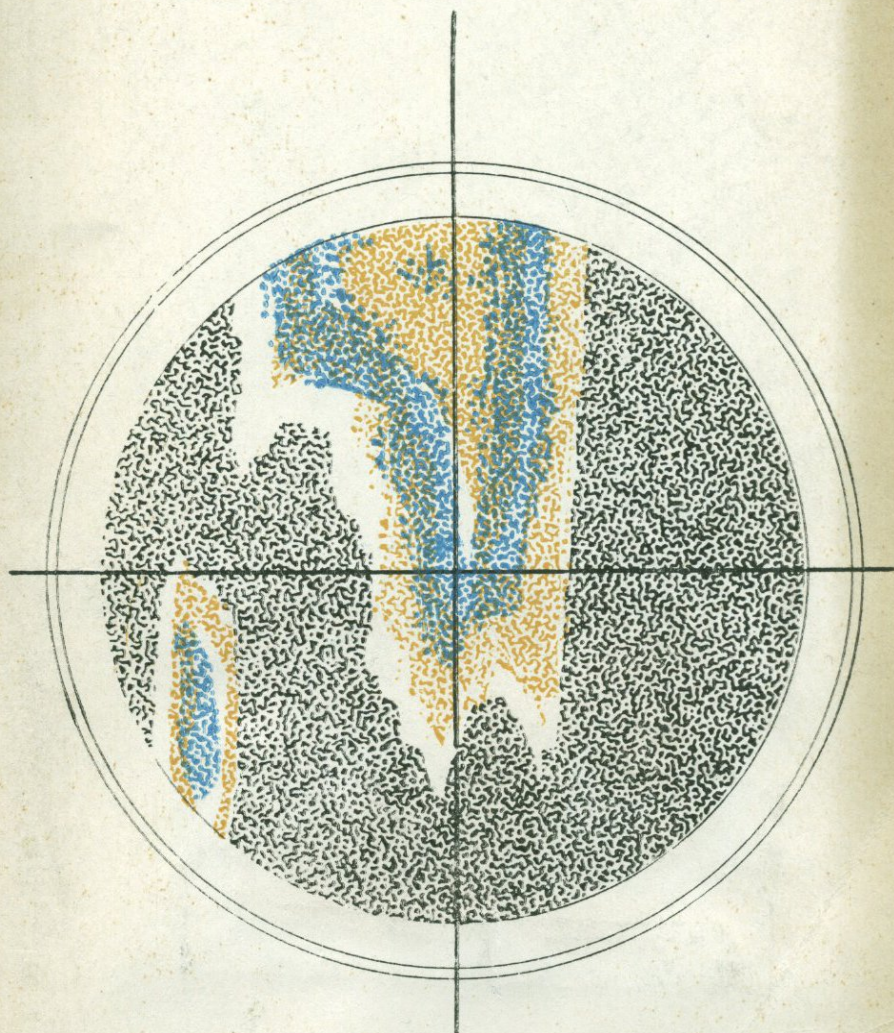


С. К. ОНИКИЕНКО

МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОРОДОБРАЗУЮЩИХ
МИНЕРАЛОВ
В ПРОЗРАЧНЫХ
ШЛИФАХ



С. К. ОНИКИЕНКО

549.12; 552.121

058

МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ
МИНЕРАЛОВ
В ПРОЗРАЧНЫХ
ШЛИФАХ

73

Допущено

*Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов
геологических специальностей вузов*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
МОСКВА 1971



Методика исследования поро-
образующих минералов в прозрач-
ных шлифах. Оникиенко С. К.
Изд. 2-е переработ. и доп. М., изд-во
«Недра», 1971, 128 стр.

Работа представляет учебное по-
собие для студентов геологических
специальностей вузов по курсу «Пет-
рография магматических и метамор-
фических пород» и составлена в соот-
ветствии с действующей программой
для специальности «Геология и раз-
ведка месторождений полезных иско-
паемых». На конкретных примерах
рассмотрены основные черты оптиче-
ской анизотропии кристаллов, связь
их кристаллографических и оптиче-
ских свойств. Описаны наиболее но-
вые и совершенные модели микро-
скопов, применяемых при петрогра-
фических исследованиях, подготовка
приборов к работе. Основная часть
работы посвящена методике изуче-
ния минералов под микроскопом: при
одном николе, в скрещенных нико-
лях, в сходящемся свете.

Таблиц 2, иллюстрации 84, спи-
сок литературы — 14 названий.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из наиболее трудоемких и сложных элементов геологических исследований, независимо от их характера и направления, является петрографическое изучение горных пород.

Методическая основа современной петрографии базируется на разнообразных приемах исследований. Но главную роль в них играют оптические исследования породообразующих минералов и пород под микроскопом.

Методика исследования породообразующих минералов основана на законах кристаллооптики. Она является специальной учебной дисциплиной и отличается сложностью и строгой работанностью основных положений. Освоение методики требует постоянного упражнения, развития навыков и отработки многих видов операций.

Данная работа представляет собой 2-е издание учебного пособия для практических занятий по курсу «Петрография магматических и метаморфических пород». Ее содержание определено действующей программой по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

В работе изложены общие методы исследования минералов под микроскопом. В нее вошли главы, посвященные элементарным основам кристаллооптики, знакомству с поляризационным микроскопом и методам исследования при одном никеле, в скрещенных николях и в сходящемся свете.

В основу структурного плана пособия положен соответствующий курс, разработанный в Московском геологоразведочном институте коллективом преподавателей под руководством профессора В. С. Коптева-Дворникова с участием Е. С. Доброхотовой, Т. Л. Никольской, И. Ф. Трусовой, В. И. Чернова и др.

Предлагаемая книга будет полезна и в качестве справочного пособия по методике исследований для геологов, ведущих петрографическую обработку материалов геологических исследований.

Автор пользуется случаем выразить глубокую признательность А. М. Даминовой, Е. С. Доброхотовой за замечания и советы.

Глава первая

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНИЗОТРОПНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Основные этапы развития представлений об оптических свойствах кристаллов

Развитие учения об оптических свойствах кристаллов трудно представить вне связи с общим развитием физики. По существу, это история развития оптики, но рассмотренная под определенным углом зрения: история возникновения и развития определенного комплекса знаний, со временем оформившихся в самостоятельный раздел оптики — в кристаллооптику.

В отличие от таких оптических явлений, как преломление и отражение света, оптическая анизотропия кристаллов замечена сравнительно недавно. Это объясняется неприметностью и невыразительностью ее черт. До второй половины XVII в. о ее существовании никто не подозревал. Изотропность прозрачных сред и веществ окружающего мира воспринималась как априорная, не вызывающая никаких сомнений истина. И даже тогда, когда в руках исследователей оказался исключительный по выразительности материал, не многие оказались способными дать ему серьезную оценку.

Примечательна история открытия. В середине XVII в. в Копенгаген из Исландии были привезены крупные кристаллы известкового шпата (кальцита). В отличие от давно известных в Европе разновидностей этого минерала, исландские кристаллы были совершенно чистыми и водянопрозрачными. Позже эта разновидность кальцита получила название исландского шпата. В 1669 г. профессор физики Копенгагенского университета Эразм Бартолин, рассматривая через кристалл исландского шпата небольшое отверстие в картоне, увидел вместо одного два совершенно одинаковых отверстия. Тонкий луч свечи, проникая в кристалл, отчетливо делился в нем на два луча одинаковой силы. Исследовав характер сдвигания луча во всех направлениях кристалла (позже это явление получило название двойного лучепреломления или двупреломления), Бартолин представил свое открытие на суд ученых различных академий, в том числе и наиболее авторитетному в то время научному центру — Лондонско-

му королевскому обществу. Однако наука середины XVII века не могла дать открытому Бартолином явлению удовлетворительного объяснения. Специальная комиссия, выделенная Лондонским королевским обществом, ознакомившись с представленными ей материалами, сочла описанное явление случайным, а отмеченные закономерности — не имеющими научного значения.

Первое научное объяснение явлению двупреломления дано в 1678 г. голландским ученым Христианом Гюйгенсом с позиций его гипотезы о свете как о волновом явлении. Основные положения гипотезы были изложены в труде «Трактат о свете» (Гюйгенс, 1935).

Гюйгенс сформулировал важнейшее положение, которое легло в основу дальнейшего развития волновой гипотезы света и известно как принцип Гюйгенса — Френеля. Сводится оно (в современной формулировке) к следующему: *каждая точка, до которой доходит волновое возбуждение, является в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая эти вторичные волны, указывает положение фронта действительно распространяющейся волны.*

В главе трактата «О своеобразном преломлении в исландском кристалле» рассмотрено явление двупреломления, подтверждены и уточнены наблюдения Бартолина и даны понятия об обыкновенном, т. е. подчиняющемся обычным законам преломления, и о необыкновенном преломлении света, не подчиняющемся закону Снеллиуса — Декарта. Основываясь на различии величин углов преломления лучей, проникающих в кристалл, Гюйгенс сделал вывод о том, что в прозрачной среде кристалла «существуют две разные категории волн света» — волн непосредственно в частицах, слагающих кристалл, и волн в эфире, заполняющем пространство между этими частицами. Скорость распространения одних волн зависит от направления в кристалле, другие волны распространяются во всех направлениях с равными скоростями. Скорости тех и других волн равны в направлении главной кристаллографической оси и не равны во всех остальных направлениях. Оптическую модель кристалла Гюйгенс представил в виде сочетания двух волновых поверхностей, т. е. поверхностей, описанных по концам векторов скоростей волн, проходящих через кристалл и имеющих разную форму. Для волн с необыкновенным преломлением формой волновой поверхности является сфероид (эллипсоид вращения), для волн с обыкновенным преломлением — сфера (шар), описанная вокруг сфероида.

Построения Гюйгенса и его доказательства характера преломления света в приложении к кристаллам среднего класса симметрии, т. е. к так называемым одноосным кристаллам (подробнее о них будет сказано ниже), не утратили своего значения по сей день.

В начале XIX в. волновая гипотеза Гюйгенса получила новую

интерпретацию и дальнейшее развитие в трудах выдающегося французского ученого Огюстена Жана Френеля (1955). Этому предшествовало два крупных открытия в оптике. Английский ученый Томас Юнг сформулировал принцип интерференции (1801 г.), давший научное объяснение происхождению цветов в тонких пленках и получивший впоследствии широкое распространение для объяснения различных по природе волновых явлений. Французский физик Этьенн Луи Малюс (1808 г.) открыл явление поляризации света, отраженного от поверхностей прозрачных сред (стекла, воды и т. д.).

Открытие Т. Юнга, как это ни парадоксально, поставило в трудное положение некоторые аспекты волновой гипотезы. Так, двупреломление в исландском шпате становилось необъяснимым: две волны распространялись в кристалле в одном, или почти в одном, направлении и не могли не интерферировать. Но многочисленные опыты утверждали — интерференции нет.

Поляризацию света Э. Малюс объяснял как проявление асимметрии световых частиц, т. е. в том понятии, какое свойствам этих частиц приписывал Ньютон. Открытие Э. Малюса произвело обескураживающее впечатление на сторонников волновой гипотезы (среди которых был и Т. Юнг).

Но вскоре было сделано еще одно открытие — в 1815 г. Брюстер обнаружил новый тип кристаллов, у которых двупреломление затухало и исчезало не в одном направлении, как у исландского шпата или кварца, а в двух направлениях (двуосные кристаллы). К этим кристаллам построения Гюйгенса оказались неприменимы.

Были и другие вопросы, на которые волновая гипотеза не могла дать ответа. Именно в этот период в науку вошел Френель, который дополнил принцип Гюйгенса о распространении световых волн принципом интерференции Юнга. В связи с этим получило объяснение прямолинейное распространение света в различных средах, а также рассеивание его при прохождении вблизи преграды, т. е. явление дифракции. В результате исследований Френеля по оптической анизотропии кристаллов и, в частности, решения им проблемы точного пространственного выражения параметров анизотропии, был создан самостоятельный раздел оптики — кристаллооптика.

Точные и тонкие опыты по исследованию интерференции в двупреломляющих кристаллах позволили Френелю доказать, что в исландском шпате происходит поляризация световых волн, что плоскости поляризации их ориентированы под прямым углом друг к другу, поэтому волны не интерferируют. Отсюда было выдвинуто очень важное положение о том, что световые колебания распространяются в виде поперечных волн, причем это свойство света вообще, а не только поляризованного света — «...обыкновенный свет включает лишь колебания параллельно волновым поверхностям...» (т. е. поперечные к направлению распрост-

ранения) и далее: «...поляризация не заключается в создании поперечных колебаний, но лишь в разложении этих колебаний на составляющие по двум определенным перпендикулярным направлениям и в разделении лучей, получающихся в результате этого разложения» («Второй мемуар о двойном лучепреломлении», 1821 г.). По существовавшим в то время представлениям, поперечные волны могли распространяться только в твердых телах. В связи с этим идея Френеля была принята не сразу и не всеми. Однако вскоре она была доказана экспериментально.

При исследовании группы двuosных кристаллов, незадолго до того открытых Брюстером, для которых оказались неприменимы построения Гюйгенса, Френель доказал на серии опытов с топазом, что ни одна из волн поляризованного света в них не подчиняется обычным законам преломления, скорости распространения волн зависят от направления в кристалле. Эта важная особенность не была замечена Брюстером.

Сложнее оказалась проблема построения волновых поверхностей для двuosных кристаллов. По расчетам они имеют очень сложные двухполостные формы, обусловленные сочетанием двух сфероидальных фигур с единым центром и пересекающимися поверхностями. Построение их представляет значительную трудность. Поэтому Френель приступил к поискам простых и удобных форм, более полно выражающих соотношение свойств.

Им было изучено несколько вариантов. Наибольшим его достижением и творческой удачей является способ построения, при котором учитываются не только величины, характеризующие скорости распространения волн, но и направление их колебаний. Для этой цели найдено простое геометрическое выражение — поверхность, имеющая форму эллипсоида, у которого величины осей обратно пропорциональны скоростям распространения волн, а направления осей указывают на положение плоскостей поляризации (эллипсоид Френеля).

Поверхности, предложенные Френелем, просты, однополостны (одинарные). Их форма и основные измерения рассчитываются несложными математическими формулами по заданным параметрам. С помощью несложных пересчетов они позволяют перейти к волновым поверхностям, к поверхностям показателей преломления и т. д. Но основное их преимущество заключается в том, что на основании предварительного изучения можно предсказать свойства кристалла в заданном направлении.

Этот удачно найденный способ построения, наиболее полно учитывающий закономерное соотношение оптических свойств анизотропных кристаллов, лег в основу современной кристаллооптики. Полуторавековой опыт применения принципа построений Френеля привел к определенной эволюции в математическом обосновании расчетов, в отборе поверхностей. В настоящее время вместо эллипсоида Френеля применяется другая поверхность того же семейства, которая называется эллипсоидом индексов,

или индикатрисой. Были устранены некоторые несовершенства и т. д. Но все эти изменения только отшлифовали идею Френеля, сделали ее более совершенной и строгой.

Труды Френеля составили эпоху в истории развития оптики. Они явились мощным толчком в развитии технических идей, в короткий срок перевооруживших минералогию и петрографию.

В 1828 г. Уильям Николь изобрел поляризационную призму. В 1834 г. Г. Тальбот сконструировал первый поляризационный микроскоп. В 1850 г. Г. Сорби описал шлиф известковистого песчаника — первой породы, исследованной с помощью поляризационного микроскопа. С этого момента в минералогии и петрографии начинается новый период — период микроскопических исследований.

Важнейшие этапы развития физики отмечались техническим и методическим совершенствованием средств исследования пород, минералов и руд. Крупнейшей вехой явилось создание спектрографов, электронных микроскопов, массспектрометров; началось применение квантовых генераторов. Однако основным методом исследования минералов и пород продолжает оставаться кристаллооптический метод.

Оптические свойства анизотропных кристаллов

Все прозрачные вещества по оптическим свойствам делятся на изотропные и анизотропные. Изотропные вещества, независимо от направления, в котором распространяется свет в их массе, сохраняют постоянство оптических свойств. К оптически изотропным относятся воздух, стекла, смолы, вода и большинство жидкостей, а из кристаллических образований — кристаллы кубической сингонии.

Анизотропные вещества меняют оптические свойства в зависимости от направления распространения в них света — изменяются скорость света и характер распространения световых волн, показатель преломления, сила и пределы светопоглощения и т. д. К анизотропным относятся все кристаллические вещества, кроме кристаллов кубической сингонии, и некоторые жидкости.

В повседневной жизни человек либо не соприкасается с анизотропными средами, либо не ощущает реально осязаемых различий анизотропных и изотропных веществ. Так, слой чистой воды и чистого льда, пластина кварцевого стекла и горного хрусталя, идентичные по химическому составу, кажутся одинаково прозрачными и вполне тождественными по оптическим свойствам, несмотря на то что между ними есть принципиальные отличия. Для установления этих отличий должны быть изготовлены специальные препараты и использованы специальные приборы.

Так обстоит с большинством прозрачных или полупрозрачных (т. е. пропускающих свет только в тонком срезе или тонкой пленке) веществ, окружающих нас.

В мире минералов положение резко меняется — в количественном (или объемном) выражении огромное большинство их кристаллов анизотропно. Однако и здесь резко выраженная, зримая оптическая анизотропия является скорее исключением, чем правилом. Но первое знакомство с этим явлением лучше всего начать именно с тех минералов, в кристаллах которых анизотропия представлена наиболее наглядно.

В качестве примера наибольший интерес представляет исландский шпат. Недаром долгое время он являлся воплощением самого явления, его классическим образцом.

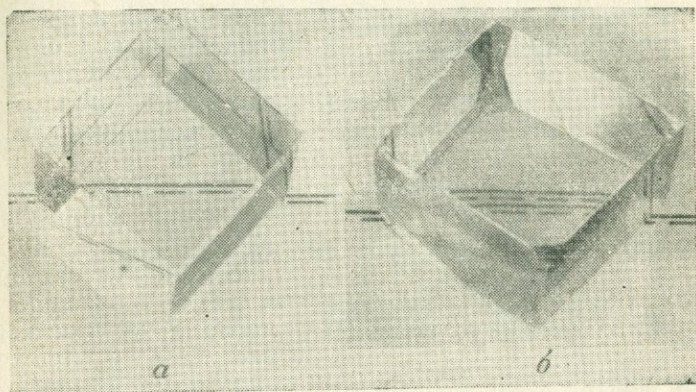


Рис. 1. Характер светопреломления в стекле (а) и в кристалле исландского шпата (б)

Ниже приведено описание нескольких несложных опытов с кристаллом этого минерала, а также их интерпретация и выводы. Их выполнение позволяет раскрыть сравнительное содержание явления, яснее представить его реальные формы и избежать поверхностных умозрительных впечатлений о нем.

Однако исландский шпат представляет лишь одну группу анизотропных минералов — группу так называемых одноосных кристаллов. Изложенное в данном разделе иллюстрирует оптические свойства преимущественно этой группы, но ряд положений носит общий характер. Об этом будет сказано отдельно в заключительной части раздела. (Свойства минералов второй группы — группы двуосных кристаллов за неимением среди них такого яркого представителя, как исландский шпат, будут изложены в последующих разделах на основании сравнительных данных.)

Значительная часть приводимых ниже опытов описана в работах исследователей разных времен (Э. Бартолина, Х. Гюйгенса, Э. Малюса, О. Френеля и др.) и относится к разным этапам развития кристаллооптики. Нет необходимости воспроизводить

их в точной исторической последовательности и точно в том виде, в каком они были проделаны.

Итак, чем же отличается оптика анизотропных кристаллов от классической оптики изотропных сред?

1. Если рассматривать рисунок через кристалл исландского шпата, то первое, что можно заметить, это его sdвоенное изображение.

Рассмотрим рис. 1. На левом фотоснимке (а) показана стеклянная призма, которой приданы размер и форма, сходные с кристаллом исландского шпата, на правом (б) — кристалл исландского шпата. Призма и кристалл расположены над одним и тем же рисунком, изображающим две параллельные линии — сплошную и штриховую.

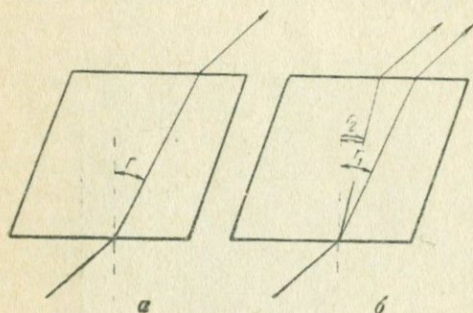


Рис. 2. Ход лучей через стекло (а) и через кристалл исландского шпата (б)

сталле изображение тоже оказалось смещенным, но, кроме того, оно sdвoено — в кристалле произошло явление, которое называется двупреломлением.

Двупреломление у исландского шпата, как и у других карбонатов, выражено резко и имеет настолько большую величину, что хорошо видно на глаз. У других анизотропных минералов оно выражено гораздо слабее и простым наблюдением не обнаруживается.

Распространение световых волн через стекло и через кристалл можно изобразить в виде схемы (рис. 2).

Из схематических рисунков видно, что световая волна естественного света, преломившись в кристалле (рис. 2, б), расщепилась на две. Волны разошлись под небольшим углом друг к другу, а достигнув границы кристалла и претерпев снова преломление, в изотропной среде — в воздухе — распространяются параллельно друг другу.

Преломившись в кристалле, волны образовали разные углы преломления. Угол преломления одной волны r_1 , не равен углу преломления другой волны r_2 .

Величина угла преломления связана следующей зависимостью с величиной угла падения и показателем преломления среды:

$$\sin r = \frac{\sin i}{n},$$

где r — угол преломления; i — угол падения; n — показатель преломления среды.

В рассматриваемом случае угол падения один и тот же. Углов преломления два. Тогда из выражения

$$r_1 \neq r_2 \quad \text{и} \quad \frac{\sin i}{\sin r} = n$$

следует

$$\frac{\sin i}{\sin r_1} = n_1, \quad \frac{\sin i}{\sin r_2} = n_2,$$

т. е. неравным углам преломления соответствуют неравные показатели преломления. Иначе говоря, двум световым волнам, распространяющимся в кристалле, соответствуют разные по величине показатели преломления.

Но величина n численно равна отношению скорости света в пустоте или в воздухе (C) к скорости света в данной среде (v):

$$n = \frac{C}{v} \quad \left(\text{или} \quad v = \frac{C}{n} \right).$$

При абсолютном значении величины C и конкретных значениях n_1 и n_2

$$\frac{C}{n_1} = v_1, \quad \frac{C}{n_2} = v_2,$$

где v_1 — скорость одной волны; v_2 — скорость другой волны. Следовательно, каждой световой волне соответствует своя скорость распространения в кристалле.

Таким образом, на основании первого наблюдения установлено, что в кристалле исландского шпата наблюдается явление дупреломления, в результате которого волна естественного света расщепляется на две световые волны, распространяющиеся с разными скоростями; волнам соответствуют разные по величине показатели преломления.

II. Если рассматривать через кристалл исландского шпата небольшое отверстие в плотной бумаге или тонком картоне, то можно увидеть вместо одного изображения два совершенно одинаковых по степени освещенности*. При вращении кристалла в плоскости, перпендикулярной лучу, проходящему через отверстие, одно изображение остается на месте, а другое по мере поворота кристалла описывает окружность вокруг первого.

Общая картина явления не изменится, если кристалл слегка наклонить так, чтобы свет падал на грань ромбоэдра под острым углом. Одно изображение по-прежнему будет оставаться неподвижным, а второе — вращаться вокруг него. Вращая кристалл, нетрудно заметить, что неподвижное изображение, независимо от

* Диаметр отверстия не должен быть больше 0,1 толщины кристалла, в противном случае изображения будут перекрывать друг друга.

угла поворота, всегда остается в плоскости падения света, т. е. в одной плоскости с лучами падающим и преломленным, а подвижное, в общем случае, находится вне этой плоскости (рис. 3). Другими словами, две световые волны, возникшие в результате дупреломления в кристалле исландского шпата, обладают разными свойствами. Одна из них подчиняется обычному закону преломления света — закону Снелиуса — Декарта, определяющему преломление естественного или обыкновенного света

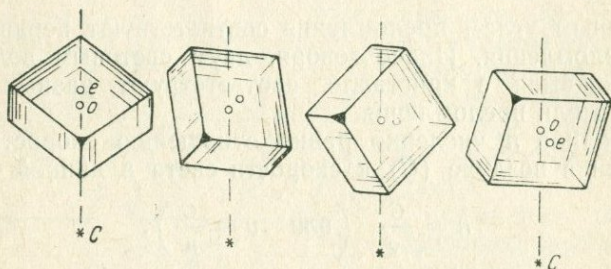


Рис. 3. Изображение, переданное волной обыкновенного света — *o*, при любых поворотах кристалла остается в плоскости падения луча *C*; изображение, переданное волной необыкновенного света *e*, находится вне этой плоскости

при прохождении им границы раздела между двумя прозрачными средами. Она называется обыкновенной волной, а направление ее распространения в кристалле обыкновенным лучом. Другая волна не подчиняется этому закону. Ее называют необыкновенной волной, а направление ее распространения в кристалле — необыкновенным лучом.

Показатель преломления обыкновенного луча обозначают как n_o — здесь буква «*o*» от слова *ordinate* — обыкновенный, показатель преломления необыкновенного луча обозначается как n_e — «*e*» — от *extraordinaire* — необыкновенный.

III. Если вернуться к только что проделанному опыту, то можно заметить еще одну особенность в расположении изображений при вращении кристалла. Как отмечено, одно изображение при этом остается неподвижным, а другое описывает вокруг него окружность. Но независимо от угла поворота оба изображения все время сохраняют свое расположение по отношению к ребрам и углам грани (рис. 4). Это явление сохраняется, если рассматривать изображение через любую пару параллельных граней ромбоэдра.

Если теперь сопоставить положение изображений на гранях, то можно убедиться, что по отношению к кристаллографической оси высшего наименования L_3 они расположены в определенном порядке — каждая пара на одной прямой к выходу оси L_3 .

