совместить этот центр с центром окулярного креста.

Во многих современных микроскопах (напр. фирмы E. Leitz Wetzlar) центрировочные винты b располагаются диагонально по отношению к нитям окулярного креста. (В других, преимущественно старых конструкциях, центрировочные винты расположены по направлению нитей окулярного креста).

Центрировка производится следующим образом. Вращением столика микроскопа приводим выбранное зерно в положение a . Осторожно руками передвигаем шлиф по направлению к центру окулярного креста на половину расстояния, т. е. в положение O . Далее винтом b_1 перемещаем зерно из положения O в положение O_1 , а затем вин-

¹ В некоторых микроскопах, преимущественно старых конструкций, центрируется столик.

² В микроскопах модели Su фирмы E. Leitz Wetzlar поляризатор и анализатор соединены общим стержнем, благодаря чему все операции можно производить не вращая препарата, а следовательно, и не прибегая к необходимости центрировки.

том b_2 , перемещаем его из положения O_1 в центр окулярного креста.

Если при вращении столика зерно смещается, описывая уже меньшую окружность, то операцию следует повторить пока эксцентриситет не будет полностью уничтожен. При значительном эксцентриситете, когда при вращении столика зерно уходит за пределы поля зрения, принцип центрировки остается таким же. Следует лишь установить положение, в котором находится зерно, за пределами поля зрения и передвинуть шлиф руками на половину расстояния, пока оно не появится. При очень большом эксцентриситете следует вынуть объектив и посмотреть, не слишком ли ввинчены или вывинчены винты b_1 и b_2 (при сильно ввинченных винтах в микроскопах фирмы E. Leitz Wetzlar объектив не вынимается из щипцов). Вообще же, в отличие от прочих фирм, в микроскопах конструкции Leitz'a центрировка объективов производится независимо для каждого из них.

2. Установка николей в скрещенное положение¹

Вынув из тубуса микроскопа объектив и окуляр и выключив анализатор, направляем зеркальцем свет в тубус (рекомендуется пользоваться в качестве источника света сильной матовой лампой). При правильной установке, смотря в тубус, мы будем наблюдать у его объективного конца изображение лампы, заполняющее все концевое пространство. Вводим анализатор и вращаем поляризатор внутри его оправы до появления темного креста с широкими ветвями, параллельными направлениям колебаний в поляризаторе и анализаторе. Незначительный поворот поляризатора от этого положения приводит к просветлению центральной части поля зрения. Приведя николи в скрещенное положение, производим следующие проверки.

3. Уничтожение параллакса нитей окулярного креста

Это явление, часто наблюдаемое в геодезических инструментах, также нередко наблюдается в окулярах поляризационных микроскопов в том случае, если нити в них натянуты, и заключается в провисании нитей, преимущественно под влиянием изменения температуры. Начинаящему категорически запрещается производить устранение этого недостатка самому, так как его неопытность в этой тонкой и аккуратной работе принесет один вред. При обнаружении подобного недостатка, занимающийся должен обратиться к руководителю или сдать окуляр для исправления в мастерскую. В окулярах с нарезанными нитями эта операция отпадает.

4. Юстировка нитей окулярного креста

Операция распадается на два приема.

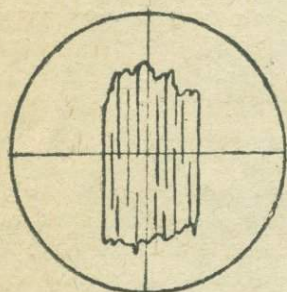
а) Проверка взаимной перпендикулярности нитей окулярного креста.

¹ Если призма в оправе анализатора сделана вращающейся, то все проверки значительно упрощаются.

Вставив объектив № 3 и поместив на предметный столик микроскопа шлиф с зернами, обладающими хорошо выраженными прямыми трещинами спайности или линиями ограничения (для выполнения всей операции рекомендуется иметь шлиф, приготовленный из слюдяного гранита с зернами мусковита или биотита), совмещаем направление трещин спайности или линий ограничения с одной из нитей окулярного креста и берем отсчет на столике микроскопа; затем поворачиваем предметный столик до совмещения их с другой нитью окулярного креста и вновь берем отсчет. Разность отсчетов должна быть 90° .

б) Определение совпадения колебаний николей с нитями окулярного креста.

Выбрав зерно какого-нибудь минерала, имеющего прямое угасание относительно линий ограничения или спайности (например, биотит в граните¹), приводим его в пересечение креста нитей и совмещаем направление трещин спайности или линий ограничения с одной из нитей окулярного креста (фиг. 26). Включаем анализатор; если наблюдается полная темнота, — направление колебаний одного из николей совпадает с данной нитью окулярного креста (направление колебаний другого николя, согласно предыдущей задаче, совпадает с другой нитью, в чем можно убедиться, повернув препарат на 90° до совмещения кристаллографического направления с другой нитью и вновь наблюдая темноту).



Фиг. 26.

Вращая препарат на небольшие углы вправо и влево, проверяем, действительно ли наблюдается полная темнота. Если полная темнота наступает при отклонении препарата на некоторый угол, то это значит, что направление колебаний николей не совпадает с нитями окулярного креста. В этом случае следует слегка повернуть диск с нитями в окуляре до совмещения одной из них со спайностью в момент полного угасания зерна. Теперь остается определить, с какой же нитью совпадает направление колебаний поляризатора.

Если полная темнота наступает при отклонении препарата на некоторый угол, то это значит, что направление колебаний николей не совпадает с нитями окулярного креста. В этом случае следует слегка повернуть диск с нитями в окуляре до совмещения одной из них со спайностью в момент полного угасания зерна. Теперь остается определить, с какой же нитью совпадает направление колебаний поляризатора.

5. Определение направления колебаний, пропускаемых поляризатором

Для этой цели обычно пользуются ранее упомянутыми зернами биотита с хорошо выраженной спайностью. Выключаем анализатор и приводим зерно биотита в центр поля зрения. Вращаем столик микроскопа до появления наиболее густой темноты.

¹ Следует иметь в виду, что биотиты в щелочных породах и лампрофирах для этой цели не пригодны, так как, при совмещении трещин спайности с одной из нитей окулярного креста, в них не наступает полного угасания (см. ниже).

Юстировка посредством других минералов по существу ничем не отличается. (Подробнее см. в книге В. Н. Лодочникова «Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества», 1930, стр. 118—122.

бурой или коричневой плеохроичной окраски; последняя появляется в момент совмещения спайности биотита с одной из нитей окулярного креста. В направлении той нити, с которой, совмещая спайность биотита получили его наиболее густую окраску, совершаются колебания, пропускаемые поляризатором.

Во многих моделях микроскопов фирм: E. Leitz Wetzlar, Winkel Zeiss и Reichart призмы укреплены в оправе анализатора неподвижно. В этом случае главное сечение поляризатора, например, в моделях фирмы E. Leitz Wetzlar (модели KM, VL), совпадает с плоскостью симметрии микроскопа, т. е. направление колебаний поляризатора совпадает с вертикальной нитью окулярного креста, а главное сечение анализатора располагается в плоскости, перпендикулярной первой, т. е. направление колебаний его совпадает с горизонтальной нитью окулярного креста¹.

В микроскопах фирм Zeiss и Reichart нередко главное сечение поляризатора располагается перпендикулярно его плоскости симметрии.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СВЕТЕ (ОРТОСКОПИЯ)

1. РАБОТА БЕЗ АНАЛИЗАТОРА

§ 1. Изучение формы зерен и спайности

В соответствующих разрезах минералов очень часто наблюдаются характерные очертания и линии ограничения, нередко указывающие на кристаллографическую форму многогранника и принадлежность его к той или иной системе. Изучая эти формы зерен и сопоставляя полученные данные с другими, можно прийти к выводу о принадлежности данного минерала к одной из систем. Эта способность минерала сохранять свои кристаллографические ограничения стоит в прямой связи с условиями кристаллизации и носит название идиоморфизма; однако в практике работы при исследовании минеральных агрегатов часто приходится сталкиваться с такими минералами, формы зерен которых являются случайными, зависящими от других, ранее выделившихся минералов. Изучая формы зерен различных минералов, иногда можно составить представление о ходе процесса кристаллизации и последовательности их выделения. Вообще это не всегда верно, и поэтому следует говорить не о порядке выделения, а о порядке идиоморфизма². Если два

¹ На моделях, в которых анализатор сделан вращающимся, начинающие нередко затрудняются в производстве проверок поляризационной системы. В этом случае рекомендуется следующий простой и быстрый прием: воспользовавшись зерном биотита, совмещаем спайность с вертикальной нитью микроскопа и, выключив анализатор, вращаем поляризатор до появления наиболее густой окраски; затем включаем анализатор, перемещаем движок анализатора до наступления максимум темноты. Еще лучше воспользоваться участком, заполненным канадским бальзамом, который в скрещенных николях должен быть совершенно черным.

² В. Н. Лодочников, «Главнейшие пороодообразующие минералы», Георазведиздат, 1933, стр. 22—23.

или более веществ, одинаково окрашенных и бесцветных, находясь в стыке друг с другом или включают одно другое, то различить их можно лишь в том случае, если показатели их преломления будут различны. Чем больше разница в показателях преломления этих веществ, тем более резкими будут казаться линии ограничения. Если же данные вещества имеют одинаковые показатели преломления, различить их становится невозможным, так как условия преломления будут одинаковыми, и при прохождении через эти среды световая волна не претерпевает никакого изменения. Ниже приводятся наиболее распространенные формы разрезов идиоморфных зерен.

| Формы разрезов зерен | Вероятная кристаллографическая система |
|--|---|
| Шестиугольные, трехугольные или округлые. Прямоугольные или удлиненные в других сечениях | Гексагональная, моноклиновая или триклинная |
| Квадратные. Прямоугольные или удлиненные в других сечениях | Тетрагональная (ромбическая) |
| Квадратные или изометричные во всех сечениях (оптически изотропны) | Кубическая |
| Восьмиугольные. Прямоугольные или удлиненные в других сечениях | Тетрагональная, моноклиновая (триклинная) |
| Прямоугольные или брусковидные. Прямоугольные же или удлиненные в других сечениях | Ромбическая (моноклиновая или триклинная) |
| Ромбические. Прямоугольные или удлиненные в других сечениях | Ромбическая (моноклиновая) |
| Игольчатые | <i>Моноклиновая ? триклинная ?</i> |
| Чешуйчатые | Чаще моноклиновая (псевдогексагональная) |
| Неправильные | ? |

Настоящей классификацией делается попытка показать связь между наиболее типичными формами зерен в различных сечениях минерала и его кристаллографической системой. Понятно, что из этого имеется целый ряд исключений и наше заключение будет лишь в том случае правильным, если данные наблюдения *сопоставлены с другими наблюдениями*. Определение минералов кубической системы не представляет больших затруднений, так как они являются *оптически изотропными*, в чем легко убедиться включив анализатор; при вращении препарата зерно должно оставаться темным. Однако следует иметь в виду, что в некоторых минералах кубической системы появляется анизотропия (гранаты). Причины таких оптических аномалий разнообразны и зависят как от строения минерала, так и от условий его кристаллизации.

Наряду с изучением формы зерен является чрезвычайно важным изучение спайности, наблюдающейся под микроскопом в соответствующих разрезах минералов в виде системы трещин, по характеру которых можно судить о степени ее совершенства. Следует иметь в виду, что спайность минералов в шлифе проявляется в виде системы *прерывистых* трещин, и некоторое исключение представляют лишь слюды, обладающие весьма совершенной спайностью. Кроме спайности, различают *отдельность*, трещины которой (следы плоскостей скольжения) проявляются в шлифе в виде *непрерывных* трещин, идущих через все зерно.

Еще следует отметить, что некоторые минералы, обычно обладающие спайностью, при известных условиях кристаллизации ее не проявляют вовсе или проявляют очень слабо, и наоборот, в минералах, для которых спайность нехарактерна, последняя прекрасно проявляется. К числу минералов, не проявляющих спайности, следует отнести авгит в эффузивных породах, ко второму случаю относится оливин¹.

В одних случаях трещины спайности идут в одном направлении (например в слюдах), в других — по двум или более кристаллографически равнозначным направлениям, образуя характерные углы. Так, например, для роговой обманки характерна спайность по (110) под углом 124°, а для пироксенов, по той же форме, под углом 87°.

Порядок работы

1. Приводим исследуемое зерно в пересечении нитей окулярного креста² и, передвигая шлиф, находим наиболее характерные формы зерен, производим их описание³ и, в случае необходимости, измеряем углы между ограничениями. *Если минерал бесцветен и показатель преломления его мало отличается от такового же окружающих минералов, то следует включить анализатор и исследовать форму зерен в скрещенных николях.*

2. Если в шлифе наблюдается спайность в двух направлениях, отмечаем степень ее совершенства и, опустив конденсор, измеряем углы между трещинами спайности. *Необходимо найти такой разрез, в котором бы обе системы трещин спайности казались тонкими прямыми линиями, не смещающимися при передвижении тубуса микроскопа, т. е. чтобы плоскости спайности были перпендикулярны плоскости шлифа (при наблюдении спайности в бесцветных минералах рекомендуется ослабить освещение, сужая диафрагму; в этом случае трещины спайности выступают отчетливее)*⁴.

¹ В. Н. Лодочников, «Главнейшие породообразующие минералы», стр. 11

² Применение того или иного увеличения зависит от размера зерен. Чаще всего приходится пользоваться объективом № 3.

³ Вообще же следует при описании данного минерала всегда указывать его форму, независимо — является он идиоморфным или нет. Например при описании пертитов или пегматитов важно бывает указать, в каких формах наблюдается альбит или кварц.

⁴ Следует иметь в виду, что при определенных углах наклона плоскости спайности к плоскости шлифа спайность может вовсе не наблюдаться. См. В. Н. Лодочникова «Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества», 1930, стр. 177—183.

3. Поворотом столика микроскопа совмещаем одно направление спайности, например, с вертикальной нитью окулярного креста и берем отсчет на столике. Затем совмещаем другое направление спайности с той же нитью окулярного креста и берем второй отсчет. Разность отсчетов и есть угол между направлениями трещин спайности или, как говорят, угол спайности.

§ 2. Исследование включений

При исследованиях различают: твердые, жидкие и газообразные включения. Твердые включения, в большинстве случаев, представляют собой минералы и их исследование не отличается от исследования таковых. В некоторых горных породах, шлаках и искусственных минеральных агрегатах, они нередко принадлежат стеклу, не действуют на поляризованный свет и характеризуются большим показателем преломления; обычно бесцветны, иногда окрашены в бурый цвет.

Значительно большая разница наблюдается между показателями преломления жидкостей (приблизительно 1,3) и минералов, наименьший показатель преломления которых 1,43, вследствие чего *включения жидкостей в минералах характеризуются резкими контурами*, превращающимися, при очень большой разнице в показателях преломления, в отчетливые черные каймы. Последние будут еще более резкими, если включениями являются газы. Примерами включения газов будут часто наблюдаемые в канадском бальзаме пузырьки воздуха. Включения бывают настолько мелки, что не поддаются изучению, и в этом случае бывает важно описать их формы¹

§ 3. Окраска минералов

Принято различать поверхностную и внутреннюю окраски веществ. Первая объясняется совокупным физиологическим воздействием на наш глаз непосредственно отраженных лучей от поверхности тела и части видимых лучей спектра, отраженных от внутренних слоев вещества.

Вторая соответствует тому цвету, который не был поглощен в теле вещества при разложении проходящего через него белого света. Как та, так и другая окраска в равной степени свойственна данному веществу, тесно связана с его структурой и называется *идохроматической окраской*. Окраска вещества, зависящая от примесей (например окраска твердых растворов), называется *аллохроматической*.

В нашем изложении имеется в виду внутренняя окраска вещества.

В анизотропных телах чрезвычайно важным является наблюдение так называемой *плеохроичной окраски*, обусловленной различным поглощением видимых лучей спектра в том или ином направлении в кристалле. *Явления поглощения подчиняются закону эллипсоида*; вращая столик микроскопа с укрепленным на нем

¹ И. И. Танатар, «Определитель минералов под микроскопом», изд. ОНТИ, 1936, стр. 15—16.

препаратом, наблюдаем изменение окраски данного минерала. Для точной характеристики плеохроизма этого минерала необходимо знать степень поглощения света по осям оптической индикатрисы, что и будет изложено в дальнейшем. Одноосные минералы, для которых плеохроичная окраска указывается по двум осям эллипсоида, называются *дихроичными* минералами. Двуосные минералы, для которых окраска указывается по трем осям эллипсоида, называются *трихроичными*.

Различают три рода плеохроизма:

- 1) меняется только цвет, а густота окраски сохраняется (гиперстен);
- 2) сохраняется цвет, но меняется густота окраски (биотит);
- 3) меняются цвет и густота окраски (роговая обманка).

§ 4. Определение показателей преломления¹

В § 1 было указано, что ограничения двух или более бесцветных и одинаково окрашенных минералов могут наблюдаться лишь в том случае, если показатели преломления их различны. Это происходит по причине:

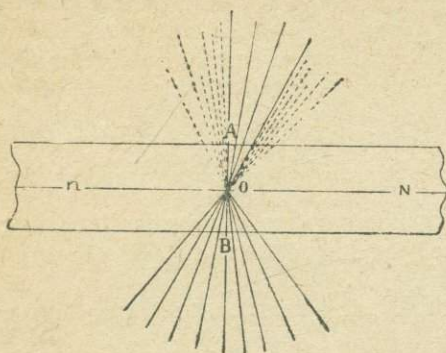
1) влияния явлений дифракции лучей на границе двух сред, одна из которых представляет собой как бы экран; вследствие этого часть лучей отклоняется в сторону более преломляющей среды;

2) явлений преломления и отражения, наступающих при падении лучей на границу раздела двух сред со стороны одной из этих сред. Лучи, падающие на какую-либо точку O границы раздела сред AB со стороны менее преломляющей среды n , частью преломляются к линии Nn , т. е. оказываются на стороне более преломляющего минерала, часть же отражаются от AB , вновь возвращаясь в среду n (фиг. 27). Часть лучей, падающих на точку O границы раздела сред AB , со стороны более преломляющей среды N , преломляются, частью же претерпевают полное внутреннее отражение, вследствие того, что последние идут из среды более плотной в среду менее плотную. Наиболее слабыми будут лучи частично отраженные. Наибольшую интенсивность имеют лучи, претерпевшие полное внутреннее отражение и практически равные по силе лучам падающим.

Наблюдение показателя преломления одного минерала относительно показателя преломления другого минерала является чрезвычайно важным. Явления неравномерного распределения освещения в двух разно преломляющих минералах вызывают ложный оптический эффект, выражающийся в том, что минералы с большим показателем преломления на границе с менее преломляющими минералами кажутся как бы более толстыми, рельефно

¹ Имеется в виду белый свет. Вообще же показатель преломления одного и того же вещества для различных цветов спектра будет различен. Приближенная формула Коши выражает зависимость между n и λ ; $n = a + \frac{b}{\lambda^2}$, где a и b — определенные коэффициенты для каждого данного вещества, находимые опытным путем.

выступающими на фоне более гладкой поверхности, подобно тому, что воспринимает наш глаз при рассматривании сверху капли застывшего стеарина на фоне гладкой бумаги, и, наоборот, ми-



Фиг. 27.

нералы с низким показателем преломления в окружении более преломляющих минералов кажутся лежащими ниже. Это явление получило название **рельефа минералов**. Итак, следует помнить, что рельеф данного минерала определяется относительно рельефа окружающих минералов и указывает на величину показателя преломления этого минерала. По характеру рельефа все минералы можно разбить на три группы:

1) $n < 1,54$ — минералы, обладающие **отрицательным (обратным) рельефом**, т. е. кажущиеся лежащими ниже других минералов;

2) $n = 1,54$ или мало отличается от такового; минералы не обладают рельефом;

3) $n > 1,54$ — минералы, обладающие **положительным рельефом**, т. е. кажущиеся лежащими выше других минералов.

Следует заметить, что при наблюдении минералов с очень высоким рельефом начинающие нередко допускают ошибки. Дело в том, что отдельные зерна или тонкозернистые агрегаты с высоким рельефом, в силу наступающего явления полного внутреннего отражения, *кажутся* серыми или даже почти непрозрачными, за каковые их и принимают. В случае исследования таких тонкозернистых скоплений (лейкоксен, соссюрит) рекомендуется наклонить микроскоп так, чтобы свет падал на шлиф; в отраженном свете такие образования кажутся светлосерыми или белыми, что отличает их от непрозрачных минералов (см. § 5). Ошибки еще более вероятны, если предметом наблюдения будут отдельные мелкие зерна. Например, мелкие иглы рутила при небольшом увеличении кажутся почти черными и легко могут быть приняты за рудный минерал. В таких случаях необходимо применять большее увеличение.