Иначе говоря, направление распространения световых волн в кристалле всегда подчиняется его кристаллографическим направлениям — обыкновенный и необыкновенный лучи всегда расположены в одной плоскости с кристаллографической осью высшего наименования.

IV. В предшествующем опыте через небольшое отверстие в картоне проходил обыкновенный свет непосредственно от источника освещения. Двойное изображение отверстия имело совершенно одинаковую интенсивность освещенности, которая не менялась при поворотах кристалла.

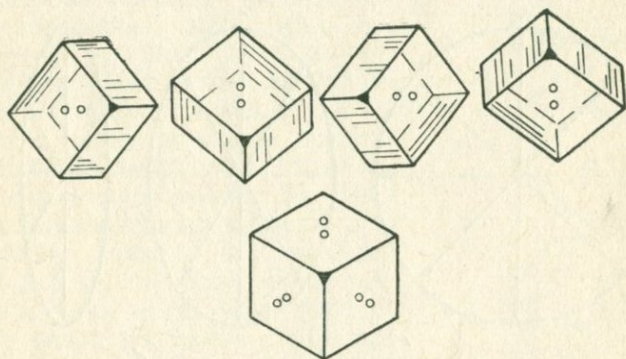


Рис. 4. Расположение изображений в кристалле исландского шпата по отношению к ребрам и углам ромбоэдра сохраняется независимо от угла поворота кристалла. (Внизу — схема расположения изображений на трех гранях ромбоэдра, прилегающих к выходу оси L_3)

Картина изменится, если через отверстие пройдет свет, отраженный от полированной поверхности изотропного диэлектрика, например от стекла (лучше черного или черной полированной пластмассы, но не от зеркала — от металлических поверхностей, в том числе и от амальгамы зеркала, свет отражается иначе). При поворотах кристалла в плоскости, перпендикулярной лучу, освещенность изображений будет меняться: одно из них будет просветляться, другое гаснуть. По мере вращения кристалла становится заметным переменный характер освещенности: если она усиливается в одном изображении, то гаснет в другом; если начинает гаснуть первое, то одновременно начинает просветляться второе, и т. д. За один полный оборот кристалла цикл просветления и погасания в каждом изображении повторяется дважды. При этом максимум освещенности одного изображения соответствует минимумам освещенности другого и наоборот.

Для того чтобы разобраться в описанном явлении, необходимо напомнить некоторые свойства отраженных и преломленных лучей. Так, свет, отраженный от гладкой или полированной по-

верхности диэлектрика — воды, смол, стекло, пластмасс и т. д., становится поляризованным. Различие между естественным, т. е. неполяризованным, и поляризованным светом заключается в том, что обычный свет, распространяясь от источника, в каждой точке световой волны имеет амплитуды световых колебаний, равные во всех направлениях. Если их в виде векторов спроектировать на плоскость, перпендикулярную направлению распространения света, то они расположатся как радиусы окружности (рис. 5). Поляризованный свет в каждой точке световой волны имеет амплитуды колебаний, неравные по величине. Спроектированные на

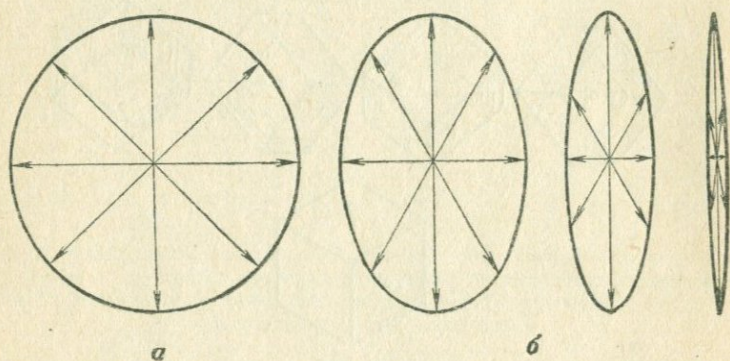


Рис. 5. Относительные величины амплитуд световых колебаний обыкновенного (а) и в разной степени поляризованного света (б). Величины амплитуд изображены в виде векторов, спроектированных на плоскость, перпендикулярную направлению распространения волны

плоскость в виде векторов, они расположатся в зависимости от степени поляризации в виде радиусов эллипса — в случае частично поляризованного света, либо в виде узкой щели — в случае плоскополяризованного света.

Степень поляризации отраженного света зависит от величины угла падения, от особенностей отражающей поверхности и т. д. Не углубляясь в причины явления, надо отметить, что наибольшей величины она достигает, когда угол между падающим и отраженным лучами близок к 90° . Высокую степень поляризации имеет свет, отраженный от темных поверхностей (черного стекла, черной пластмассы и т. д.). Плоскость световых колебаний отраженной волны ориентирована перпендикулярно плоскости падения света (в связи с тем что отраженная волна является частично поляризованной, здесь и далее речь идет о плоскости преимущественных колебаний).

Из наблюдений за изменением освещенности двойного изображения при прохождении поляризованной волны через кристалл видно, что в зависимости от положения кристалла по отношению к плоскости преимущественных колебаний интенсивность освеще-

ценности, т. е. величина амплитуды световых колебаний, то уменьшается, гаснет, то восстанавливается до какого-то максимума.

Если учесть положение плоскости световых колебаний поляризованной волны (например, при горизонтальном положении отражающей поверхности — пластинки стекла, лежащей на столе, — плоскость колебаний отраженной волны по отношению к наблюдателю будет ориентирована горизонтально) и продолжить наблюдения, то можно заметить следующее:

а) изображение, переданное необыкновенной волной, максимально просветляется тогда, когда линия, соединяющая его выход и выход оси L_3 , находится в горизонтальном положении, т. е. совпадает с плоскостью колебаний отраженной волны. По отношению к направлениям в самом кристалле можно сказать, что наибольшую амплитуду световые колебания имеют в момент, когда они ориентированы в одной плоскости с кристаллографической осью высшего наименования. По мере поворота кристалла амплитуда световых колебаний уменьшается и минимальной величины достигает в момент, когда эти колебания ориентированы под прямым углом по направлению к выходу оси L_3 (рис. 6);

б) световая волна, переданная обыкновенным лучом, имеет наибольшую амплитуду световых колебаний — наибольшее просветление изображения в тот момент, когда плоскость колебания ориентирована под прямым углом к выходу оси L_3 и т. д.

Таким образом, исландский шпат наиболее полно пропускает световые колебания поляризованной волны только в определенных плоскостях (направлениях) и гасит световые колебания, если их направления не совпадают с этими плоскостями. При этом совершенно независимо от степени поляризации и ориентировки плоскости преимущественных колебаний волны, вступившей в кри-

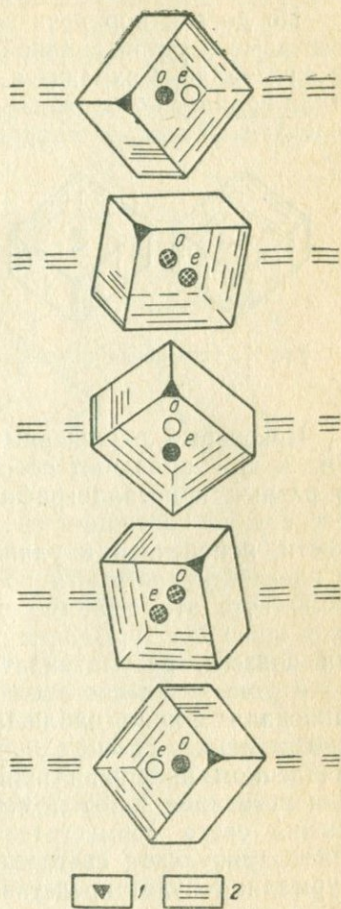


Рис. 6. Изменение освещенности изображений, переданных обыкновенной o и необыкновенной волной e в зависимости от положения кристалла по отношению к плоскости колебаний отраженной световой волны, вступающей в кристалл

1 — выход оси L_3 ; 2 — ориентировка колебаний отраженной волны

стала, каждая из выходящих волн поляризуется в плоскости, имеющей совершенно определенную кристаллическую ориентировку — кристалл поляризует свет*.

Но до сих пор речь шла о превращениях световых колебаний заведомо поляризованной волны, претерпевшей двупреломление в кристалле. Сохранится ли картина явления, если через кристалл пройдет обыкновенный свет? Это можно выяснить, проделав следующий опыт в неполяризованном свете.

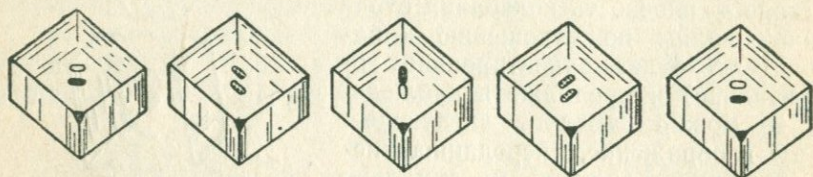


Рис. 7. Изменение интенсивности окраски зерна турмалина в поляризованном свете

Некоторые окрашенные минералы (турмалин, биотит, флогопит и др.) обладают способностью неравномерно поглощать свет в разных кристаллографических направлениях. Турмалин наиболее сильно поглощает световые колебания, происходящие в плоскости, поперечной к удлинению кристалла, биотит и флогопит — в плоскости спайности по третьему пинакоиду. В неполяризованном свете это свойство останется незаметным. Но если небольшой кристалл турмалина (1×2 мм), расшлифованный вдоль грани призмы, рассматривать через кристалл исландского шпата, то в уже знакомом двойном изображении прозрачной пластинки минерала можно наблюдать упомянутый эффект потемнения и просветления, происходящий в каждом изображении порознь при медленном вращении шлифа. Зерно турмалина будет в положении погасания в тот момент, когда плоскость наибольшего поглощения света совместится с плоскостью, в которой исландский шпат пропускает световые колебания. В этом положении зерно турмалина будет представлять как бы штору, которая поглощает свет, проникающий в исландский шпат, и своеобразный индикатор — в момент наибольшего затемнения кристалл турмалина своим коротким измерением указывает на положение плоскости световых колебаний поляризованной волны в исландском шпате** (рис. 7).

* Приведенное явление описывается формулой Малюса: $I = I_0 \cos^2 \alpha$. Интенсивность световой волны, выходящей из кристалла (I), пропорциональна интенсивности поляризованной волны, вступившей в кристалл I_0 и косинусу угла между плоскостями начальных колебаний волны и пропускаемой кристаллом (закон Малюса).

** Описанный опыт можно легко выполнить с любым прозрачным шлифом, содержащим турмалин. Для этого достаточно покрыть шлиф листом плотной бумаги, в которой предварительно проделано небольшое отверстие против зерна турмалина и сделаны пометки, указывающие на удлинение кристалла и направление спайности.

Анализируя приведенные наблюдения, можно сделать следующие выводы:

1. Световые волны, распространяющиеся в кристалле исландского шпата, являются поляризованными. Плоскости световых колебаний этих волн ориентированы под прямым углом друг к другу: колебания волны необыкновенного света происходят всегда в одной плоскости с кристаллографической осью высшего наименования, колебания волны обыкновенного света — всегда в плоскости, перпендикулярной первой.

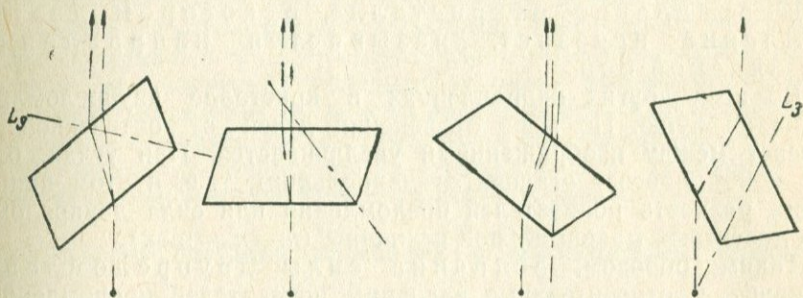
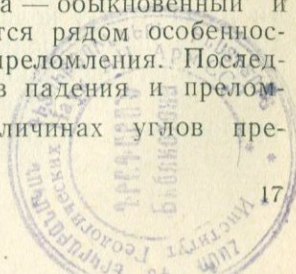


Рис. 8. Изменение относительных величин углов преломления лучей в исландском шпате в зависимости от направления распространения света в кристалле

2. Условия поляризации преломленного света в анизотропных кристаллах существенно отличаются от поляризации в изотропных средах. Если в изотропной среде положение плоскости поляризации преломленной волны определяется только положением плоскости падения света на границу раздела двух сред, то в анизотропном кристалле она определяется только положением его кристаллографических осей.

V. Если рассматривать точечное изображение через кристалл исландского шпата и наклонять кристалл так, чтобы лучи проходили через него в разных направлениях, то можно заметить, что расстояние между изображениями при этом меняется и что по мере приближения направление лучей к направлению оси высшего наименования L_3 расстояние между изображениями сокращается (рис. 8). Изображения могут даже слиться в одно. Это произойдет, когда лучи совпадут с направлением кристаллографической оси L_3 (или пройдут параллельно ей).

В анизотропном кристалле в каждом направлении, как это было нами установлено, проходят два луча — обыкновенный и необыкновенный. Каждый луч характеризуется рядом особенностей и, в частности, величиной показателя преломления. Последняя определяется отношением синусов углов падения и преломления ($n = \frac{\sin i}{\sin r}$). Поэтому различие в величинах углов пре-



ломления обыкновенного и необыкновенного лучей в данном случае можно рассматривать как критерий величины двупреломления: чем больше разница этих углов, или чем больше угол между лучами, тем больше величина двупреломления и, наоборот, чем меньше угол, тем меньше двупреломление.

В рассматриваемом опыте при определенном положении кристалла лучи совпадают. Момент, когда лучи, или пути распространения двух поляризованных волн в кристалле, совпадают, и различия в величинах показателей преломления, таким образом, исчезают, сила двупреломления равна нулю (при $n_e = n_o, n_e - n_o = 0$).

Направление в кристалле, в котором двупреломление исчезает, называется направлением оптической оси.

Во всех других направлениях в кристалле двупреломление не равно нулю. По мере отклонения лучей от оптической оси просвет между изображениями увеличивается. При углах, близких к 90° , просвет становится наибольшим, т. е. в этом направлении разность показателей преломления или сила двупреломления достигают максимальной величины ($n_e - n_o = \max$).

Таким образом, величина силы двупреломления, а значит, и относительные величины показателей преломления и скорости распространения волн непостоянны и изменяются в зависимости от направления прохождения света через анизотропный кристалл.

Обобщая наблюдения, произведенные в опытах с исландским шпатом, можно отметить следующие особенности оптики анизотропных кристаллов:

а) для анизотропных кристаллов характерно явление двупреломления — световая волна естественного света, проникая в кристалл, расщепляется на две образующие разные углы преломления. Волны распространяются с разными скоростями, им соответствуют разные величины показателей преломления:

б) световые волны по-разному преломляются в анизотропных кристаллах: одни подчиняются обычному закону преломления; они всегда распространяются в плоскости падения света, другие не подчиняются закону преломления — в общем случае они распространяются в преломляющей среде вне этой плоскости. Но по отношению к кристаллографическим осям те и другие занимают более четкое положение. Так, в исландском шпате и других одноосных кристаллах их лучи всегда находятся в одной плоскости с кристаллографической осью высшего наименования;

в) в анизотропных кристаллах распространяются волны поляризованного света: обе волны плоскополяризованные, плоскости их световых колебаний перпендикулярны друг другу и, кроме того, их ориентировка в кристалле строго связана с положением кристаллографических осей;

г) скорости распространения волн, величины показателей преломления и сила двупреломления изменяются в определенных

пределах, в зависимости от направления, по которому распространяется свет в анизотропном кристалле.

Из свойств анизотропных кристаллов, описанных выше, одни характеризуют явление оптической анизотропии вообще, в целом. К ним относятся двупреломление, поляризация света, взаимная ориентация плоскостей колебания световых волн, своеобразное преломления лучей и т. д. Другие, выражающие связь между направлениями световых колебаний и положением кристаллографических элементов, между величинами показателей преломления, силой двупреломления и направлением прохождения света через кристалл и т. д., характеризуют количественную сторону явления. На изучении последних основана минералого-петрографическая диагностика и кристаллооптическая систематика минералов, т. е. основные элементы методики исследования.

На общих закономерностях, определяющих изменение этих свойств, необходимо остановиться более детально.

Направления световых колебаний в анизотропных кристаллах

На примере исландского шпата установлено, что направления световых колебаний в кристаллах ориентированы закономерно. Колебания одних волн происходят в одной плоскости с главной кристаллографической осью, других — в плоскостях, перпендикулярных первым.

Если световые колебания волн, в любом направлении проходящих через кристалл исландского шпата, спроектировать на шаровую поверхность, описанную вокруг кристалла, то проекции направления колебаний расположатся так же, как градусная сетка на географическом глобусе (рис. 9, а). Пересечение меридиональных и широтных линий на этой поверхности указывает на главные направления световых колебаний волн обыкновенного и необыкновенного света, направленных в данную точку через центр кристалла (см. рис. 9). Широтные линии указывают на направление колебаний обыкновенной волны, а меридионально идущие линии — направление колебаний необыкновенной волны. Последние образуют на шаровой поверхности две полярные точки — точки общего их пересечения. Тем же точкам соответствуют проекции выходов кристаллографической оси высшего наименования. И, что очень важно, в оптическом отношении прямая, соединяющая эти точки, является единственным направлением в кристалле, в котором скорости распространения обеих волн равны, т. е. двупреломление не обнаруживается. Это очень характерное направление принято называть оптической осью кристалла.

Условные шаровые поверхности с нанесенными на них проекциями направлений световых колебаний в кристаллах называют скиндромами.

Кристаллы средних сингоний — тригональной, тетрагональной и гексагональной — имеют один и тот же вид скиндром. Он полностью соответствует воспроизведенному на рис. 9, а.

Для группы кристаллов средних сингоний характерно также то, что с направлением кристаллографической оси высшего наименования всегда совпадает оптическая ось кристалла.

Если воспользоваться тем же приемом и спроектировать на шаровую поверхность направления световых колебаний такого минерала, как биотит или мусковит, то полученные скиндромы

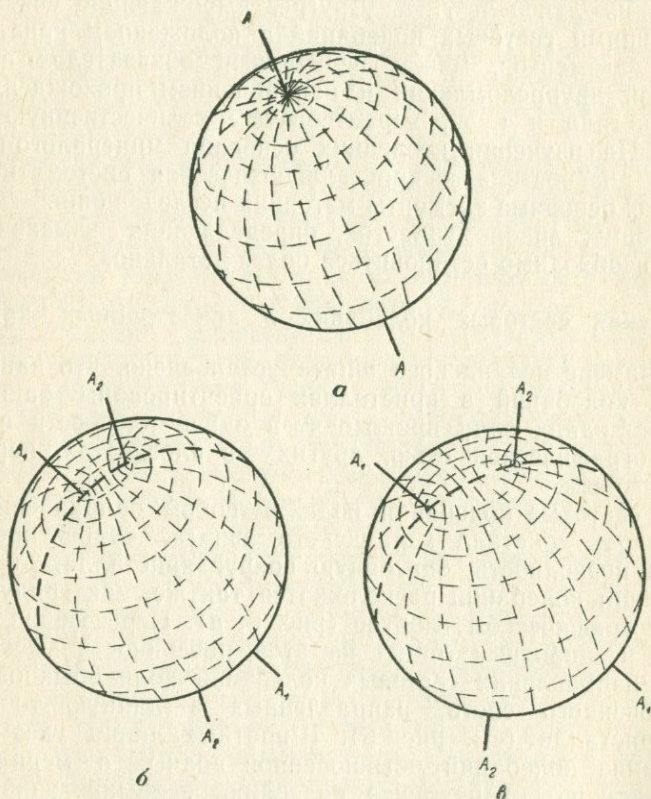


Рис. 9. Скиндромы одноосного кристалла (а) и двуосных кристаллов с разными углами оптических осей (б и в)

будут несколько отличны от приведенной. Разница станет особенно заметной, если рассматривать скиндромы минералов группы оливина, амфибола, пироксена, плагиоклазов и др. Все эти минералы образуют кристаллы низших сингоний — ромбической, моноклинной и триклинной.

В связи с более низким характером их симметрии направления световых колебаний в них подчиняются более сложной закономерности, а проекции колебаний на шаровой поверхности располагаются более сложным рисунком. Для скиндром этих кристаллов характерна одна особенность, имеющая принципиальное

значение: расположение линий скиндром на шаровой поверхности указывает на наличие не одной, а двух оптических осей (рис. 9, б и в), т. е. двух пересекающихся направлений, в которых двупреломление не обнаруживается.

По отношению к кристаллографическим осям оптические оси кристаллов ромбической сингонии расположены симметрично, но с ними не совпадают. В кристаллах моноклинной сингонии оптические оси расположены, как правило, в одной плоскости с кристаллографическими осями *a* и *c*. В кристаллах триклинной сингонии положение оптических и кристаллографических осей не связано какой-либо общей закономерностью, но в каждом кристалле их сорасположение подчиняется индивидуальным особенностям минерала и может рассматриваться как его диагностический признак.

Таким образом, по характеру распределения световых колебаний все анизотропные кристаллы делятся на две большие группы — на группу оптически одноосных кристаллов, в которую входят все кристаллы средних сингоний, и группу оптически двуосных кристаллов, в которую входят все кристаллы низших сингоний.

Изменение оптических свойств в зависимости от направлений в анизотропных кристаллах

В самом общем виде характер этих изменений был показан на примере исландского шпата. Установлено, что параметры оптической анизотропии кристалла меняются в зависимости от направления прохождения света в нем.

Однако в этом представлении остались неясными многие вопросы. Так, если с изменением направлений в кристалле меняются относительные величины показателей преломления и сила двупреломления, то как они меняются? Происходит ли это на общем фоне повышений или понижений их значений? В каких пределах изменяются величины? Как эти изменения происходят в двуосных и одноосных кристаллах и т. д.?

Вопрос о количественной стороне явлений и выяснение закономерностей, определяющих пределы колебания оптических свойств, является одним из наиболее сложных. Его решение возможно одним путем — систематическими замерами основной оптической константы — величин показателей преломления в характерных направлениях в кристалле, выяснением пределов, в которых меняются эти величины в зависимости от ориентировки плоскости световых колебаний и построением оптической модели кристалла.

Для проведения подобного исследования необходимо располагать средством для получения плоскополяризованного света и иметь возможность задавать его волне нужную ориентировку плоскости световых колебаний. Для этой цели пользуются спе-

циальными устройствами — поляризаторами или поляроидами, преобразующими обычный свет в плоскополяризованный с заранее известной ориентировкой плоскости световых колебаний.

Для изготовления поляризатора используют кристалл исландского шпата. По граням ромбоэдра из него выкалывается удлиненная призма. Она имеет форму косого параллелепипеда с удлинением 1:3,5. Естественный свет, проходя по оси такой призмы, расщепится на две плоскополяризованные волны, которым соответствуют разные показатели преломления. Величина одного из них (n_o) равна 1,658, другого (n_e) в этом направлении 1,515.

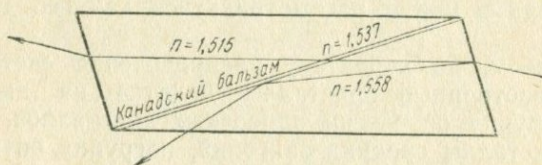


Рис. 10. Ход лучей в призме Николя

Однако обе волны, выйдя в пространство за кристаллом, распространяются параллельно, и их световые колебания, налагаясь, создают сложную волну частично поляризованного света и, таким образом, ослабляют поляризационный эффект друг друга. Возникает необходимость устранения одной из волн. Для этого поступают следующим образом.

Кристалл разрезается по диагонали и снова склеивается веществом, промежуточный показатель преломления которого между 1,658 и 1,515. Обычно для этой цели используют канадский бальзам — прозрачную смолу канадской пихты с показателем преломления около 1,54 (1,537).

Положение плоскости разреза по отношению к направлению распространения световых волн рассчитано так, что волна обыкновенного света подходит к ней под критическим углом. На границе с канадским бальзамом, т. е. при переходе из среды с более высоким показателем преломления (1,658) в среду с более низким (1,537), она испытывает полное внутреннее отражение и будет, таким образом, устранена и выведена из оптической системы (рис. 10).

Волна необыкновенного света с показателем преломления 1,515 проходит плоскость разреза с незначительным смещением и переходит во вторую половину кристалла, а далее — в пространство за кристаллом в заданном направлении (см. рис. 10). Световые колебания этой волны происходят перпендикулярно плоскости разреза кристалла.

Впервые подобным образом устроенная призма в качестве

поляризатора предложена английским ученым Николем (1828). Позже стали применять более компактные и совершенные призмы, но за поляризатором, основой которого является косорезанная призма исландского шпата, прочно сохранилось название «призма Николя», или просто николь.

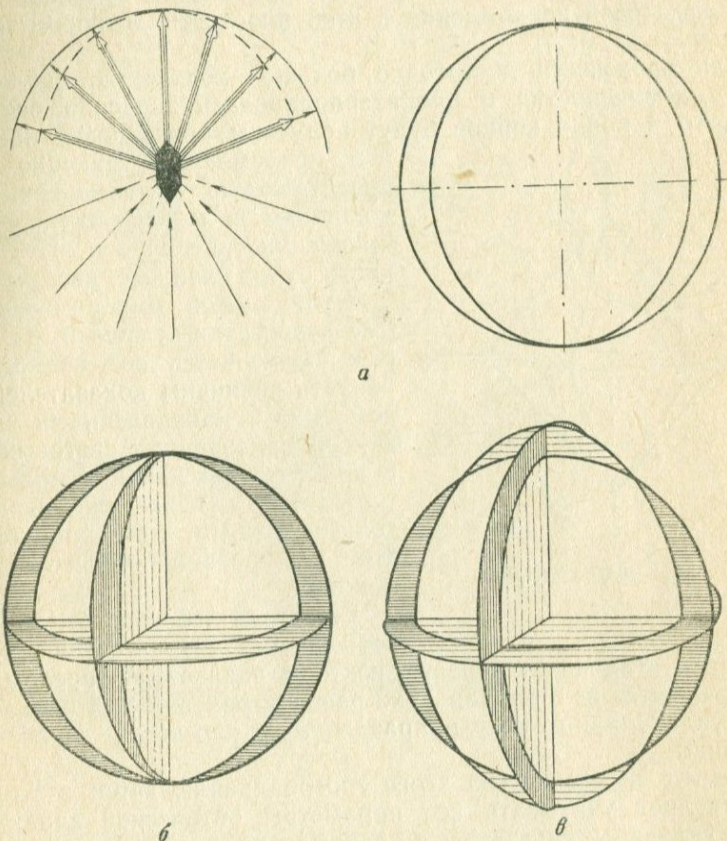


Рис. 11. Поверхности показателей преломления. Построение для одноосного кристалла (а). Общий вид поверхностей показателей преломления одноосного (б) и двуосного (в) кристаллов

С помощью поляризатора можно приступить к исследованию оптических свойств анизотропных кристаллов, к созданию оптической модели кристаллов.

Способов моделирования оптических свойств кристаллов существует несколько.

Исследуя условия прохождения света через кристалл в разнообразных направлениях, можно, например, откладывать измеренные величины показателей преломления в направлении распрост-

ранения световых волн в виде векторов (в связи с явлением дву-
 преломления в каждом направлении будет отложено два векто-
 ра). Если сделать достаточное количество замеров в какой-то
 одной плоскости, секущей кристалл, а затем концы векторов, ин-
 терполируя их значение, соединить плавными линиями, то будут
 получены замкнутые кривые, характеризующие изменение вели-
 чин показателей преломления в этой плоскости, в любом направ-
 лении (рис. 11, а).

Если произвести достаточно большое количество наблюдений
 в разных плоскостях и проинтерполировать значения всех век-
 торов, то в конце концов будут получены поверхности показате-
 лей преломления, дающие ясное
 представление об изменении этой
 константы в любом заданном на-
 правлении (рис. 11, б и в). Поверх-
 ности будут сложные, двойные.

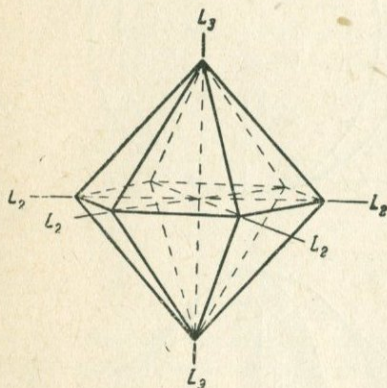


Рис. 12. Кристалл кварца

Этот способ имеет существен-
 ные недостатки, главный из кото-
 рых заключается в невозможности
 увязать величины показателей пре-
 ломления с направлениями колеба-
 ния поляризованных световых волн.
 В практических целях использовать
 такую модель кристаллов оказалось
 делом сложным, а без дополнитель-
 ных построений — просто невоз-
 можным.

Есть и другой способ. Он, как и
 первый, был разработан О. Френе-
 лем. Но в отличие от первого, векторы показателей преломления
 откладываются не в направлении распространения световой волны,
 а перпендикулярно этому направлению, в плоскости ее световых
 колебаний.

Главное преимущество этого способа заключается в том, что
 он позволяет учитывать все параметры оптической характерис-
 тики — величины показателей преломления и ориентировку плос-
 костей световых колебаний соответствующих им волн. Поверх-
 ности, построенные этим способом, более простые, однополостные.
 Это позволяет более простым путем установить основные законо-
 мерности, определяющие изменения оптических свойств в крис-
 таллах.

Применение описанного способа моделирования оптических
 свойств можно проиллюстрировать на примере сначала одноосно-
 го, а затем двуосного кристаллов.

В качестве одноосного кристалла можно использовать такой
 распространенный в природе минерал, как кварц. В кислых
 жильных и эффузивных породах он встречается в виде одиноч-
 ных, но иногда хорошо образованных бипирамидальных крис-

таллов (рис. 12), в которых легко распознаются кристаллографические оси. Кварц кристаллизуется в тригональной сингонии. Ось C , или третья кристаллографическая ось, является осью третьего порядка, перпендикулярно ей расположены три оси второго порядка.

Одна из осей второго порядка принимается за исходное направление.

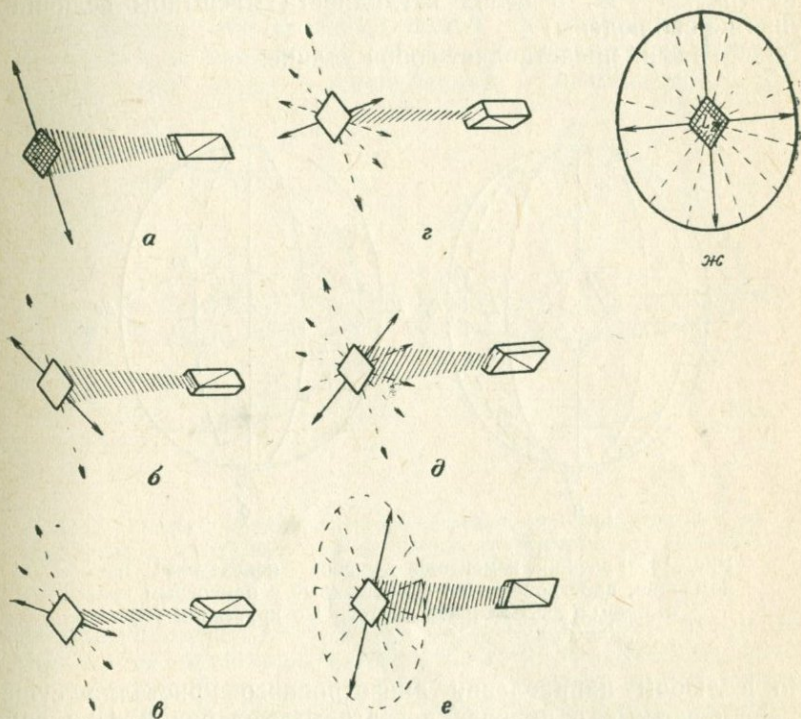


Рис. 13. Изменение величины показателя преломления в кристалле кварца в направлении оси L_2 в зависимости от ориентировки плоскости колебаний проходящего через кристалл поляризованного света (а—е). График показателей преломления в направлении L_2 и главные направления световых колебаний — оси эллипса

Проделаем следующее:

а) через кристалл в выбранном направлении пропустим плоскополяризованный свет;

б) в направлении световых колебаний замерим величину показателя преломления*;

в) отложим ее на бумаге в виде вектора в определенном масштабе параллельно плоскости световых колебаний перпендикулярно распространению световой волны (рис. 13);

* Величины показателей преломления минералов определяются с помощью иммерсионного метода.

г) не меняя положение кристалла, произведем те же операции для нескольких других положений николя (рис. 13, а—е);
 д) плавной линией соединим концы векторов.

В результате будет получена замкнутая кривая, представляющая собой график изменения величины показателя преломления для данного направления в кристалле в зависимости от изменения направления световых колебаний плоскополяризованной волны (рис. 13, ж; в целях наглядности масштабы величин на рисунке не соблюдены).

Такой график представляет собой эллипс.

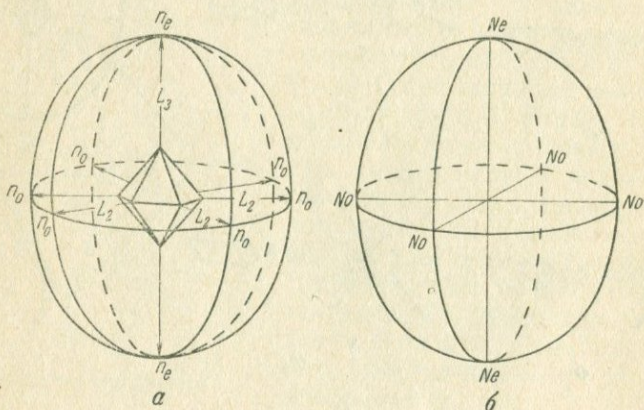


Рис. 14. Графики изменения величин показателей преломления, пространственно совмещенные с одноосным кристаллом (а). Индикатриса того же кристалла (б)

Но в любом направлении анизотропного кристалла существует два основных направления световых колебаний. Они ориентированы перпендикулярно одно другому, им соответствуют крайние величины показателей преломления. На графике они определены положением осей эллипса. Большой полуоси, направлению которой совпадает с ориентировкой кристаллографической оси высшего наименования (рис. 13, ж), соответствует значение показателя преломления необыкновенного луча n_e . Численно для этого минерала оно равно $n_e = 1,554$. Малой полуоси соответствует значение показателя преломления обыкновенного луча n_o , численно равное 1,545. Сила двупреломления для данного направления в кристалле равна разности полуосей $(n_e - n_o) = 1,554 - 1,545 = 0,009$.

Графики, построенные относительно других осей второго порядка, будут представлять собой эллипсы, подобные и равные данному.

Несколько отличным будет график, построенный для направления оси высшего наименования L_3 . В связи с тем что в этом

направлении обе волны распространяются с равными скоростями, $n_e = n_o$. График, построенный на равных радиусах-векторах, будет представлять окружность с радиусом n_o .

Графики, построенные для произвольного направления в кристалле, например для направления перпендикуляра, восстановленного из центра S к грани пирамиды, будет иметь вид эллипса с радиусами-векторами $n_o = 1,545$ и $n_e < 1,554$.

Итак, графики, характеризующие изменение величин показателей преломления, построенные относительно кристаллографических осей кварца, представляют собой три одинаковых по размерам эллипса и окружность. Пространственно совмещенные с кристаллом, они дают определенную комбинацию фигур (рис. 14, а).

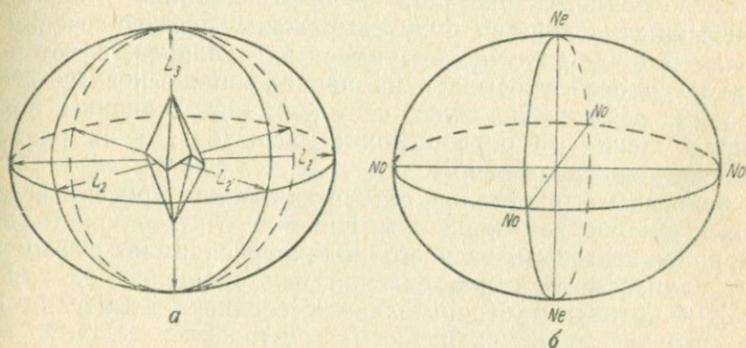


Рис. 15. Графики показателей преломления, пространственно совмещенные с одноосным отрицательным кристаллом (а). Индикатриса того же кристалла (б)

Поверхность, описанная вокруг этой комбинации фигур, представляет собой эллипсоид вращения, т. е. поверхность, которая может быть получена путем вращения эллипса вокруг одной из осей. У кварца она имеет форму, удлиненную в направлении оси высшей наименования, которая является осью вращения (рис. 14, б).

Если произвести те же исследования и построения для другого тригонального кристалла, для кальцита, то можно установить, что показатели преломления его имеют значения $n_o = 1,658$, $n_e = 1,486$, а поверхность, описанная вокруг комбинации исходных фигур, представляет также эллипсоид вращения, но, в отличие от первого, сплюснутый в направлении оси вращения (рис. 15, а).

Поверхности, построенные тем же способом для других кристаллов тригональной, тетрагональной или гексагональной сингоний, будут отличаться только относительными размерами эллипсоидов и степенью их сплюснутости или вытянутости в направлении оси вращения, но форма их будет одна и та же — эллипсоид вращения.

Оптическая индикатриса

Поверхность (см. рис. 14 и 15), построенная на векторных величинах показателей преломления кристалла, отложенных в направлении световых колебаний плоскополяризованной волны перпендикулярно ее распространению в кристалле, называется оптической индикатрисой.

Индикатриса есть геометрическое выражение закономерностей изменения оптических свойств всего кристалла в целом и в любой его элементарной ячейке, т. е. его оптическая модель. Ее положение и ориентировка в кристалле увязаны с направлением кристаллографических осей.

Пользуясь индикатрисой, можно вычислить оптические свойства анизотропного кристалла в любом заданном направлении. Графически эти свойства будут выражены формой сечения индикатрисы. В общем случае оно имеет вид эллипса, в котором положение его осей указывает на направление основных световых колебаний, размеры радиусов-векторов — на величины показателей преломления (в определенном масштабе), а их разность — на величину двупреломления.

У одноосных кристаллов оптическая индикатриса всегда имеет форму эллипсоида вращения. Принято считать кристалл оптически положительным, если его индикатриса имеет форму эллипсоида, удлиненного в направлении оси вращения (у кристалла $n_e > n_o$) и оптически отрицательным, если его эллипсоид сплюснут в направлении оси вращения ($n_e < n_o$).

Примером оптически положительного кристалла является кварц, оптически отрицательного — кальцит (см. рис. 14 и 15).

Эллипсоид вращения как геометрическое тело имеет оси симметрии: ось вращения, которая является осью симметрии бесконечного порядка, и бесконечное множество осей симметрии второго порядка, лежащих в плоскости наибольшего кругового сечения и являющихся его диаметрами.

Эти оси симметрии принято называть осями индикатрисы и обозначать аналогично показателям преломления, но заглавными буквами: ось N_o , ось N_e .

У индикатрисы одноосного кристалла различают следующие характерные сечения и направления:

а) главное сечение индикатрисы (сечение, ориентированное вдоль оптической оси) — плоскость симметрии, в которой лежат обе оси индикатрисы N_o и N_e . По форме оно представляет собой эллипс с полуосями, равными n_o и n_e , поэтому разрез кристалла, параллельный ему, характеризуется наибольшей величиной двупреломления. У одноосного кристалла таких сечений может быть бесконечное множество;

б) круговое сечение (сечение, перпендикулярное оптической оси), плоскость симметрии, с которой совпадает сечение наибольшего круга эллипсоида, радиусом его является n_o . Разрез кристалла, параллельный этому сечению, не обнаруживает двупре-

ломления; это сечение оптически изотропно. У эллипсоида вращения такое круговое сечение единственно;

в) направление оптической оси (всегда перпендикулярно круговому сечению). В одноосном кристалле оно всегда совпадает с направлением кристаллографической оси высшего наименования, а в индикатрисе одноосного кристалла — с осью Me . Оптические свойства кристалла в этом направлении определяются свойствами кругового сечения.

Любое произвольное сечение индикатрисы, за исключением направления, перпендикулярного оптической оси, представляет собой эллипс с радиусами-векторами, из которых один всегда равен n_o , другой n_e или имеет промежуточное значение между n_o и n_e (и тогда его следует именовать n_e').

До сих пор речь шла об одноосных кристаллах.

Тот же способ построения модели можно применить и при исследовании двусосных кристаллов, ромбических, моноклинных и триклинных. Наиболее простые соотношения оптических и геометрических свойств наблюдаются в кристаллах ромбической сингонии.

В качестве примера для подробного рассмотрения по ряду причин лучше всего взять такой ромбический минерал, как арагонит.

Арагонит относится к группе карбонатов и имеет тот же состав, что и кальцит. Его кристалл характеризуется наличием трех осей симметрии второго порядка, расположенных взаимно перпендикулярно и совпадающих с кристаллографическими осями, трех плоскостей симметрии и центра ($3L_23PC$).

Если произвести систематические исследования изменения показателей преломления в главных кристаллографических направлениях арагонита, то выяснится важная особенность: в зависимости от направления в кристалле изменяются и верхний, и нижний пределы величин показателей преломления. Другими словами, ни один из поляризованных лучей в исследуемом кристалле не является обыкновенным.

В этом принципиальное отличие двусосных кристаллов от одноосных.

Графики изменения величин показателей преломления, построенные относительно кристаллографических осей арагонита, будут представлять три разновеликих эллипса с величинами полуосей, численно равными: 1,530—1,685; 1,530—1,680; 1,680—1,685 (рис. 16).

Пространственно совмещенные с кристаллом, они дадут определенную комбинацию фигур. Поверхность, описанная вокруг нее, будет представлять эллипсоид. Но в отличие от эллипсоида вращения, характерной формы для одноосных кристаллов, это — трехосный эллипсоид, сфероидальная поверхность с тремя взаимно перпендикулярными осями, образующими выходы в точках пересечения исходных фигур (рис. 17).

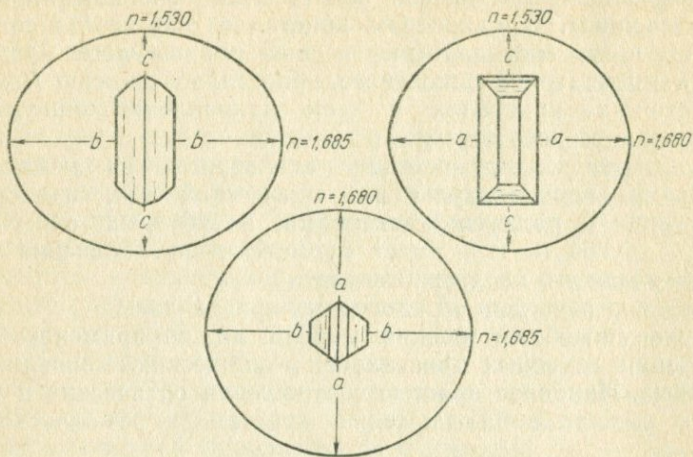


Рис. 16. Графики изменения величин показателей преломления, построенные относительно кристаллографических осей ромбического кристалла (аргонита)

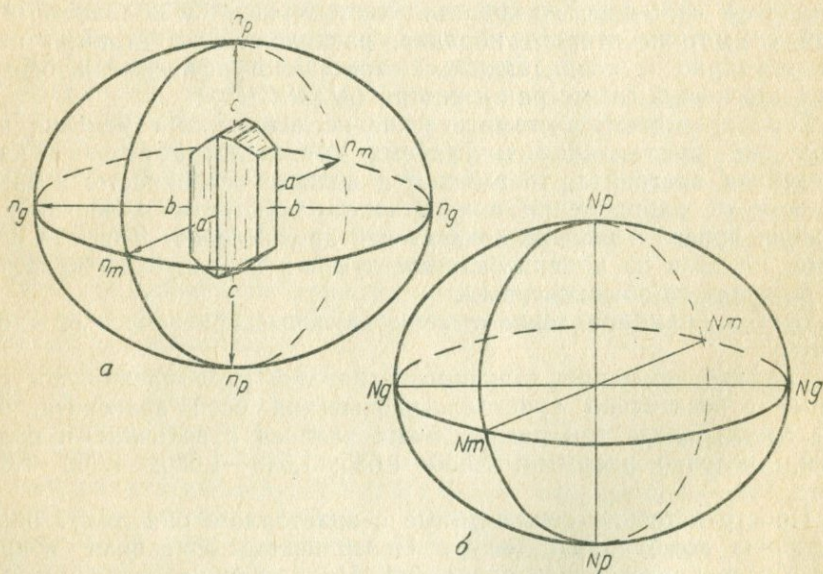


Рис. 17. Графики изменения величин показателей преломления, пространственно совмещенные с двусным кристаллом (а). Индикатриса того же кристалла (б)

Трехосный эллипсоид не является фигурой вращения.

Таким образом, первое и основное отличие индикатрисы двуосного кристалла от одноосного заключается в том, что она имеет три взаимно перпендикулярные оси разной величины.

В основу различия показателей преломления положен также иной признак. Наибольший из них всегда называется n_g (*grand* — большой, франц.), наименьший — n_p (*petit* — малый) и промежуточный — n_m (*moyen* — средний). Соответственно показателям преломления оси индикатрисы обозначаются как N_g , N_p и N_m . В примере с арагонитом расположение осей индикатрисы показано на рис. 17.

Второй отличительной особенностью индикатрисы кристаллов низших сингоний является своеобразие ее ориентировки относительно кристаллографических осей.

В разобранном выше примере в ромбическом кристалле наблюдается четкое совпадение осей индикатрисы с направлением кристаллографических осей. Иное явление наблюдается в кристаллах моноклинной и триклинной сингоний.

Так, если для моноклинного минерала, например для пироксена, построить график изменения величин показателей преломления относительно второй кристаллографической оси, то он будет иметь обычный вид (рис. 18). Однако в привычных контурах этой оптической схемы есть деталь, которая невольно обращает на себя внимание: оси эллипса не совпадают с кристаллографическими осями (первой — a и третьей — c), хотя и лежат с ними в одной плоскости. Серия графиков, построенных относительно первой и третьей осей кристалла и любых дополнительных направлений, подтверждает отмеченную особенность и уточняет ее: в моноклинном кристалле только одна кристаллографическая ось совпадает с осью индикатрисы — обычно это оси b и N_m . Две другие оси кристалла — a и c — не совпадают с N_g и N_p , но лежат с ними в одной плоскости (рис. 19, а).

В кристаллах триклинной сингонии связь между оптически и кристаллографическими элементами еще более сложная. Так, графики изменения показателей преломления, построенные относительно осей такого триклинного кристалла, как плагиоклаз, показывают, что ни одна из осей индикатрисы не совпадает ни с одной из кристаллографических осей (рис. 19, б).

Трехосный эллипсоид как геометрическое тело имеет три оси симметрии второго порядка — три оси индикатрисы, расположен-

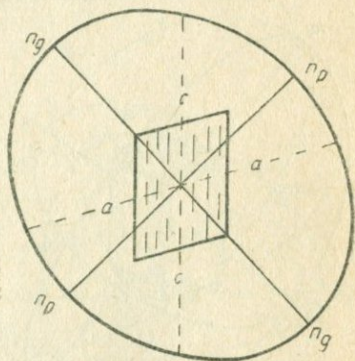


Рис. 18. График изменения показателей преломления, построенный относительно второй кристаллографической оси моноклинного кристалла (пироксена).

ные взаимно перпендикулярно, три плоскости симметрии — три взаимно перпендикулярных сечения, в которых попарно лежат оси индикатрисы. Эти характерные, или главные, сечения называются соответственно лежащим в их плоскости осям: сечениями $NgNp$, $NgNm$ и $NpNm$.

Любое сечение трехосного эллипсоида в общем случае представляет собой эллипс. Физический смысл этого положения заключается в том, что в любом произвольном сечении двуосного кристалла можно определить главные направления световых ко-

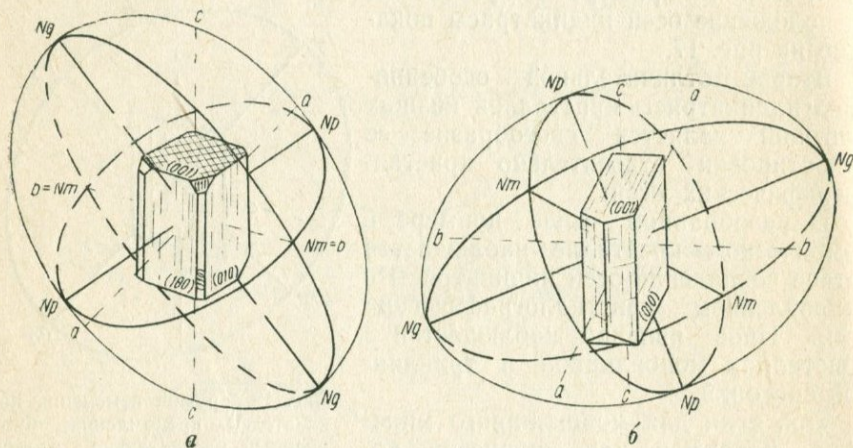


Рис. 19. Ориентировка оптической индикатрисы в моноклинном (а) и триклинном (б) кристаллах

лебаний, величины показателей преломления и дупреломления. Исключение представляют только два возможных направления, два симметрично расположенных в эллипсоиде и пересекающихся сечения, имеющих формы кругов. Положения этих сечений можно рассчитать математически, но нетрудно установить и из графических построений.

Так, размеры и форма сечения $NgNp$ определяются величиной радиусов-векторов n_g и n_p , имеющих крайние для данного эллипсоида значения. Если в этой плоскости построить серию векторов с промежуточными значениями, то два из них будут обязательно равны n_m . Но перпендикулярно к $NgNp$, а стало быть и к этим векторам, расположена ось эллипсоида, также численно равная n_m (ось Nm). Иначе говоря, в двух возможных сечениях эллипсоида два взаимно перпендикулярных радиуса-вектора будут равны n_m . Такие сечения представляют собой круги. Кристалл, разрезанный параллельно круговому сечению, выглядит под микроскопом изотропным. Как и в одноосном кристалле, этой особенностью отличаются характерные направления — направления оптических осей. Эти оси ориентированы перпендикулярно круго-

вым сечениям и лежат в одной плоскости с осями индикатрисы Ng и Np , которые являются биссектрисами образованных оптическими осями углов.

Острый угол между оптическими осями принято называть углом $2V$. Он является важной диагностической константой.

В зависимости от того, какая из осей индикатрисы — Ng или Np — является биссектрисой острого угла $2V$, определяется оптический знак двусного кристалла. Кристалл считается оптически положительным, если биссектрисой острого угла $2V$ является Ng , и оптически отрицательным, если биссектрисой является Np (рис. 20). Кристалл считается оптически нейтральным, если угол $2V$ равен 90° .