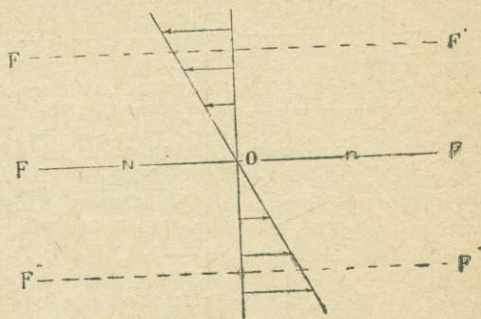
Кроме рельефа минералов, обусловленного только различием их коэффициентов преломления, отмечают **характер поверхности** минерала.

Обычно поверхности зерен минералов в шлифе вследствие несовершенства шлифовки не являются зеркально гладкими, а представляются неровными и шероховатыми, кажущимися тем более шероховатыми, чем больше различие между показателями преломления минерала и вещества, в которое последний погружен (т. е. обычно канадского бальзама). Чем резче это различие, тем сильнее будет наблюдаться явление рассеяния света при переходе его из минерала в канадский бальзам, т. е. тем заметнее для нашего глаза будут все неровности поверхности минерала. Поэтому поверхности сильно преломляющих и низко преломляющих минералов по отношению к поверхности канадского бальзама кажутся как бы покрытыми многочисленными мелкими бугорками

подобно поверхности шагреновой кожи; говорят о *шагреновой поверхности* минерала. Если показатель преломления данного минерала значительно меньше показателя преломления канадского бальзама, то говорят об *обратной шагреновой поверхности*.

Наиболее простым и быстрым методом определения показателя преломления минералов является *метод Бекке* (Bekke). Сущность метода ясна из приведенного чертежа (фиг. 28).

Сфокусировав микроскоп на границу раздела сред с показателями преломления N и n в фокальной плоскости объектива получим действительное и обратное изображение предмета, благодаря чему N и n будут расположены взаимно обратно. Подняв несколько тубус микроскопа в плоскости FF , будем наблюдать более интенсивное освещение на стороне более преломляющего минерала; при опускании произойдет обратное явление.



Фиг. 28.

Чем на большее расстояние удалены плоскости $F'F'$ или $F''F''$ от плоскости FF , тем более широкую световую полоску мы будем видеть на стороне одной из этих сред. Таким образом, при поднятии или опускании тубуса микроскопа, наш глаз будет получать впечатление движения световой полоски, или, как говорят, *полоски Бекке в сторону одного из минералов*. Занимающимся следует твердо помнить следующее, легко запоминающееся мнемоническое правило: *при поднятии тубуса микроскопа световая полоска Бекке движется в сторону минерала с большим показателем преломления; при опускании тубуса — в сторону минерала с меньшим показателем преломления*. При наблюдении полоски Бекке необходимо пользоваться большим увеличением (объективы №№ 5, 7).

Порядок работы

1. Находим два зерна в непосредственном стыке друг с другом и приводим их в пересечение креста нитей (необходимым условием является наличие чистой и резкой границы между двумя минералами!).
2. Вставляем объектив № 5 или № 7¹ и, сфокусировав микроскоп на границу раздела двух сред, опускаем конденсор доотказа.
3. Вращением микрометрического винта *осторожно* перемещаем тубус микроскопа (сначала поднимаем вверх или опускаем вниз) и, регулируя освещение ирис-диафрагмой, наблюдаем направление движения световой полоски.

В практике работы для ряда низкопреломляющих минералов (полевые шпаты, кварц) является очень важным определение

¹ При достаточном навыке полоска Бекке хорошо наблюдается при объективе № 3.

их показателя преломления по отношению к показателю преломления канадского бальзама, для чего находим зерно минерала на стыке с канадским бальзамом и определяем его показатель преломления. Исключительная простота и удобство метода Бекке сделали его важнейшим приемом в повседневной практической работе.

Ниже приводится группировка минералов по их преломлению, основанная на практическом использовании метода Бекке.

| Группа | n | Рельеф, ограничения и шагреневая поверхность | Примеры минералов |
|--------|--------------|--|--|
| I | 1,41—1,47 | Рельеф ограничения и шагреневая поверхность обратные — резкие | Опал, флюорит, тридимит |
| II | 1,47—1,53 | Рельеф и ограничения обратные, заметные, шагреневая поверхн. неясная | Кристаллит, ортоклаз, микроклин и карбонаты |
| III | 1,535—1,545 | Рельеф и ограничения незаметны или слабо улавливаются | Халцедон, альбит, нефелин |
| IV | 1,55—1,60 | Рельеф и ограничения слабо заметны | Кордиерит, кварц, плагиоклазы, тальк |
| V | 1,61—1,66 | Рельеф и ограничения отчетливые, шагреневая поверхность ясная | Топаз, апатит, андалузит, мелилит, волластонит, тремолит |
| VI | 1,66—1,78 | Рельеф и ограничения резкие, отчетливая и даже резкая шагреневая поверхность | Карбонаты, силлиманит, оливин, пироксены, эпидот, цоизит, дистен |
| VII | Ок. 1,80 и > | Рельеф и ограничения очень резкие, резкая шагреневая поверхность | Гранаты, циркон, сфен |

В практике работы особенно хорошо следует помнить, что мы обычно имеем дело с веществами оптически анизотропными, т. е. такими веществами, в которых коэффициенты преломления в разных направлениях различны.² Так, например, если исследуемое сечение есть главное сечение Ng Np эллипсоида, то наблюдаемое нами явление (рельеф, характер поверхности, ограничения) лишь в том случае будет целиком и полностью зависеть от показателя преломления по оси Ng , если последняя будет совмещена с направлением колебаний поляризатора. Таким образом, для определения показателя преломления по данной оси эллипсоида необходимо совместить эту ось с направлением колебаний поляризатора, т. е. повернуть препарат так, чтобы ось Ng , лежащая в данном сечении, совместилась с соответствующей нитью окулярного креста (направлением колебаний поляризатора). Нередко наблюдаемое резкое различие в показателях преломления по Ng и Np (большое двупреломление) для ряда минералов (кальцит, магnezит, доломит, арагонит, мусковит)

¹ Мало отличается от такового же канадского бальзама.

² В веществах анизотропных, с которыми обычно имеют дело, определяются показатели преломления Ng , Nm , Np или Ng и Np .

влечет за собой явление *псевдоабсорбции* (Е. С. Федоров), выражающееся в том, что при вращении зерна вокруг световой нормали мы наблюдаем различную по резкости картину. В одном положении столика при совмещении оси Ng с PP например, зерно магнезита ($Ng=1,717$) представляется нам резко ограниченным, обладающим сильным рельефом и хорошо выраженными трещинами спайности. При повороте столика микроскопа на 90° (до совмещения с PP оси Np эллипсоида) резкость почти совершенно исчезает и зерно кажется как бы лежащим несколько ниже канадского бальзама ($Np=1,518$).

При определении показателя преломления большую услугу оказывает наблюдение так называемого *дисперсионного эффекта*, выражающегося в появлении цветной световой полоски на границе двух разно преломляющих *бесцветных* минералов. Менее преломляющие минералы в стыке с более преломляющими кажутся *золотисто-желтыми* вследствие преобладания лучей красной части спектра; более преломляющие минералы в стыке с менее преломляющими приобретают отчетливый *бледный голубовато-зеленый оттенок*, так как преобладают слабые лучи фиолетовой части спектра (например, ортоклаз в стыке с канадским бальзамом кажется золотисто-желтым, между тем как канадский бальзам приобретает зеленоватый оттенок). Сущность этого явления заключается в том, что лучи красной части спектра, обладающие более длинными и быстрыми волнами, будут менее сильно преломляться и легче отражаться, нежели лучи фиолетовой части спектра, имеющие более короткие волны и менее полно отражающиеся. Должен заметить, что начинающие обычно затрудняются в наблюдении этого эффекта, и для его восприятия необходимо долго и настойчиво приучать свой глаз.

Самым точным методом определения показателей преломления является *иммерсионный метод* (метод погружения), разработанный Шредер-фан-дер-Кольком (Schroeder van-der-Kolk, 1899) и основанный на определении показателя преломления n минерала при погружении его в жидкость с известным показателем преломления. Посредством метода Бекке можно подобрать две жидкости с показателями преломления n_1 и n_2 так, чтобы показатель преломления n данного минерала заключался между ними: $n_1 > n > n_2$. Для практических целей точность составляет $\pm 0,005$. Шредер-фан-дер-Кольком был предложен следующий набор иммерсионных жидкостей.

| №№ | Название жидкости | n | Температура кипения (в°С) |
|----|--------------------------|-------|---------------------------|
| 1 | Вода | 1,336 | — |
| 2 | Аммиак | 1,348 | 45 |
| 3 | Ацетон | 1,357 | 20 |
| 4 | Этиловый спирт | 1,372 | 20 |
| 5 | Этилвалерат | 1,393 | 20 |
| 6 | Амилловый спирт | 1,409 | 20 |
| 7 | Керосин | 1,448 | 20 |
| 8 | Четыреххлористый углерод | 1,477 | — |

| №№ | Название жидкости | n | Температура кипения (в °С) |
|----|----------------------------|-------|-------------------------------|
| 9 | Терпентинное масло | 1,462 | — |
| 10 | Ксилол | 1,487 | — |
| 11 | Толуол | 1,496 | — |
| 12 | Бензол | 1,501 | 45 |
| 13 | Кедровое масло | 1,505 | 45 |
| 14 | Монохлорбензол | 1,523 | 45 |
| 15 | Бром-этилен | 1,536 | 45 |
| 16 | Гвоздичное масло | 1,544 | 45 |
| 17 | Нитро бензол | 1,552 | 45 |
| 18 | Монобромбензол | 1,561 | 45 |
| 19 | Бромформ | 1,590 | 45 |
| 20 | Коричное масло | 1,605 | 45 |
| 21 | Моноиодбензол | 1,619 | 45 |
| 22 | α -монохлорнафталин | 1,635 | 45 |
| 23 | α -монобромнафталин | 1,655 | 45 |
| 24 | Иодистый метилен | 1,740 | 45 |

В практике работы нередко употребляется жидкость Туле, представляющая собою смесь HgJ_2 и KJ в весовом отношении 1,24:1, что соответствует отношению приблизительно одной граммолекулы HgJ_2 к двум граммолекулам KJ . Приготовленные растворы в воде различной концентрации обладают различными показателями преломления. Кроме указанных наборов жидкостей, существует много других наборов, изготовляемых по различным рецептам и различными иностранными фирмами. Показатель преломления жидкости определяется на рефрактометре при определенной температуре. При работе рекомендуется от времени до времени проверять показатель преломления жидкости. К жидкостям предъявляются следующие требования:

- 1) малая летучесть,
- 2) химическая однородность,
- 3) химическая стойкость, т. е. слабая окисляемость, нечувствительность к свету и т. д.

Часто приходится пользоваться смесями двух жидкостей, стараясь комбинировать их так, чтобы они имели близкую упругость паров при одинаковой температуре. Особый интерес в этом отношении представляет набор жидкостей, рекомендуемый Эммонсом. В наборе жидкостей, рекомендованном Ларсеном, подобраны жидкости, смешивающиеся в различных пропорциях.

Методика иммерсионного метода различна, зависит от тех требований, которые предъявляются к исследуемому объекту, и в настоящем руководстве не излагается. Желающие познако-

миться с этим методом могут обратиться к специальной литературе по этому вопросу¹.

Кроме перечисленных методов определения показателей преломления минералов, существуют методы, предложенные Мишель-Леви и Лакруа, де-Шоном, Никитиным и Виолем, требующие большей затраты времени и, по существу, не дающие большей точности; в настоящем руководстве также не излагаются.

§ 5. Исследование непрозрачных (опаковых) минералов

Все опаковые минералы могут быть разделены на две группы

- 1) минералы абсолютно непрозрачные и
- 2) минералы, слегка просвечивающие в тонких пластинках или краях.

К первой группе относятся магнетит и пирит, характеризующиеся разрезами зерен, изображенными на фиг. 29, и титано-магнетит в ассоциации с образующимся лейкоксеном; последний часто наблюдается в виде каймы вокруг зерен титано-магнетита (фиг. 30). Сюда же следует отнести часто наблюдающиеся в горных породах углистые частицы.

Ко второй группе относятся: хромит, просвечивающий в краях красновато-бурым цветом, графит, просвечивающий зеленовато-серым цветом в тонких листочках и чешуйках, и гематит, просвечивающий красным цветом в тонких пластинках и зернах, иногда обнаруживающий плеохроизм. Следует заметить, что для обнаружения этих свойств необходимо пользоваться сильным источником света (сильная лампа, вольтова дуга и т. д.).

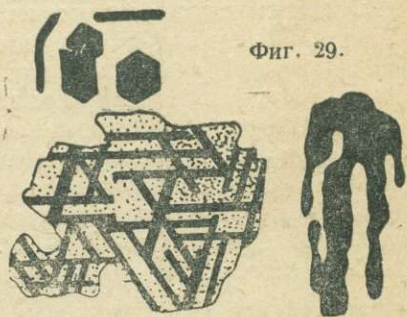
Для различия непрозрачных рудных минералов рекомендуется следующий прием: закрываем зеркальце микроскопа и наклоняем микроскоп так, чтобы свет падал на шлиф. В отраженном свете в момент наилучшего освещения каждый из рудных минералов обнаруживает различные свойства. Например, магнетит кажется темным, буроватым с металлическим блеском, пирит — бронзово-серым, халькопирит — латунно-желтым и т. д.

II. РАБОТА В СКРЕЩЕННЫХ НИКОЛЯХ

§ 6. Ориентировка оптической индикатрисы в кристаллах различных систем. Определение характера и угла угасания

В оптически одноосных кристаллах, т. е. кристаллах тетрагональной и гексагональной систем, оптическая индикатриса ориен-

¹Рекомендую использовать руководство Н. Веденевой «Иммерсионный метод определения показателей преломления под микроскопом», Георазведпат, 1933, а также соответствующую главу из известного руководства В. Н. Лодочникова «Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества». Для более полного изучения этого вопроса необходимо знакомство с оригинальными иностранными работами.



Фиг. 29.

Фиг. 30.

тирована таким образом, что ось вращения эллипсоида совпадает с вертикальной осью C кристалла. В кристаллах ромбической системы с кристаллографическими осями $X(a)$, $Y(b)$, $Z(c)$ (или, в частном случае, с тремя осями симметрии второго порядка) совпадают оси симметрии второго порядка трехосного эллипсоида. Следовательно, каждая из осей эллипсоида— Ng , Nm , Np обязательно совпадает с одной из кристаллографических осей— $X(a)$, $Y(b)$, $Z(c)$. В кристаллах моноклинной системы, в которых имеется ось симметрии второго порядка, принимаемая за ось $Y(b)$, и плоскость симметрии (010) , ей перпендикулярная, с кристаллографической осью $Y(b)$ кристалла совпадает одна из осей оптической индикатрисы: Ng , Nm или Np (для многих минералов ось Nm), а с плоскостью симметрии одно из главных сечений эллипсоида $NgNp$, $NgNm$ или $NmNp$ (часто плоскость оптических осей $NgNp$). Две другие оси эллипсоида с остальными кристаллографическими осями не совпадают, образуя углы, величины которых являются $const$ для данного минерала. Угол, образованный какой-либо кристаллографической осью в кристалле $[100]$, $[010]$ или $[001]$ с одной из осей оптической индикатрисы Ng , Nm или Np , называется **углом угасания** данного минерала. Угол угасания в соответствующем сечении минерала всегда отсчитывается до оси Ng и записывается следующим образом: $cNg = a^\circ$, где c — вертикальная кристаллографическая ось $[001]$, лежащая в этом сечении. Например для роговой обманки: $[001] Ng = 10-20^\circ$; для авгита: $[001] Ng = 36-50^\circ$. На фиг. 31 изображен кристалл роговой обманки с ориентировкой в нем оптической индикатрисы.

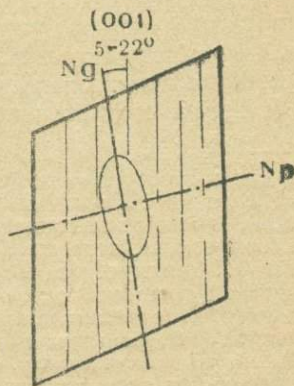
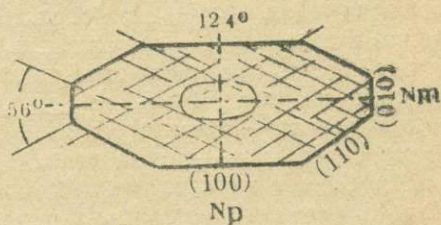
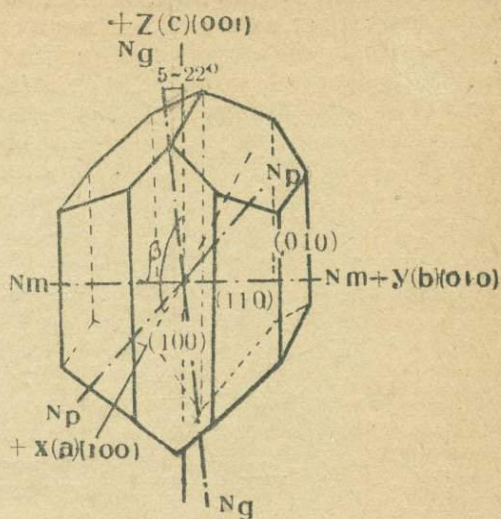
Вообще же углы угасания в различных сечениях минерала могут измеряться относительно трещин спайности, ограничений, удлинения, двойниковых швов. В этом случае следует говорить не об угле угасания минерала, а об угле угасания его сечения, замеряемом относительно одного из указанных кристаллографических элементов.

В отдельных случаях, подобно кристаллам ромбической системы, для определенных длин волн и определенных температур имеет место совпадение всех осей эллипсоида с кристаллографическими осями.

В кристаллах триклинной системы все кристаллографические оси не совпадают с осями эллипсоида, и ориентировка последнего в этих кристаллах носит случайный характер.

Если пластинку, вырезанную из кристалла квадратной, гексагональной или ромбической системы параллельно удлинению, поместить на столик микроскопа между скрещенными николями, то в положении совмещения удлинения кристалла или какого либо одного его ограничения, параллельного одной из осей эллипсоида, с плоскостью колебаний одного из николей, она угаснет. Таким образом, полное угасание наступает тогда, когда какие-либо главные кристаллографические направления кристалла, параллельные осям эллипсоида, совпадают с сечениями николей; такое угасание называется **прямым угасанием**. В кристаллах моноклинной системы, в разрезах, перпендикулярных плоскости симметрии (010) и параллельных кристаллографической оси $Y(b)$, одна из осей

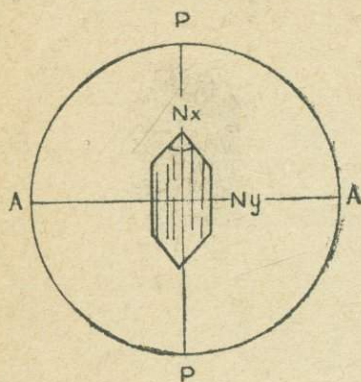
эллипсоида N_g , N_m или N_p совпадает с осью $V(b)$ и плоскость (010) с одним из главных сечений эллипсоида. Не трудно понять, что такие разрезы обладают прямым угасанием, measurable относительно какого-либо одного кристаллографического направления (например относительно спайности (010) в ортоклазе). В пластинке, вырезанной из кристалла моноклинной системы в каком-либо другом направлении (например перпендикулярно $V(b)$), будет наблюдаться косое угасание. Если эту пластинку поместить на столик микроскопа между скрещенными николями, то в положении совмещения какого-либо кристаллографического направления (например спайности в роговой обманке) с сечением одного из николей, угасание не угаснет; угасание наступает лишь при повороте на определенный угол, т. е. тогда, когда с направлением колебаний николей совпадают направления колебаний в зерне, т. е. когда оси эллипсоида в данном сечении совпадают по направлению с PP и AA^1 . В кристаллах квадратной, гексагональной, ромбической систем, также в моноклинной в разрезах,



Фиг. 31.

¹ Согласно правилу Френеля, для определения направления колебаний и показателей преломления (или скоростей) нужно разрезать эллипсоид плоскостью, перпендикулярной световой нормали (или лучу), что в общем случае

перпендикулярных (010), наблюдается так называемое *симметричное угасание*, заключающееся в том, что направление угасания делит пополам угол, образованный линиями *равнозначных* кристаллографических направлений в кристалле (фиг. 32). На приведенной выше фиг. 31 в сечении $NmNp$ роговой обманки, относительно трещин призматической спайности по (110) будет наблюдаться симметричное угасание. Точно так же симметричное угасание будет наблюдаться во всех разрезах, параллельных $Y(b)$, но непараллельных $Z(c)$.



Фиг. 32.

Порядок работы.