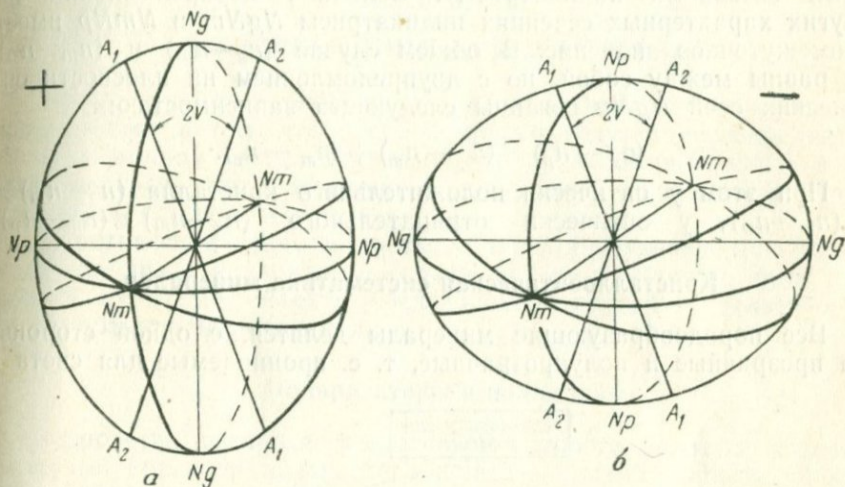


Рис. 20. Индикатрисы оптически положительного (а) и отрицательного (б) двусных кристаллов.

Между параметрами трехосного эллипсоида — величинами n_g , n_p и n_m — и величиной $2V$ существует аналитическая зависимость, определяемая следующей формулой:

$$\operatorname{tg} V = \pm \frac{n_g}{n_p} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_m^2}}.$$

При оценке величин углов $2V$ принята следующая градация: угол $2V$ считается малым, если он не превышает 30° , средним, если величина его колеблется от 30 до 60° , и большим — от 60 до 90° .

Радиусы круговых сечений трехосного эллипсоида численно равны n_m . Естественно, что направление оси индикатрисы Nm определяется следом пересечения круговых сечений.

По построению эллипсоида ось Nm является перпендикуляром к оси Ng и Np , а следовательно и к оптическим осям A_1 и A_2 , лежащим с последними в одной плоскости. В связи с этим ось Nm принято называть оптической нормалью двусного кристалла.

В двусных кристаллах в связи с более сложным распределением световых колебаний характер двупреломления представляет также более сложную картину по сравнению с одноосными кристаллами. Максимальной величины двупреломление достигает на разрезе кристалла, параллельном плоскости оптических осей, или на сечении $NgNp$ (см. рис. 16—17, $n_g - n_p = \max$).

Двупреломление отсутствует на разрезах, перпендикулярных оптическим осям (на разрезах кристалла, совпадающих с круговыми сечениями индикатрисы). Величина двупреломления на других характерных сечениях индикатрисы $NgNm$ и $NmNp$ имеет промежуточное значение. В общем случае $(n_g - n_m)$ и $(n_m - n_p)$ не равны между собой, но с двупреломлением на плоскости оптических осей $NgNp$ связаны следующей зависимостью:

$$(n_g - n_p) = (n_g - n_m) + (n_m - n_p).$$

При этом у оптически положительного кристалла $(n_g - n_m) > (n_m - n_p)$, у оптически отрицательного $(n_g - n_m) < (n_m - n_p)$.

Кристаллооптическая систематика минералов

Все породообразующие минералы делятся, с одной стороны, на прозрачные и полупрозрачные, т. е. проницаемые для света в

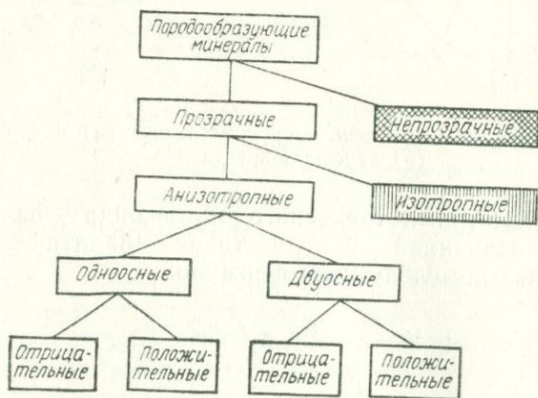


Рис. 21. Систематика породообразующих минералов по оптическим свойствам

тонком срезе при толщине кристаллической пластинки 0,03 мм и с другой — непрозрачные, рудные и некоторые нерудные минералы, не проницаемые для света даже в тонком срезе (рис. 21).

Непрозрачные минералы изучаются в отраженном свете. Методика их исследования излагается в курсе минераграфии.

Прозрачные минералы делятся на анизотропные и изотропные.

Изотропные минералы отличаются друг от друга только величиной показателя преломления. Таким образом, излагаемая методика исследования имеет к ним ограниченное применение. Так же, как и непрозрачные, они в дальнейшей систематизации не рассматриваются*.

Анизотропные минералы делятся на оптически одноосные и двуосные. А каждая из этих групп, в свою очередь, делится на оптически положительные и оптически отрицательные.

Глава вторая

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП

Принципиальная особенность поляризационного микроскопа заключается в том, что с его помощью ведутся исследования в поляризованном свете. Для преобразования обычного света в поляризованный поляризационный микроскоп снабжается двумя николями, или поляроидами.

В оптической схеме микроскопа николи установлены так, что один из них — поляризатор — расположен на участке пути светового пучка до объекта исследования, другой — анализатор — после объекта исследования.

Поляризаторы и поляроиды

Устройство поляризатора, основой которого является косорезанный кристалл исландского шпата — призма Николя, — было изложено выше.

Впервые призмы Николя были применены в 1834 г. Г. Тальботом, создавшим первый поляризационный микроскоп.

В настоящее время призма Николя почти не используется в микроскопической оптике, так как она имеет ряд существенных недостатков: а) слишком малый апертурный угол поляризации, равный 28° , б) невозможность в скрещенных николях получить полное погашение по всему полю зрения (полная темнота устанавливается только в пределах определенной полосы), в) параллельное смещение пучка лучей, падающих на призму (несовпадение выходящего из призмы пучка лучей с ее продольной осью) создает неудобства в работе.

* Методика исследования изотропных кристаллов не разработана в связи с тем, что их свойства недостаточно изучены. Ясно пока одно — оптические свойства кристаллов кубической сингонии нельзя отождествлять с аморфными веществами, стеклами и т. д. Ряд исследователей относят их к так называемым квазиизотропным системам. Это и не удивительно: будучи исследованными методом ультразвука, — микротвердости и т. д., они нередко обнаруживают анизотропию.

Более удобны и почти лишены этих недостатков призмы Франка—Риттера, Глена—Томсона, Осипова и др. К числу наиболее компактных, обладающих апертурным углом до 40° относятся двойные призмы Франка—Риттера и Аренса, которые и используются в настоящее время. Оригинальной конструкции поляризаторы были предложены Е. С. Федоровым и Е. Е. Флинтом.

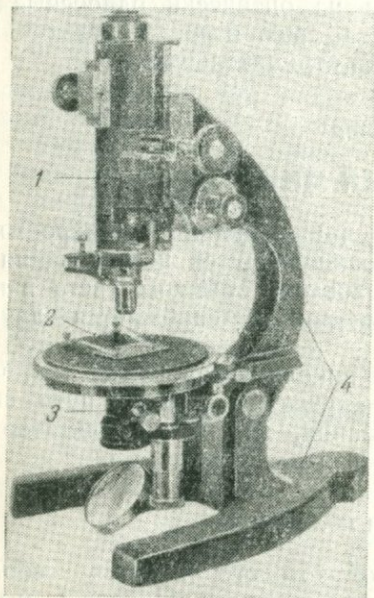


Рис. 22. Поляризационный микроскоп МП-7

1 — тубус; 2 — столик микроскопа; 3 — осветительное устройство; 4 — штатив

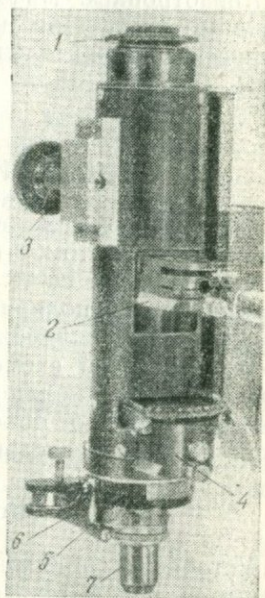


Рис. 23. Окуляр, линза Бертрана, верхний николю и объектив в тубусе

1 — окуляр; 2 — линза Бертрана; 3 — кремальерный винт линзы Бертрана; 4 — верхний николю; 5 — прорез для компенсатора; 6 — шиповый зажим объектива; 7 — объектив

Принцип действия поляризатора сводится к использованию явления полного внутреннего отражения для вывода из оптической системы одного из поляризованных лучей — луча обыкновенного.

На ином принципе основано действие другого поляризующего устройства — поляроида. Некоторые естественные образования, например кристаллы турмалина, и искусственные соединения, например некоторые виды полииодидов, будучи веществами анизотропными, обладают резко выраженным свойством дихроизма, т. е. способностью пропускать без поглощения одну из поляризованных волн — волну обыкновенного света — и сильно, почти

полностью, поглощать другую поляризованную волну — волну необыкновенного света.

Поляроиды появились в 20-х годах XX века.

В микроскопической оптике в качестве поляроидов применяют пленки полииодида сульфата хинина — герпатит (по имени английского ученого Герпата) и пленки полииодида поливинилового спирта. Герпатит образует кристаллы гексагональной сингонии. В вязкой среде его субмикроскопические кристаллы при определенных условиях располагаются параллельно даже в тончайшей пленке. Полная поляризация света достигается при толщине пленки всего в 5 мкм.

Полиидид поливинилового спирта получают путем обработки йодом горячей пленки поливинилового спирта, подвергнутой сильному растяжению в одном направлении.

Поляроиды имеют апертурный угол поляризации до 120° . Для их изготовления не требуется остродефицитное оптическое сырье, площадь поляроидной пленки может измеряться десятками квадратных сантиметров. Незначительное поперечное сечение позволяет легко вводить поляроид в любую оптическую схему, не усложняя конструкции.

Вместе с тем они имеют ряд недостатков: а) неодинаковая поляризация света в пределах видимой области спектра. Особенно заметно ослабление поляризации происходит на границе красной и инфракрасной частей спектра, в связи с чем скрещенные поляроиды иногда придают полю зрения синеватый, лиловатый или даже красноватый цвета; б) поляроиды сильнее, чем поляризаторы, поглощают свет — от 60 до 70%; в) не выдерживают длительного нагревания свыше 95°C .

В поляризационных микроскопах поляроиды обычно применяются в сочетании с николями. При этом поляроид используется как анализатор.

Главные части поляризационного микроскопа

Поляризационный микроскоп снабжен рядом дополнительных устройств и приспособлений, необходимых для проведения специальных исследований. Он состоит из следующих главных частей: тубуса, вращающегося столика, осветительного устройства и штатива.

Тубус микроскопа. Тубус представляет собой цилиндрическую трубу, на которой укреплены объектив, окуляр, дополнительная линза (линза Бертрана) и один николь-анализатор (рис. 23).

Окуляр состоит из цилиндрической обоймы, в которой закреплена система линз. Между линзами в фокальной плоскости окуляра на кольце имеются две скрещенные тонкие нити (рис. 24). В окулярах, предназначенных для измерения размеров микрообъектов, на месте креста нитей монтируется специальная линейка. В окулярах, предназначенных для производства мине-

ралоогических подсчетов, на этом же месте укрепляется специальная сетка. Микроскоп снабжен набором окуляров. Наиболее употребительны окуляры с пяти-, восьми-, двенадцати с половиной и семнадцатикратными увеличениями.

Крест нитей (линейку или сетку) можно установить по глазу. Верхняя линза соединена с ободкой окуляра подвижно; приподнимая ее ввинчивающим движением над крестом нитей или опуская, можно добиться наиболее резкой видимости нитей.



Рис. 24. Окуляры

1 — ободка; 2 — верхняя фокусируемая линза; 3 — фиксирующий винт окуляра

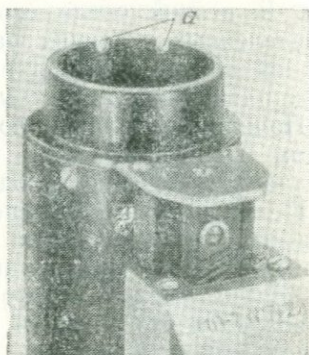


Рис. 25. Верхняя торцовая часть тубуса

a — выточка для фиксирующего винта окуляра

Окуляр в тубусе микроскопа может иметь два положения. В первом положении крест нитей расположен прямо, т. е. одна нить ориентирована в плоскости симметрии микроскопа, а другая перпендикулярна ей. Во втором положении крест нитей расположен под углом 45° к первому положению. Для изменения положения окуляра используют винт, находящийся в верхней части его ободки; головка винта всегда остается над поверхностью ободки. В торцовой части тубуса имеются две выточки, расположенные под углом 45° одна к другой. Входя в одну из выточек, головка винта жестко фиксирует окуляр в том или ином положении (рис. 25).

Линза Бертрана является дополнительным устройством и применяется при исследовании минералов в сходящемся свете. Она монтируется в особых салазках, которые свободно перемещаются в горизонтальном направлении в прорезе тубуса под окуляром. В пластинке салазок два отверстия. Одно из них свободное, через него проходит свет, когда линза выключена. В другом находится сама линза Бертрана с диафрагмой и центрирующими винтами (рис. 26). Для фокусировки линзы Бертрана служит кремальберный винт, укрепленный на тубусе (см. рис. 23).

Верхний николю, или анализатор, находится в тубусе микроскопа. Он, так же как и линза Бертрана, монтируется в

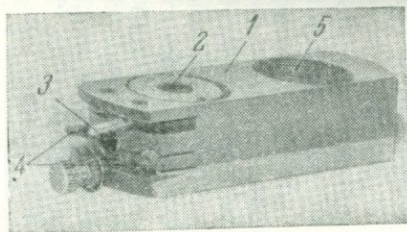


Рис. 26. Линза Бертрана

1 — оправа линзы; 2 — гнездо; 3 — рычаг диафрагмы; 4 — центрировочные ключи линзы; 5 — сквозное отверстие в оправе (для положения «линза выключена»)

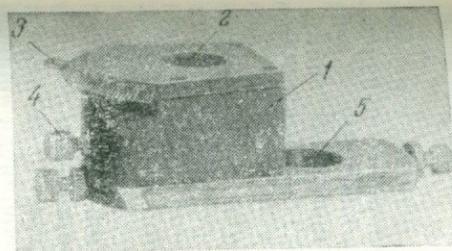


Рис. 27. Верхний николь (анализатор) в оправе

1 — оправа николя; 2 — гнездо; 3 — поворотный рычаг николя; 4 — фиксатор поворота; 5 — сквозное отверстие в оправе (для положения «николь выключен»)

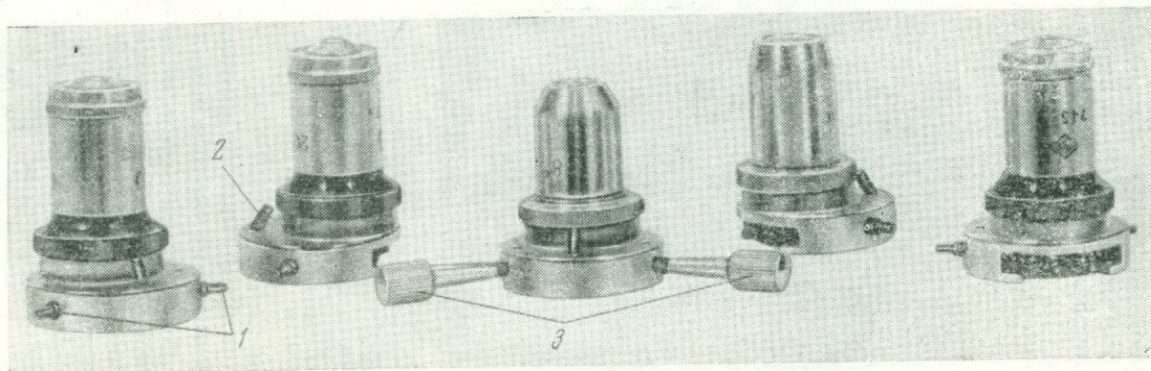


Рис. 28. Объективы:

1 — центрирующие винты; 2 — косой винт; 3 — центрировочные ключи, надетые на винты

специальных салазках и в процессе работы может быть введен или выведен из оптической системы микроскопа (рис. 27). Обычно верхний николю фиксируется неподвижно, но в микроскопах МИН-5, МИН-7, МИН-8 и МП-7 николю можно повернуть на 90° вокруг вертикальной оси специальным рычажком.

Объектив. Объектив представляет собой систему линз, смонтированную в цилиндрической оправе. Оправа привинчивается к подковообразному держателю, снабженному двумя центрировочными винтами и одним косым установочным винтом.

В микроскопах отечественного производства объективы крепятся к тубусу щипцовым зажимом (см. рис. 23, б). Зажим смонтирован в нижней части тубуса, а в торце тубуса находится кольцевой паз с конической расточкой.

Чтобы установить тот или иной объектив, надо зажать пальцами левой руки щипцовый зажим, а правой рукой — объектив. Объектив держат подковообразной пластиной вверх, линзой — вниз. Выемку в подковообразной пластине справа надевают на кольцевой паз тубуса и объектив поворачивают так, чтобы косой винт вошел в расточку щипцового зажима. После этого щипцовый зажим отпускают, в таком положении объектив будет прочно закреплен на тубусе. К кольцевому пазу тубуса он прижат пружинной щипцового зажима и прикасается к нему

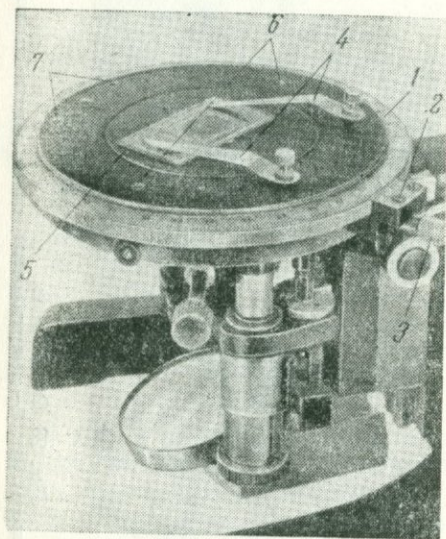


Рис. 29. Столик микроскопа
1 — градуированный лимб столика; 2 — но-
ниус; 3 — стопорный винт столика; 4 —
съемные зажимы — держатели шлифа; 5 —
съемное кольцо; 6 — гнезда для винтов
столика Федорова; 7 — гнезда для кресто-
образного подвижного столика

двумя центрирующими винтами. При центрировке, вращая винты, можно смещать ось объектива относительно оси тубуса на некоторое угловое расстояние в любую сторону. При смене объективов снятый объектив убирается в специальный ящик или ставится на стол подковообразной пластиной вниз, линзой вверх (рис. 28).

Микроскоп снабжен набором объективов. Микроскопы марок МП-2, МП-3 и МП-7 имеют объективы с увеличением: 3; 8; 20; 40 и 60-кратным (рис. 29). Микроскопы МИН-4 и МИН-5 имеют увеличения 3,7; 9; 20; 40 и 60-кратное.

Столик микроскопа. Столик микроскопа имеет круглую форму, он свободно вращается вокруг мнимой оси. Внешняя часть столика, его лимб, проградуирован через каждый градус с оциф-

ровкой через десять градусов. Для удобства измерения углов поворота и взятия отсчетов справа и слева (реже — с одной стороны) расположены нониусы (рис. 29), позволяющие брать отсчеты с точностью до $0,1^\circ$, т. е. до $6,0'$. Столик может быть закреплён в любом положении стопорным винтом, расположенным обычно под левым нониусом. Для закрепления препарата на столике имеются два зажима.

Для точных кристаллооптических исследований на столике микроскопа укрепляют столик Федорова, для чего предусмотрено внутреннее съёмное кольцо и гнезда для винтов.

Осветительное устройство и штатив. Осветительное устройство находится под столиком микроскопа. Оно состоит из нижнего николя или поляризатора, сменных конденсорных линз, диафрагмы, специальной подвижной короткофокусной линзы или линзы Лазо и двухстороннего плоско-вогнутого зеркала (рис. 30).

Поляризатор размещается в специальной цилиндрической обойме, в которой его можно поворачивать вокруг вертикальной оси на любой угол и в любом положении фиксировать стопорным винтом. Поворотом николя изменяется направление пропускаемых им световых колебаний. Над поляризатором расположена диафрагма. Она служит для ограничения поперечного сечения светового потока.

В микроскопах МИН-4 и МИН-5 под поляризатором установлена вторая диафрагма. Выше поляризатора и диафрагмы укреплена линза Лазо, которая используется для получения сходящегося света. Линза Лазо может быть введена в оптическую систему микроскопа или выведена из нее посредством специального рычага. Все осветительное устройство можно поднимать или опускать при помощи подъемного винта. В микроскопах МП-2 и МП-3 подъемный винт расположен вертикально и помещен с левой стороны, в моделях МИН-4 и МИН-5 винт горизонтальный и расположен справа.

Под осветительным устройством установлено отражательное зеркало, предназначенное для того, чтобы направлять пучок све-

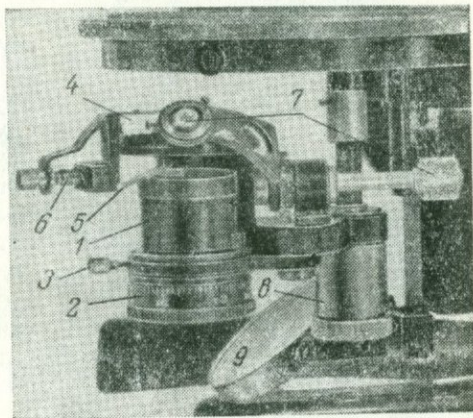


Рис. 30. Осветительное устройство микроскопа (опущено вниз до конца и выведено из-под столика)

1 — обойма поляризатора; 2 — градуировочное кольцо поляризатора; 3 — его стопорный винт; 4 — сменная конденсаторная линза; 5 — рычаг ирисовой диафрагмы; 6 — винт щелевой диафрагмы; 7 — линза Лазо (в положении «выключено») и ее рычаг; 8 — винт подъема осветительного устройства; 9 — зеркало

та от осветителя в систему микроскопа. Зеркало двухстороннее плосковогнутое, его можно свободно ориентировать и устанавливать под любым углом к оптической оси микроскопа.

Штатив состоит из двух частей — массивной подковообразной опоры и шарнирно закрепленной на ней ручки-держателя. На последней укреплены все подвижные части микроскопа: тубус, столик и осветительное устройство (рис. 31).

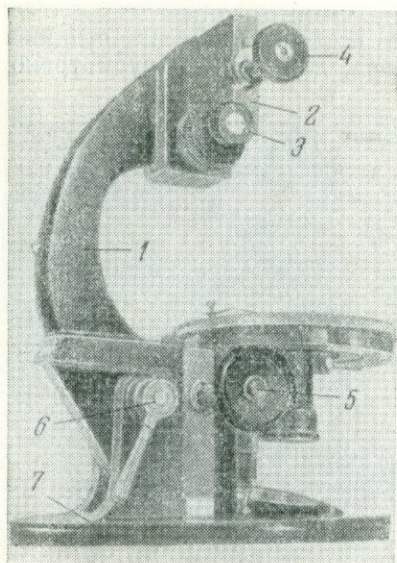


Рис. 31. Штатив микроскопа

1 — подвижная ручка—держатель штатива; 2 — промежуточная пластина; 3 — микрометрический винт фокусировки; 4 — винт грубой фокусировки; 5 — винт подъема столика; 6 — стопорный винт штатива; 7 — опора штатива

руйство и зеркало. Для удобства работы ручка-держатель микроскопа может быть наклонена к исследователю под необходимым углом и закреплена в этом положении стопорным винтом.

Новые модели отечественных поляризационных микроскопов

За последние годы отечественным приборостроением созданы новые совершенные модели поляризационных микроскопов. В них оригинально решены некоторые конструктивные вопросы, имеются дополнительные устройства и усовершенствования.

Одним из таких микроскопов является МИН-8. Он имеет следующие конструктивные особенности, отличающие его от всех прежних моделей (рис. 32).

1. Тубус микроскопа укреплен неподвижно на тубусодержателе, он не поднимается и не опускается и имеет постоянный угол

наклона к основанию. Тубус разъемный, его верхняя наклонная часть (наклонная насадка) может быть повернута вокруг вертикальной оси на любой угол и закреплена в этом положении.

2. Столик микроскопа расположен горизонтально. Для того чтобы сфокусировать объект исследования, столик надо опустить или поднять. Подъем и опускание столика производится двумя винтами — винтом грубой наводки и винтом точной фокусировки (микрометренным).

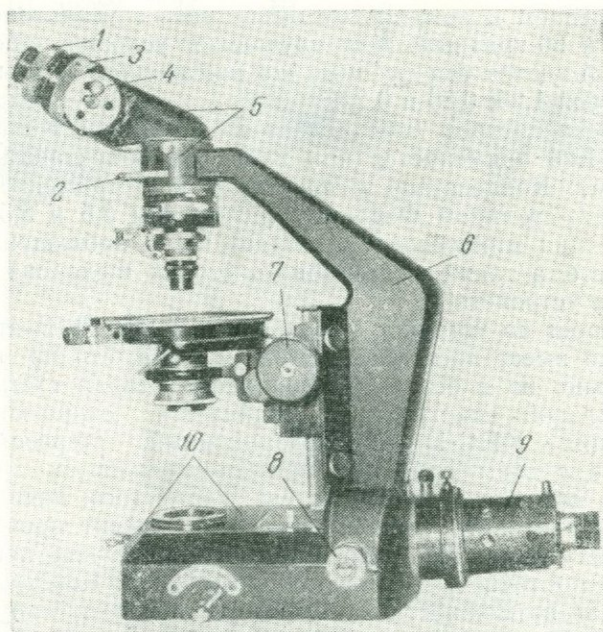


Рис. 32. Микроскоп МИН-8

1 — кольцо осевого перемещения окуляра; 2 — поворотный диск со светофильтрами; 3 — кольцо диафрагмы линзы Бертрана; 4 — поворотный диск линзы Бертрана; 5 — тубус; 6 — тубусодержатель; 7 — макрометренный подъемный винт столика; 8 — микрометренный винт столика; 9 — осветитель; 10 — основание микроскопа

3. Осветитель вмонтирован в массивное основание прибора. Свет, отраженный зеркалом, также вмонтированным в основание, поступает в осветительное устройство снизу, через специальный иллюминатор. В рабочем положении микроскоп устанавливается так, что осветительный иллюминатор и тубус повернуты к исследователю, а осветитель и тубусодержатель — в противоположную сторону от него (см. рис. 33).

Микроскоп имеет следующие дополнительные устройства:

1. Над верхним никелем расположен вращающийся диск с четырьмя отверстиями. В трех из них установлены светофильтры:

красный ($\lambda=620$), желтый ($\lambda=589$) и синий ($\lambda=486$). Четвертое отверстие остается свободным. Любой из светофильтров вводится в оптическую схему микроскопа поворотом диска.

2. Под окуляром расположено кольцо с ребристой нарезкой. Вращением кольца окуляр углубляется в тубус или выдвигается из него. Осевое перемещение окуляра позволяет устанавливать наибольшую резкость изображения фигуры интерференции при исследованиях в сходящемся свете.

Микроскоп снабжен комплектом окуляров с 5; 8; 10 и 15-кратным увеличением и комплектом объективов с увеличением 3,5; 9; 20; 40; 60 и 90-кратным. Для улучшения условий работы объективов используются три сменные конденсаторные линзы с различной апертурой 1,25; 0,85 и 0,22.

Линза с апертурой 0,85 является основной. Конденсатор с апертурой 1,25 применяется при работе с объективом $90\times$ (иммерсионным). Конденсатор с апертурой 0,22 применяется только при работе со столиком Федорова (объективы $3,5$ и $5,5\times$).

Конструкция микроскопа позволяет вести наблюдения в отраженном свете, а также использовать столик Федорова и фазово-контрастное устройство.

Более прост по устройству микроскоп МИН-10. В этой модели тубус также имеет постоянный угол наклона, столик расположен горизонтально, но в остальном сохранена старая схема.

Оригинальной конструкцией отличается микроскоп МПС-2 (модификация МПС-1) — поляризационный, стереоскопический. При работе с этим прибором зрительная нагрузка равномерно ложится на оба глаза исследователя; кроме того, появляется возможность исследовать стереоскопический эффект препарата. Новые модели отличаются рядом достоинств. В них использована прекрасная по точности просветленная оптика. Конструкция микроскопа дает возможность использовать дополнительную аппаратуру, позволяющую производить разнообразные и высокоточные исследования.

Горизонтальные столики очень удобны в работе, особенно при иммерсионном методе исследования. Вместе с тем есть ряд особенностей, которые ограничивают использование этих приборов в учебных лабораториях. Так, МИН-8 отличается излишней универсальностью и сложностью, что особенно сильно ощущается на первых этапах работы с микроскопом. В этом отношении МИН-10 удобнее, но тубусы с постоянными углами наклона требуют оборудования индивидуальных лабораторных рабочих мест, соответствующих росту работающих. Это также вызывает неудобства при работе в обычной учебной лаборатории.

Некоторые недостатки этих микроскопов носят объективный характер. Так, микроскоп МПС-2 в том виде, в каком он выпущен, обладает незначительным максимальным увеличением (всего $100\times$, в то время как у МИН-8 и МИН-10 увеличение $1350\times$) и поэтому не может быть использован в качестве основного прибора для петрографических исследований.

Шлиф

Объектом исследования на поляризационном микроскопе является шлиф — очень тонкая прозрачная пластинка горной породы, заклеенная между двумя полосками стекла. Для изготовления шлифа берут небольшой обломок породы (обычно не более $2 \times 2 \times 2$ см). На шлифовальном станке одну из сторон обломка зашлифовывают, а затем с помощью канадского бальзама приклеивают к пластинке стекла размером $2,5 \times 5$ см (рис. 33). Это стекло называется предметным.

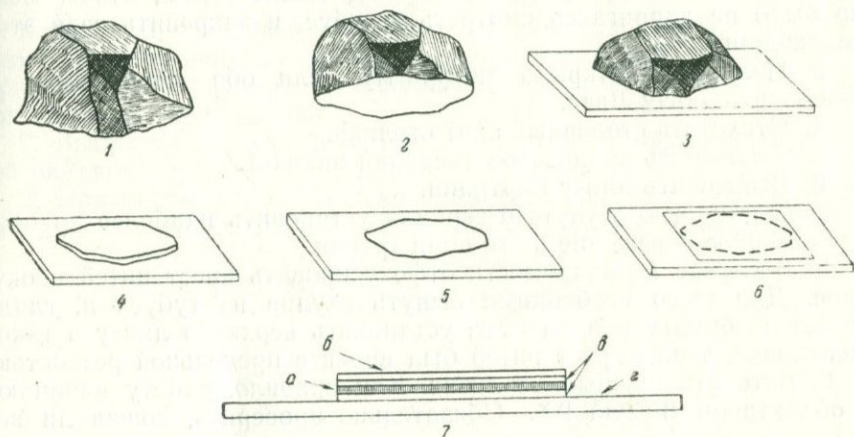


Рис. 33. Последовательные стадии изготовления шлифа

1 — обломок породы; 2 — заготовка в обломке плоской площадки; 3 — обломок, наклеенный плоской площадкой на предметное стекло; 4 — сошлифованная тонкая пластинка породы; 5 — пластинка, доведенная до толщины 0,03 мм; 6 — пластинка, закрытая покровным стеклом; 7 — разрез готового шлифа (вертикальные размеры произвольно увеличены): а — пластинка породы; б — покровное стекло; в — канадский бальзам; з — предметное стекло

Канадский бальзам — смолообразное вещество, которое добывается из канадской пихты. Он имеет показатель преломления, близкий к показателю преломления стекла — 1,54 (1,537). В Советском Союзе бальзам добывают из сибирской пихты; сходное вещество, называемое бальзаминном, получают также синтетическим путем.

На шлифовальном станке обломок породы, приклеенный к стеклу, постепенно сошлифовывают до пластинки толщиной 0,03 мм. Эту пластинку или шлиф покрывают вторым слоем канадского бальзама и заклеивают второй пластинкой очень тонкого — покровного — стекла. Готовый шлиф просушивают. В таком виде шлифы применяют для петрографических и минералогических исследований.

Приведение микроскопа в рабочее положение

Поляризационный микроскоп — это сложный оптический прибор, предназначенный для детальных исследований минералов и горных пород, их структурных и текстурных особенностей.

Поляризационные микроскопы надо подготавливать к работе следующим образом.

1. Установить микроскоп на расстоянии 15—20 см от ближнего края стола прямо перед собой. Повернуть штатив микроскопа к себе (у микроскопов системы МП-2, МП-3, МП-7, МИН-4 и МИН-5).

2. Наклонить ручку-держатель под таким углом, чтобы можно было не напрягаясь смотреть в тубус, и закрепить ее в этом положении*.

3. Полностью открыть диафрагму (или обе диафрагмы) и выключить линзу Лазо.

4. Отпустить стопорный винт столика.

5. Выключить анализатор (верхний николь).

6. Выключить линзу Бертрана.

7. С помощью вогнутого зеркала установить наиболее яркое и равномерное освещение всего поля зрения.

8. В случае необходимости отфокусировать крест нитей в окуляре. Для этого необходимо вынуть окуляр из тубуса и, глядя на белую бумагу или на свет, установить верхнюю линзу в такое положение, чтобы крест нитей был виден с предельной резкостью.

9. Вставить нужный объектив. Как правило, работу начинают с объективом 8× или 9×. Обязательно проверить, вошел ли косяк винт объектива в щипцовый зажим тубуса.

10. Уложить шлиф горной породы на столик микроскопа и закрепить его зажимами. Шлиф надо положить покровным стеклом вверх.

В таком положении микроскоп готов к работе. Однако если на одном приборе работает несколько человек или работа производится впервые, необходимо произвести его основные проверки. К ним относятся проверка и центрировка объективов, проверка скрещенности николей и определение плоскости световых колебаний, пропускаемых ими. Необходимость в проверках может возникнуть из-за того, что прибор в процессе длительной работы начинает постепенно разлаживаться.

Основные проверки

Центрировка микроскопа. Для проверки центрировки микроскопа надо отфокусировать его на шлифе и, выбрав в пределах поля зрения какую-нибудь хорошо заметную точку небольших

* Микроскоп в этом положении неустойчив — центр тяжести его сильно смещен назад, поэтому его не следует оставлять в рабочем положении на столе. Уходя, ставьте микроскоп вертикально.

размеров, совместить ее с крестом нитей, затем повернуть столик на один оборот, одновременно следя за точкой. Если выбранная точка уходит с перекрестка нитей и описывает какую-то окружность, микроскоп надо отцентрировать.

Приступая к центрировке, необходимо надеть центрировочные ключи на центрирующие винты объектива. Ввинчивая или вывинчивая один из них, можно изменить направление оптической оси микроскопа на некоторое угловое расстояние, совместив ее с центром вращения столика.

Центрировку можно производить двумя приемами.

Первый прием

1. Приподнять окуляр и повернуть его так, чтобы фиксирующий винт окуляра вошел в дополнительный паз тубуса. При этом нити окуляра расположатся под углом в 45° к их первоначальному положению.

2. Выбранную точку в шлифе совместить с перекрестием нитей окуляра.

3. Повернуть столик на некоторый угол так, чтобы точка, описав дугу, совместилась с одной из нитей окуляра (рис. 34).

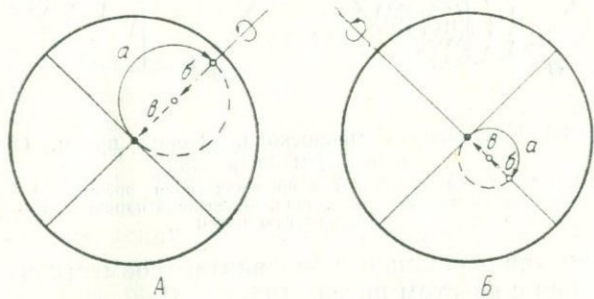


Рис. 34. Центрировка микроскопа. Первый прием
Окуляр в положении « 45° »

A — выбранная в шлифе точка совмещена с перекрестием нитей; *a* — поворотом столика точка, описавшая часть окружности, совмещена с одной из нитей, *б* — вращением винта точка перемещается на половину расстояния к центру (расстояние — *б*), *в* — передвигая шлиф рукой, совместить точку с перекрестием нитей; *Б* — те же, операции проделываются еще раз

4. Действуя центрировочным винтом, расположенным в направлении этой нити, не прикасаясь к шлифу руками, «переместить» точку на полпути к перекрестию нитей.

5. Передвигая шлиф рукой, совместить точку с перекрестием нитей (см. рис. 34).

6. Повернуть столик, и если точка снова описывает окружность, то совместить ее с другой нитью.

7. Действуя другим центрировочным винтом, «переместить»

точку на полпути к перекрестию нитей, а на оставшееся расстояние передвинуть шлиф рукой.

Операция повторяется до тех пор, пока полностью не исчезнет эксцентриситет.

Второй прием

Окуляр можно оставить в обычном положении.

1. Не выбирая какой-либо определенной точки в пределах поля зрения, но следя за перемещением всех точек одновременно, надо быстро повернуть столик микроскопа на $60-90^\circ$ туда и обратно несколько раз и визуально определить центр вращения, т. е. место, где точки имеют наименьшее линейное перемещение (рис. 35).

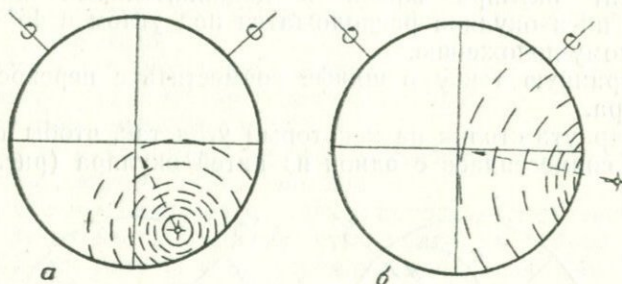


Рис. 35. Центрировка микроскопа. Второй прием. Окуляр в обычном положении

a — центр вращения находится в пределах поля зрения; *b* — центр вращения — вне пределов поля зрения, определено направление от него к перекрестию нитей

2. Вращая одновременно оба винта, совместить найденный центр вращения с крестом нитей.

3. Снова сделать несколько быстрых поворотов, и если сохранился некоторый эксцентриситет, то повторить операцию.

При определенном навыке после двух—трех попыток удается добиться хорошей центрировки. Этот способ особенно удобен, если приходится работать с сильно расцентрированным объективом, когда центр вращения расположен за пределами поля зрения. Направление к центру вращения мысленно устанавливается по нормали к вогнутой части дуг, описываемых точками шлифа.

Проверка скрещенности николей. Скрещенные николи не пропускают света. Если снять со столика шлиф и включить верхний николю, то поле зрения должно стать темным. При любых поворотах столика просветления не наступает. Если при включении верхнего николя поле зрения темнеет не полностью, то очевидно, николи не скрещены. Чтобы исправить это, надо опустить стопорный винт нижнего николя и, вращая рычаг поляризатора, добиться максимального затемнения поля зрения.

Определение ориентировки плоскости световых колебаний, пропускаемых поляризатором или «главного сечения» поляризатора. В правильно отрегулированном микроскопе николи установлены так, что плоскости пропускаемых ими световых колебаний («главные сечения») расположены под прямым углом одна к другой и ориентированы параллельно нитям окуляра. Но стандартного положения для верхнего и нижнего николей не существует, в одних микроскопах нижний николю пропускает световые колебания, совершающиеся в вертикальной плоскости («главное сечение» расположено параллельно вертикальной нити окуляра), а верхний — колебания, направленные горизонтально, в других — наоборот. Поэтому в каждом микроскопе эти положения необходимо определить. Для этого достаточно определить положение плоскости световых колебаний, пропускаемых одним николю, что удобнее сделать для невыключающегося поляризатора. При определении используют шлиф породы с биотитом, который обладает свойством интенсивно поглощать световые колебания, совершающиеся параллельно плоскости его спайности, т. е. в плоскости третьего пинакоида (001). Ориентировка главного сечения поляризатора устанавливается по направлению трещинок спайности биотита в момент наиболее интенсивной окраски его кристалла при вращении столика микроскопа.

Порядок работы при определении ориентировки световых колебаний николей следующий:

1. Выключить анализатор.
2. В шлифе с биотитом выбрать кристалл с хорошо видимыми трещинами спайности и совместить его с перекрестием нитей.
3. Вращая столик микроскопа, найти такое его положение, при котором листочек биотита будет иметь наиболее густую окраску. В этом положении трещины спайности будут расположены параллельно плоскости главного сечения поляризатора. Вместе с тем они должны быть ориентированными параллельно одной из нитей окуляра — вертикальной или горизонтальной.
4. Записать, в какой плоскости лежит главное сечение поляризатора — в вертикальной или горизонтальной.
5. Для проверки, не меняя положения столика, включить верхний николю. Листочек биотита должен находиться в положении погасания. При полном обороте столика минерал гаснет в скрещенных николях четыре раза: два раза, когда направление трещин спайности совпадает с «главной плоскостью» нижнего николя, и два раза при совпадении его с «главной плоскостью» верхнего николя. Необходимо убедиться, что в момент погасания направление трещин спайности биотита точно совпадает с направлением нитей окуляра.

Проверка угла перекрестия нитей окуляра и совпадения с ними главных сечений николей. Если же при проверке выяснилось, что эти направления не совпадают, то прежде всего надо проверить угол, под которым пересекаются нити окуляра. Для этого поступают следующим образом:

1. В шлифе выбирается хорошо заметная точка и сдвигается к краю поля зрения, где совмещается с одной из нитей окуляра.

2. По нониусу берется первый отсчет на лимбе столика. (Принимается, что микроскоп уже отцентрирован.)

3. Повернуть столик до совмещения выбранной точки с другой нитью.

4. Взять второй отсчет по тому же нониусу.

Разница между отсчетами должна быть 90° .

В связи с тем что крест нитей образуется натяжением в фокальной плоскости окуляра двух свободно ориентирующихся по натяжению нитей, нет необходимости проверять остальные секторы, так как неточность будет обнаружена первым же замером.

Если при проверке оказалось, что угол между нитями не равен 90° , окуляр необходимо передать мастеру для ремонта.

Если нити перпендикулярны, надо еще раз проверить параллельность им плоскостей главных сечений николей и добиться совпадения этих направлений. Для этого с помощью шлифа с биотитом при одном никеле проверяется поляризатор, а затем в скрещенных николях — анализатор.

Порядок работы следующий.

1. При выключенном анализаторе кристалл биотита в шлифе совмещается с перекрестием нитей, и поворотом столика трещинки его спайности располагаются строго параллельно нити окуляра, указывающей на направление главного сечения поляризатора.

2. Сделать несколько небольших поворотов столика ($10-15^\circ$) в ту и другую сторону и установить его в положении, соответствующем наиболее густой окраске кристалла. Если при этом трещинки спайности не параллельны нити, необходимо поправить ориентировку николя. Для этого необходимо:

1. Кристалл биотита возвратить в исходное положение (трещинки параллельны нити).

2. Отпустить стопорный винт поляризатора.

3. Аккуратно поворачивая его ручку, остановить ее в положении наиболее густой окраски кристалла.

4. Зажать стопорный винт поляризатора.

5. Скрестить николи и убедиться, что кристалл находится в положении погасания.

6. Повернуть столик на 90° и в случае неполного погасания поправить положение анализатора, отпустив его стопорный винт. Последнее можно сделать у микроскопов последних марок с ориентирующимся анализатором. Анализатор микроскопов марки МП-2 и МП-3 зафиксирован жестко, поэтому во избежание порчи прибора поправлять его положение без помощи мастера не следует.

На первых порах работы с микроскопом установка николей, если в этом возникла необходимость, производится только под руководством мастера или специалиста-петрографа.

Поверки можно считать законченными, если в результате их установлено, что: а) ось вращения столика точно совпадает с оптической осью микроскопа; б) плоскости главных сечений николей расположены перпендикулярно друг другу и точно совпадают с положением нитей окуляра, при этом известно направление световых колебаний, пропускаемых поляризатором.

Оценка увеличения микроскопа

Увеличение объекта, рассматриваемого в микроскоп, зависит от силы применяемых объективов и окуляров.

Для того чтобы вычислить общее увеличение, надо умножить увеличение объектива на увеличение окуляра. Например, при объективе $9\times$ и окуляре $6\times$ общее увеличение будет $9\times 6=54$; при объективе $60\times$ и окуляре $12,5\times$ общее увеличение будет $60\times 12,5=750$ и т. д.

При определении кратности увеличения микрофотоснимка шлифа следует сравнить диаметр поля зрения микроскопа (в миллиметрах) с наибольшим сечением фотоснимка. Например, при диаметре поля зрения $1,8$ мм и длине наибольшей диагонали прямоугольного фотоснимка 90 мм увеличение составит $90:1,8=50$.

Определение размеров зерен минералов

Измерять абсолютные размеры микрообъективов, изучаемых в шлифе, можно приблизительно — при предварительном описании и точно — при детальном исследовании.

Для приблизительной оценки величины зерен минералов в шлифе достаточно определить видимую величину диаметра поля зрения (в миллиметрах). Сравнивая поперечник зерна с диаметром поля зрения, можно примерно определить величину зерна. Поясним это на примере.

Диаметр поля зрения $1,8$ мм. Зерно по своей длинной оси укладывается в поперечнике поля зрения три раза (рис. 36), а по короткой — шесть раз, следовательно, длина зерна $1,8:3=0,6$ мм; ширина его $1,8:6=0,3$ мм. Размеры зерна $0,6\times 0,3$ мм.

При том же диаметре поля зрения само поле укладывается два с половиной раза по длине кристалла и составляет $\frac{2}{3}$ его ширины (рис. 36, б). В этом случае длина кристалла равна $1,8\cdot 2,5=4,5$ мм, ширина его $1,8\cdot \frac{2}{3}=1,2$ мм. Размеры зерна $1,2\times 4,5$ мм.

Величина зерна минерала всегда дается в двух измерениях: по короткой и по длинной осям. Диаметр поля зрения наиболее просто измерить, положив на столик микроскопа вместо шлифа небольшой лист миллиметровки. Надо отфокусировать объектив и сосчитать количество клеточек, расположенных поперек поля зрения, это и будет величина его диаметра в миллиметрах. Пред-

варительно рекомендуется поднять миллиметровую сетку светло-окрашенной миллиметровки (оранжевой, желтой и др.) остро отточенным карандашом или тушью. Диаметр поля зрения зависит не только от применяемого объектива, но и окуляра.

Описанный способ измерения размеров зерен минералов не отличается точностью. Кроме того, область его применения ограничена как величиной зерен, размеры которых должны быть легко сопоставимы с диаметром поля зрения, так и малыми увеличениями объективов (3; 3,7; 8; 9×).

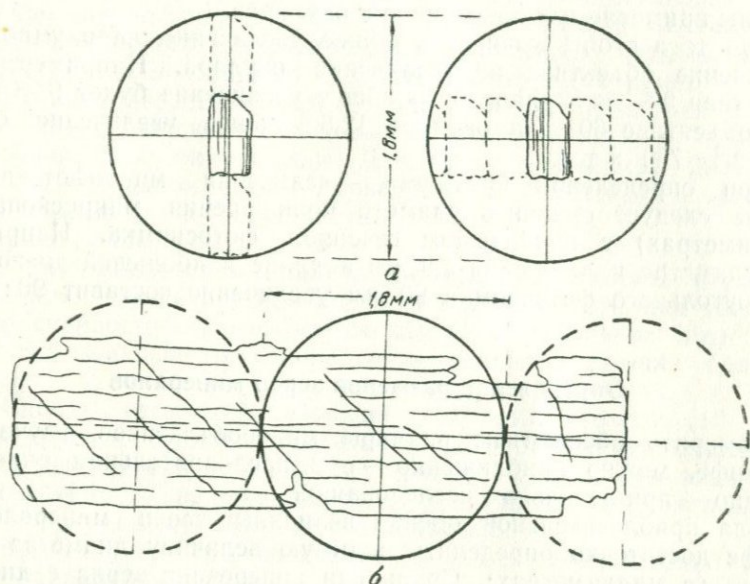


Рис. 36. Определение размеров зерен минералов по соотношению их с диаметром поля зрения
 a — мелкое зерно, в несколько раз меньше поля зрения; b — крупное зерно, в несколько раз больше поля зрения

Для точного определения величины наблюдаемых объектов необходимо применять дополнительные приспособления, такие, как объект-микрометр и окуляр-микрометр.

Объект-микрометр представляет собой линейку длиной 1 мм с делениями через 0,01 мм, вмонтированную на прозрачной основе в стеклянную пластинку, которая в свою очередь заключена в металлическую оправу.

Окуляр-микрометр — это также микроскопическая линейка на прозрачной основе, вмонтированная в фокальную плоскость окуляра вместо креста нитей. Линейка разделена на 100 делений с оцифровкой через каждые 10 делений.

Объект-микрометр устанавливают на столике микроскопа и

фокусируют; вместо обычного окуляра в тубус микроскопа вводят окуляр с линейкой, т. е. окуляр-микрометр. Совмещают линейку объект-микрометра с линейкой окуляр-микрометра и определяют цену делений последнего.

Для определения цены деления окуляр-микрометра (в миллиметрах) надо количество сотых долей миллиметра объект-микрометра разделить на совместившееся с ними количество делений окуляр-микрометра. Разбираем в качестве примера два наиболее обычных случая.

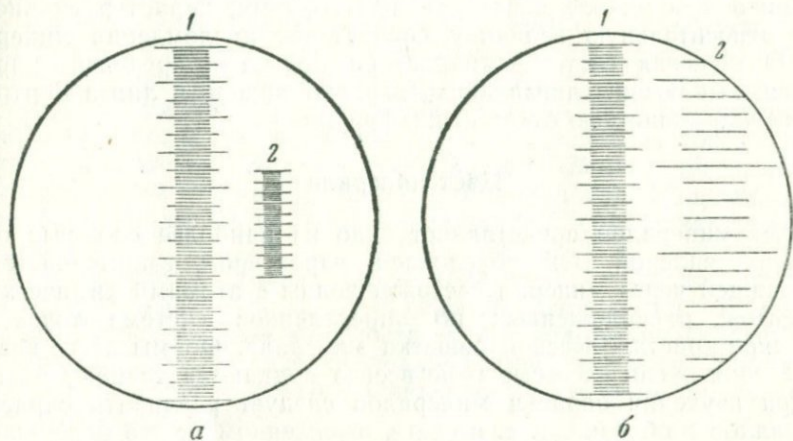


Рис. 37. Определение цены деления окуляр-микрометра при малых (а) и больших (б) увеличениях объектов
1 — линейка окуляр-микрометра; 2 — линейка объект-микрометра

1. Со 100 делениями объект-микрометра, т. е. с 1,00 мм изучаемого объекта, совмещены 30 делений окуляр-микрометра (рис. 37). Определяем цену делений последнего: $1,00 : 30 = 0,033$ мм.

Одно деление окуляр-микрометра соответствует 0,033 мм (десять делений 0,33 мм, сто делений, длина всей линейки 3,3 мм).

2. С 30 делениями объект-микрометра, т. е. с 0,30 мм совмещаются 75 делений окуляр-микрометра (рис. 37, б). Определяем цену делений последнего: $0,30 : 75 = 0,004$ мм.

Одно деление окуляр-микрометра соответствует 0,004 мм (десять делений 0,04 мм, сто делений 0,4 мм).

Для каждого объектива цену деления окуляр-микрометра следует вычислять отдельно и результаты вычислений выписывать в таблицу. Составленная таблица будет действительно только для данного микроскопа и окуляр-микрометра.

Дальнейшее определение размеров зерен минералов в шлифе сводится к измерению их длины и ширины с помощью линейки окуляр-микрометра и переводу отвлеченных величин в доли миллиметра.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ ПРИ ОДНОМ НИКОЛЕ

Методика исследования породообразующих минералов с помощью поляризационного микроскопа делится на три раздела:

1. Исследования при одном никеле.
2. Исследования при скрещенных николях.
3. Исследования в сходящемся свете.