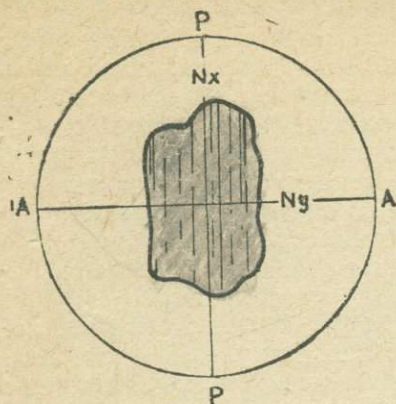
1. Включив анализатор с объективом № 3, фокусируем микроскоп и находим зерно исследуемого минерала с *наивысшей интерференционной окраской* (в данном сечении лежат оси N_g и N_p !).
2. Приводим его в пересечение нитей окулярного креста.
3. Поворачиваем препарат (столлик микроскопа) до момента совмещения какого-либо кристаллографического направления (например, спайности) с вертикальной или горизонтальной нитью окулярного креста. Может быть два случая:
 - а) зерно угасло — прямое угасание (фиг. 33);
 - б) зерно не угасло — косое угасание (фиг. 34).
4. Берем отсчет на столике микроскопа и поворачиваем препарат до наступления максимума темноты в сторону наименьшего угла.

Наступившая темнота указывает на то, что оси N_x и N_y оптической индикатрисы лежат в плоскости колебаний николей, т. е. совмещены с нитями окулярного креста (фиг. 35). Берем второй отсчет на столике микроскопа. Разность отсчетов дает

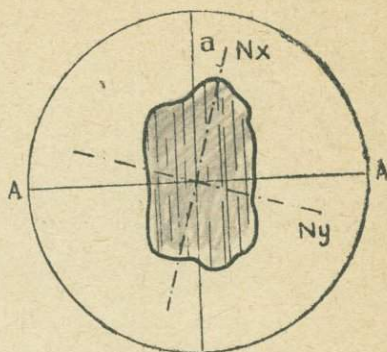
менее точно), тогда направления осей эллипса в плоскости сечения укажут на направления колебаний, а величины полуосей — на показатели преломления (или скорости). В микроскопе направление световой нормали совпадает с оптической осью микроскопа, следовательно, рассматриваемое нами сечение лежит в плоскости шлифа. Таким образом, во всех случаях, если препарат вырезан неперпендикулярно оптической оси, в плоскости шлифа будет расположен эллипс с осями N_x и N_y , направления которых указывают на направления колебаний. Величины N_x и N_y будут зависеть от того, как ориентирован эллипсоид по отношению к направлению волны, т. е. как сделан разрез. Например, если волна распространяется в направлении, перпендикулярном плоскости оптических осей (световая нормаль совпадает с лучом), то в плоскости сечения будут лежать оси N_g и N_p .

Согласно ранее изложенному, α — угол, образованный направлениями колебаний в пластинке (зерне) с направлениями колебаний николей. При значениях $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, т. е. тогда, когда направления осей N_x и N_y совпадают с направлениями колебаний николей, будет наблюдаться максимум темноты. Все последующие задачи, связанные с ориентировкой эллипсоида в зерне, основаны на правиле Френеля.

угол угасания, образованный направлением спайности с одной из осей эллипсоида. Остается определить, которая же из осей,



Фиг. 33.



Фиг. 34.

лежащих в данном сечении, N_x или N_y — ось N_{θ} и которая N_{ρ} и с какой из них замерен угол.

Определение кристаллографической системы по характеру угасания по отношению к спайности и ограничениям в различных сечениях минерала¹.

| Трещины спайности | | | | Разрезы мин. и плоскости их огранич. | Система |
|--|--|--|--|--|--------------------------|
| Пинакоидальные | | Призматические | | | |
| Норм. к пл. шлифа — тонкие и несмещающ. | Накл. к пл. шлифа — толстые и смещающ. | Ось зоны призм. спайн. норм. к пл. пл. трещ. сп. тонкие и несмещающ. | Накл. к пл. шлифа — толстые и смещающ. | | |
| Прямое | | Изотропны ² | | Прямое в прямоуг. или удлин. разрез. Проч. разрезы (восьмиуг., шестиуг., четырехуг., трехуг.) — изотр. или облад. косым или сим. угас. | Тетрагон Гексагон |
| Прямое | Косое или прямое в сеч. леж. в зонах кристалл. осей [100], [010], [001] | Косое или симм. | Косое, симм. в сеч. \perp (010) и не \parallel [001] и прямое в зоне верт. оси [001] | Прямое и симм. в прямоуг. разрез. Косое, прямое или симм. в проч. разрезах | Ромбич. |
| Косое по отнош. к сп. по (100) и (001) и прямое по отнош. к сп. по (010) | Косое или прямое по отнош. к сп. по [010] в сеч. леж. в зонах кристалл. осей [100], [010], [001] | Косое или симм. | Косое, симм. в сеч. \perp (010) и не \parallel [001] и в искл. случ. прямое | Косое, прямое в зоне [010], — в удлин. разрез. Косое или симм. в шестиуг. или восьмиуг. разрезах | Монокл. |
| Косое и лишь в искл. случ. прямое ³ | | | | Косое во всех разрезах. или как искл. прям. | Трикл. |

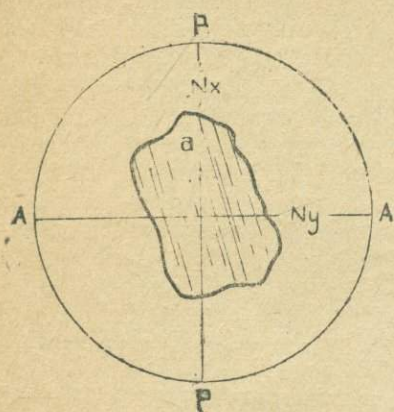
¹В. Н. Лодочников, «Основы микроскоп. методов исследования кристалл. вещества», 1930, стр. 187—210.

² Призматич. спайность в этом случае проявл. в виде сист. трещин на плоскости пинакоида, совпад. с изотроп. сеч. под углом 90° в тетрагон. сист. и 60° — в гексагон. сист.

³ Для трикл. сист., в которой призмы как формы отсутств., под призматической спайностью подразумевается спайность по пинакоиду 3-го рода (hko)

§ 7. Определение наименования осей оптической индикатрисы в данном сечении

Для определения наименования осей оптической индикатрисы пользуются *гипсовой* и *слюда́ной* пластинками. Последние представляют собой эталоны, изготовленные из гипса¹ и слюды (мусковита²) с известной ориентировкой эллипсоида. Выбитые по спайности тонкие пластинки гипса и слюды заклеиваются канадским бальзамом между двумя стеклами и вставляются в металлические оправы.



Фиг. 35.

На оправе гипсовой пластинки стрелками указаны оси оптической индикатрисы, лежащие в плоскости пластинки. Стрелкой, расположенной параллельно длинной стороне пластинки, обозначена ось Np оптической индикатрисы (ось «наибольшей упругости»— a). Стрелкой, расположенной параллельно короткой стороне пластинки, обозначена ось Ng оптической индикатрисы (ось «наименьшей упругости»— e).

Гипсовая пластинка делается такой толщины, что обладает разностью хода в 575μ и имеет *красный цвет* I порядка, в чем легко убедиться, поместив ее при скрещенных николях на столик микроскопа в диагональном положении по отношению к кресту нитей.

Слюда́ная пластинка обладает разностью хода в 150μ и имеет *серый цвет*.

На фиг. 36 изображены гипсовая и слюда́ная пластинки, изготавливаемые фирмой E. Leitz Wetzlar. Разница в пользовании гипсовой и слюда́ной пластинками заключается в том, что при



Фиг. 36.

¹ Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ кристаллизуется в моноклинной системе в виде прозрачных кристаллов с весьма совершенной спайностью по (010). Легко расщепляется на тонкие пластинки, отчего его называют в народе «слюдкой» за внешнее сходство со слюдой. Уд. вес 2,3. Тв. 2. Двупреломление 0,009. Главное сечение $NgNp$ оптической индикатрисы в кристалле совпадает с плоскостью (010). Таким образом, в плоскости пластинки гипса, выбитой по спайности, лежат оси $NgNp$.

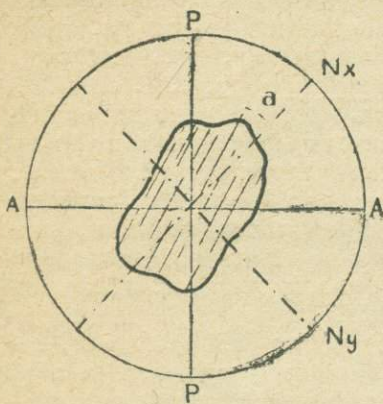
² Мусковит $\text{H}_2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$ кристаллизуется в моноклинной или гексагональной системе в виде прозрачных листоватых кристаллов с весьма совершенной спайностью по (001). Уд. вес 2,76—3,0. Тв. 2. Двупреломление 0,036—0,044.

пользовании гипсовой пластинкой изменение интерференционной окраски зерна определяют от цвета гипсовой пластинки (первоначальная интерференционная окраска зерна не имеет значения), а при пользовании слюдяной пластинкой изменение окраски определяют от первоначального цвета минерала (перед вставлением слюдяной пластинки заметить интерференционную окраску минерала!). При согласном налегании осей эллипсов в гипсовой пластинке и зерне, т. е. когда одноименные оси эллипсов в пластинке и зерне совпадают по направлению, в положении, изображенном на фиг. 38, происходит увеличение разности хода, т. е. повышение интерференционной окраски. Пусть исследуемое зерно обладает разностью хода 400μ , что соответствует оранжевому цвету I порядка. При согласном налегании осей в пластинке и кристалле, получим разность хода $400 + 575 = 975 \mu$, что соответствует желтому цвету II порядка. Наблюдая появление желтой окраски, ошибочно говорим, что происходит понижение окраски относительно цвета гипсовой пластинки (красного), между тем как в действительности происходит повышение окраски. Результат будет верен лишь в том случае, если Δ мин. $+575 \mu$ не $> 860 \mu$ (синие, зеленые цвета). При несогласном же налегании осей эллипсов (фиг. 39) для той из пластинок, которая обладала более высокой интерференционной окраской, произойдет понижение окраски, вследствие того, что разность хода, возникающая в одной из пластинок, компенсируется разностью хода в другой. Беря, как пример, разность хода в кристалле 750μ , т. е. зеленую окраску II порядка при движении пластинки, получим $750 - 575 = 175 \mu$, что соответствует светлосерому цвету. В случае, если разность хода в кристалле равна 335μ , при движении пластинки получим разность хода $575 - 335 = 240 \mu$, что соответствует серовато-белому цвету I порядка.

При движении в поле зрения микроскопа слюдяной пластинки, в случае согласного налегания осей эллипсов в пластинке и в зерне, также происходит возрастание разности хода в кристалле на величину разности хода, заключающейся в слюдяной пластинке, т. е. на 150μ . Пусть разность хода в исследуемом зерне равна 750μ , что соответствует зеленой окраске II порядка. Вдвинув пластинку, получаем разность хода $750 + 150 = 900 \mu$, что соответствует желтому цвету II порядка. При несогласном же налегании осей в пластинке и зерне мы, очевидно, получим уменьшение разности хода на величину 150μ , т. е. от разности хода в кристалле, равной до вставления пластинки 750μ , отнимается 150μ : $750 - 150 = 600 \mu$. Полученная разность хода соответствует синей окраске I порядка.

Итак, при пользовании слюдяной пластинкой происходит изменение интерференционной окраски в ту или другую сторону на величину разности хода пластинки. Из сказанного вытекает правило: При исследовании минералов с высокой интерференционной окраской следует пользоваться слюдяной пластинкой, при исследовании же минералов с низкой интерференционной окраской — гипсовой пластинкой, в противном случае легко впасть в ошибку.

1. Поворачиваем препарат от положения максимум темноты в ту или другую сторону (например, по часовой стрелке) на 45° до максимум света и закрепляем зажимной винт предметного столика. Оси N_x и N_y занимают диагональное положение относительно нитей окулярного креста (фиг. 37).



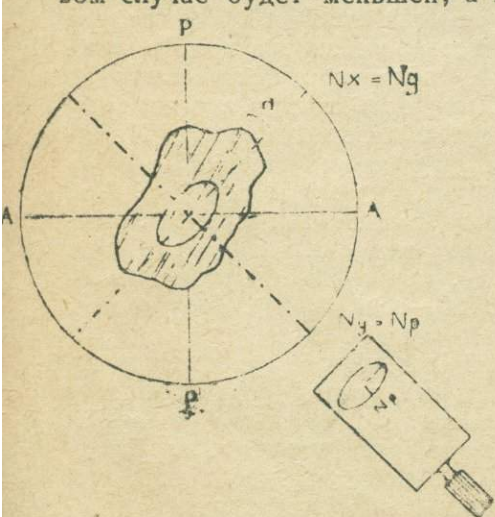
Фиг. 37.

2. Вставляем гипсовую или слюдяную пластинку и наблюдаем изменение интерференционной окраски. Может быть два случая:

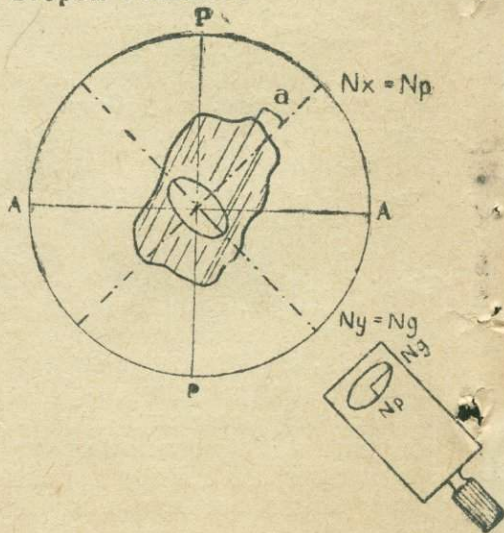
а) интерференционная окраска повышается — наложение осей эллипсов в пластинке и в зерне согласное (фиг. 38);

б) интерференционная окраска понижается — наложение осей эллипсов в пластинке и в зерне несогласное (фиг. 39).

Начинающим рекомендуется проверить результат, повернув препарат от положения максимум темноты на 45° в противоположную сторону (или на 90° от максимум света в противоположную сторону), т. е. в нашем примере против часовой стрелки. Очевидно, должно произойти обратное явление и, если в первом случае имело место повышение, то при повороте препарата в противоположную сторону, после вставления пластинки, наступит понижение интерференционной окраски. В случае, если в плоскости препарата лежат оси $NgNm$ или $NmNp$, порядок работы остается таким же; ось Nm в первом случае будет меньшей, а во втором большей.



Фиг. 38.



Фиг. 39.

Начинающим также необходимо делать зарисовки каждый раз при измерении угла угасания в том положении, в каком это изображено на фиг. 37. При определении наименования осей оптической индикатрисы в густо окрашенных и сильно плеохроичных минералах (например, в биотите или роговой обманке), занимающиеся часто сталкиваются с затруднениями. В этом случае необходимо производить наблюдения над каким-нибудь одним участком зерна или, лучше всего, над его тонкими краями. Более надежный результат получается при применении компенсатора Берека.

При исследовании минералов, обладающих большой разностью хода, а следовательно, и высокими интерференционными цветами, часто бывает трудно определить, имеем ли мы дело с повышением или понижением интерференционной окраски. В этом случае наименование осей рекомендуется определять посредством кварцевого клина или компенсатора Берека (см. фиг. 41).

§ 8. Определение оптического характера главной зоны минерала (знака зоны)

Часто минералы бывают удлинены в определенных кристаллографических направлениях, с которыми в одних случаях совпадает ось Ng , а в других Np эллипсоида.

В том случае, когда ось Ng оптической индикатрисы совпадает с удлинением минерала или составляет с ним угол меньше 45° , говорят о положительном характере главной зоны или удлинения; в случае же совпадения с удлинением минерала оси Np говорят об отрицательном ее характере. Когда ось Ng составляет с удлинением угол 45° , оптический характер главной зоны будет (\pm) . Для характеристики оптического характера главной зоны принято обозначение Ch_z . Таким образом, при совпадении оси Ng с удлинением минерала или угле меньшем $45^\circ - Ch_z (+)$.

В удлинённых минералах, при отсутствии хорошо выраженных ограничений, угол угасания для определения оптического характера главной зоны измеряется по отношению к спайности, если таковая наблюдается.

§ 9. Исследование плеохроизма

Установив, что исследуемый нами минерал плеохроичен (см. § 3), необходимо охарактеризовать степень поглощения света по осям эллипсоида, т. е. установить, по которой из осей свет поглощается больше и по которой меньше.

Порядок работы

1. Приводим исследуемое зерно с наивысшей интерференционной окраской (сечение $NgNp1$) в пересечение нитей окулярного креста.

2. Определяем наименование осей.

3. Зная ориентировку осей в данном сечении, вращением столика совмещаем одну из осей эллипса (например Ng) с плоскостью колебаний поляризатора, т. е. с одной из нитей оку-

лярного креста (положение главного сечения поляризатора должно быть точно установлено) и выключаем анализатор. Наблюдаем окраску и ее интенсивность. Далее поворачиваем столик микроскопа в ту или другую сторону на 90° (до момента совмещения оси эллипса Np с плоскостью колебаний поляризатора) и вновь наблюдаем окраску.

В случае трихричного минерала необходимо найти разрез, в котором бы лежала ось Nm эллипсоида (например, для роговой обманки сечение $NmNp$ характеризуется наличием трещин спайности под углом 124° , см. фиг. 31). Определив наименование осей в данном сечении, совмещаем ось Nm с направлением колебаний поляризатора и отмечаем цвет и густоту. Результаты наблюдения, например для роговой обманки, записываются в следующей таблице:

| | |
|------|--------------|
| Ng | Темнозеленая |
| Nm | Зеленая |
| Np | Желтая |

Схема абсорбции: $Ng > Nm > Np$.

Из этого следует, что свет поглощается, или, как говорят, абсорбируется по оси Ng больше, чем по Nm , и по Nm больше, чем по Np .

Для щелочных роговых обманок (арфведсонит) характерна обратная схема абсорбции: $Ng < Nm < Np$.

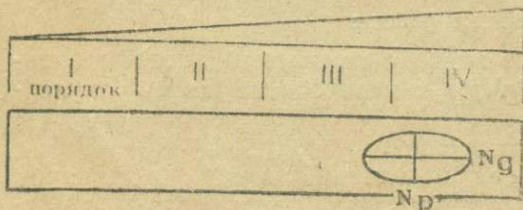
§ 10. Определение разности хода (порядка интерференционной окраски) посредством компенсационных приборов

Определение порядка интерференционной окраски минерала производится посредством кварцевого клина или компенсатора Берекса.

1. Кварцевый клин вырезается из кварца параллельно или под углом к оптической оси и заклеивается канадским бальзамом между двумя стеклами.

Наиболее целесообразным представляется способ вырезывания клина под углом к оптической оси (параллельно грани одного из ромбоэдров), так как в этом случае значительно упрощается процесс его изготовления.

Вначале в указанном направлении вырезается пластинка, ставиваемая затем на клин, тонкий конец которого, отвечающий черной или темносерой окраске, будет толще, нежели в случае вырезывания пластинки в направлении, параллельном оптической оси (параллельно одной из граней призмы). Ориентировка осей эллипса в клине определяется способом вырезания клина, т. е.



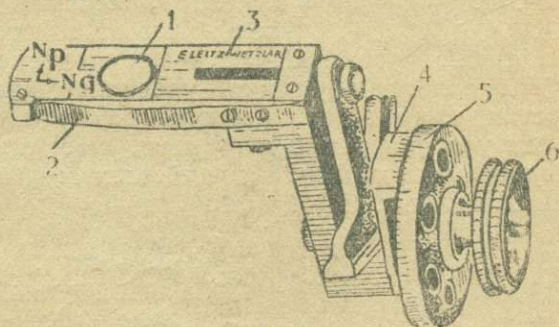
Фиг. 40.

его ориентировкой в плоскости среза; часто с длинной стороной клина совпадает ось Ng , а с короткой Np эллипсоида (фиг. 40). Если такой клин поместить на столик микроскопа или в специальное для него от-

верстие в нижней части тубуса микроскопа (отверстие, в которое вставляются гипсовая и слюдяная пластинки) и передвигать его в поле зрения в направлении его длины от тонкой части, то будет наблюдаться смена интерференционных цветов вначале в пределах I, затем II, III и т. д. порядков. Число порядков зависит от того, каким способом вырезан клин и каких размеров был кристалл кварца, из которого он вырезался. Так например, клин, вырезанный параллельно оптической оси длиной около 30 мм, имеет 4 порядка; его тонкая часть равна 0,01—0,02 мм, толстая — 0,25 мм. Для практических целей достаточно иметь трехпорядковый клин.