Каждый раздел исследования имеет самостоятельные задачи.

При одном никеле исследуют цвет, форму, характер спайности и относительную величину показателей преломления минералов. Оптическая система микроскопа при этом предельно упрощается: выключены линза Лазо, верхний николь и линза Бертра-на, обычно полностью открыта диафрагма.

Цвет минерала

Цвет минералов представляет одно из наиболее сложных оптических явлений. Он обусловлен характером взаимодействия проходящей через минерал световой волны с атомами химических элементов, расположенных по определенной системе точек в структуре кристаллической решетки минерала. Формы этого взаимодействия очень сложные и не всегда поддаются точному учету.

При изучении окраски минералов следует различать окраску кристаллов в образце, т. е. в свете, отраженном от его поверхностей, и цвет кристалла в шлифе, в свете, проходящем через тонкую прозрачную пластинку минерала. Обусловленные разными условиями прохождения света, эти окраски не всегда сопоставимы.

Методика изучения окраски минерала в образце излагается в курсе минералогии.

В шлифе минералы по разному реагируют на проходящий свет. Водяно-прозрачные бесцветные минералы, такие, как кварц и полевые шпаты, полностью или почти полностью пропускают его; оливины, некоторые пироксены, апатит и другие заметно рассеивают или поглощают свет. Минералы, содержащие в своем составе хромофоры* (амфиболы, некоторые слюды, щелочные пироксены и др.), как известно, в проходящем свете избирательно поглощают, гасят световые волны определенной длины.

Благодаря этому выходящий свет обладает иным спектральным составом по сравнению с белым естественным светом и придает минералу цвета непогашенных участков видимой области спектра.

Таким образом, в шлифе под микроскопом одни минералы кажутся бесцветными, другие — окрашенными.

* Хромофоры — химические элементы, присутствие которых всегда придает минералам определенные (в данных условиях) окраски.

К числу наиболее распространенных окрашенных минералов относится обширная группа амфиболов. Они имеют различные окраски, чаще всего представленные сочетаниями зеленого цвета с бурым, коричневым, желтым или синим. Встречаются также амфиболы с бурой и коричневой окраской.

Из группы слюд интенсивно окраска выражена у биотита. Этот минерал, очень распространенный в горных породах, имеет коричневатую окраску или бурую, реже зеленовато-бурую или буровато-зеленую и др. Яркими зелеными окрасками обладают щелочные пироксены, эгирин, эгирин-авгиты.

В светло-зеленый или голубовато-зеленый цвет обычно окрашен хлорит. Светло-зеленым или бледным желто-зеленым цветом обладают некоторые разновидности эпидота.

Окраски минералов, как правило, очень сложны, поэтому в описании необходимо указывать не только основной тон, но и его густоту и оттенки. Вначале указывается общая интенсивность окраски, затем оттенки и, наконец, основной тон. Например, темный синевато-зеленый, светлый зеленовато-бурый, светло-желтый и т. п.

При вращении столика микроскопа можно заметить, что цвет или интенсивность окраски минералов изменяются. Изменение окраски кристалла в зависимости от его положения относительно плоскости главного сечения поляризатора является следствием плеохроизма. Более подробно явление плеохроизма будет описано в следующей главе.

Форма минерала

В горной породе формы выделений минералов и общий облик тех или иных кристаллов зависит от многих факторов — от кристаллографических особенностей минералов и силы их кристаллического роста, от условий кристаллизации, характера взаимоотношений растущего минерала с изменяющейся обстановкой окружающей среды и т. д.

В благоприятных условиях минерал образует присущие ему формы выделений и характеризуются правильными кристаллографическими ограничениями. Такие кристаллы называются идиоморфными («идиос» — собственный, «морфос» — форма, греч.), или эвгедральными. В неблагоприятных условиях развития минерал приобретает случайные, не свойственные ему формы. Иногда такие формы возникают в результате заполнения пространства между ранее выделившимися зернами минерала или кристаллами, обладающими большей силой кристаллического роста. Кристаллы, обладающие не свойственными им вынужденными формами, называются ксеноморфными («ксенос» — чужой, греч.).

Для наиболее распространенных порообразующих минералов характерны следующие формы.

Кварц в порфиروهвых выделениях кислых эффузивов и в некоторых жильных породах имеет иногда форму правильных ди-

пирамидальных кристаллов. Грани призмы у таких кристаллов обычно отсутствуют.

Плагиоклазы в порфировых выделениях образуют таблитчато-призматические кристаллы, удлиненные в направлении третьей кристаллографической оси и сплюснутые в плоскости второго пинакоида. По мере изменения условий кристаллизации и увеличения вязкости среды усиливается тенденция к образованию удлиненно-таблитчатых, затем призматических и, наконец, игольчатых кристаллов плагиоклаза (микролитов).

Калиевые полевые шпаты имеют вид таблитчатых или призматических кристаллов.

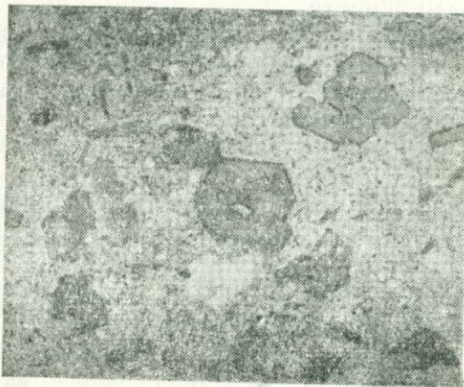


Рис. 38. Идиоморфные выделения кристаллов биотита в жильной породе (керсантит)

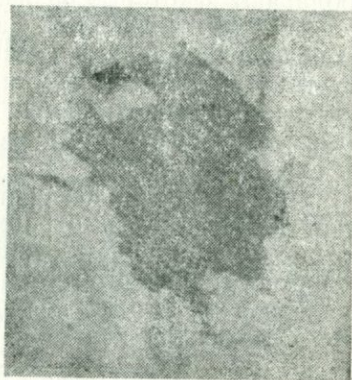


Рис. 39. Ксеноморфные выделения кристаллов биотита в интрузивной породе (гранит)

Биотит наблюдается в форме пластинчатых или листоватых кристаллов, сплюснутых в плоскости третьего пинакоида с хорошо развитыми его гранями.

Пироксены образуют короткопризматические кристаллы, ограниченные гранями первого и второго пинакоидов, и призмы (110) со слабо развитыми конечными гранями. В микролитах пироксены иногда имеют форму сильно удлиненных призм.

Амфиболы, близкие к пироксенам по форме, отличаются от них большим удлинением в направлении третьей кристаллографической оси и характерными шестигранными очертаниями. В метаморфических горных породах встречаются игольчатые или волокнистые разновидности амфиболов.

Оливин редко имеет правильно ограниченные кристаллы, обычно они имеют вид округлых или овальных зерен.

В разных горных породах одни и те же минералы образуют различные по совершенству формы. Так, в эффузивных и некоторых жильных породах вкрапленники кварца, калиевых полевых шпатов, пироксенов и некоторых других минералов обычно наб-

людаются в виде хорошо образованных, правильных кристаллов. В интрузивных породах те же минералы иногда дают резко ксеноморфные выделения (рис. 38, 39).

Для того чтобы получить представление о форме идиоморфного кристалла, необходимо иметь в шлифе не менее двух или трех ориентированных разрезов. Важно выяснить общий облик минерала. Наиболее часто встречаются кристаллы призматического, таблитчатого, пластинчатого, игольчатого, листового и волокнистого облика. В тех случаях, когда у кристалла наблюдаются необычные соотношения длины и ширины, следует в записях уточнить характеристику его формы (например, кристаллы короткопризматические, широко таблитчатые и т. д.).

У ксеноморфных кристаллов следует отмечать наиболее общие особенности формы, например удлиненные — кристалл, несмотря на отсутствие правильных форм, обнаруживает отчетливо выраженные длину и ширину; изометричность — выражена способностью минерала образовывать зерна с равными или почти равными измерениями и, наконец, характер неправильности форм — угловато-неправильные, округло-неправильные и т. п.

Иногда выделения минералов характеризуются не столько формой отдельных индивидов, сколько формой их сростаний в агрегаты. Среди последних можно выделить лучистые или радиальнолучистые формы сростания, метельчатые, перистые, графические и др.

Спайность

В прозрачном шлифе спайность минерала имеет вид тонких параллельных полосок-трещинок. По степени прямизны, длины и параллельности трещин различают весьма совершенную, совершенную и несовершенную спайность.

В разрезах минералов с весьма совершенной спайностью трещинки идут через весь кристалл, не прерываясь. Сами трещинки очень выдержаны по ширине. Для них характерны строгая параллельность и прямолинейность. Такой спайностью обладают, например, слюды (рис. 40).

Минералы с совершенной спайностью характеризуются общим параллельным расположением трещинок. Но трещинки прерывисты, неравномерны по ширине. Рядом расположенные элементы двух трещинок не всегда параллельны друг другу. Они несколько извилисты. Примером совершенной спайности могут служить кристаллы пироксенов и амфиболов (рис. 41 и 42).

У минералов с несовершенной спайностью трещинки расположены прерывисто, элементы двух рядом расположенных трещин не совпадают, нет строгой параллельности, они то сближаются, то расходятся, иногда ветвятся и пересекаются, но вместе с тем общее направление в расположении трещин легко улавливается. Несовершенная спайность выражается также в наличии

редких и коротких трещин. К числу минералов с несовершенной спайностью относятся, например, оливин и турмалин (рис. 43). Некоторые минералы, в том числе кварц и гранат, в прозрачных шлифах вообще не обнаруживают спайности. В них наблюдаются беспорядочно расположенные трещины, обычно неровные и извилистые (рис. 44).

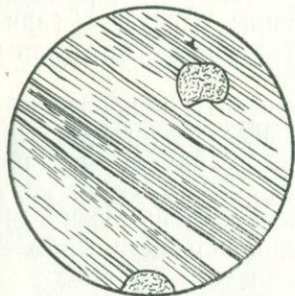


Рис. 40. Весьма совершенная спайность в одном направлении в кристалле биотита

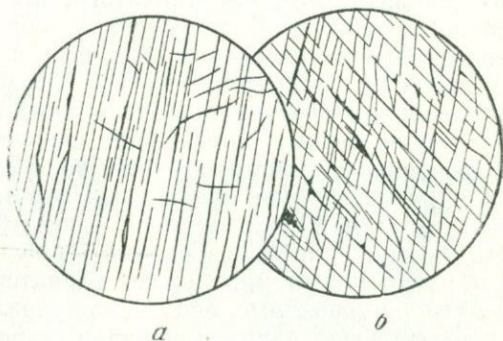


Рис. 41. Совершенная спайность в кристалле амфибола на продольном (а) и поперечном (б) разрезах

Трещины спайности могут быть развиты в одном или в нескольких направлениях. Угол между трещинами является важным диагностическим признаком минерала. Его измеряют следу-

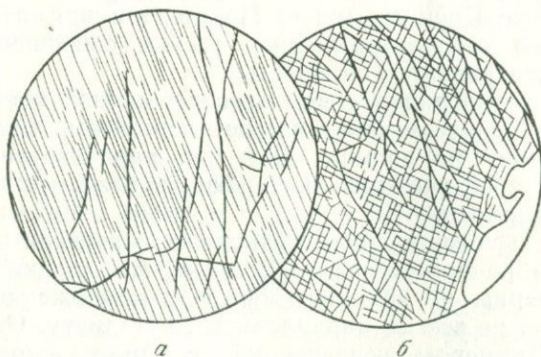


Рис. 42. Совершенная спайность в кристалле пироксена на продольном (а) и поперечном (б) разрезах

ющим образом. Поворотом столика совмещают одно из направлений трещин спайности с вертикальной (или горизонтальной) нитью окуляра и берут отсчет на столике. Затем, повернув столик

до совмещения той же нити окуляра со вторым направлением трещин спайности, берут второй отсчет. Разность отсчетов дает угол между двумя направлениями трещин спайности.

Приступая к замеру угла между трещинами спайности, необходимо обращать внимание на два следующих положения.

1. Замер углов между трещинами спайности дает точные результаты на точно ориентированных разрезах кристаллов. Такой разрез узнают по наличию тонких и наиболее четких трещинок. При подъеме и опускании тубуса микрометренным винтом эти трещинки не должны смещаться. В случае неточной ориентировки трещинка будет как бы передвигаться параллельно своему

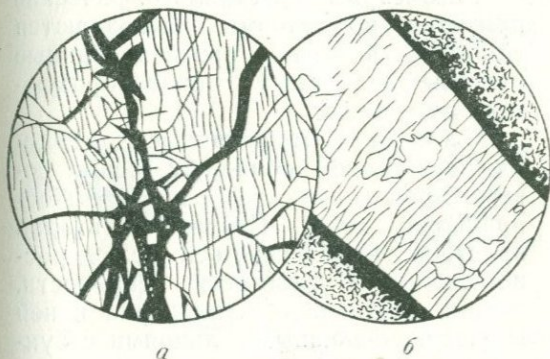


Рис. 43. Несовершенная спайность в кристаллах оливина (а) и турмалина (б)

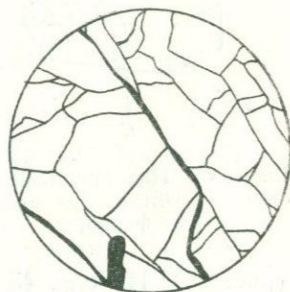


Рис. 44. Трещиноватость в кристалле граната

расположению вправо или влево от оси трещинки. Это объясняется тем, что опуская или поднимая объектив над препаратом, мы фокусируем разные участки трещины, если она расположена наклонно к плоскости среза шлифа.

2. В кристаллах с несовершенной (а иногда и с совершенной) спайностью рядом расположенные трещинки не всегда строго параллельны одна другой. Поворачивая столик, надо добиваться, чтобы нить окуляра была параллельна не одной какой-то трещинке, а общему их направлению.

Изучение спайности минерала в шлифе не ограничивается выяснением ее совершенства, количества направлений и замерами углов между ними. Породообразующие минералы в горных породах редко имеют хорошо развитые грани, по которым можно определить пространственное положение кристалла в шлифе. Для установления кристаллографических направлений в этом случае большое значение имеет ориентировка трещин спайности.

Спайность минерала не зависит от его внешней формы в данном агрегате породы, она определяется исключительно его внутренним строением. Поэтому в ксеноморфных выделениях правиль-

ная оценка положения плоскостей спайности позволяет выяснить ориентировку кристалла на разрезе. Однако для этого пригоден не всякий разрез. Вследствие беспорядочного расположения кристаллов минерала в массе горной породы в плоскость среза шлифа попадают случайные разрезы. Для определения же кристаллографических направлений из всего их количества пригодны лишь разрезы, точно ориентированные по отношению к направлениям спайности, т. е. такие разрезы, которые проходят под прямым углом к спайности или расположены в плоскости спайности, под прямым углом к следу пересечения двух плоскостей спайности или параллельно этому следу.

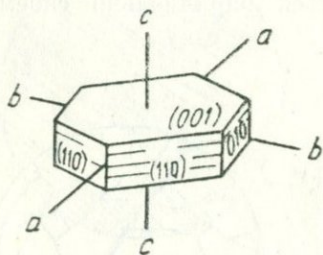


Рис. 45. Пластинчатый кристалл биотита (из лампрофиров)

Рассмотрим кристаллографические признаки, по которым распознаются наиболее важные ориентированные разрезы некоторых породообразующих минералов.

Слюды (моноклинные, псевдогексагональные) обладают весьма совершенной спайностью по третьему пинакоиду (001) . Первая и вторая кристаллографические оси у слюд расположены в плоскости спайности, третья почти перпендикулярна к ней

(рис. 45). На рис. 45 и последующих сплошными линиями с буквенными обозначениями показаны достоверные направления кристаллографических осей. Без буквенных обозначений показаны предполагаемые направления осей. Для большей наглядности рисунки выполнены в косоугольной проекции с показом двух поверхностей разрезанного кристалла. В шлифе видна только плоскость среза.

У слюд различают два ориентированных разреза относительно положения направления спайности.

1. Разрез, параллельный третьей кристаллографической оси c . На таком разрезе трещины спайности пересекаются плоскостью среза под прямым углом, поэтому они очень четкие — тонкие и прямые. За третью кристаллографическую ось принимается направление, перпендикулярное трещинкам спайности (рис. 46, а).

2. Разрез, перпендикулярный третьей кристаллографической оси c . Отличительная особенность этого разреза заключается в том, что он равномерно окрашен, на нем не видны трещины спайности, так как срез проходит по спайности (рис. 46, б). Ось c направлена перпендикулярно плоскости среза (плоскости спайности), две другие оси a и b расположены в плоскости среза (в плоскости спайности).

Амфиболы (моноклинные) обладают совершенной спайностью в двух направлениях по граням призмы (110) . Плоскости спайности, пересекаясь, образуют угол около 56° (124°).

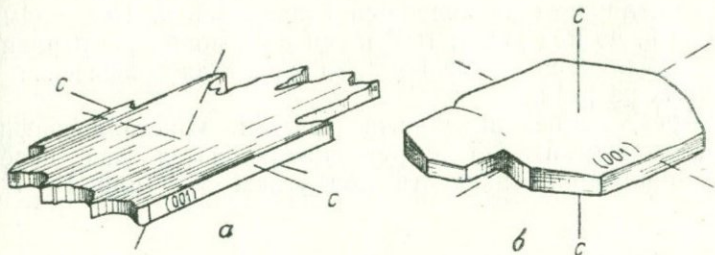


Рис. 46. Ориентированные разрезы биотита
a — разрез, параллельный третьей кристаллографической оси; *б* — разрез, перпендикулярный ей

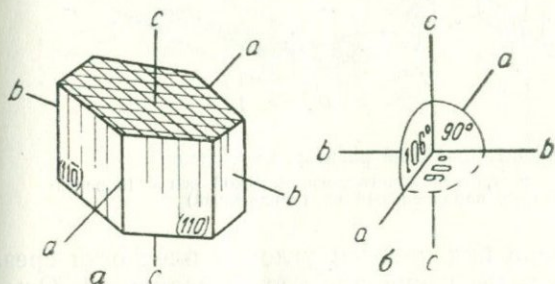


Рис. 47. Срез моноклинного кристалла амфибола (*a*) и схема расположения кристаллографических осей в нем (*б*)

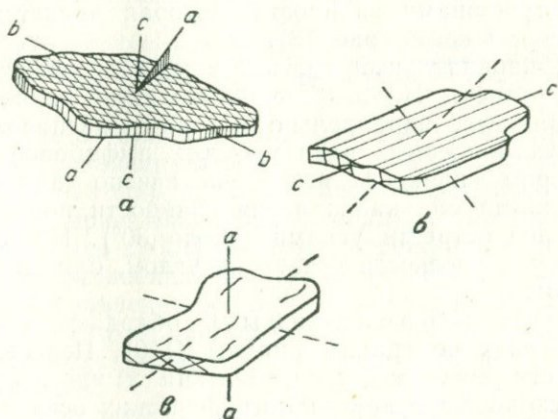


Рис. 48. Ориентированные разрезы моноклинного амфибола
a — разрез, перпендикулярный третьей кристаллографической оси *c* (поперечный разрез); *б* — разрез, параллельный оси *c* (продольный); *в* — разрез, близкий к перпендикулярю к первой кристаллографической оси

В кристалле параллельно следу пересечения плоскостей спайности направлена ось c (рис. 47). Перпендикулярно этой оси в остром углу спайности расположена вторая ось b . Под прямым углом к оси b , но под углом 106° к оси c расположена первая ось a . Для амфиболов различают два кристаллографически ориентированных разреза.

1. Разрез, перпендикулярный третьей кристаллографической оси c (поперечный). На разрезе наблюдаются два пересекающихся направления спайности под углом 56° (или 124°).

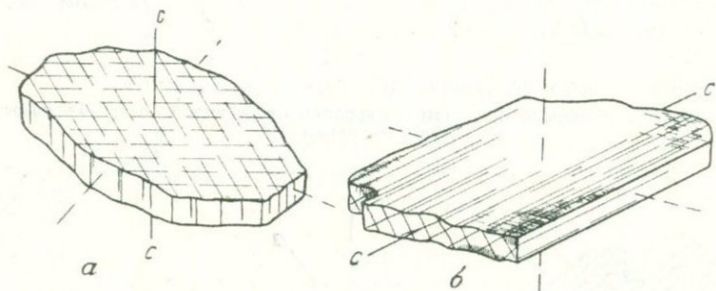


Рис. 49. Ориентированные разрезы пироксена

a — разрез, перпендикулярный третьей кристаллографической оси c (поперечный); b — разрез, параллельный ей (продольный)

Ось c будет направлена под прямым углом к плоскости среза, т. е. параллельно следу пересечения плоскостей спайности. Ось b будет биссектрисой острого угла между направлениями спайности. На направление оси a указывает биссектриса тупого угла, образуемого трещинами спайности, которая является проекцией оси a на плоскость среза (рис. 48).

2. Разрез, параллельный третьей кристаллографической оси c (продольный разрез). На разрезе наблюдается только одно направление спайности, параллельно которому расположена ось c .

Кроме двух описанных разрезов, для амфиболов важен разрез, на котором спайность выражена неясно или отсутствует, т. е. случай, когда оба направления спайности подходят к плоскости среза под острыми углами (около 30°). На этом разрезе ось a подходит к плоскости среза под углом, близким к прямому (см. рис. 48, в).

Пироксены (моноклинные) обладают спайностью в двух направлениях по граням призмы (110) . Пересекаясь, плоскости спайности образуют угол, близкий к прямому (87 — 88°). Взаимное расположение кристаллографических осей у пироксенов такое же, как у амфиболов. Их направления точно так же распознаются на поперечных и продольных разрезах в шлифе (рис. 49). Различие лишь в том, что на поперечных разрезах положения второй и первой кристаллографических осей не могут быть уверенно зафиксированы, поскольку разница между тупым

и острым углами спайности составляет всего $4-6^\circ$, т. е. находится в пределах допустимой ошибки.

Плагиоклазы. Плагиоклазы кристаллизуются в триклинной сингонии. Их кристаллографические оси при пересечении не образуют прямых углов. Плагиоклазы обладают весьма совершенной спайностью по второму (010) и третьему (001) пинакоидам.

Для плагиоклазов очень важное значение имеет разрез, перпендикулярный первой кристаллографической оси a [100].

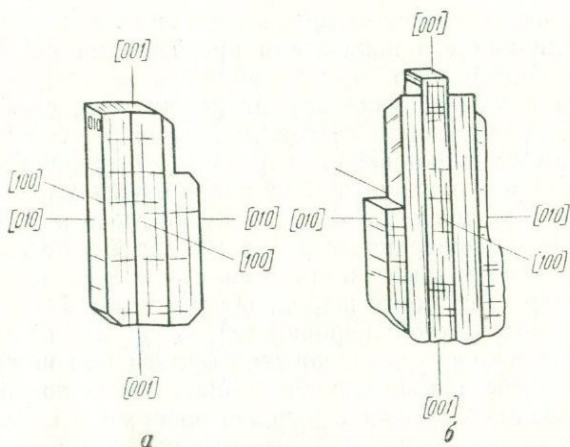


Рис. 50. Разрезы плагиоклазов, ориентированные перпендикулярно первой кристаллографической оси

a — разновидность двойника, у которого трещины по (001) видны у обеих серий индивидов; *b* — разновидность двойника — трещины по (001) видны только у одной серии

На этом разрезе отчетливо видны трещины спайности в двух направлениях, пересекающиеся почти под прямым углом $86-88^\circ$. Ось a [100] направлена параллельно следу пересечения плоскостей спайности, т. е. ориентирована перпендикулярно плоскости среза. На направление оси c [001] указывают трещинки спайности, ориентированные по удлинению кристалла (спайность по второму пинакоиду), на направление оси b (010) — трещинки, поперечные удлинению (спайность по третьему пинакоиду). Это последнее направление спайности не всегда выражено так четко, как первые. Дело в следующем.

Кристаллы плагиоклазов очень часто срastaются в серии двойников по плоскости (010). У одних разновидностей двойников трещинки спайности по (001), переходя из одного индивида в другой, отклоняются от первоначального направления на $4-6^\circ$, при этом образуется характерный излом на границе срастания (рис. 50). В других двойниках на ориентированных разрезах трещинки спай-

ности просматриваются только у одной серии индивидов. У другой же они либо просматриваются неясно, либо не просматриваются вовсе.

Встречаются и другие формы соотношений плоскостей спайности у плагиоклазов, но они наблюдаются относительно реже и имеют меньшее значение.

Относительная величина показателя преломления

Важным диагностическим признаком минерала является относительная величина его показателя преломления по сравнению с окружающей средой. Это отличие обнаруживается, если исследовать минерал в узком пучке параллельных или слабо расходящихся лучей. Для сужения светового потока, поступающего в оптическую систему микроскопа через осветительное устройство, служит диафрагма, расположенная над нижним николем.

Шагреновая поверхность. В узком пучке света наблюдается интересное явление—поверхности зерен минералов, которые до того были относительно ровными и чистыми, становятся по мере затягивания диафрагмы все более шероховатыми и, наконец, сплошь покрываются густой сеткой неровностей. Узор таких неровностей напоминает поверхность ватмановской бумаги или шагреновой кожи, откуда и заимствовано название—шагреновая поверхность.

Причина возникновения шагреновой поверхности заключается в том, что при изготовлении шлифа отшлифованная поверхность прозрачной пластинки горной породы не полируется. Она остается шероховатой, покрытой мельчайшими бугорками и раковинками. Пучок света, проходя через предметное стекло, канадский бальзам и кристаллическую пластинку минерала, при переходе из одной среды в другую преломляется.

Величина угла преломления светового пучка зависит от различия величин показателей преломления двух сред и положение поверхности раздела по отношению к направлению светового пучка. Так, при переходе из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей плотностью пучок света, преломляясь, приближается к направлению перпендикуляра к поверхности раздела. Величина отклонения пучка от первоначального направления тем больше, чем больше различие в величинах показателей преломления различных сред и чем более пологий угол, под которым пучок подошел к плоскости раздела.

В шлифе показатели преломления стекла и канадского бальзама очень близки, поэтому преломление света, вертикально падающего на ровную границу раздела, незначительно. Картина существенно изменится на границе раздела канадского бальзама и шероховатой поверхности кристаллической пластинки.

В зависимости от положения плоскости раздела в каждой отдельной точке и различий в показателях преломления канадского

бальзама и данного минерала направление отдельных пучков света отличается от первоначального на больший или меньший угол, причем лучи то сближаются, то расходятся (рис. 51). Пучок света, рассеянный у нижней границы кристаллической пластинки, под разными углами подходит к неровной поверхности верхней границы и, проникая через нее, рассеивается еще больше. Неравномерное преломление света, вызванное шероховатостью верхней границы кристаллической пластинки, сообщает неравномерную освещенность зерну минерала и оттеняет все неровности на его поверхности. Чем больше рассеивает свет кристаллическая пластинка,

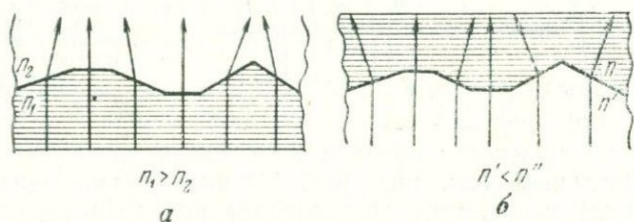


Рис. 51. Характер рассеивания света при переходе из одной среды в другую при неровной границе раздела *а* — из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления; *б* — из среды с меньшим в среду с большим показателем преломления

ка, чем больше отличается показатель ее преломления от показателя преломления канадского бальзама, тем резче выражена шагрeneвая поверхность. У разных минералов она выглядит различно.

В зависимости от разницы в показателях преломлений канадского бальзама и кристалла шагрeneвая поверхность может быть резкой, средней, низкой или совсем отсутствовать (кварц).

Рельеф. Чем больше разница в показателях преломления рассматриваемого зерна и окружающих его других зерен, тем более рельефным (выпуклым или вогнутым) кажется зерно.

Рельефность зерен минерала или, как принято называть, высота рельефа, так же как и шагрeneвая поверхность, зависит от сравнительной величины показателя преломления и является мерой для его оценки. Рельеф может быть высокий, средний и низкий, иногда выделяют очень высокий и очень низкий.

Для того чтобы уяснить разницу между минералами с разной высотой рельефа, необходимо исследовать с этой целью некоторые из них под микроскопом.

Световая полоска. По характеру шагрeneвой поверхности или по высоте рельефа минерала можно решить вопрос о том, насколько показатель его преломления отличается от показателя преломления канадского бальзама, но нельзя установить, какой показатель преломления больше — минерала или канадского бальзама. Для определения относительной величины показателя преломления используют явление полного внутреннего отражения, которое

возникает на границе двух сред с разными показателями преломления.

Свет, переходящий из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления, отклоняется

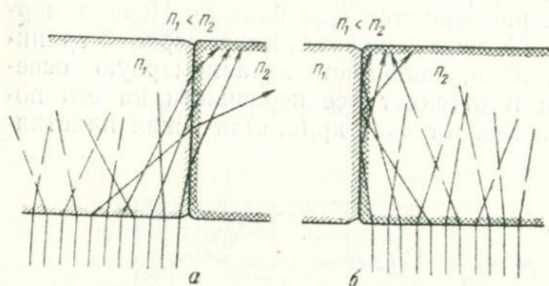


Рис. 52. Характер преломления света вблизи границы раздела двух сред с разными показателями преломления:

a — лучи, преломляясь, проникают через границу раздела; *б* — лучи претерпевают полное внутреннее отражение и создают дополнительную подсветку (световую полосу) вблизи границы раздела

от нормали к плоскости раздела на больший угол по сравнению с первоначальным (см. рис. 51). Начиная с некоторых малых (критических) углов, свет претерпевает полное внутреннее отра-

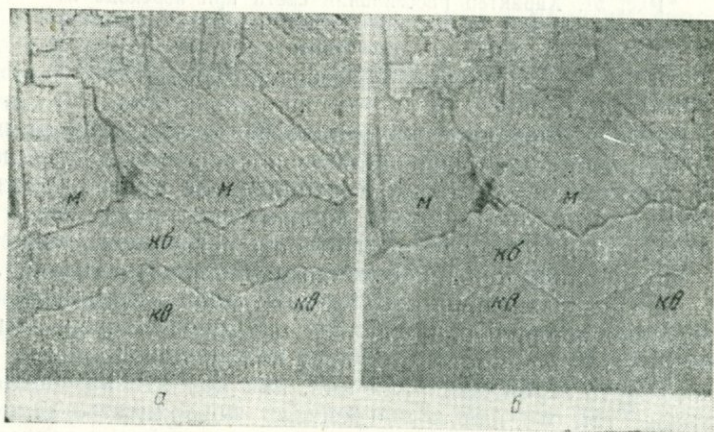


Рис. 53. Световая полоска в шлифе

a — тубус микроскопа поднят, световая полоска с трещины, заполненной канадским бальзамом, переместилась на мусковит (*м*) и кварц (*кв*); *б* — тубус опущен, световая полоска переместилась на канадский бальзам (*кб*). Световая полоска в кварце ($n=1,55$) уже и бледнее, чем у мусковита ($n=1,60$)

жение. В шлифе поток параллельных или слабо расходящихся световых лучей, рассеянных неровностями нижней границы кристаллической пластинки, преобразуется в световой пучок, расходящийся в разные стороны. Одна часть этого пучка достигает верхней поверхности пластинки, другая попадает на вертикальную границу раздела пластинки и канадского бальзама или другого минерала. Большинство лучей подходит к плоскости разде-

ла, образуя с нею малые углы, и если граничащая среда отличается меньшим показателем преломления, они претерпевают полное внутреннее отражение (рис. 52). Серия таких световых пучков создает дополнительную освещенность среды с большим показателем преломления вблизи границы раздела и наблюдается в виде очень узкой световой полоски, параллельной границе зерна минерала (рис. 53).

Световая полоска становится хорошо видимой, если сузить диафрагму и слегка поднять тубус. При этом освещенность зерна минерала уменьшается, и световой эффект пучка лучей, претерпевших полное внутреннее отражение, виден особенно хорошо. Поднимая и опуская тубус, можно заметить, что световая полоска движется то в одну сторону от границы раздела, то в другую.

При поднятии тубуса световая полоска перемещается в сторону среды с большим показателем преломления; при опускании тубуса, наоборот, — в сторону среды с меньшим показателем преломления*. Световая полоска является чутким индикатором, она отчетливо видна на границе двух сред, если показатели их преломления отличаются хотя бы на 0,001. Особенно хорошо она видна на бесцветных минералах, показатели преломления которых отличаются от канадского бальзама на 0,05—0,07. Для первого упражнения надо взять шлиф с такими минералами, как мусковит или основной плагиоклаз (лабрадор или битовнит).

После того как будут отработаны навыки сравнения показателей преломления на бесцветных минералах с небольшими различиями в величине показателя преломления по отношению к канадскому бальзаму, можно приступить к работе с минералами, показатели преломления которых резко отличаются от показателей преломления окружающей среды.

Световая полоска в минералах, резко отличающихся показателем преломления от окружающей среды, и в кристаллах игольчатой или волокнистой формы. В тех случаях, когда показатель преломления минерала резко отличается от показателя канадского бальзама, световая полоска вследствие более сильного рассеивания света в кристаллической пластинке видна хуже. Ширина ее больше, она имеет расплывчатые края и быстрее перемещается при поднятии тубуса. В этих случаях отчетливо видна теневая полоска. Она, как и световая полоска, повторяет контуры кристалла и представляет собой узкую серую линию — как бы разрывающую тень границы зерна. При поднятии тубуса она, расширяясь, перемещается в ту же сторону, что и световая полоска, но обычно лучше видна.

* Одним из первых в 1882 г. явление световой полоски объяснил и использовал при разработке методики определения показателей преломления кристаллов австрийский ученый-петрограф Ф. Бекке. Поэтому в литературе световая полоска часто называется его именем — полоска Бекке.

Можно использовать другой прием. Грубо вращая макрометрический винт, поднимая и опуская тубус, можно заметить, что при подъеме тубуса все зерно минерала светлеет, если показатель преломления минерала значительно выше окружающей среды, и темнеет, если он заметно ниже показателя преломления окружающей среды.

К этому же приему необходимо прибегать при работе с игольчатыми или волокнистыми минералами, поперечные размеры которых настолько малы, что обычные приемы наблюдения за световой полоской не могут быть использованы.

Дисперсионный эффект Лодочникова

На границе канадского бальзама и бесцветного минерала или на стыке зерен двух бесцветных минералов при сравнении их показателей преломления иногда наблюдается интересное явление — вместо световой полоски белого света, которая возникает в обычных условиях, появляется цветная окрашенная световая полоска, золотисто-розовая или бледно-зеленая. На поднятие и опускание тубуса она реагирует своеобразно: при поднятии тубуса перемещается в сторону среды с большим показателем преломления и окрашивается в бледно-зеленый цвет, при опускании тубуса — перемещается в сторону среды с меньшим показателем преломления и окрашивается в золотисто-розовый цвет.

Впервые явление дисперсии света на границе раздела двух сред описал и объяснил В. Н. Лодочников, а потому эффект дисперсии носит его имя.

Разложение световой полоски белого света на цветные вызывается следующими причинами. Как было отмечено, при переходе светового пучка из одной среды в другую на границе раздела происходит преломление света, а при некоторых условиях возникает явление полного внутреннего отражения. Световая волна белого света представляет собой семейство световых волн разной длины. Величины углов, начиная с которых происходит полное внутреннее отражение, для световых волн разной длины различны. Для коротковолновой «фиолетовой» части спектра (зеленый, синий и фиолетовый цвета, диапазон длин волн от 515 до 410 *нм*) полное внутреннее отражение происходит при меньших углах. Для длинноволновой «красной» части спектра (красный, оранжевый и желтый цвета, диапазон длин волн от 780 до 560 *нм*) полное внутреннее отражение происходит при больших углах.

Таким образом, в той части светового пучка, которая подходит к поверхности раздела под углами, близкими к критическим, происходит дисперсия белого света. Коротковолновая часть спектра претерпевает полное внутреннее отражение, и при поднятии тубуса создается светло-зеленая окраска у границы зерен со стороны среды с большим показателем преломления. Длинноволновая часть спектра проходит через границу раздела, и при опус-

кании тубуса возникает золотисто-розовая окраска у границы зерен со стороны среды с меньшим показателем преломления.

При малых размерах кристаллических выделений (сотые доли миллиметра в поперечнике) вся площадь среза зерна окрашивается соответственно в бледно-зеленый или золотисто-розовый цвет. Это явление очень удобно использовать при изучении микрозернистых пород, сложенных несколькими бесцветными минералами, например кварцем, альбитом и калиевым полевым шпатом. Приспуская и приподнимая тубус, по изменению окраски одних зерен в розовые, а других — в зеленые цвета, можно определить количественные соотношения минералов, слагающих породу.

Дисперсия света хорошо видна на границе зерен двух бесцветных минералов с небольшой разницей в показателях преломления, например калиевого полевого шпата и кварца. Для того чтобы лучше видеть изображение, надо перейти на увеличение $20\times$ или больше, усилить освещение и слегка затянуть диафрагму.

Зная относительную величину показателя преломления, можно уточнить характер рельефа. Рельеф считается положительным, если показатель преломления минерала выше, чем у канадского бальзама, и отрицательным, если он ниже.

Показатель преломления минерала можно сравнивать не только с канадским бальзамом, но и с окружающими минералами, если они имеют непосредственную границу. Методика сравнения показателей преломления двух соприкасающихся минералов аналогична рассмотренной выше.

Для последующей работы необходимо иметь шкалу оценки величины показателя преломления минерала по его рельефу, шагреневой поверхности и поведению световой полоски. Удобно пользоваться табл. 1.

Таблица 1

Шкала оценки величины показателя преломления

Минерал	Шагреневая поверхность	Рельеф	Показатель преломления
Гранат	Очень резкая	Очень высокий, положительный	1,8 и выше
Пироксен	Резкая	Высокий, положительный	1,7
Мусковит	Средняя	Средний, положительный	1,6
Основной плагиоклаз	Низкая	Низкий положительный	1,56
Кварц	Нет	Очень низкий положительный	1,54
Калиевый полевой шпат	Низкая	Низкий, отрицательный	1,52
Флюорит	Резкая	Высокий, отрицательный	1,43

Изложенная здесь методика определения относительной величины показателя преломления обычно используется при общих описаниях минералов на предварительных этапах исследования. Точные значения показателей преломления минералов (с точностью до 0,001) определяются иммерсионным методом.

Глава четвертая

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ В СКРЕЩЕННЫХ НИКОЛЯХ

В скрещенных николях определяют силу двупреломления минералов и расположение осей оптической индикатрисы относительно кристаллографических направлений. В оптическую систему микроскопа вводится верхний николю.

Интерференция световых волн

Верхний николю — анализатор — ориентирован так, что плоскость его главного сечения расположена под прямым углом к плоскости главного сечения нижнего николя. Поэтому плоскополяризованная волна, выходящая из нижнего николя, полностью уничтожается верхним николю, и в окуляре наблюдается темнота. Однако если на пути плоскополяризованного света между нижним и верхним николями поместить шлиф горной породы, произойдет характерное явление — зерна бесцветных или слабо окрашенных минералов приобретут яркую цветную окраску вследствие интерференции.

За один полный поворот столика микроскопа каждое зерно четыре раза просветляется, приобретает наиболее яркую освещенность, затем постепенно меркнет и, наконец, совершенно гаснет — становится черным.

Сущность явления интерференции можно кратко пояснить следующим образом. Плоскополяризованная световая волна, вышедшая из нижнего николя, попадает в оптически анизотропную среду минерала и делится в ней на две волны со взаимоперпендикулярными направлениями колебаний. Образовавшиеся световые волны распространяются практически в одном направлении, но с разными скоростями. Проходя через кристалл, они не одновременно выйдут из него — сначала выйдет одна, затем другая. Между волнами образуется разрыв или, как принято называть, разность хода. Величина разности хода зависит от длины пути, пройденного волнами в анизотропной среде, т. е. от толщины кристаллической пластинки d и величины, характеризующей разницу в скоростях движения волн. Такой величиной является разность показателей преломления кристалла или сила двупреломления ($n_g - n_p$).

Разность хода R можно записать в виде формулы

$$R = d(n_g - n_p).$$

В воздушной изотропной среде между шлифом и верхним николем обе световые волны распространяются с равной скоростью, поэтому сохраняется образовавшаяся разность хода. Попадая в верхний николь, каждая из волн расщепится на две составляющие — параллельную и перпендикулярную главному сечению николя. Верхний николь пропускает только те составляющие световых волн, плоскости колебаний которых совпадают с его главным сечением. Перпендикулярные составляющие уничтожаются. III

Таким образом, с помощью верхнего николя составляющие двух волн, до того колебавшиеся в двух взаимоперпендикулярных направлениях, совмещаются в одну плоскость. Происходит сложение волн, смещенных одна относительно другой на величину, равную разности хода плюс полволны.

Последнее условие — смещение на полволны в дополнение к разности хода — следует кратко пояснить, несколько повторив только что приведенные рассуждения, но под другим углом зрения.

В результате прохождения света через систему поляризатор — кристалл — анализатор направление колебаний световых волн преобразовывается трижды:

1) из поляризатора выходит плоскополяризованная световая волна с заданным (назовем условно — первоначальным) направлением колебаний;

2) в анизотропной среде кристалла это направление колебаний разделится на два, в общем случае ни одно из направлений не совпадает с первоначальным, и в то же

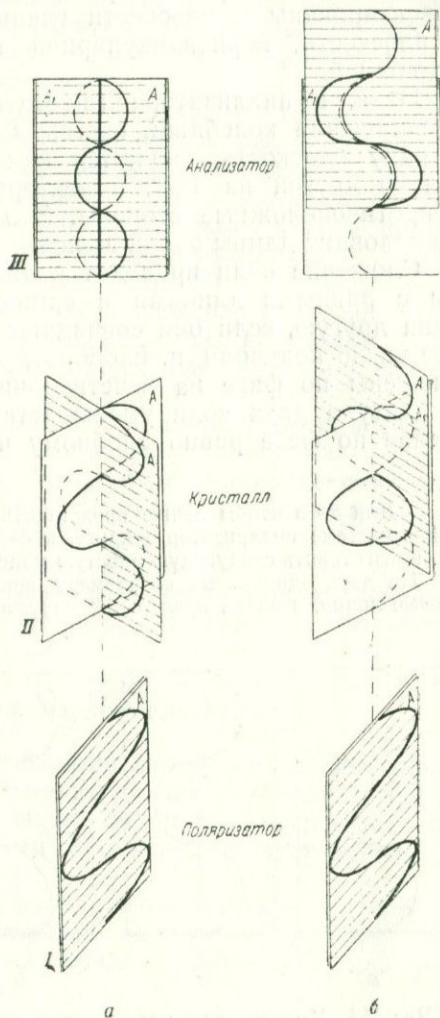


Рис. 54. Схема преобразования колебаний световых волн в системе поляризатор — кристалл — анализатор

a — кристалл вызывает незначительную разность хода (близкую к нулю), суммарное смещение равно длине полуволны, результирующая амплитуда равна нулю (III); *б* — кристалл вызывает значительную разность хода, равную длине полуволны, суммарное смещение равно полной длине волны, результирующая амплитуда равна сумме амплитуд

время колебания будут ориентированы перпендикулярно одно другому;

3) в анализаторе две световые волны разделятся на составляющие, из которых сохранятся только те, колебания которых ориентированы в плоскости главного сечения анализатора, т. е. в плоскости, перпендикулярной первоначальному направлению колебаний.

Итак, в анализаторе (внимательно проследите еще раз все превращения колебаний световых волн) две волны, совмещенные в одну плоскость, окажутся как бы повернутыми одна относительно другой на 180° , а векторы их амплитуд — обращенными в противоположные стороны. Это и приводит к смещению волн на половину длины одной волны.

Сложение волн приводит к явлению интерференции. Две волны с равными длинами и одинаковыми периодами усиливают одна другую, если они совпадают по фазе, т. е. смещены на четное число полуволн, и, наоборот, они взаимно уничтожаются, если смещены по фазе на нечетное число полуволн. Результирующая амплитуда двух волн уменьшается или увеличивается, если смещение по фазе равно дробному числу полуволн*. Световая вол-

* Для того чтобы лучше представить механизм сложения световых колебаний в системе поляризатор — кристалл — анализатор, для пояснения рис. 54 полезно изготовить следующую простую модель.

На двух одинаковых по размеру прямоугольных листках кальки провести осевые линии, а затем правильные синусоиды так, чтобы при наложении листков изображения полностью совпали (в просвет).

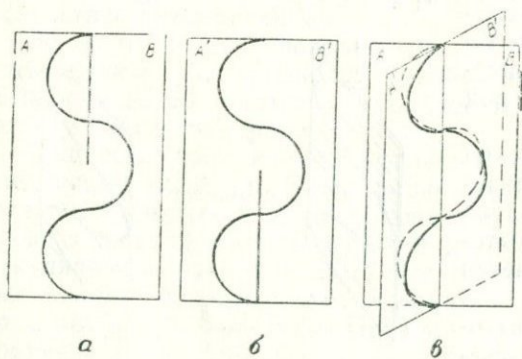


Рис. 55. Модель для иллюстрации прохождения разности хода и сложения световых волн в системе поляризатор — кристалл — анализатор

условно отвечать направлениям световых колебаний в кристалле (см. рис. 54, положение II). Наконец, если листы развернуть еще больше, т. е. сложить их в одну плоскость так, чтобы совпали A и B' , B и A' , то схема будет соответствовать сложению световых волн в анализаторе (см. рис. 54, положение III).

Перемещая листы по осевой линии один относительно другого, т. е. моделируя величины разности хода, возникшие при прохождении плоскополяризован-

Обозначить уголки одного листа буквами A и B , другого — A' и B' (рис. 55, а и б). Разрезать первый лист по осевой линии снизу до половины, а второй — сверху до половины. Если теперь в разрез одного листа ввести разрез другого (рис. 55, в) так, чтобы совпали уголки A и A' , B и B' , а изображения синусоид слились, то полученную схему можно условно принять как модель плоскополяризованной световой волны, вышедшей из поляризатора (см. рис. 54, положение I). Если листы развернуть друг относительно друга по осевой линии под прямым углом, то такая схема будет

на белого света представляет собой совокупность световых волн различных цветов видимой части спектра. Поэтому явление интерференции может ослабить амплитуды одних волн, но усилить амплитуды других.

Зная разность хода, создаваемую в данном кристалле, и длину световых волн видимой части спектра, можно заранее рассчитать, какие световые волны станут слабее в результате интерференции и какие, наоборот, усилятся.

Например, в роговой обманке при стандартной толщине шлифа $0,03$ мм при скрещенных николях возникает разность хода R , равная 690 м. Вычислим интерференционную окраску. Длина волн основных цветов (в м): красного 760 , оранжевого 620 , желтого 560 , синего 470 , индиго 440 , фиолетового 410 . В принятую нами разность хода почти по два раза укладываются полуволны красного и оранжевого цвета ($690:360 \approx 2$, $690:310 \approx 2$). Это будет наиболее ослабленная часть спектра, поскольку суммарная разность хода, созданная пластинкой кристалла (две полуволны) и анализатором (одна полуволна), будет составлять нечетное число полуволн.

Почти по три раза укладываются в принятую нами величину полуволны зеленого, синего, индиго и фиолетового цвета. Суммарная разность хода для этих цветов будет равна четному числу полуволн — это будет наиболее усиленная часть спектра. Зерно минерала окажется окрашенным в цвета, полуволны которых наиболее полно укладываются в данную разность хода, т. е. в цвета синий и индиго. К этим цветам будет примешан зеленый.

Эту задачу можно решить значительно быстрее, пользуясь цветной номограммой Мишель-Леви.

Цветная номограмма Мишель-Леви

На этой номограмме по горизонтали отложены величины разности хода (в нанометрах), а по вертикали — толщина шлифа (в сотых долях миллиметра). Как это видно в номограмме, каждой конкретной величине разности хода соответствует определенная интерференционная окраска.

В левой части номограммы изображены наиболее низкие окраски, соответствующие минимальным величинам значений разности хода. Это окраски первого порядка. Они начинаются тем-

ной волны через анизотропный кристалл (положение II) и совмещая колебания в одну плоскость, можно построить суммарную их составляющую.

На рис. 54 приведены два крайних случая:

а) разность хода ничтожно мала (близка к нулю), световые колебания, смещенные на полуволны при совмещении в одну плоскость, не совпадая по фазе, уничтожили друг друга — суммарная амплитуда равна нулю (света нет);

б) разность хода равна полуволне, световые колебания, смещенные на длину волны при совмещении их в одну плоскость, полностью совпадая по фазе, усилили друг друга — суммарная амплитуда имеет максимально возможное в данных условиях значение.

ной буровато-серой окраской, которая по мере увеличения разности хода постепенно переходит сначала в серую, потом светло-серую, белую, бледно-желтую, желтую, оранжевую и, наконец, в красную. Далее красная окраска сменяется фиолетовой, с которой начинается второй порядок. Последовательность смены окрасок в начале второго порядка отличается от первого. Во втором порядке фиолетовая сменяется синей, синяя переходит в синезеленую, потом в зеленую, затем в желто-зеленую, в желтую, далее, как и в первом порядке, следуют оранжевая и красная. В такой же последовательности сменяются окраски в третьем, четвертом и более высоких порядках. Каждый порядок начинается фиолетовой и заканчивается красной окраской.

Зная разность хода и пользуясь номограммой, можно сразу определить интерференционную окраску минерала, для этого достаточно по горизонтали отложить величину R . Вертикально расположенная над этой точкой цветная полоса соответствует интерференционной окраске минерала. Разность хода связывает две величины — толщину кристаллической пластинки d и величину силы двупреломления ($n_g - n_p$). Последняя является очень важной константой минерала.

Определение величины силы двупреломления

Из формулы разности хода $R = d(n_g - n_p)$ числовую величину силы двупреломления можно определить как частное от деления величины разности хода на толщину кристаллической пластинки:

$$(n_g - n_p) = \frac{R}{d}.$$

Так, например, двойное лучепреломление роговой обманки при $R = 690$ нм и $d = 0,03$ мм будет

$$(n_g - n_p) = \frac{R}{d} = 690 : 30\,000 = 0,023.$$

Величину силы двупреломления легко определить, пользуясь цветной номограммой Мишель-Леви. С нижнего левого угла номограммы веером вверх и вправо расходится пучок прямых линий. Они соединяют точки равных величин силы двупреломления при разных толщинах шлифа и разных значениях R .

Отложив по горизонтали величину разности хода, а по вертикали толщину кристаллической пластинки, получим на номограмме точку. Если через нижний левый угол и эту точку провести прямую, то на пересечении с верхней (или правой боковой) границей рамки найдем величину ($n_g - n_p$).

Задание для самостоятельной работы

Пользуясь цветной номограммой Мишель-Леви, определить величину ($n_g - n_p$) при следующих данных: толщина шлифа 0,03 мм, разность хода $R_1 = 690$, $R_2 = 1020$, $R_3 = 1140$, $R_4 = 1240$, $R_5 = 1400$ нм.

Определение высоты интерференционной окраски в шлифе

Как видно из цветной номограммы и показано в разобранных примерах, в каждом порядке интерференционные окраски повторяются. Зерно минерала может быть окрашено в любой из них. Возникает задача, как определить порядок интерференционной окраски, например, как отличить желтую окраску второго порядка от желтой первого или желтой третьего порядков и т. д.