На фиг. 40 изображен четырехпорядковый клин, в котором с длинной стороной совпадает ось Ng , а с короткой — Np эллипса.

2. Компенсатор Берка, изображенный на фиг. 41, предста-

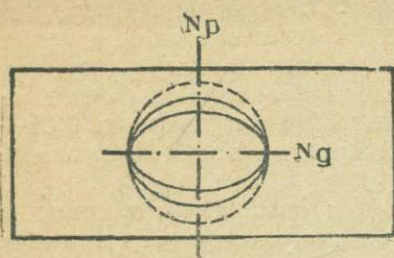


Фиг. 41. Компенсатор Берка

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1 — кальцитовая пластинка. | 4 — нониус. |
| 2 — пружинка. | 5 — барабан. |
| 3 — обойма. | 6 — рукоятка для вращения. |

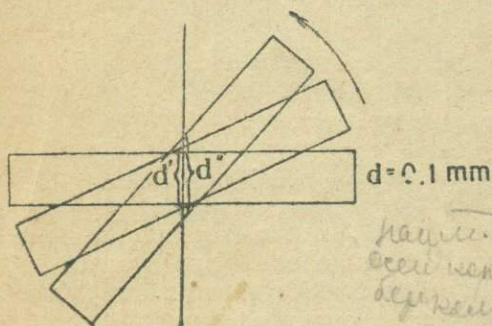
вляет собой прибор, предназначенный, как и кварцевый клин, для определения разности хода в минерале. Его устройство основано на идее использования пластинки кальцита толщиной 0,1 мм, вырезанной перпендикулярно оптической оси и вращающейся вокруг одной из осей, лежащей в плоскости кругового сечения, т. е. в плоскости этой пластинки. Так как кальцит кристалл оптически отрицательный (оптическая индикатриса имеет вид эллипсоида вращения, сплюснутого по оси вращения), то осью вращения пластинки будет ось Ng эллипсоида. Вращая ее, мы тем самым будем получать различные значения d , соответствующие различным величинам Γ , т. е. будем наблюдать ту же смену цветов, что и в кварцевом клине. Из теории следует, что в положении совмещения оптической оси в пластинке с оптической осью микроскопа, т. е. когда плоская волна падает перпендикулярно оптической оси, разность хода двух волн равна нулю, иначе говоря, не происходит двойного лучепреломления. Наклоняя пластинку, мы будем переходить от кругового сечения к эллиптическим (фиг. 42). Из фиг. 43 видно, что лучи проходят тем больший путь в пластинке, чем больше угол поворота пластинки вокруг оси вращения, т. е. чем меньше угол наклона ее к оптической оси микроскопа. Пластинка заклеивается

канадским бальзамом между стеклами и вставляется в оправу, вращающуюся в металлической обойме, на конце которой расположен барабан с делениями и нониус, по которым и отсчитывается угол поворота пластинки. В положении совмещения 30-го деления барабана с нулем нониуса кристаллическая пластинка находится в плоскости металлической обоймы (место нуля). На металлической обойме стрелками показано направление осей эллипса. Стрелкой, расположенной параллельно длинной стороне обоймы и обозначенной буквой $H_1 = e$, показано направление оси Ng , а стрелкой, расположенной параллельно короткой стороне обоймы и обозначенной буквой $H_2 = a$, — направление оси Np .



Фиг. 42.

С боков обоймы имеются пружинки, удерживающие компенсатор в отверстии микроскопа. Кварцевый клин и компенсатор Берека являются универсальными приборами, посредством которых также можно определить наименование осей оптической индикатрисы в данном сечении минерала. В § 7 было указано, что при определении наименования осей в минералах, обладающих большой разностью хода, рекомендуется пользоваться кварцевым клином или компенсатором Берека. В этом случае поступают следующим образом. Выбрав зерно с наивысшей интерференционной окраской и приведя его в положение максим. света (см. ниже), т. е. положение, изображенное на фиг. 37, вдвигаем кварцевый клин или поворачиваем компенсатор.



Фиг. 43.

Если наступает понижение интерференционной окраски и, наконец, при некотором положении компенсатора зерно делается темным, то положение осей эллипсов в приборе и в зерне несогласное, т. е. $Nx = Ng$, а $Ny = Np$. Если же компенсация не наступает, т. е. наблюдается повышение интерференционной окраски, то оси эллипсов в приборе и в зерне расположены согласно, вследствие чего $Nx = Np$, а $Ny = Ng$. Кроме компенсатора Берека, в практике работы иногда применяется компенсатор Бабиней¹.

Для определения разности хода используются разрезы с наивысшей интерференционной окраской.

¹ О применении компенсатора Бабиней см. в книге А. К. Подногина «Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу В. С. Федорова», Горгеонефтеиздат, 1933, § 14.

Порядок работы

1. Находим зерно исследуемого минерала с *наивысшей* интерференционной окраской (для чего может быть использовано зерно, в котором измерялся угол угасания) и, приведя его в пересечение нитей окулярного креста, вставляем объектив № 3 и фокусируем.

2. Вращением столика микроскопа приводим зерно в максимум темноты.

3. От положения темноты поворачиваем препарат в ту или другую сторону на 45° до максимум света и закрепляем зажимной винт столика.

4. Заметив окраску зерна (например желтую), вставляем кварцевый клин или компенсатор Берека (помнить, что 30-е деление барабана должно совпадать с нулем нониуса!).

5. Вдвигаем клин или вращаем компенсатор Берека (от положения совмещения 30-го деления барабана с нулем нониуса) к себе или от себя. Может быть два случая:

а) компенсация наступает (разности хода в компенсаторе и в зерне равны), т. е. появляется темносерая или черная окраска — оси эллипсов в компенсаторе и в зерне располагаются несогласно;

б) компенсация не наступает, т. е. не появляется темносерой или черной окраски — оси эллипсов в компенсаторе и в зерне располагаются согласно.

В этом случае выдвигаем клин или вращаем компенсатор Берека в обратном направлении до места нуля и затем поворачиваем столик микроскопа в ту или другую сторону на 90° . Вновь повторяем операцию сначала. Компенсация должна наступить.

6. Достигнув компенсации, убираем шлиф. Окраска *центральной части поля* зрения (в поле зрения будет наблюдаться несколько цветов клина или компенсатора) должна быть такой же, как и минерала (т. е. желтая).

7. *Медленно* выдвигаем клин или вращаем компенсатор в *обратную сторону* до нулевого положения (до момента совмещения 30-го деления барабана с нулем нониуса!) и наблюдаем смену цветов. Пусть, например, от компенсированного желтого цвета пройдут следующие цвета: зеленый, синий, красный, желтый, белый, серый и черный. Таким образом, желтый цвет повторяется два раза и мы делаем заключение, что минерал имеет желтую окраску II порядка. В некоторых минералах (например слюдах) можно определить порядок интерференционной окраски, не применяя компенсационных приборов. Зерно каждого минерала в поперечном сечении представляет собой как бы клин с утолщенной частью в центре и более тонкими частями в краях; соответственно различным толщинам в разных участках зерна будет наблюдаться различная интерференционная окраска, повышающаяся от периферии к центру. Внимательно наблюдая смену цветов, без труда можно определить порядок интерференционной окраски. В минералах, обладающих высокими интерференционными цветами, появляется так называемая *радужная* или *перламутровая* интерференционная окраска (кальцит, магнезит, доломит).

§ 11. Аномальная интерференционная окраска (дисперсия двупреломления)

Для некоторых минералов (эпидота, цоизита, хлорита, мелилита, гельвина) наблюдаются необычные интерференционные цвета. Причина этого явления лежит в изменении величины двупреломления, вместе с изменением длины волны. Если сила двойного лучепреломления для красного цвета меньше, чем для синего, наблюдается типичная индигово-синяя или серовато-синяя *супернормальная* интерференционная окраска (эпидот, цоизит). Если же сила двупреломления для красного цвета больше, чем для синего, наблюдается красновато-бурая, оливково-зеленая или сине-фиолетовая *субнормальная* интерференционная окраска (некоторые хлориты). В тех случаях, когда сила двойного лучепреломления для средних цветов спектра равна нулю, наблюдается тусклая индигово-синяя или фиолетовая аномальная интерференционная окраска (некоторые хлориты, мелилиты, везувианы). Различие этих окрасок производится в монохроматическом свете. В обычной микроскопической практике достаточно отметить наличие вообще аномальной окраски.

§ 12. Более точный способ измерения разности хода

Нередко в практике работы приходится прибегать к более точному измерению разности хода посредством компенсатора Берека.

Порядок работы

1. Выбрав зерно с *наивысшей* интерференционной окраской и приведя его в пересечение нитей окулярного креста, вставляем компенсатор Берека (помнить, что 30-е деление барабана должно совпадать с нулем нониуса).

2. Вращаем компенсатор от нулевого положения сначала от себя до момента компенсации и берем отсчет a на барабане, затем вращаем его к себе от нулевого положения и берем на барабане второй отсчет b . Пусть отсчеты будут: $a = 38^{\circ},1$, $b = 25^{\circ},9$. Берем полуразность этих отсчетов и получаем число, которое обозначаем буквой l .

$$l = \frac{a - b}{2} = \frac{38^{\circ},1 - 25^{\circ},9}{2} = 6^{\circ},1.$$

3. Из таблицы I, прилагаемой к настоящему руководству, находим логарифм числа $f(6^{\circ},1)$.

4. Пользуясь формулой:

$$\lg \Gamma = \lg C + \lg f(l),$$

где $\lg C$ — логарифм константы компенсатора для данного света (см. ниже), Γ — разность хода, находим $\lg \Gamma$:

$$\lg C = 3,931$$

$$\lg f(6^{\circ},1) = 8,054$$

$$\lg \Gamma = 11,985$$

5. Из таблицы II, прилагаемой к данному руководству, для мантиссы 985 находим число 986. Из полученной характеристики

отнимаем 10; к остатку прибавляем единицу и получаем целое число знаков перед запятой. Итак, $\Gamma = 96,6 \text{ мк}$.

Для выражения разности хода в долях длины волны того света, при котором производились наблюдения, следует разность хода разделить на длину волны.

Таблицей III, также прилагаемой к настоящему руководству, пользуются для определения Γ , если вычисления производятся на счетной линейке.

По таблице III находят значение для 10000 $f(i)$, а затем, умножая его на константу $\frac{C}{10000}$, находят Γ .

В приведенном выше примере $10000 f(6^\circ, 1) = 113,2$. Взяв значение $\frac{C}{10000}$ для того же компенсатора, равное 0,854, находим:

$$\Gamma = 113,2 \cdot 0,854 = 96,6 \text{ мк}.$$

§ 13. Определение постоянной компенсатора Берека

В таблицах, прилагаемых фирмой Leitz к каждому компенсатору, даются значения C компенсатора, обычно для красного, желтого, синего и дневного света, а также $\frac{C}{10000}$. Так, например, для компенсатора № 1935 эти значения таковы:

| λ | C | D | F | Дневной свет осв. пункт 550 мк |
|-------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|
| | 656 мк | 589 мк | 486 мк | |
| lg C | 3,924 | 3,928 | 3,938 | 3,931 |
| $\frac{C}{10000}$ | 0,840 | 0,848 | 0,867 | 0,854 |

В монохроматическом свете определенной длины волны вставляем в отверстие тубуса компенсатор и, скрестив николи, вращаем его сначала в одну сторону, а затем в другую до появления первой темной полосы в пересечении нитей окулярного креста. Взяв отсчеты a и b на барабане, находим угол i .

Из таблицы I находим $\lg f(i)$, а из таблицы II — $\lg \lambda$.

Константа компенсатора для данной длины волны будет выражаться формулой:

$$\lg C = \lg \lambda - \lg f(i).$$

Если используется любая пара n темных полос ¹ и находится угол $i_n = \frac{a_n - b_n}{2}$, тогда формула принимает вид:

$$\lg C = \lg n\lambda - \lg f(i).$$

При получении константы компенсатора для белого дневного света используют чувствительную фиолетовую окраску, т. е. границу между цветами I и II порядков, приводя ее вращением компенсатора в пересечение нитей окулярного креста. Для λ берется значение: $\lambda = 550 \text{ мк}$.

¹ Обычно рекомендуется вычислять константу по нескольким парам темных полос и затем из полученных данных вывести среднее.

Пример

Первые отсчеты:

$$a = 44^{\circ},0; b = 14^{\circ},8;$$

$$\frac{a-b}{2} = \frac{43,8 - 14^{\circ},8}{2} = 14^{\circ},5;$$

$$\lg 550 = 2,740$$

$$\lg/(14^{\circ},5) = 8,803$$

$$\lg C = 3,937$$

Вторые отсчеты:

$$a = 44^{\circ},0; b = 14^{\circ},6;$$

$$\frac{a-b}{2} = \frac{44,0 - 14,6}{2} = 14^{\circ},7;$$

$$\lg 550 = 2,740$$

$$\lg/(14^{\circ},7) = 8,815$$

$$\lg C = 3,925$$

$$\text{Средн. } \lg C = \frac{3,937 + 3,925}{2} = 3,931.$$

Вообще же следует заметить, что практическая точность при определении этой константы составляет приблизительно $\pm 0,003 - 0,005$.

Для вычисления константы $\frac{C}{10000}$, пользуясь таблицей II, находят число, соответствующее $\lg C$, а затем делят его на 10000.

§ 14. Определение толщины шлифа¹

Зная разность хода данного минерала, нам остается определить толщину шлифа, после чего мы можем определить важнейшую константу минерала — *двупреломление* из формулы:²

$$\Gamma = d(Ng - Np)^2.$$

¹ Согласно исследованиям Reinhard'a (см. В. Н. Лодочникова «Основы микроскоп. метод. исслед. кристал. вещества», 1930, стр. 124) толщина шлифа в разных его участках может отличаться приблизительно на величину $5 \mu = 0,005$ мм.

² Если пластинка вырезана из двоякопреломляющего минерала но перпендикулярно оптической оси, то очевидно, что поляризованный свет с колебаниями лежащих в пластинку, даст два взаимно перпендикулярных колебания, принадлежащих двум различным волнам и совершающимся, согласно правилу Френеля, в направлении осей N_x и N_y эллиптического сечения, с различной скоростью v_1 и v_2 . Проходя через пластинку и распространяясь с различной скоростью v_1 и v_2 , по выходе они дадут некоторую разность хода Γ . Обозначим через S_1 и S_2 — пути волн в воздухе за время t . Пусть t_1 и t_2 — время прохождения волн через кристаллическую пластинку толщиной d .

Если одна волна пройдет через пластинку и затем выйдет из нее, а другая только достигнет ее поверхности, тогда $\Gamma = S_1 - S_2$. Отношение между временем прохождения волн через пластинку, их скоростями и величиной d выражается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} d &= v_1 t_1; S_1 = vt_1 \\ d &= v_2 t_2; S_2 = vt_2 \end{aligned} \right\} \text{ где } v \text{ — скорость распростра-} \\ \text{нения волн в воздухе.}$$

$$\Gamma = S_1 - S_2 = vt_1 - vt_2 = v \frac{d}{v_1} - v \frac{d}{v_2} = d \left(\frac{v}{v_1} - \frac{v}{v_2} \right).$$

Так как $v = 1$, имеем:

$$\Gamma = S_1 - S_2 = d \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \text{ или } \Gamma = d (n_1 - n_2),$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления. В случае, если в плоскости шлифа располагается сечение $NgNp$ оптической индикатрисы, формула принимает вид:

$$\Gamma = d (Ng - Np).$$

1. **Определение толщины шлифа по кварцу.** Если в шлифе есть кварц, то легко определить толщину шлифа, используя для этого разрезы кварца с *наивысшей* интерференционной окраской (белые и желтые).

Порядок работы

1. Находим зерно кварца с *наивысшей* интерференционной окраской (белой или желтой) и посредством клина или компенсатора определяем разность хода одним из изложенных выше способов.

2. Зная для кварца $Ng - Np = 0,009$, графически по таблице Мишель-Леви¹ или пользуясь формулой (в случае, если разность хода вычислялась аналитически), находим толщину шлифа d .

Для большей точности необходимо произвести определение толщины по нескольким зернам и затем взять среднее.

2. **Определение толщины шлифа по методу Шона** менее точному, чем первый, производится в том случае, если в шлифе нет кварца или его очень мало (нет подходящих разрезов).

Применение этого метода возможно лишь в том случае, если имеется микроскоп с градуированным микрометренным винтом.

Порядок работы

1. Приводим какой-нибудь известный минерал² с показателем преломления n_m (см. стр. 38—39) в пересечение нитей окулярного креста, вставляем объектив № 5 или № 7 (в случае применения иммерсии — иммерсионный объектив) и фокусируем микроскоп.

2. Вращением микрометренного винта поднимаем тубус микроскопа вверх, минерал начинает расплываться и в фокусе появляются пылинки на *верхней* стороне шлифа. Наведя их на резкость, берем отсчет a на барабане микрометренного винта.

3. Вновь наводим на фокус минерал.

4. Вращением микрометренного винта опускаем тубус микроскопа до появления в фокусе пылинок на *нижней* стороне шлифа. Наведя их на резкость, берем отсчет b на барабане микрометренного винта.

¹ Таблица Мишель-Леви построена следующим образом: по оси абсцисс отложены величины Γ (разности хода — интерференционные света) и через 20 μ проведены тонкие вертикальные линии. Каждые 300 μ выделены более толстыми линиями. Короткими жирными линиями разграничены порядки. По оси ординат отложены величины d (толщины кристаллической пластинки — шлифа) и через каждые 0,001 мм проведены тонкие горизонтальные линии. Каждые 0,1 мм выделены толстыми линиями. Из начала координат (точки пересечения линий лежатой оси Ng и Np . Для кварца $Ng - Np = 0,009$). Предположим, что разность хода $\Gamma = 220 \mu$, что соответствовало при наблюдении светлосерой интерференционной окраске. Находим точку пересечения вертикальной линии, соответствующей 220 μ , с радиальной линией 0,009 и через эту точку проводим горизонтальную линию до пересечения с осью ординат. Толщина шлифа, в нашем примере, равна 0,024 мм.

² Следует избегать минералов с непостоянным химическим составом, так как в них оптические свойства меняются в широких пределах.

5. Зная цену деления микрометрического винта, толщину шлифа вычисляем по формуле:

$$d = \frac{n_m}{n_c} (b - a)\alpha,$$

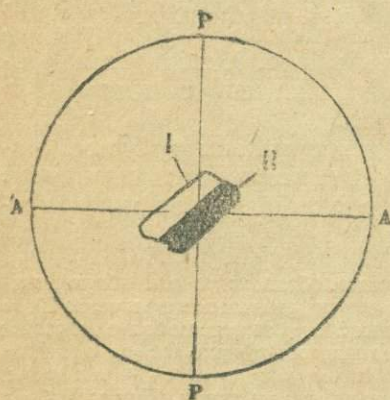
где n_m — показатель преломления минерала, в котором производились наблюдения, n_c — показатель преломления жидкости (глицерин или кедровое масло), в случае применения иммерсионного объектива, для воздуха $n_c = 1$, α — цена деления микрометрического винта микроскопа. Определение необходимо произвести несколько раз и взять среднее.

§ 15. Определение силы двойного лучепреломления

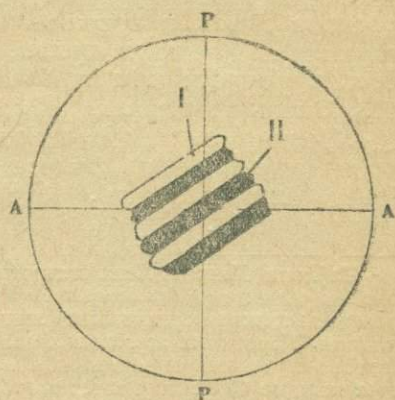
Зная разность хода для данного минерала и толщину шлифа, легко определить графически по таблице Мишель-Леви¹ или вычислить по формуле $Ng - Np = \frac{\Gamma}{d}$ силу двойного лучепреломления.

§ 16. Наблюдение двойников

Двойники бывают *простые* и *полисинтетические* и часто являются важным диагностическим признаком (плаггиоклазы, кордьерит, микроклин, рутил, тридимит). На фиг. 44 изображен простой двойник, а на фиг. 45 — полисинтетический. При поворо-



Фиг. 44.



Фиг. 45.

те столика микроскопа, одна половинка — в случае простого двойника, или системы полосок — в случае полисинтетического, угасает, в то время как другая просветляется. Последнее обстоятельство объясняется взаимно обратной ориентировкой эллипсо-

¹ Для чего нужно найти точку пересечения горизонтальной линии, соответствующей величине d , с вертикальной линией, соответствующей разности хода Γ , и определить, какая величина $Ng - Np$ соответствует радиальной линии, проходящей через эту точку.

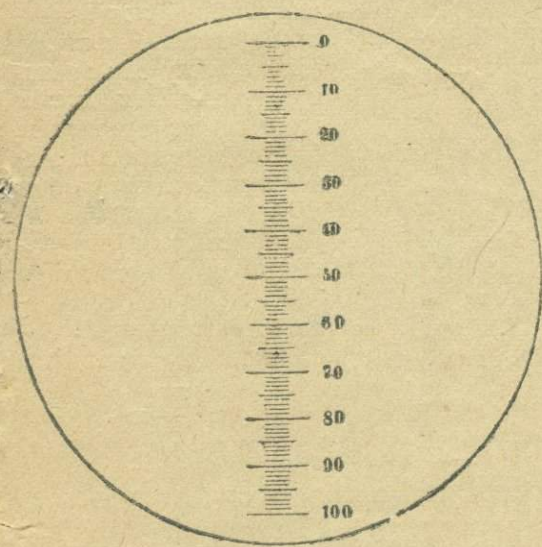
идов в половинках. Некоторые двойники обладают симметричным угасанием (плагноклазы). В двойниках различают следующие элементы: двойниковую ось, двойниковую плоскость и плоскость срastания, след которой в шлифе (граница раздела двух индивидов) называется двойниковым швом. Резкость двойникового шва указывает на угол наклона плоскости срastания к плоскости препарата.

В случае, если плоскость срastания перпендикулярна к плоскости препарата, двойниковый шов должен быть тонким и резким.

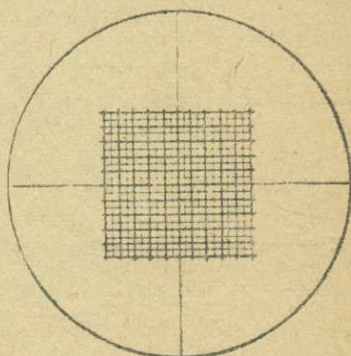
На наблюдении характера двойникового шва основан метод определения плагноклазов. По взаиморасположению двойниковых элементов, двойники разделяются на три типа: по закону грани, или нормальные, по закону оси, или параллельные, и сложные, или комплексные. Определение типа двойника и двойникового закона чаще всего производится на федоровском столике.

§ 17. Определение размеров зерен в шлифе

Определение размеров зерен производится различными приборами и с различной точностью, в зависимости от поставленных целей. В обычной микроскопической практике часто пользуются обыкновенным окуляр-микрометром (фиг. 46) и квадратноклетчатым окуляр-микрометром (фиг. 47). Последние прилагаются фирмой к микроскопу. Как тот, так и другой окуляр-микрометры представляют собой обычный окуляр с вложенной в него стеклянной пластинкой, на которой нанесена



Фиг. 46.



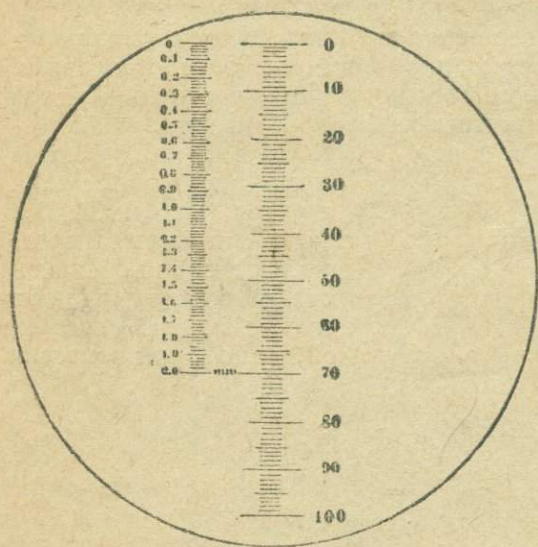
Фиг. 47.

шкала или сетка¹. Вставив окуляр-микрометр в микроскоп и сфокусировав с каким-нибудь объективом на исследуемый предмет, мы получим изображение этого предмета в фокальной плоскости

¹ В микроскопах фирмы E. Leitz Wetzlar окуляр-микрометр обозначен буквой M (№ 2).

объектива, покрываемой шкалой или сеткой окуляр-микрометра. Следовательно, окуляр-микрометром измеряется не сам предмет, а его изображение.

Не трудно сообразить, что для определения размеров зерен в миллиметрах необходимо знать цену деления шкалы или клетки окуляр-микрометра. Для этой цели пользуются так называемым объектным микрометром, представляющим собой стеклянную пластинку, на которой нанесены 2 мм, разделенные на 200 частей. Поместив объектный микрометр на столик микроскопа и сфокусировав на его деления микроскоп, при каком-нибудь объективе, мы в поле зрения увидим шкалу объектного микрометра, каждое деление которой равно 0,01 мм. Рассматривая шкалу в окуляр-микрометре, мы увидим, что она перекрывается шкалой или сеткой окуляр-микрометра. В положении, изображенном на фиг. 48, считаем, сколько делений шкалы объектного микрометра укладывается в n делениях шкалы или сетки окуляр-микрометра.



Фиг. 48.

$x = \frac{200}{70} = 2,86$. Зная цену деления объектного микрометра, равную 0,01 мм, находим цену деления шкалы окуляр-микрометра:

$$2,86 \cdot 0,01 = 0,0286 \text{ мм.}$$

При работе с микроскопом необходимо определить цену деления для объективов №№ 1, 2, 3, 5, 7 и составить табличку (имея в виду во всех случаях работу с окуляром № 2).

При определении размеров зерен, имеющих вытянутую форму, необходимо указывать два размера, т. е. длину и ширину, для зе-

Ни в коем случае не рекомендуется определять цену деления по тому, сколько делений шкалы объектного микрометра (1,5—2 деления) падает на одно деление шкалы, или на одну клетку окуляр-микрометра, так как в этом случае результат будет значительно менее точным. Пусть при объективе № 2 на 70 делений шкалы окуляр-микрометра падает 200 делений объектного микрометра¹. Составляем пропорцию:

$$\begin{array}{l} 70 — 200 \\ 1 — x \end{array}$$

¹ В виду технической трудности воспроизведения на рисунке мелких штрихов в шкале объектного микрометра показано 100 делений. Цифры указывают, что вся длина шкалы равна 2 мм.

рен, имеющих неправильную форму (например кварца), указывается средний размер в поперечнике. Не менее важно указывать наименьший и наибольший размеры зерен данного минерала в шлифе, а также указать средний его размер. Например, неправильные зерна кварца в шлифе имеют размеры от 0,001 до 0,75 мм. Это особенно важно при исследовании эффузивных пород, в которых кварц (или какой-нибудь другой минерал) может наблюдаться как во вкрапленниках, так и в основной массе. Практика определения размеров зерен посредством обыкновенного окуляр-микрометра заключается в следующем:

1) Располагаем исследуемое зерно в поле зрения так, чтобы с одним из его краев совпадало первое деление шкалы окуляр-микрометра, и считаем, сколько делений шкалы укладывается в среднем его поперечнике (если зерно неправильной формы). Пусть число делений будет 46. Допустим, что наблюдение производилось с объективом № 2.

2) Зная цену деления (ранее нами определенную) окуляр-микрометра — 0,029 мм, вычисляем истинный размер зерна в мм-

$$46 \cdot 0,029 = 1,314 \sim 1,3 \text{ мм.}$$

Методика работы по определению размеров зерен посредством квадратно-клетчатого окуляр-микрометра остается такой же. Преимущество заключается в том, что мы, не прибегая к вращению препарата для определения нескольких размеров зерна, что неизбежно при первом методе, получаем эти размеры при одном положении зерна в поле зрения. Это даст нам возможность точнее установить средний размер. Кроме того, мы получаем возможность сравнивать средний размер нескольких зерен различных минералов, изображения которых одновременно покрываются сеткой.

В ряде случаев для определения размеров зерен пользуются так называемыми салазками, изображенными на фиг. 49. Салазки служат для непосредственного измерения объективов, а не их изображений. Салазки прикрепляются к столику микроскопа специальными винтами. *a* и *b* — винты, перемещающие салазки в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Вращением столика микроскопа располагаем зерно так, чтобы измеряемая длина была строго параллельна направлению перемещения салазок. Совмещаем один край измеряемого зерна с одной из нитей окулярного креста и берем отсчет, затем перемещаем шлиф (параллельно измеряемой длине!) до момента совмещения другого края зерна с той же нитью и берем другой отсчет. Разность отсчетов по нониусам дает искомую длину зерна. Точность салазок различных типов составляет 0,0025—0,10 мм.

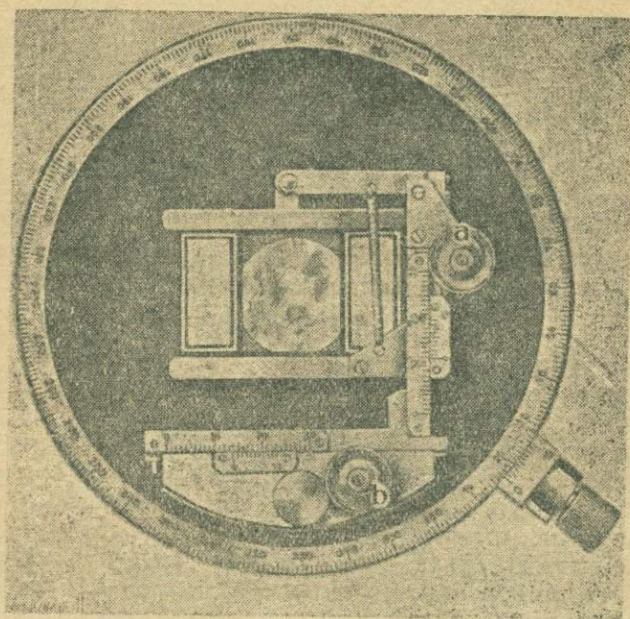
Салазками часто пользуются для общего просмотра шлифа, перемещая последний в нужном нам направлении.

§ 18. Измерение под микроскопом площадей и определение количеств минералов в шлифе

Измерение площадей производится с целью определения количеств различных минералов в шлифе. В практике работы поль-

зуются двумя методами: 1) планиметрическим, или непосредственным, и 2) линейным.

При обоих методах принимается допущение: $V_1:V_2:V_3 = n_1S:n_2S:n_3S$ (положение Делесса), где V_1, V_2, V_3 — объемы зерен минералов в породе, n_1, n_2, n_3 , — число ячеек квадратно-клетчатого



Фиг. 49.

окуляр-микрометра, приходящихся на долю каждого минерала S — площадь одной квадратной ячейки микрометра, абсолютная величина которой в дальнейшем элиминируется и не будет иметь значения.

1. Планиметрический метод

Предположим, что шлиф содержит три различных минерала. На основании принятого допущения, принимаем, что величины:

$\frac{n_1 \cdot 100}{\Sigma n}$, $\frac{n_2 \cdot 100}{\Sigma n}$, $\frac{n_3 \cdot 100}{\Sigma n}$ выражают собой процентное содержание

соответствующих минералов в агрегате, Σn — число клеток, покрывающих поле зрения, обычно равное $20 \cdot 20 = 400$.

Порядок работы

1. Вращаем столик микроскопа до момента совмещения сторон шлифа (шлиф укреплен в салазках), соответственно с вертикальной и горизонтальной нитью окулярного креста.

2. Перемещаем шлиф так, чтобы в поле зрения находилась крайняя угловая часть шлифа (например левая верхняя).

3. Считаем число клеток, покрывающих каждый из минералов. Неполные клетки прикидываем на-глаз. Пусть, например, на данный первый минерал падает 84 клетки

$$\frac{84 \cdot 100}{400} = 21\%$$

на долю второго — 300 клеток

$$\frac{300 \cdot 100}{400} = 75\%$$

на долю третьего — 18 клеток

$$\frac{18 \cdot 100}{400} = 4,5\%$$

$$\hline 100,5\%$$

4. Заметив какую-либо характерную точку на правой крайней вертикальной линии сетки, перемещаем шлиф (параллельно горизонтальной нити окулярного креста) вправо до момента, пока замеченная точка не попадет на левую крайнюю вертикальную линию сетки. Вновь производим аналогичный подсчет. Подсчитав таким образом верхнюю полосу шлифа, перемещаем его параллельно вертикальной нити вверх (снова заметив какую-нибудь точку на нижней крайней горизонтальной линии сетки) и затем вновь, перемещая шлиф параллельно горизонтальной нити справа налево, подсчитываем вторую горизонтальную полосу.

На фиг. 50 изображена схема подсчета и перемещения шлифа. Цифрами указаны квадраты, в которых производились подсчеты.

Получив проценты для каждого из трех минералов в различных квадратах, находим средний процент для каждого из трех минералов. Так, например, для первого минерала¹:

1-й квадрат 84 клетки $\frac{84 \cdot 100}{400} = 21,0\%$

2 " 81 " 20,0%

3 " 66 " 16,5%

4 " 74 " 18,5%

5 " 88 " 22,0%

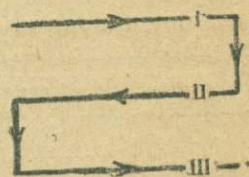
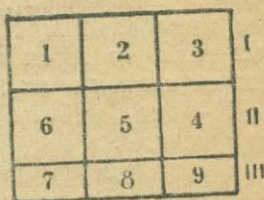
6 " 92,5 " 23,0%

7 " 42 " $\frac{42 \cdot 100}{200} = 21,0\%$

8 " 36 " 18,0%

9 " 44 " 22,0%

Среднее $\frac{182}{9} \sim 20\%$.



Фиг. 50.

(неполные квадр.)

При внимательной работе с объективами № 1 и № 2 точность подсчетов составляет 1—1,5%.

¹ Примеры заимствованы из руководства В. Н. Лодочникова «Основы микроскопических методов исследования кристаллического вещества».

При применении более сильных объективов точность подсчетов будет больше.

В. Н. Лодочников рекомендует производить подсчет не сразу на всей площади покрываемой сеткой окуляр-микрометра, а в каждом его квадрате отдельно (сетка окуляр-микрометра разделена на 4 квадрата), причем при таком подсчете не следует принимать во внимание части минералов, лежащие в соседнем квадрате.

В практике работы, обычно, приходится производить подсчеты в 30—50 квадратах, что, естественно, сопряжено с большой затратой энергии и времени.

При применении квадратно-клетчатого окуляр-микрометра подсчеты следует производить для минералов сравнительно крупных, хорошо выраженных и находящихся в шлифе в небольшом количестве. В этом случае с успехом можно пользоваться сравнительно малыми увеличениями и не затрачивать на подсчеты слишком много времени.

2. Линейный метод

На основании допущения

$$P_1 : P_2 : P_3 \dots P_n = l_1 : l_2 : l_3 \dots l_n,$$

где $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ — площади, покрываемые каждым минералом в шлифе, а $l_1, l_2, l_3 \dots l_n$ — отрезки линий, пересекающих эти минералы. Практика работы заключается в определении линейных размеров зерен в данном сечении, выраженных определенным числом клеток и их последующим суммированием.

Порядок работы в основном остается таким же, как и в первом методе.

Проводим измерительные линии, отстоящие друг от друга на такое число клеток, которое равно среднему поперечнику измеряемых зерен¹.

Пусть в нашем примере² измерительные линии проведены на расстоянии пяти клеток друг от друга (средний поперечник зерен не больше 6—7 делен.). Считаем число клеток (по длине), падающих на каждый из минералов. Измерения для одного из минералов дают следующие результаты:

| | | | |
|-----------|----------------------------|-----------|---------|
| 1-я линия | $6 + 6,5 + 3,25$ | $= 15,75$ | делений |
| 2-я „ | $3,25 + 4,5$ | $= 7,75$ | „ |
| 3-я „ | $6,75 + 6,25 + 6,25$ | $= 19,25$ | „ |
| 4-я „ | $5,5$ | $= 5,50$ | „ |
| 5-я „ | $5 + 7,25$ | $= 12,25$ | „ |
| 6-я „ | $3,25 + 5,75 + 4,25$ | $= 13,25$ | „ |
| 7-я „ | $1,5 + 6 + 6 + 2,5 + 2,25$ | $= 18,25$ | „ |
| 8-я „ | $6,5$ | $= 6,50$ | „ |
| 9-я „ | $6 + 5,75 + 5,25 + 6,5$ | $= 23,50$ | „ |

Всего на 9 линий 122 деления

¹ Вообще же, чем неравномернее зерна и чем неравномернее они распределены в шлифе, тем большее количество линий необходимо провести для получения возможно большей точности.

² Примеры заимствованы из того же руководства В. Н. Лодочникова.

Длина каждой линии равна 60 делениям.

Общая сумма всех линий $60 \cdot 10 = 600$ делений.

Площадь, занимаемая данным минералом в шлифе, $\frac{122 \cdot 100}{600} = 20,3\%$. Точность этого метода также составляет $1,0-1,5\%$.

Нередко практикуется определение количества минералов в шлифе в процентах на-глаз. Принимая площадь поля зрения за 100% , прикидываем, какой процент площади занимает данный минерал. Повторяем эту операцию в возможно большем числе участков шлифа и находим средний процент (удобно воспользоваться схемой досчета, изображенной на фиг. 50). Следует заметить, что для определения процентного содержания минералов в шлифе на-глаз требуется значительный опыт, и на первых порах неизбежны ошибки. В последнее время в практику вошли специальные приборы — пушинтеграторы, значительно сокращающие время, затрачиваемое на подсчет.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ (ХОНОСКОПИЯ)

Кроме изучения кристаллов в параллельном свете, существует метод исследования их в сходящемся свете, основанный на прохождении через кристалл сходящегося, в виде конуса, пучка плоско поляризованных лучей и получения так называемых интерференционных фигур в данном сечении кристалла, позволяющих судить о его оптических свойствах.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ

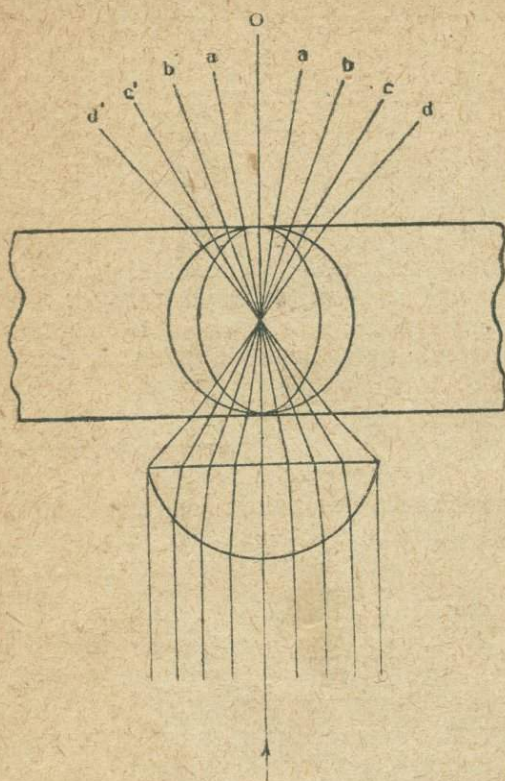
§ 19. Исследование кристаллов в разрезах, перпендикулярных оптической оси

Представим себе пластинку некоторого одноосного (например положительного) минерала, вырезанную перпендикулярно оптической оси OO , и пропустим через нее пучок плоско поляризованных лучей $a, b, c, d, a', b', c', d'$, полученных посредством плоско выпуклой линзы, помещенной между поляризатором и препаратом. Из фиг. 51 видно, что все лучи, идущие по направлению оптической оси, обладают нулевой разностью хода; поэтому в центре поля зрения в скрещенных николях должно получиться черное пятно. Все лучи, образующие одинаковые углы наклона к оптической оси, обладают некоторой одинаковой разностью хода, которая увеличивается по мере увеличения угла наклона их к оптической оси по следующим причинам:

- 1) увеличивается разность между N_g и N_p ;
- 2) увеличивается путь, проходимый лучом через кристалл.

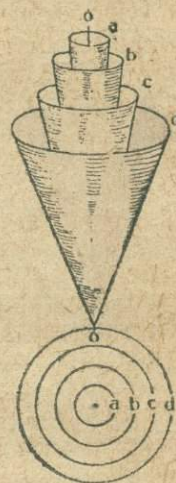
Конические поверхности, образующими которых являются лучи равно наклоненные к оптической оси, т. е. обладающие одинаковой разностью хода, называются поверхностями равного хода и имеют вид, изображенный на фиг. 52. Проекция бесчисленного множества таких конусов, имеющих общую вершину, на плоскость, перпендикулярную оптической оси (на поле зрения), изобразится бесчисленным множеством концентрических окружностей; во

всех точках которых совершают колебание два луча — обыкновенный и необыкновенный. Из теории известно, что необыкновенный луч совершает колебания в плоскости, проходящей через луч и оптическую ось, т. е. в плоскости главного сечения; обыкновенный же луч колеблется в плоскости, проходящей через луч и ось, лежащую в плоскости кру-



Фиг. 51.

т. е. в плоскости, перпендикулярной главному сечению. Взяв некоторую точку *a* в поле зрения (Фиг. 53), мы без труда можем найти направления колебаний двух лучей. Так как препарат вырезан перпендикулярно оптической оси и последняя выходит в центре поля зрения, то линия, соединяющая выход оптической оси *O* с точкой *a*, и будет проекцией плоскости, проходящей через оптическую ось и луч, т. е. направлением колебаний необыкновенного луча. Плоскость, проведенная через точку *a* перпендикулярно данной, есть направление колебаний обыкновенного луча.

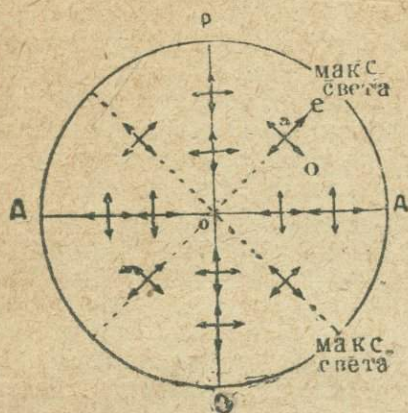


Фиг. 52.

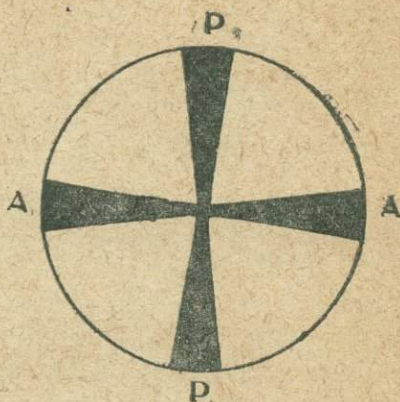
Из предыдущего следует, что в точке *a* поля зрения будет наблюдаться максимум освещения. Во всех же точках, не лежащих на диагоналях и приближающихся к плоскостям колебаний николей *PP* и *AA*, будет наблюдаться ослабление света и, наконец, во всех точках, лежащих в плоскостях колебаний николей, будет наблюдаться максимум темноты (направления колебаний лучей совпадают с направлениями колебаний николей).

Таким образом, в разрезах одноосных кристаллов, перпендикулярных оптической оси, будет наблюдаться интерференционная фи-

гура, имеющая вид **черного креста**, совпадающего с направлением колебаний николей (фиг. 54). При вращении препарата крест не должен смещаться, так как оптическая ось кристалла совмещена

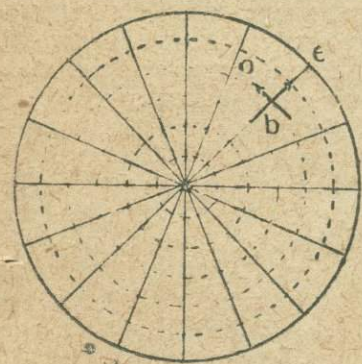


Фиг. 53.



Фиг. 54.

с оптической осью микроскопа. Направление колебаний лучей может быть найдено графически при помощи построения так называемых скиодром. Последние представляют собой стереографическую проекцию меридиональных и широтных кругов сферы на экваториальную плоскость, являющуюся не чем иным, как плоскостью кругового сечения оптической идиатрисы. В точке пересечения радиуса сферы с ее поверхностью получим две взаимно перпендикулярных окружности, касательные к которым и будут направлениями колебаний лучей. На фиг. 55 изображена скиодрома одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном оптической оси. Стереографическая проекция меридиональных плоскостей, изображающихся в виде радиусов, есть направления колебаний необыкновенных лучей. Линии, касательные к одной из концентрических окружностей в любой ее точке, показывают направление колебаний луча обыкновенного. Из чертежа видно, что широтные круги пересекаются с радиусом под углом 90° . Строя скиодромы в проекции на поле зрения, мы в любой его точке найдем



Фиг. 55.

направления колебаний лучей. Из изложенного следует, что проекция поверхностей равного хода a, b, c, d , в поле зрения изображается системой концентрических колец. При исследовании препарата в скрещенных николях, в монохроматическом свете,

будет наблюдаться погасание лучей в тех точках, в которых разность хода равна: λ , 2λ , 3λ ... $2n\lambda$, и усиление света там, где разность хода равна:

$$\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda \dots (2n-1)\frac{\lambda}{2}$$

Вследствие этого получается система черных и светлых, чередующихся между собой, колец (фиг. 56). При исследовании препарата в белом свете, которым обычно пользуются в практике работы, кольца будут обладать интерференционными окрасками, сменяющимися, подобно смене их в кварцевом клине, при чем по мере удаления от центра интерференционные цвета увеличиваются. Таким образом, в поле зрения будет располагаться система одинаково окрашенных или, как говорят, *изохроматических колец*. В пространственном представлении поверхности, обладающие одинаковой интерференционной окраской (одинаковой разностью хода), называются *изохроматическими поверхностями*.



Фиг. 56.

Согласно формуле

$$\Gamma = d(Ng - Np),$$

появление интерференционных колец зависит от: 1) величины

двупреломления и 2) толщины пластинки.

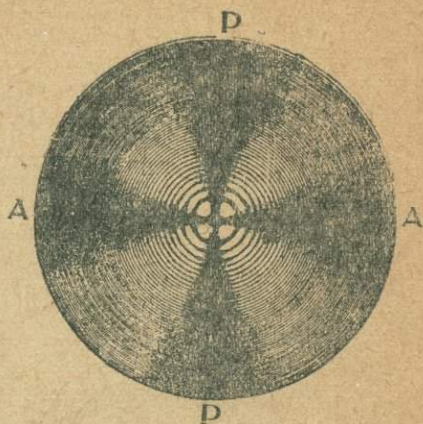
Следовательно, если две эти величины будут небольшими, то и *изохроматические кольца* наблюдаться не будут.

В практике работы при исследовании тонких шлифов минералов ($d=0,025-0,030$ мм), большинство которых имеет относительно небольшое двупреломление, *изохроматические кольца* почти или совсем не наблюдаются и поле зрения становится белым или бледно-серым. Лишь при исследовании тонких шлифов таких минералов, как кальцит, двупреломление которого равно $0,172$, наблюдаются *изохроматические кольца*. Для того чтобы получить их в разрезах минералов (например кварца), обладающих небольшим двупреломлением необходимо изготовить специальный толстый препарат. Ширина интерференционных колец зависит от величины разности хода двух лучей в кристалле и потому при одинаковых толщинах в двух различных веществах, обладающих различным двупреломлением, будет различна. Кольца, наблюдаемые при исследовании вещества, обладающего небольшим двупреломлением, будут шире, чем кольца, наблюдаемые при исследовании сильно двупреломляющего вещества; в последнем случае число их, укладываемое в поле зрения, будет значительно большим. По мере удаления к периферии, расстояние между кольцами становится все меньше, и наконец, кольца сливаются (фиг. 57). При

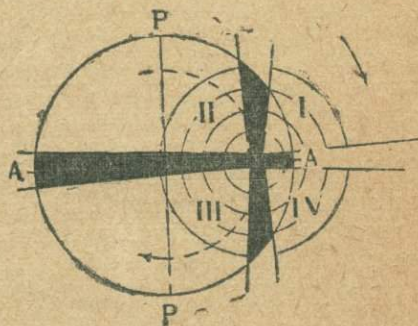
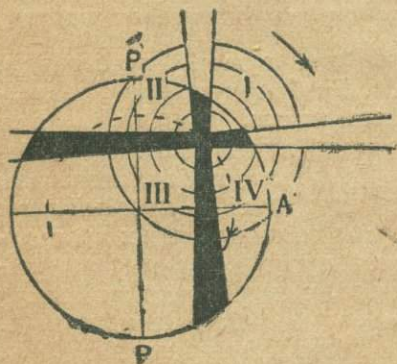
исследовании толстого препарата, вырезанного из того же вещества, расстояние между кольцами будет еще меньше. Таким образом, расстояние между интерференционными кольцами тем больше, чем тоньше исследуемая пластинка, и тем меньше, чем пластинка эта толще.

§ 20. Исследование кристаллов в разрезах, наклонных к оптической оси

В разрезах одноосных кристаллов, вырезанных под углом к оптической оси, последняя будет располагаться не в центре поля зрения, а на некотором расстоянии от него, зависящем от величины угла, под которым вырезана эта пластинка. При вращении препарата оптическая ось опишет некоторую коническую поверхность с радиусом основания r , следовательно, центр черного креста будет расположен на периферии от центра поля зрения, а при больших углах наклона плоскости препарата к оптической оси — вне его. На фиг. 58, 59 изображены различные случаи положения креста, в зависимости от различного угла наклона плоскости препарата к оптической оси, и его движение при вращении

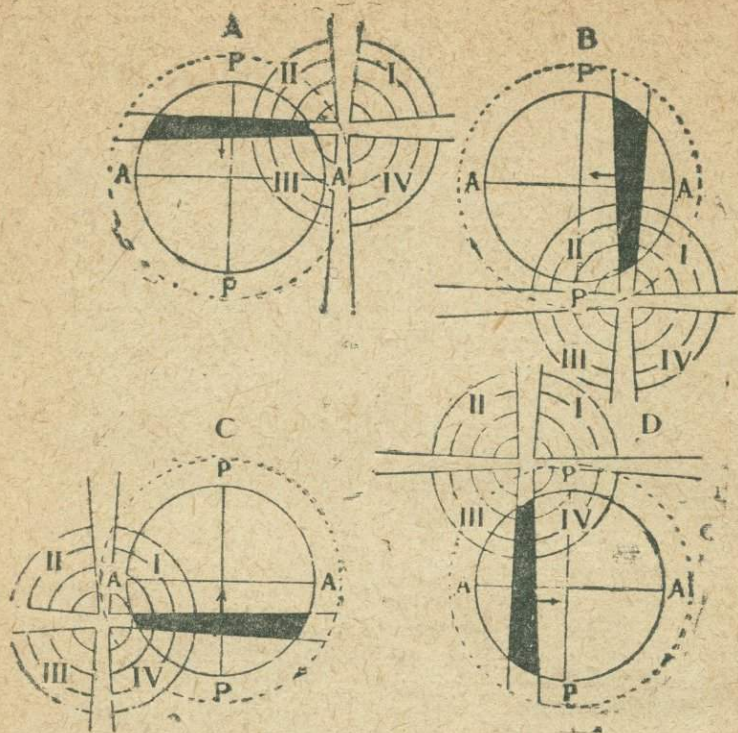


Фиг. 57.



Фиг. 58.

последнего. Стрелками показано направление вращения и движение балок креста. Римскими цифрами (I, II, III, IV) обозначены квадранты. Следя за движением балок, легко установить, который из четырех квадрантов, расположен в поле зрения. В том случае, когда в поле зрения движется одна балка (фиг. 59), начинающие нередко затрудняются в определении квадранта, а это особенно важно для определения оптического характера минерала.

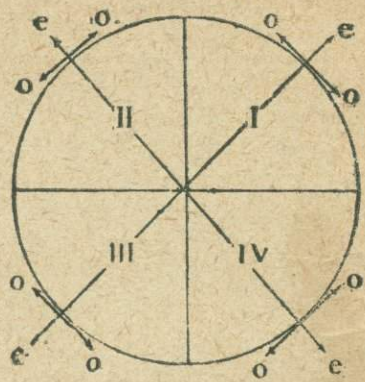


Фиг. 59.

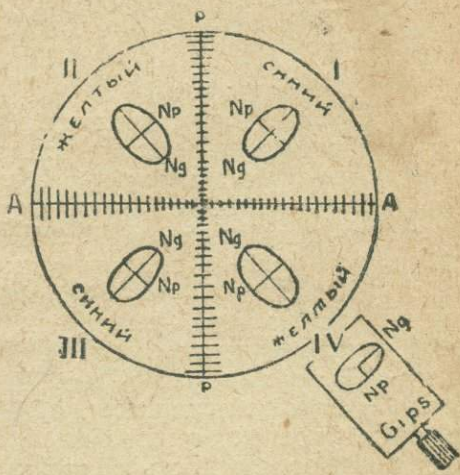
§ 21. Определение оптического характера (знака) минерала

При определении знака минерала пользуются известными нам гипсовой и слюдяной пластинками. Разберем явления, происходящие при применении *гипсовой пластинки*. Определив при помощи скиодром направления колебаний лучей (фиг. 55) в разрезе минерала, перпендикулярном оптической оси, вдвигаем гипсовую пластинку. *Черный крест окрасится в красный цвет (цвет гипсовой пластинки!)*. В оптически *положительных* кристаллах с направлением оси *Np* гипсовой пластинки совпадает направление колебаний луча необыкновенного, с направлением оси *Ng* пластинки совпадает направление колебаний обыкновенного луча. Из теории известно, что в оптически *положительных* кристаллах ($n_o < n_e$) необыкновенный луч, обладающий меньшей скоростью по сравнению с обыкновенным, совершает колебания в направлении оси *Ng*, а обыкновенный луч, обладающий большей скоростью, колеблется в направлении оси *Np*. Из фиг. 60 следует, что в этом случае с осью *Np* гипсовой пластинки в квадрантах *II, IV* совпадает ось *Ng* кристалла, а с осью *Ng* пластинки совпадает ось *Np* кристалла. В этом случае произойдет *уменьшение* разности хода, т. е. *понижение* интерференционной окраски (появляется желтая окраска). В квадрантах *I, III* одноименные оси в пластинке и в кристалле совпадают, поэтому происходит *увеличение*

разности хода, выражающееся в *повышении* интерференционной окраски (появляется синяя окраска). В оптически *отрицательных* кристаллах происходит обратное явление и в квадрантах II и IV наблюдается повышение интерференционной окраски, а в квадрантах I, III — *понижение*. При вдвижении в поле зрения слюдяной пластинки черный крест окрасится в светлосерый цвет, а смещение интерференционных колец (если таковые наблюдаются) и появление двух черных пятен, располагающихся перпендикулярно направлению движения пластинки, указывает на *отрицательный* оптический характер минерала (фиг. 61).



Расположение двух черных пятен по направлению движения пластинки указывает на *положительный* его характер (фиг. 62). Пунктиром изображено положение интерференционного кольца до введения слюдяной пластинки. Сущность изложенных явлений легко уяснить из предыдущего. В разрезах, параллельных оптической оси и, как известно, характеризующихся наивысшей интерференционной окраской, интерференционной фигуры наблюдаться не будет. Определить же при помощи гипсовой пластинки знак минерала можно, для чего следует поставить минерал так, чтобы оптическая ось совпадала с направлением движения гипсовой пластинки. Наблюдая изменение интерференционной окраски, как и в предыдущем случае, определяем оптический характер.

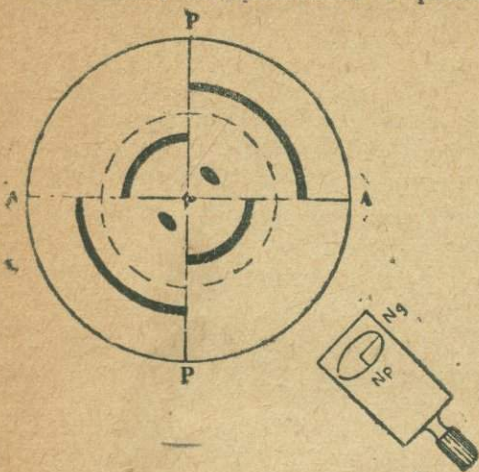


Фиг. 60.

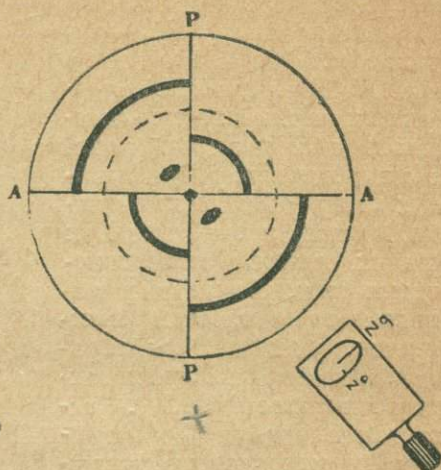
§ 22. Вращение плоскости поляризации

Кристаллы некоторых веществ, независимо являются ли они двупреломляющими или нет, обладают способностью *вращать плоскость поляризации* на некоторый угол. Этой же способностью обладают некоторые жидкости (например нефть, сахарный сироп и т. д.). Сущность этого явления заключается в том, что свет,

вступающий в кристалл и совершающий свои колебания в определенной плоскости, разлагается внутри его на два круговых колебания, совершаемых с различной скоростью по кругу во

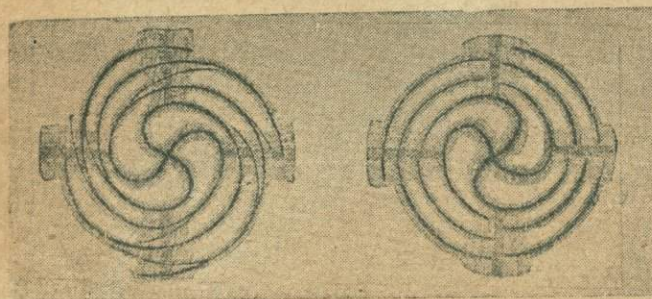


Фиг. 61.



Фиг. 62.

взаимно обратных направлениях. Эти два круговых колебания, выходящие из кристалла с некоторою разностью фаз, складываются в одно прямолинейное колебание, повернутое относительно направления первоначального на некоторый угол, зависящий от разности хода этих лучей. Продолжительность каждого из колебаний зависит от степени преломляемости того или иного луча света. Угол поворота, наименьший для красного цвета, увеличивается по мере приближения к фиолетовой части спектра. Способностью вращать плоскость поляризации обычно обладают вещества энантиоморфные. Так, например, правый кварц, в котором большая скоростью обладают колебания, происходящие вправо, вращает вправо же плоскость поляризации. Левый кварц вращает плоскость поляризации влево. Кристаллическая пластинка, вырезанная как перпендикулярно оптической оси, так и под углом к ней, обнаруживает в отношении вращения плоскости поляризации одни и те же явления. Лишь при определенном угле наклона



Фиг. 63.

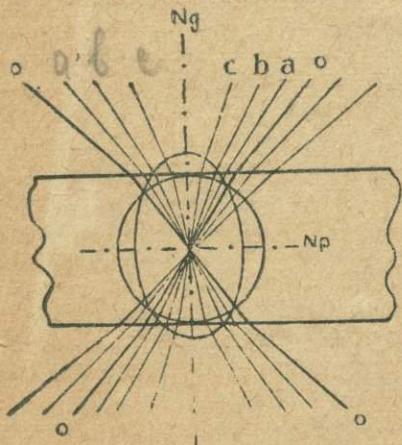
лучей к оптической оси прямолинейно поляризованный свет, вступающий в кристалл, распадается на два прямолинейно же поляризованные и взаимно перпендикулярные колебания; кристалл терять

способность вращать плоскость поляризации. Две пластинки, вырезанные из право и лево вращающего кристалла, наложенные одна на другую, дают фигуры, изображенные на фиг. 63. Аналогично ведут себя двойники кварца по бразильскому закону. Эти фигуры получили название *спиралей Эри* (Airy). По направлению закрученности спиралей можно судить о направлении вращения плоскости поляризации, т. е. в какую разность кварца (право или лево вращающую) вступают раньше световые лучи. В оптически двуосных кристаллах не наблюдается вращения плоскости поляризации, так как в них нет направления, в котором бы не наблюдалось двойного лучепреломления.

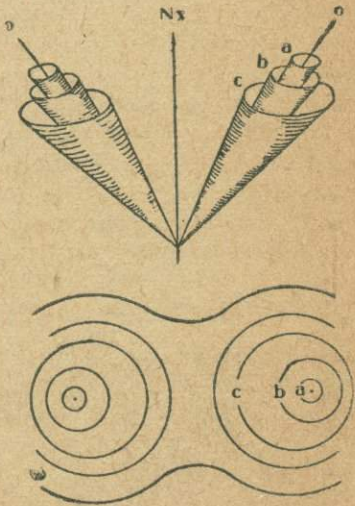
II. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ

§ 23. Исследование кристаллов в разрезах, перпендикулярных острой биссектрисе

Представим себе пластинку двуосного, например, положительного кристалла, вырезанную перпендикулярно острой биссектрисе, и пропустим через нее пучок плоско поляризованных лучей как это изображено на фиг. 64. Конические поверхности равного хода будут иметь вид, изображенный на фиг. 65. В проекции на поле зрения мы получим две системы замкнутых кривых, которые по мере увеличения будут сближаться и, наконец, сливаются, вследствие чего получатся фигуры, носящие название *лемнискат*. Условия их наблюдения как в монохроматическом, так и в белом



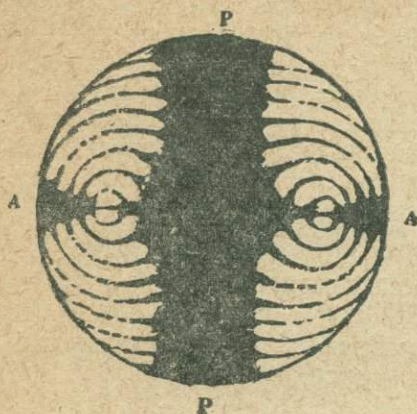
Фиг. 64.



Фиг. 65.

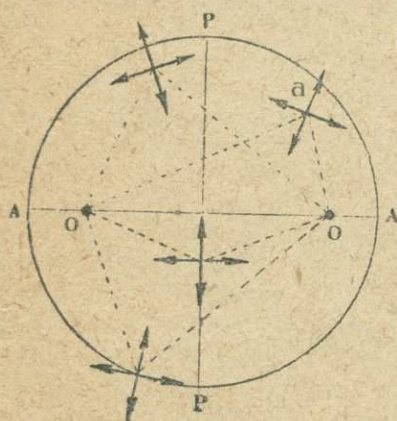
свете и все прочие явления остаются такими же, как и в отношении одноосных кристаллов. При увеличении толщины пластинки лемнискаты становятся уже, и число их возрастает.

В положении, когда плоскость оптических осей совмещена с плоскостью колебаний анализатора, интерференционная фигура имеет вид черного креста, изображенного на фиг. 66. Зная положение



Фиг. 66.

т. е. когда направления колебаний лучей будут образовывать с ними угол 45° , получится интерференционная фигура, изображенная на фиг. 68. Как в местах выхода оптических осей, так и во всех точках, в которых колебания лучей параллельны сечениям николей, будут наблюдаться темные пятна, которые образуют две кривые или, как говорят *изогирь*, представляющие собой не



Фиг. 67.

что иное, как гиперболы, асимптотами которых будут направления колебаний николей. Сказанное легко уяснить из фиг. 69. Из чертежа следует, что плоскость колебания луча в точке t параллельна главному сечению PP . Из предыдущего следует, что направление ts делит пополам угол, образованный проекциями плоскостей, проходящих через данную точку и оптические оси. Следовательно, $\triangle mg$ — равнобедренный треугольник и $\angle mgA + \angle m/A = 180^\circ$. Обозначая координаты точки t через x и y , а координаты точки N — через x_0 и y_0 и принимая сечение николей за координатные оси из треугольников trN и mNs , где r — точка пересечения перпендикуляра, восстановленного из N к линии ts (на чертеже не показано), находим:

$$\operatorname{tg} mgA = -\frac{y-y_0}{x_0-x};$$

$$\operatorname{tg} m/A = \frac{x+x_0}{y+y_0}.$$

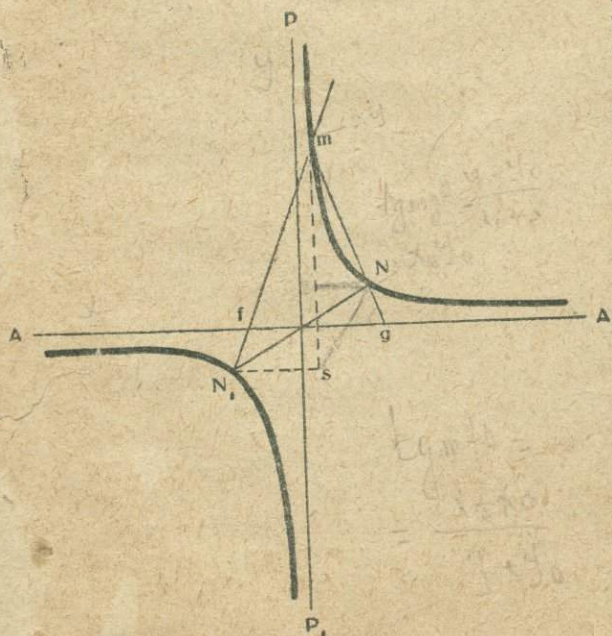
Так как $\text{tg } m \angle A = -\text{tg } m \angle A$, следует, что

$$\frac{y-y_0}{x_0-x} = \frac{y+y_0}{x+x_0}, \text{ откуда } xy = x_0 y_0.$$

Последнее уравнение, как известно, есть уравнение гиперболы, отнесенной к ее асимптотам. Следовательно, как точка m , так и все прочие точки, удовлетворяющие этому уравнению, располагаются на гиперболе, асимптотами которой являются сечения никелей. Не трудно сообразить, что чем меньше угол оптических осей, тем круче будут гиперболы (изогиры), и, наоборот, чем больше значение $2V$, тем более пологими они делаются. При $2V = 0$ интерференционная фигура имеет вид черного креста, т. е. минерал превращается в одноосный. Как и в одноосном минерале, направление колебаний лучей может быть найдено при помощи построения скиодром. Последние представляют собой стереографическую проекцию точек пересечения



Фиг. 68.

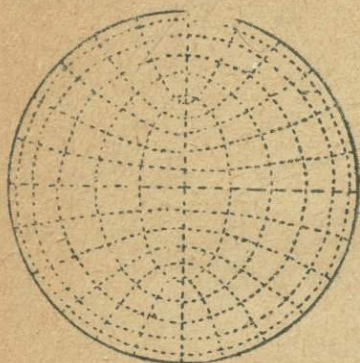


Фиг. 69.

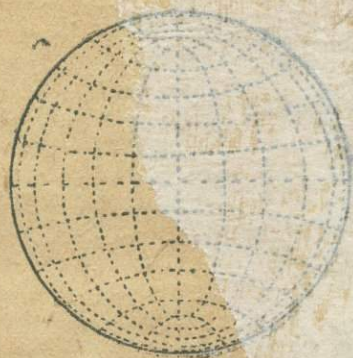
точек пересечения нормальми волн на одно из главных сечений оптической индикатрисы. На фиг. 70, 71 изображены скиодромы в проекции на плоскость, перпендикулярную острой и тупой биссектрисам. На фиг. 72 изображена проекция скиодром на плоскость, перпендикулярную оптической нормали. Зная угол $2V$ и воспользовавшись стереографической сеткой Вульфа или Федорова, легко можно построить скиодромы и тем определить направление колебаний лучей в любой точке.

§ 24. Исследование кристаллов в разрезах, перпендикулярных оптической оси

Рассмотрим явления, происходящие в том случае, если пластинка вырезана перпендикулярно оптической оси. Из фиг. 73 следует, что в этом случае в центре поля зрения будет наблюдаться выход одной оптической оси и, соответственно с этим

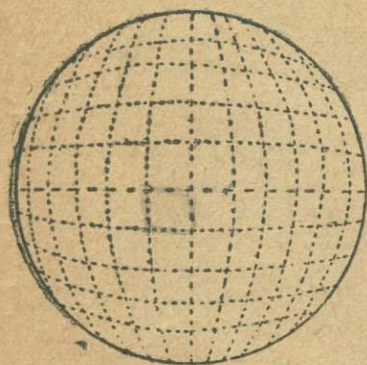


Фиг. 70.

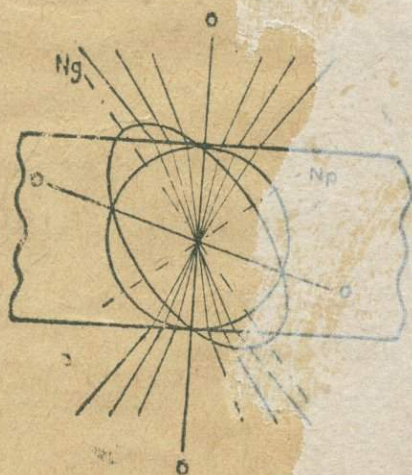


Фиг. 71.

одна система интерференционных кривых. В центре поля зрения мы увидим *одну гиперболу*, вращающуюся вокруг оптической оси



Фиг. 72.



Фиг. 73.

и при вращении меняющую свою форму. В момент, когда плоскость оптических осей параллельна сечению одного из николей, гипербола превращается в прямую балку. Наибольшей кривизны она достигает в момент, когда плоскость оптических осей располагается диагонально по отношению к сечениям николей (фиг. 74). Разрезы, направленные косо к оптической оси или биссектрисе,

характеризоваться наличием одной или двух, несимметрично расположенных относительно центра, изогир, движущихся в диагональном направлении относительно сечений николей.

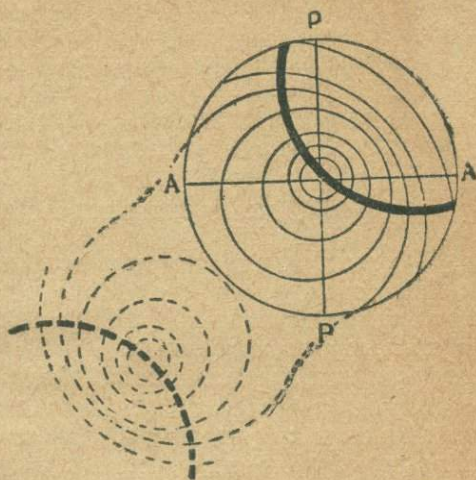
Определение оптического характера минерала

При определении оптического характера двусносного минерала пользуются так называемыми гипсовой или слюдяной пластинками. Из фиг. 75 следует, что в случае оптически *положительного* минерала в положении, когда проекция плоскости оптических осей совпадает с направлением движения гипсовой пластинки (с направлением оси Np) на *выпуклой* стороне изогир (или одной изогире, если разрез сделан перпендикулярно оптической оси), появляется *синяя* окраска (повышается интерференционная окраска относительно цвета гипсовой пластинки), на *вогнутой* же стороне *желтая*.

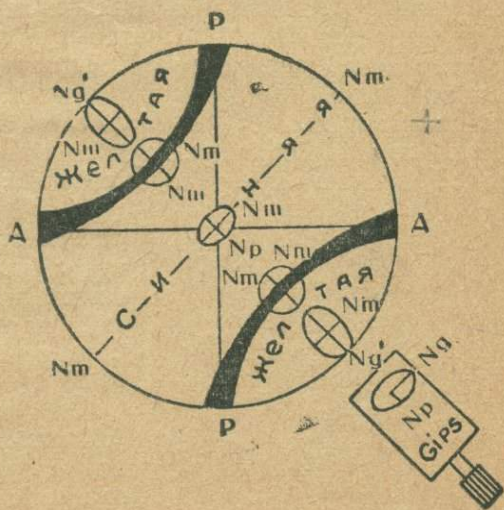
В случае оптически *отрицательного* минерала происходит обратное явление, т. е. на *выпуклой* стороне изогир появляется *желтая* окраска, а на *вогнутой* — *синяя*.

Необходимо заметить, что, определяя знак минерала при наличии интерференционных колец, следует быть осторожным, так как яркая окраска этих колец затрудняет наблюдения и нередко сбивает с толку начинающего. В этом случае появление синей и желтой окраски можно наблюдать в той части поля зрения, в которой кольца имеют наиболее низкую интерференционную окраску (в месте выхода оптической оси), т. е. около самого центра креста или гиперболы.

В разрезе параллельных плоскости оптических осей, так



Фиг. 74.

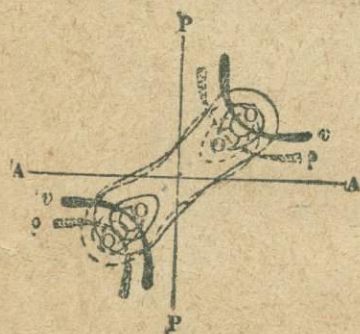


Фиг. 75.

как и в случае одноосного минерала, можно определить характер, для чего нужно данный разрез от полного угасания повернуть на 45° . Направление, в котором наблюдается понижение интерференционной окраски, является направлением острой биссектрисы. Поворачиваем препарат так, чтобы направление острой биссектрисы было параллельно направлению движения гипсовой пластинки, и вставляем последнюю. Понижение интерференционной окраски указывает на отрицательный характер минерала, повышение — на отрицательный.

§ 26. Дисперсия оптических осей и биссектрис

В некоторых минералах ромбической системы, характеризующейся совпадением осей оптической индикатрисы с главными кристаллографическими направлениями, угол оптических осей для различных цветов различен. Это явление получило название *дисперсии оптических осей*. Обозначив угол оптических осей для синего цвета через v , а для красного через ρ , получим два рода дисперсии: $\rho > v$ и $\rho < v$. Характер дисперсии определяется в сходящемся свете в разрезах, перпендикулярных оптической оси или острой биссектрисе. В случае дисперсии $\rho > v$ на вогнутой стороне изогри наблюдается красноватая или желтоватая окраска (погашены синие лучи), а на выпуклой — синеватая окраска (погашены красные лучи). В случае же дисперсии $\rho < v$ наблюдается обратное явление, т. е. на вогнутой стороне гиперболы появляется синеватая окраска, а на выпуклой красноватая или желтоватая. В некоторых минералах моноклиной системы, характеризующейся совпадением только одной оси оптической индикатрисы с каким-нибудь кристаллографическим направлением (все остальные оси занимают положение, зависящее от окраски лучей), наблюдается так называемая *дисперсия биссектрис*. Различают три рода дисперсии:



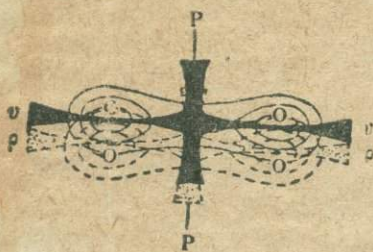
Фиг. 76.

1. *Наклонная дисперсия (dispersion inclinée)* — в случае совпадения с осью $Y(b)$ кристалла оси N_1 оптической индикатрисы (оптической нормали); плоскость оптических осей совпадает с плоскостью (010) кристалла (фиг. 76).

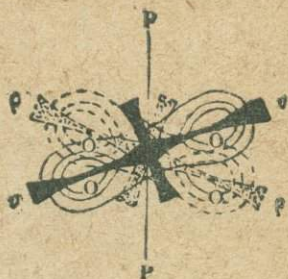
2. *Горизонтальная дисперсия (dispersion horizontale)* — в случае совпадения с осью $Y(b)$ кристалла тупой биссектрисы; плоскость оптических осей перпендикулярна плоскости (010) кристалла (фиг. 77).

3. *Перекрытая дисперсия (dispersion croisée enroulante)* — в случае совпадения с осью $Y(b)$ кристалла острой биссектрисы; плоскость оптических осей также перпендикулярна плоскости (010) кристалла (фиг. 78). Некоторые минералы (например адидот) при вращении столба ...

угасают. Это обстоятельство указывает на явление дисперсии биссектрис. Очевидно, для кристаллов ромбической системы дисперсия биссектрис наблюдаться не может.



Фиг. 77.



Фиг. 78.

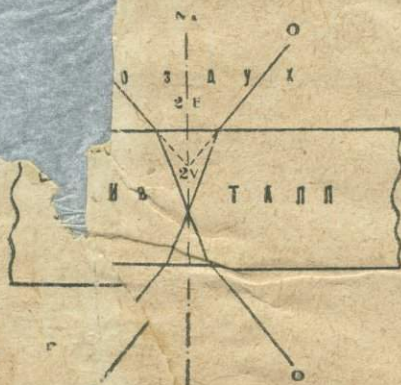
27. Действительный и кажущийся угол оптических осей

Угол оптических осей является *const* для данного минерала. Следует различать *действительный* угол оптических осей $2V$ и *кажущийся* $2E$. Из фиг. 79 видно, что представляет каждый из этих углов. Отношение между величинами $2V$ и $2E$ выражается формулой:

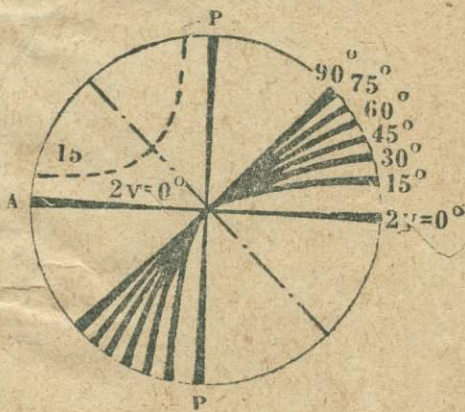
$$\sin V = \frac{\sin E}{\beta}$$

где β — действительный показатель преломления минерала. Угол $2V$ из настоящего время почти исключительно на фелоровке. Для приближенного суждения о величине $2V$, по визиту изогир в разрезах, перпендикулярных опти-

(фиг. 80)¹.



Фиг. 79.



Фиг. 80.

III. ПРАКТИКА РАБОТЫ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ

В практике работы для получения интерференционных фигур в сходящемся свете пользуются двумя методами: методом Лазо

и методом Бертрана. Сущность первого заключается в следующем:

1. Находим соответствующий разрез минерала (с наименьшей интерференционной окраской) и, скрестив николи, вставляем объектив большого увеличения.

2. Включаем линзу Лазо и поднимаем конденсор доотказа.

3. Вынимаем окуляр и рассматриваем полученную интерференционную фигуру.

Из фиг. 81 видно, что изображение получается мелкое, четкое.

Сущность метода Бертрана заключается в следующем:

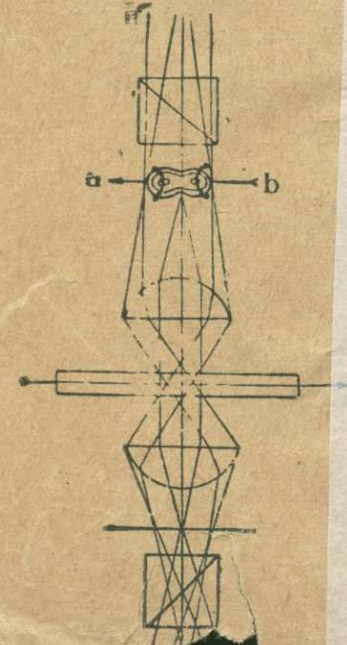
1. Повторяем первую и вторую операции вышеизложенного метода. Не вынимая окуляра, включаем линзу Бертрана и рассматриваем полученную интерференционную фигуру. Из фиг. 82 видно, что изображение получается *большое, но расплывчатое*. Интерференционная фигура, полученная методом Бертрана, повернута относительно интерференционной фигуры, полученной методом Лазо, на 180° .

При получении неясной интерференционной фигуры последним методом, результат необходимо проверить, пользуясь методом Лазо.

Порядок работы

А. Определение осиности минерала

1. При объективе № 3 находим зерно с наименьшей интерференционной окраской (нужно стараться найти зерно *возможное и неизменяемое*).



2. Приведя найденное *рассечение* к центру окуляра, вставляем объектив № 5 и одним из указанных методов получаем интерференционную фигуру. Она может быть следующей:

а) Наблюдается черная *смещающаяся* при вращении микроскопа (см. фиг. 54) *однаго* разрез перпендикулярной оптической оси (в этом случае зерно должно быть черным, *когда* *смещающаяся* при вращении столика микроскопа).

б) Наблюдается черная *крест*, центр которого при вращении микроскопа описывает *не* окружность в пределах которой окраска (см. фиг. 58), минерал *однаго* разрез косою по отношению к оптической оси.

в) Наблюдается *прямые* черные балки, при вращении столика микроскопа попеременно *являющиеся* в поле зрения и *смещающиеся* параллельно

итям окулярного креста (см. фиг. 59), минерал *одноосный*, разрез косою по отношению к оптической оси.

г) Наблюдается одна гипербола, при вращении столика микроскопа движущаяся в *диагональных* направлениях относительно осей окулярного креста, минерал *двуосный*, разрез косою по отношению к острой биссектрисе и оптической оси.

д) Наблюдается одна гипербола, проходящая через центр поля зрения и при вращении столика микроскопа вращающаяся в поле зрения, не выходя из пределов последнего (см. фиг. 74), минерал *двуосный*, разрез перпендикулярный оптической оси.

Для нахождения разрезов, перпендикулярных острой биссектрисе, зерна с наименьшей интерференционной окраской не пригодны. Нужно использовать разрезы со средней интерференционной окраской. В этом случае наблюдается одновременно две гиперболы (изогиры), расположенные в двух противоположных квадрантах и при вращении столика микроскопа превращающихся в черный крест и затем вновь принимающих форму гипербол, расположенных в двух других противоположных квадрантах (фиг. 66, 68).

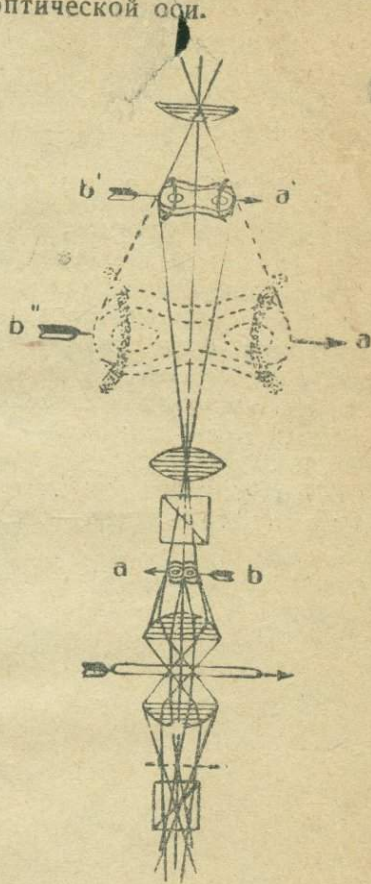
Наблюдение интерференционных колец в шлифах нормальной толщины указывает на большую величину двупреломления исследуемого минерала. По появлению синей или красноватой окраски на выпуклой или вогнутой стороне изогиры в разрезах, перпендикулярных оптической оси или острой биссектрисе, при исследовании двуосных ромбических кристаллов, можно определить характер дисперсии оптических осей.

Установив осьность минерала, определяют его оптический характер, или знак.

Б. Определение знака одноосного минерала

Найдя разрез, перпендикулярный (или почти перпендикулярный) оптической оси, вставляем *гипсовую пластинку*¹ и наблюдаем интерференционную окраску в квадрантах, расположенных по направлению движения пластинки. Может быть два случая:

¹ О применении слюдяной пластинки см. § 21.



Фиг. 82.

а) появляется желтая окраска — минерал положительный (в двух других квадрантах появляется синяя окраска, фиг. 69);
б) появляется синяя окраска — минерал отрицательный (в двух других квадрантах появляется желтая окраска).

Определяя знак минерала в случае, если в поле зрения видна одна балка, необходимо установить, в каком именно квадранте будем наблюдать окраску. Для этого вращаем столик микроскопа и по движению балок устанавливаем квадрант (например, правый нижний), а затем вставляем гипсовую пластинку; появление желтой окраски указывает на положительный характер минерала.

В. Определение знака двусосного минерала

Независимо от того, какой из вышеуказанных разрезов мы имеем (одна или две изогирь наблюдаются в поле зрения), вращаем столик микроскопа до момента, пока изогирь (или одна изогирь) не расположатся в поле зрения в направлении перпендикулярном движению гипсовой пластинки, и вставляем последнюю. Может быть два случая:

а) на выпуклой стороне изогир (или изогирь) появляется синяя окраска, а на вогнутой — желтая, — минерал положительный (фиг. 75).

б) на выпуклой стороне изогир появляется желтая окраска, а на вогнутой — синяя, — минерал отрицательный.

ТАБЛИЦА I

 $\lg f(i)$

| i | .0 | .1 | .2 | .3 | .4 | .5 | .6 | .7 | .8 | .9 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | — | 4,484 | 5,086 | 5,438 | 5,688 | 5,882 | 6,040 | 6,174 | 6,290 | 6,392 |
| 1 | 6,484 | 6,566 | 6,642 | 6,712 | 6,776 | 6,836 | 6,892 | 6,945 | 6,994 | 7,041 |
| 2 | 7,086 | 7,128 | 7,169 | 7,207 | 7,244 | 7,280 | 7,314 | 7,346 | 7,378 | 7,408 |
| 3 | 7,438 | 7,466 | 7,494 | 7,521 | 7,547 | 7,572 | 7,596 | 7,620 | 7,643 | 7,666 |
| 4 | 7,688 | 7,709 | 7,730 | 7,750 | 7,770 | 7,790 | 7,809 | 7,828 | 7,846 | 7,864 |
| 5 | 7,881 | 7,898 | 7,915 | 7,932 | 7,948 | 7,964 | 7,980 | 7,995 | 8,010 | 8,025 |
| 6 | 8,039 | 8,054 | 8,068 | 8,082 | 8,095 | 8,109 | 8,122 | 8,135 | 8,148 | 8,161 |
| 7 | 8,173 | 8,185 | 8,198 | 8,210 | 8,221 | 8,233 | 8,244 | 8,256 | 8,267 | 8,278 |
| 8 | 8,289 | 8,300 | 8,310 | 8,321 | 8,331 | 8,341 | 8,352 | 8,361 | 8,371 | 8,381 |
| 9 | 8,391 | 8,400 | 8,410 | 8,419 | 8,429 | 8,438 | 8,447 | 8,456 | 8,465 | 8,473 |
| 10 | 8,482 | 8,491 | 8,499 | 8,508 | 8,516 | 8,524 | 8,532 | 8,541 | 8,549 | 8,557 |
| 11 | 8,564 | 8,572 | 8,580 | 8,588 | 8,595 | 8,603 | 8,610 | 8,618 | 8,625 | 8,632 |
| 12 | 8,640 | 8,647 | 8,654 | 8,661 | 8,668 | 8,675 | 8,682 | 8,689 | 8,695 | 8,702 |
| 13 | 8,709 | 8,715 | 8,722 | 8,728 | 8,735 | 8,741 | 8,748 | 8,754 | 8,760 | 8,766 |
| 14 | 8,773 | 8,779 | 8,785 | 8,791 | 8,797 | 8,803 | 8,809 | 8,815 | 8,820 | 8,826 |
| 15 | 8,832 | 8,838 | 8,843 | 8,849 | 8,855 | 8,860 | 8,866 | 8,871 | 8,877 | 8,882 |
| 16 | 8,888 | 8,893 | 8,898 | 8,904 | 8,909 | 8,914 | 8,919 | 8,924 | 8,929 | 8,935 |
| 17 | 8,940 | 8,945 | 8,950 | 8,955 | 8,960 | 8,965 | 8,969 | 8,974 | 8,979 | 8,984 |
| 18 | 8,989 | 8,993 | 8,998 | 9,003 | 9,007 | 9,012 | 9,017 | 9,021 | 9,026 | 9,030 |
| 19 | 9,035 | 9,039 | 9,044 | 9,048 | 9,053 | 9,057 | 9,062 | 9,066 | 9,070 | 9,075 |
| 20 | 9,079 | 9,083 | 9,087 | 9,092 | 9,096 | 9,100 | 9,104 | 9,108 | 9,112 | 9,116 |
| 21 | 9,120 | 9,124 | 9,128 | 9,132 | 9,136 | 9,140 | 9,144 | 9,148 | 9,152 | 9,156 |
| 22 | 9,160 | 9,164 | 9,168 | 9,172 | 9,175 | 9,179 | 9,183 | 9,187 | 9,190 | 9,194 |
| 23 | 9,198 | 9,201 | 9,205 | 9,209 | 9,212 | 9,216 | 9,220 | 9,223 | 9,227 | 9,230 |
| 24 | 9,234 | 9,237 | 9,241 | 9,244 | 9,248 | 9,251 | 9,255 | 9,258 | 9,262 | 9,265 |
| 25 | 9,268 | 9,272 | 9,275 | 9,278 | 9,282 | 9,285 | 9,288 | 9,292 | 9,295 | 9,298 |
| 26 | 9,301 | 9,305 | 9,308 | 9,311 | 9,314 | 9,318 | 9,321 | 9,324 | 9,327 | 9,330 |
| 27 | 9,333 | 9,336 | 9,339 | 9,343 | 9,346 | 9,349 | 9,352 | 9,355 | 9,358 | 9,361 |
| 28 | 9,364 | 9,367 | 9,370 | 9,373 | 9,376 | 9,379 | 9,382 | 9,384 | 9,387 | 9,390 |
| 29 | 9,393 | 9,396 | 9,399 | 9,402 | 9,405 | 9,407 | 9,410 | 9,413 | 9,416 | 9,419 |
| 30 | 9,421 | 9,424 | 9,427 | 9,430 | 9,432 | 9,435 | 9,438 | 9,441 | 9,443 | 9,446 |

ТАБЛИЦА II

Логарифмы натуральных чисел

| N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10 | 000 | 004 | 009 | 013 | 017 | 021 | 025 | 029 | 033 | |
| 11 | 041 | 045 | 049 | 053 | 057 | 061 | 064 | 068 | 072 | |
| 12 | 079 | 083 | 086 | 090 | 093 | 097 | 100 | 104 | 107 | |
| 13 | 114 | 117 | 121 | 124 | 127 | 130 | 134 | 137 | 140 | 1 |
| 14 | 146 | 149 | 152 | 155 | 158 | 161 | 164 | 167 | 170 | 17 |
| 15 | 176 | 179 | 181 | 185 | 188 | 190 | 193 | 196 | 199 | 20 |
| 16 | 204 | 207 | 210 | 212 | 215 | 217 | 220 | 223 | 225 | 228 |
| 17 | 230 | 233 | 236 | 238 | 241 | 243 | 246 | 248 | 250 | 253 |
| 18 | 255 | 258 | 260 | 262 | 265 | 267 | 270 | 272 | 274 | 276 |
| 19 | 279 | 281 | 283 | 285 | 288 | 290 | 292 | 294 | 297 | 299 |
| 20 | 301 | 303 | 305 | 307 | 310 | 312 | 314 | 316 | 318 | 320 |
| 21 | 322 | 324 | 326 | 328 | 330 | 332 | 334 | 336 | 338 | 340 |
| 22 | 342 | 344 | 346 | 348 | 350 | 352 | 354 | 356 | 358 | 360 |
| 23 | 362 | 364 | 365 | 367 | 369 | 371 | 373 | 375 | 377 | 379 |
| 24 | 380 | 382 | 384 | 386 | 387 | 389 | 391 | 393 | 394 | 396 |
| 25 | 398 | 400 | 401 | 403 | 405 | 407 | 408 | 410 | 412 | 414 |
| 26 | 415 | 417 | 418 | 420 | 422 | 423 | 425 | 427 | 428 | 429 |
| 27 | 431 | 433 | 435 | 436 | 438 | 439 | 441 | 442 | 444 | 445 |
| 28 | 447 | 449 | 450 | 452 | 452 | 455 | 456 | 458 | 459 | 460 |
| 29 | 462 | 464 | 465 | 467 | 468 | 470 | 471 | 472 | 474 | 475 |
| 30 | 477 | 479 | 480 | 481 | 483 | 484 | 485 | 487 | 488 | 489 |
| 31 | 491 | 493 | 494 | 496 | 497 | 498 | 500 | 501 | 502 | 503 |
| 32 | 505 | 507 | 508 | 509 | 511 | 512 | 513 | 515 | 516 | 517 |
| 33 | 519 | 520 | 521 | 522 | 524 | 525 | 525 | 528 | 529 | 530 |
| 34 | 531 | 533 | 534 | 535 | 537 | 538 | 539 | 540 | 542 | 543 |
| 35 | 544 | 545 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 553 | 554 | 555 |
| 36 | 556 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 565 | 566 | 567 |
| 37 | 568 | 569 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 579 |
| 38 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | 587 | 588 | 589 | 590 |
| 39 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 |
| 40 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | 607 | 609 | 610 | 611 | 612 |
| 41 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 |
| 42 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 |
| 43 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 |
| 44 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | 649 | 650 | 651 | 652 |
| 45 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 |
| 46 | 663 | 664 | 665 | 666 | 667 | 667 | 668 | 669 | 670 | 671 |
| 47 | 672 | 673 | 674 | 675 | 676 | 677 | 678 | 679 | 679 | 680 |
| 48 | 681 | 682 | 683 | 684 | 685 | 686 | 687 | 688 | 688 | 689 |
| 49 | 690 | 691 | 692 | 693 | 694 | 695 | 695 | 696 | 697 | 698 |
| 50 | 699 | 700 | 701 | 702 | 702 | 703 | 704 | 705 | 706 | 707 |
| 51 | 708 | 708 | 709 | 710 | 711 | 712 | 713 | 713 | 714 | 715 |
| 52 | 716 | 717 | 718 | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 722 | 723 |
| 53 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 |
| 54 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 |

ТАБЛИЦА II
(продолжение)

| N | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 55 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 744 | 745 | 746 | 747 | 747 |
| 56 | 748 | 749 | 750 | 751 | 751 | 752 | 753 | 754 | 754 | 755 |
| 57 | 756 | 757 | 757 | 758 | 759 | 760 | 760 | 761 | 762 | 763 |
| | 763 | 764 | 765 | 766 | 766 | 767 | 768 | 769 | 769 | 770 |
| 59 | 771 | 772 | 772 | 773 | 774 | 775 | 775 | 776 | 777 | 777 |
| 60 | 778 | 779 | 780 | 780 | 781 | 782 | 782 | 783 | 784 | 785 |
| 61 | 785 | 786 | 787 | 787 | 788 | 789 | 790 | 790 | 791 | 792 |
| 62 | 792 | 793 | 794 | 794 | 795 | 796 | 797 | 797 | 798 | 799 |
| 63 | 799 | 800 | 801 | 801 | 802 | 803 | 803 | 804 | 805 | 805 |
| 64 | 806 | 807 | 808 | 808 | 809 | 810 | 810 | 811 | 812 | 812 |
| 65 | 813 | 814 | 814 | 815 | 816 | 816 | 817 | 818 | 818 | 819 |
| 66 | 820 | 820 | 821 | 822 | 822 | 823 | 823 | 824 | 825 | 825 |
| 67 | 826 | 827 | 827 | 828 | 829 | 829 | 830 | 831 | 831 | 832 |
| 68 | 833 | 833 | 834 | 834 | 835 | 836 | 836 | 837 | 838 | 838 |
| 69 | 839 | 839 | 840 | 841 | 841 | 842 | 843 | 843 | 844 | 844 |
| | 845 | 846 | 846 | 847 | 848 | 848 | 849 | 849 | 850 | 851 |
| | 851 | 852 | 852 | 853 | 854 | 854 | 855 | 856 | 856 | 857 |
| | 857 | 858 | 859 | 859 | 860 | 860 | 861 | 862 | 862 | 863 |
| | 863 | 864 | 865 | 865 | 866 | 866 | 867 | 867 | 868 | 869 |
| | 869 | 870 | 870 | 871 | 872 | 872 | 873 | 873 | 874 | 874 |
| | 875 | 876 | 876 | 877 | 877 | 878 | 879 | 879 | 880 | 880 |
| | 881 | 881 | 882 | 882 | 883 | 884 | 884 | 885 | 885 | 886 |
| 77 | 886 | 887 | 888 | 888 | 889 | 889 | 890 | 890 | 891 | 892 |
| 78 | 892 | 893 | 893 | 894 | 894 | 895 | 895 | 896 | 897 | 897 |
| 79 | 898 | 898 | 899 | 899 | 900 | 900 | 901 | 901 | 902 | 903 |
| 80 | 903 | 904 | 904 | 905 | 905 | 906 | 906 | 907 | 907 | 908 |
| 81 | 908 | 909 | 910 | 910 | 911 | 911 | 912 | 912 | 913 | 913 |
| 82 | 914 | 914 | 915 | 915 | 916 | 916 | 917 | 918 | 918 | 919 |
| 83 | 919 | 920 | 920 | 921 | 921 | 922 | 922 | 923 | 923 | 924 |
| 84 | 924 | 925 | 925 | 926 | 926 | 927 | 927 | 928 | 928 | 929 |
| 85 | 929 | 930 | 930 | 931 | 931 | 932 | 932 | 933 | 933 | 934 |
| 86 | 934 | 935 | 936 | 936 | 937 | 937 | 938 | 938 | 939 | 939 |
| 87 | 940 | 940 | 941 | 941 | 942 | 942 | 942 | 943 | 943 | 944 |
| 88 | 944 | 945 | 945 | 946 | 946 | 947 | 947 | 948 | 948 | 949 |
| 89 | 949 | 950 | 950 | 951 | 951 | 952 | 952 | 953 | 953 | 954 |
| | 954 | 955 | 955 | 956 | 956 | 957 | 957 | 958 | 958 | 959 |
| | 959 | 960 | 960 | 961 | 961 | 962 | 962 | 963 | 963 | 964 |
| | 964 | 964 | 965 | 965 | 966 | 966 | 967 | 967 | 968 | 969 |
| | 968 | 969 | 969 | 970 | 970 | 971 | 971 | 972 | 972 | 973 |
| | 973 | 974 | 974 | 975 | 975 | 975 | 976 | 976 | 977 | 978 |
| | 978 | 978 | 979 | 979 | 980 | 980 | 980 | 981 | 981 | 982 |
| | 982 | 983 | 983 | 984 | 984 | 985 | 985 | 985 | 986 | 987 |
| | 987 | 987 | 988 | 988 | 989 | 989 | 989 | 990 | 990 | 991 |
| | 991 | 992 | 992 | 993 | 993 | 993 | 994 | 994 | 994 | 995 |
| | 996 | 996 | 997 | 997 | 997 | 998 | 998 | 999 | 999 | 1000 |

ТАБЛИЦА III

10000 / (i)

| i | .0 | .1 | .2 | .3 | .4 | .5 | .6 | .7 | .8 | .9 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0° | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 | 2,4 |
| 1 | 3,0 | 3,7 | 4,4 | 5,1 | 6,0 | 6,9 | 7,8 | 8,8 | 9,9 | 11,1 |
| 2 | 12,2 | 13,4 | 14,7 | 16,1 | 17,5 | 19,0 | 20,6 | 22,2 | 23,9 | 25,7 |
| 3 | 27,4 | 29,3 | 31,2 | 33,2 | 35,2 | 37,3 | 39,5 | 41,7 | 44,0 | 46,4 |
| 4 | 48,4 | 51,2 | 53,7 | 56,3 | 58,9 | 61,6 | 64,4 | 67,2 | 70,1 | 73,1 |
| 5 | 76,1 | 79,1 | 82,3 | 85,5 | 88,7 | 92,0 | 95,4 | 98,8 | 102,3 | 105,9 |
| 6 | 109,5 | 113,2 | 116,9 | 120,7 | 124,6 | 128,5 | 132,5 | 136,5 | 140,6 | 144,7 |
| 7 | 149,0 | 153,3 | 157,6 | 162,0 | 166,5 | 171,0 | 175,6 | 180,2 | 184,9 | 189,6 |
| 8 | 194,5 | 199,3 | 204,3 | 209,3 | 214,4 | 219,5 | 224,6 | 229,2 | 233,9 | 238,7 |
| 9 | 245,9 | 251,4 | 257,0 | 262,6 | 268,2 | 273,9 | 279,7 | 285,5 | 291,4 | 297,2 |
| 10 | 303,4 | 309,5 | 315,6 | 321,8 | 328,1 | 334,4 | 340,7 | 347,2 | 353,7 | 360,2 |
| 11 | 366,8 | 373,5 | 380,2 | 387,0 | 393,8 | 400,8 | 407,7 | 414,7 | 421,8 | 428,9 |
| 12 | 436,1 | 443,4 | 450,7 | 458,1 | 465,5 | 473,0 | 480,6 | 488,2 | 495,8 | 503,5 |
| 13 | 511 | 519 | 527 | 535 | 543 | 551 | 559 | 567 | 575 | 583 |
| 14 | 592 | 601 | 609 | 618 | 626 | 635 | 644 | 652 | 661 | 669 |
| 15 | 679 | 688 | 697 | 706 | 715 | 725 | 734 | 743 | 752 | 761 |
| 16 | 772 | 781 | 791 | 801 | 810 | 820 | 830 | 840 | 850 | 860 |
| 17 | 870 | 880 | 890 | 901 | 911 | 921 | 932 | 942 | 953 | 963 |
| 18 | 974 | 985 | 996 | 1006 | 1017 | 1028 | 1039 | 1050 | 1061 | 1072 |
| 19 | 1084 | 1095 | 1106 | 1118 | 1129 | 1141 | 1152 | 1164 | 1175 | 1187 |
| 20 | 1199 | 1211 | 1222 | 1234 | 1246 | 1259 | 1270 | 1283 | 1295 | 1307 |
| 21 | 1319 | 1332 | 1344 | 1357 | 1369 | 1382 | 1394 | 1407 | 1420 | 1433 |
| 22 | 1445 | 1458 | 1471 | 1484 | 1497 | 1510 | 1523 | 1537 | 1550 | 1563 |
| 23 | 1577 | 1590 | 1603 | 1617 | 1631 | 1644 | 1658 | 1672 | 1686 | 1699 |
| 24 | 1713 | 1727 | 1741 | 1755 | 1769 | 1783 | 1797 | 1812 | 1826 | 1840 |
| 25 | 1855 | 1869 | 1884 | 1898 | 1913 | 1927 | 1942 | 1957 | 1972 | 1987 |
| 26 | 2001 | 2016 | 2032 | 2046 | 2062 | 2077 | 2092 | 2107 | 2122 | 2137 |
| 27 | 2153 | 2169 | 2184 | 2200 | 2215 | 2231 | 2247 | 2262 | 2278 | 2293 |
| 28 | 2310 | 2326 | 2342 | 2358 | 2374 | 2390 | 2407 | 2422 | 2438 | 2454 |
| 29 | 2471 | 2488 | 2504 | 2521 | 2537 | 2554 | 2570 | 2587 | 2604 | 2620 |
| 30 | 2637 | 2654 | 2671 | 2688 | 2705 | 2722 | 2739 | 2756 | 2773 | 2790 |

20 коп.



2674