Практически решить эту задачу помогает одна особенность шлифуемого материала. Если шлифуется однородная масса (стекло, пластмасса, металл), поверхность ее получается совершенно ровной и гладкой. Если же шлифованию подвергается зернистый материал, состоящий из неоднородных по физическим свойствам зерен, то краевые части этих зерен больше стираются, чем их середина. Поэтому каждое зерно по форме поперечного среза более или менее приближается к линзе, плоской по середине и утончающейся к краям.

На произвольном срезе зерна минерала в каждой его точке величина силы двупреломления ($n_g - n_p$) будет постоянной, так как она зависит только от ориентировки разреза. Но в связи с тем что толщина зерна в шлифе изменяется, постепенно увеличивается от периферии к центру, величина разности хода $R = d(n_g - n_p)$ тоже будет изменяться, постепенно увеличиваясь от краев к центру. Следовательно, и интерференционная окраска зерна будет постепенно возрастать в том же направлении.

Центральная плоская часть зерна будет окрашена в ровный цвет, наивысший для данного разреза. А в краевых частях, там, где величина d имеет наименьшее значение, будут наблюдаться наиболее низкие окраски (например, серая, белая, первого порядка). Постепенно, по мере возрастания величины d , одна окраска в каемке сменяется другой, все более высокой. Последовательно отмечая одну за другой окраски и порядки, начиная от самых низких, ustanавливают наивысшую окраску и ее порядок, соответствующий данной пластинке в ее наиболее толстой части.

Величина силы двупреломления зависит от оптической ориентировки разреза. На разрезах, перпендикулярных оптической оси, она всегда равна нулю. На разрезах, параллельных оптической оси (для одноосных кристаллов) или параллельных плоскости оптических осей (для двуосных), она равна какой-то максимальной величине, характерной для данного минерала. Из всех возможных разрезов очень важно найти разрез с наивысшей интерференционной окраской.

Определение интерференционной окраски представляет собой задачу различной трудности для разных минералов. Для начала работы рекомендуется воспользоваться в шлифах такими минералами, как оливины и пироксены, избегая на первых порах окрашенных разностей последних. Вначале надо найти и определить разрезы с интерференционными окрасками второго порядка — синей, зеленой и зеленовато-желтой, тщательно наблюдая за их

краевыми каемками. Далее перейти к повторяющимся цветам того же порядка — желтым, оранжевым и красным. В заключение надо найти в шлифе низкие окраски первого порядка и высшие интерференционные окраски.

В тех случаях, когда каемки очень тонки и при объективах с увеличениями $8\times$ и $9\times$ становится трудно разобраться в переходах цветов интерференции, необходимо перейти на объективы с увеличением $20\times$ и даже более сильные: 40 или $60\times$.

Особенности определения некоторых интерференционных окрасок

Интерференционные окраски окрашенных минералов. Интерференционная окраска определяется разностью хода, которую создает кристаллическая пластинка. Из формулы $R=d(n_g-n_p)$ видно, что она зависит только от толщины этой пластинки и величины силы двупреломления. Собственная окраска минерала не влияет на высоту интерференционной окраски, но, просвечиваясь сквозь эту окраску, она как бы загрязняет ее. Особенно сильно она ощущается главным образом в первой половине первого порядка. Даже в слабо окрашенных минералах собственная окраска полностью маскирует белую интерференционную окраску первого порядка. В этом случае в скрещенных николях зерно минерала выглядит так же, как и при одном николе.

• Особенно трудны для определения минералы, интенсивно окрашенные в синие и зеленые тона. Окраска минерала загрязняет интерференционные окраски иногда не только в первом, но и во втором порядке. Светло-серые, белые и бело-желтые цвета интерференции часто полностью перекрываются цветом минерала, который при недостаточном навыке можно принять за интерференционную окраску второго порядка. Чтобы не принять низкие окраски за более высокие, необходимо при работе с окрашенными минералами обращать внимание на следующие признаки низкой окраски: 1) зерно имеет одинаковую окраску при одном и при двух николях; 2) в краевых частях, где толщина пластинки минимальная, зерно минерала имеет темно-серую кайму; цветные каемки, обычные для высоких окрасок, отсутствуют; 3) в отличие от ярких и чистых интерференционных окрасок более высоких порядков зерно обычно окрашено в блеклые, тусклые тона.

Интерференционные окраски минералов, дающих в шлифе тонкие краевые каемки. Ряд минералов, обладающих высоким двупреломлением, например тальк, иногда слюды, дают в шлифе настолько тонкие краевые каемки, что проследить в них последовательность смены интерференционных окрасок трудно. При рассмотрении таких каемок с обычным увеличением создается впечатление, что красная, фиолетовая и синие окраски сливаются в одну черную полосу, имеющую красноватый отлив с одной стороны и зеленоватый — с другой, а оранжевая, желтая и желто-зеленая окраски сливаются в одну бледно-желтую полосу. Проис-

ходит чередование черных и желтых полос; при этом одному порядку вместо семи цветных полосок соответствуют лишь две — черная и светло-желтая.

Считая полосы одного цвета, например черные, нетрудно установить, сколько порядков предшествует последнему, интерференционная окраска которого определяется. Очень тонкие крайние полосы дают минералы группы карбонатов.

Необычные интерференционные окраски (дисперсия двупреломления)

При изучении в скрещенных николях отдельных разновидностей хлоритов, эпидота и некоторых других минералов наблюдаются ржаво-бурые, красно-фиолетовые, индигово-синие и другие интерференционные окраски. Они резко отличаются от нормальных и не отвечают цветам ньютонových колец.

Чтобы понять причину возникновения этих необычных или, как их не совсем правильно иногда называют, аномальных интерференционных окрасок, необходимо уточнить одно из положений, поясняющих характер прохождения поляризованного света через анизотропное вещество.

До сих пор принималось, что величина разности хода, образовавшаяся при прохождении пучка света через тонкую (постоянной толщины) пластинку анизотропного кристалла, одинакова для всего семейства световых волн видимой части спектра белого света. Однако это не всегда так. В некоторых анизотропных минералах световые волны разной длины распространяются с разной скоростью. В связи с этим величины показателей преломления n_g , n_m , n_p , например, для красного света, отличаются от показателей преломления зеленого, фиолетового и другого света. Естественно, что при таких условиях для разных частей спектра будут получены и различные величины силы двупреломления.

Изменение величины силы двупреломления для разных частей спектра в одном и том же веществе называется дисперсией двупреломления. В одних случаях сила двупреломления возрастает с увеличением длины волны, т. е. для фиолетового света, имеющего наиболее короткую волну, она будет наименьшей, а для красного света, обладающего наиболее длинной волной, — наибольшей. В других случаях, наоборот, сила двупреломления уменьшается с увеличением длины волны. Возможен и третий случай, когда в средней части спектра двупреломление отсутствует (для этих длин волн кристалл изотропен), а к краевым частям спектра оно постепенно возрастает.

Интерференционные окраски, возникающие при разных видах дисперсий двупреломления, сходны между собой, вследствие чего обычными методами исследований различить эти разновидности дисперсии невозможно. Поэтому при описании минералов в скрещенных николях отмечается только факт наличия дисперсии двупреломления.

Явление дисперсии проявляется и в других формах. Наиболее часто встречающиеся или имеющие диагностическое значение формы проявления дисперсии будут рассмотрены ниже.

Явление компенсации

Волна плоскополяризованного света, проникая в кристаллическую пластинку, разлагается в ней на две волны. Эти волны будут распространяться практически в одном направлении, но с разными скоростями, и колебания в них будут происходить в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. К моменту выхода волн из пластинки между ними образуется разность хода.

Если над кристаллической пластинкой с известной разностью хода на пути светового пучка расположить другую кристаллическую пластинку с такой же разностью хода и оптической ориентировкой, таким образом, чтобы в обеих пластинках совпадали направления колебаний быстрой и медленной волн или (что то же) одноименные оси индикатрисы, то, пройдя через обе пластинки вдвое больший путь, световые волны получают вдвое большую разность хода. Практически это выразится в том, что если рассматривать в микроскоп две сложенные пластинки, то их интерференционная окраска повысится вдвое (проследите на монограмме Мишель-Леви изменение интерференционной окраски для $d=0,03$ и $0,06$ мм при одной и той же величине n_g-n_p).

Если оставить первую пластинку в прежнем положении, а вторую повернуть на 90° таким образом, чтобы совпали направления разноименных осей индикатрисы, то в новом препарате одна световая волна пройдет первую пластинку с большей скоростью, а вторую — с меньшей. Другая волна, наоборот, пройдет первую пластинку с меньшей скоростью, а вторую — с большей. Таким образом, разность хода световых волн, возникших в первой пластинке, будет полностью выровнена — восполнена или компенсирована (отсюда и название этого явления) во второй. Интерференционная окраска станет в этом случае наиболее низкой, т. е. черной, а разность хода будет равна нулю.

Анализируя описанное явление, можем записать следующее правило:

Суммарная разность хода двух кристаллических пластинок, помещенных последовательно на пути светового пучка, зависит от их относительной ориентировки. При совпадении в пластинках одноименных осей индикатрисы результирующая разность хода складывается из суммы разностей хода, полученных в каждой пластинке в отдельности; интерференционная окраска в этом случае повышается. При совпадении разноименных осей индикатрисы результирующая разность равна разнице между разностями хода пластинок, интерференционная окраска минералов при этом понижается.

Компенсаторы. Явление компенсации обычно используется для

определения наименования осей оптической индикатрисы на разрезах кристаллов в прозрачных шлифах. Для этого специально изготавливают кристаллические пластинки с заранее определенной разностью хода и точной ориентировкой осей индикатрисы N_p и N_g . Такие пластинки называются компенсаторами.

В настоящее время применяются компенсаторы с разностью хода в 560 нм — так называемые гипсовые компенсаторы. Если такой компенсатор рассматривать в скрещенных николях, то он окрашивает все поле зрения в красно-фиолетовый цвет, поэтому иногда эти компенсаторы называют красными. Кроме красных или гипсовых компенсаторов, применяются серые, или слюдяные компенсаторы с разностью хода в 160—200 нм. Под микроскопом они окрашивают поле зрения в светло-серый, иногда буроватый или голубоватый цвет. Надо добавить, что в настоящее время компенсационные пластинки для того и другого вида компенсаторов делают из слюды. Название «гипсовый» отражает лишь исторический эпизод, когда компенсаторы с $R=560$ действительно делались из гипса.

Компенсаторы представляют собой тонкие кристаллические пластинки мусковита, заклеенные между двумя полосками стекла, так что короткая ось индикатрисы N_p в них всегда ориентирована по длинной стороне компенсатора, а N_g — по короткой (рис. 56).

При исследовании минералов с высокими интерференционными окрасками, выше первого порядка, удобнее применять серые, или слюдяные, компенсаторы. Они понижают или повышают интерференционную окраску минерала меньше чем на половину порядка, что облегчает определение наименования осей.

Если минерал обладает интерференционными окрасками первого порядка, то удобнее применять красный, или гипсовый, компенсатор. В этом случае разность хода компенсатора (не минерала, а компенсатора) понижается или повышается на величину разности хода минерала. Соответственно понижается или повышается интерференционная окраска компенсатора.

Определение наименования осей оптической индикатрисы двусных кристаллов

Определение наименования осей индикатрисы производится в скрещенных николях. Выбирают разрез минерала с наивысшими интерференционными окрасками и в зависимости от них заранее

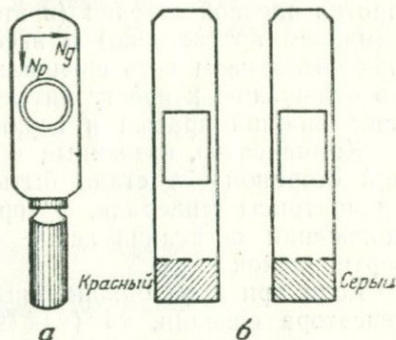


Рис. 56. Компенсаторы
а — заводского изготовления; б — лабораторного изготовления

решают, с каким компенсатором удобнее работать. Выбранное зерно совмещают с перекрестием нитей окуляра и поворотом столика микроскопа устанавливают его в положение погасания. В момент погасания зерна оси индикатрисы минерала ориентированы параллельно кресту нитей окуляра. Зная расположение осей индикатрисы, с помощью компенсатора можно определить их наименование.

Для этого необходимо повернуть столик микроскопа на 45° против часовой стрелки (в этом положении зерно минерала максимально просветлено) и ввести компенсатор в тубус. В тубусе над объективом есть специальный прорез, который ориентирован по отношению к кресту нитей окуляра под углом в 45° и пересекает нижний правый и верхний левый квадранты поля зрения.

Компенсатор, введенный в прорез тубуса, расположится длинной стороной — а стало быть осью Np , — параллельно той оси индикатрисы минерала, которая до поворота столика на 45° в положении погасания зерна была ориентирована параллельно вертикальной нити.

Если при этом одноименные оси индикатрис минерала и компенсатора совпали, то (как это следует из разобранных нами выше явления компенсации) интерференционная окраска зерна минерала повысится. Если при введении компенсатора совпали разноименные оси индикатрис, т. е. Np компенсатора и Ng минерала, то интерференционная окраска понизится.

Напоминаем, что при окрасках минерала в пределах первого порядка и при пользовании красным, или гипсовым, компенсатором следует отмечать изменения интерференционной окраски не минерала, а компенсатора. В тех случаях, когда при введении компенсатора характер изменения интерференционной окраски неясен, решить вопрос о наименовании осей индикатрисы становится трудно. Необходима проверка.

Для этого надо, не вынимая компенсатора, повернуть столик микроскопа на 90° в любую сторону (до совмещения оси Np компенсатора с другой осью минерала). При этом изменение интерференционной окраски становится, как правило, достаточно ясным. Разумеется, что в таком случае характер изменения будет обратным тому, который мог быть в первом случае.

Необходимо обратить внимание на следующее: приведенный здесь метод основан на установлении соотношения величин показателей преломления двусосного кристалла в главных направлениях световых колебаний. Этого вполне достаточно для прямого определения наименования осей индикатрисы этой разновидности кристаллов.

В одноосных кристаллах (Ne которых может иметь, например, значение Ng — для оптически положительных кристаллов, и Np — для оптически отрицательных), описанным методом можно установить только положение большей и меньшей осей индикатрисы. Наименование осей определяется путем исследования минерала в сходящемся свете (см. главу пятую).

Определение величины разности хода и силы двуупреломления с помощью компенсатора Берек

Иногда возникает необходимость определения величин разности хода и силы двуупреломления с точностью, значительно превышающей ту, которую может дать цветная номограмма. Для этого обычно используют компенсатор Берек (рис. 57).

В отличие от обычных компенсаторов с неподвижно укрепленной компенсационной пластинкой и постоянной разностью хода, в компенсаторе Берек пластина укреплена на подвижной оси и

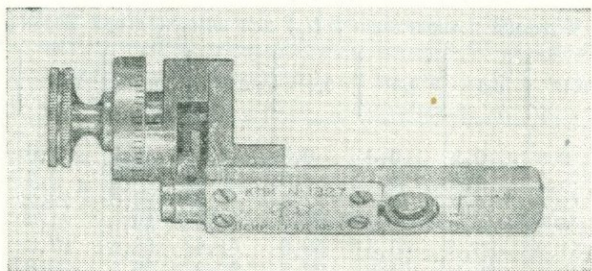


Рис. 57. Компенсатор Берек

с помощью поворотного кольца может быть повернута в одну и другую сторону на 30° от нейтрального положения. Компенсационная пластина компенсатора Берек вырезается из кристалла исландского шпата перпендикулярно его оптической оси. В нейтральном положении, т. е. когда пластина параллельна оправе компенсатора, оптическая ось микроскопа проходит через изотропное направление пластины, и компенсатор не создает разности хода, так как в этом положении $n_g - n_p = 0$. В скрещенных николях (без шлифа) наблюдается широкий размытый крест, закрывающий почти все поле зрения.

По мере поворота пластины (в любую из сторон) разность хода, создаваемая ею, постепенно растет — в скрещенных николях через поле зрения, постепенно повышаясь, проходят изогнутые цветные полосы интерференционных окрасок сначала первого, потом второго, наконец, третьего и четвертого порядков.

Любому углу поворота пластинки соответствует строго определенная величина разности хода. Угол поворота отсчитывается на поворотном кольце компенсатора по нониусу с точностью до $0,1^\circ$ (т. е. до $6'$) *.

Разность хода, создаваемая подвижной пластинкой компенсатора в том или ином ее положении, является сложной функцией

* Принципиальная идея компенсатора с устанавливаемой силой двуупреломления впервые была выдвинута Е. С. Федоровым и В. В. Никитиным. В качестве компенсационной пластины ими был использован кварц.

угла ее поворота. По мере поворота меняется угловое расстояние между оптической осью кристалла пластинки и проходящим через нее пучком лучей, в связи с чем меняется разность хода лучей обыкновенного и необыкновенного. Одновременно меняется длина пути световой волны через пластинку, т. е. ее видимая толщина. Кроме того, меняется и величина углов преломления при переходе света из воздушной среды в кристалл и наоборот и т. д.

Эта сложная зависимость или функция компенсации $f(i_k)$ * определяется по табл. 2.

Таблица 2

Функция компенсации $f(i_k)$ для компенсатора Берера

i_k	0,0°	0,1°	0,2°	0,3°	0,4°	0,5°	0,6°	0,7°	0,8°	0,9°
0°	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1	1,5	1,9	2,5
1	3,0	3,7	4,4	5,1	6,0	6,9	7,8	8,8	9,9	11,0
2	12,2	13,4	14,7	16,1	17,5	19,0	20,6	22,2	23,9	25,6
3	27,4	29,3	31,2	33,2	35,2	37,3	39,5	41,7	44,0	46,3
4	48,7	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	144,8
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	229,9	235,2	240,5
9	245,9	251,4	257,0	262,6	268,2	273,9	279,7	285,5	291,4	297,4
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	576	584
14	592	601	609	618	626	635	644	653	661	670
15	679	688	697	706	716	725	734	743	753	762
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	1258	1270	1283	1295	1307
21	1319	1332	1344	1357	1369	1382	1394	1407	1420	1432
22	1445	1458	1471	1484	1497	1510	1523	1537	1550	1563
23	1577	1590	1603	1617	1631	1644	1658	1672	1685	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	2123	2138
27	2153	2169	2184	2200	2215	2231	2247	2262	2278	2294
28	2310	2326	2342	2358	2374	2390	2407	2422	2439	2455
29	2471	2488	2504	2521	2537	2554	2570	2587	2604	2620
30	2637	2654	2671	2688	2705	2722	2739	2756	2773	2791
31	2808	2825	2843	2860	2877	2895	2912	2930	2947	2965

Известно также, что разность хода, создаваемая любой оптически анизотропной пластинкой, зависит от ее толщины. Для та-

* В отличие от угла падения луча, который обозначается i (см. стр. 10), угол поворота компенсатора нами обозначается как i_k . В большинстве учебных пособий и тот и другой угол обозначаются одинаково — i .

кого высокопреломляющего минерала, как кальцит, эта зависимость становится весьма ощутимой даже при ничтожных изменениях этой величины. Для компенсатора Берека, у которого стандартная толщина пластинки $\approx 1,0$ мм, эта слагающая разности хода определяется отдельно для каждого прибора, как его индивидуальная константа C . Полная величина разности хода компенсатора Берека складывается из двух величин: переменной $f(i_k)$ и постоянной C

$$R = f(i_k)C.$$

Определение константы C . При работе в естественном (белом) свете константа C определяется следующим образом. При скрещенных николях в тубус микроскопа вводится компенсатор Берека при горизонтальном положении пластинки. На кольце компенсатора отметка 30° должна быть совмещена с отметкой 0 на нониусе.

В дальнейшем надо тщательно следить за тем, чтобы компенсатор вводился в тубус и извлекался из него только при отсчете кольца на 30° . В противном случае прибор будет неминуемо поврежден.

После того как компенсатор правильно установлен и введен в прорез тубуса, поворотом его оси в одну сторону с перекрестием окуляра совмещается цветная фиолетовая полоска (начало второго порядка, $R=551$ нм) и берется первый отсчет (i_1). То же проделывается при повороте оси компенсатора в другую сторону — берется второй отсчет (i_2).

По полуразности полученных отсчетов $\frac{i_1 - i_2}{2} = i_k$ находится функция компенсации $f(i_k)$. Далее константа C находится как частное от деления разности хода на $f(i_k)$.

Пример. При повороте барабана компенсатора в одну сторону фиолетовая полоса $R=551$ нм совместилась с перекрестием окуляра при отсчете $16,2^\circ$; при повороте в другую сторону — при отсчете $43,4^\circ$.

$$i_k = \frac{43,4 - 16,2}{2} = 13,6^\circ.$$

По таблице определяется $f(i_k)$, соответствующая $i_k = 13,6^\circ$. Она равна 569. Вычисляется константа C ,

$$C = \frac{R}{f(i_k)} = \frac{551}{569} = 0,970.$$

Значение C выписывается отдельно.

Определение разности хода R на разрезе минерала. Разность хода на выбранном разрезе в шлифе определяется следующим образом.

1. Выбранный разрез кристалла устанавливается в центре поля зрения так, чтобы с перекрестием нитей был совмещен участок зерна с наиболее высокой интерференционной окраской. Оп-

ределяется ориентировка и наименование осей индикатрисы, после чего ось кристалла поворотом столика микроскопа располагается параллельно прорези компенсатора, т. е. под углом 45° к кресту нитей окуляра.

2. Компенсатор Берека с установленным отсчетом 30° вводится в прорез тубуса. Следует помнить, что по длинной стороне компенсатора расположена ось Ng^* .

3. Внимательно следя за изменением интерференционных окрасок на выбранном участке разреза, медленно повернуть ось в одну сторону и убедиться, что при этом окраски понижаются (если окраски повышаются, надо повернуть столик микроскопа на 90°).

4. Вращение оси компенсатора остановить в момент, когда в середине поля зрения на выбранном для наблюдения участке зерна окраска станет темно-серой. Делается первый отсчет угла поворота (i_1).

5. Ось компенсатора поворачивается в другую сторону и с появлением на том же участке зерна темно-серой окраски делается второй отсчет (i_2).

6. По полуразности отсчетов определяется i_k .

7. С помощью таблицы функций компенсации находится $f(i_k)$.

Разность хода определяется по формуле $R = f(i_k)C$.

Определение силы двупреломления. Для определения силы двупреломления надо располагать точными данными о величинах разности хода R и толщине шлифа d .

Способ определения R с помощью компенсатора Берека изложен выше. Определение толщины шлифа, а точнее толщины зерна минерала в шлифе, может производиться следующими приемами.

В шлифовальных лабораториях при изготовлении шлифов их толщину определяют по высоте интерференционной окраски некоторых минералов с хорошо известной силой двупреломления, например, по кварцу — $(n_g - n_p) = 0,009$. Если ориентированные в плоскости оптических осей зерна кварца в скрещенных николях имеют белую интерференционную окраску первого порядка, то считается, что толщина шлифа равна $0,03$ мм.

Этот способ, несмотря на всю его привлекательность, имеет явные ограничения: во-первых, не во всех породах присутствует кварц, во-вторых, разные минералы по разному истираются в процессе изготовления шлифа, в связи с чем толщина их зерен может колебаться в заметных пределах.

Толщину зерна в данной точке можно замерять другим менее точным, но независимым способом. Он сводится к тому, что объектив микроскопа фокусируется сначала на нижней поверхности шлифа, а затем на верхней. Величина расстояния между этими

* Исландский шпат — оптически отрицательный одноосный минерал. Поэтому при поворотах пластинки, вырезанной перпендикулярно оптической оси, большая ось индикатрисы Ng будет всегда расположена вдоль оси вращения.

положениями измеряется с помощью микрометричного винта при подъеме тубуса микроскопа, а затем вычисляется реальная толщина зерна.

Делается это следующим образом. При сильном увеличении — объективы с увеличением 40 и $60\times$ — устанавливается фокус на неровностях или пылинках у нижней поверхности пластинки шлифа. На оцифрованном кольце микрометричного винта против риски берется первый отсчет.

Далее, поднимая тубус только микрометричным винтом, фокусируют объектив на верхней поверхности и берут второй отсчет.

Разность отсчетов, взятых по микрометричному винту, дает представление о видимой или кажущейся толщине кристаллической пластинки шлифа d' . Но эта толщина всегда меньше действительной d . Сущность этого явления становится понятной, если внимательно рассмотреть приведенный ниже рисунок (рис. 58), на котором при опущенном объективе (нижнее его положение) дано действительное и кажущееся положение точки, расположенной на нижней поверхности шлифа (b_0 и b_1). Скрадывание расстояния, т. е. кажущееся его уменьшение, происходит вследствие преломления пучка сходящихся лучей при переходе их из среды с более высоким в среду с более низким показателем преломления*.

Для того чтобы вычислить действительную толщину зерна на выбранном разрезе надо кажущуюся его толщину d' умножить на показатель преломления минерала n :

$$d = d'n.$$

Величина показателя преломления определяется по высоте рельефа и резкости шагреновой поверхности, т. е. с точностью до первого знака после запятой. Если название минерала известно, показатель преломления его можно взять из справочника и округлить до второго знака после запятой (по значению Nm).

Располагая значениями R и d , можно вычислить величину силы двупреломления на данном разрезе по формуле:

$$(n_g - n_p) = \frac{R}{d}.$$

Приступая к практическому определению величины силы двупреломления, необходимо учитывать следующее:

* Аналогичное явление наблюдается довольно часто в обыденной жизни: так, монета, брошенная на дно бассейна, кажется лежащей значительно ближе к поверхности воды (при условии бинокулярного зрения), чем на самом деле.

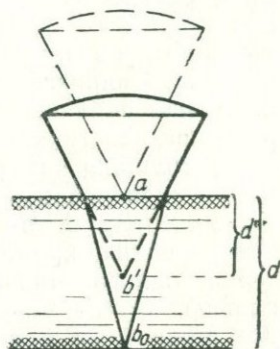


Рис. 58. Толщина пластинки шлифа кажущаяся (d') и действительная (d)

а) величина R дается в нанометрах (миллионные доли миллиметра), величина d — в сотых долях миллиметра;

б) один оборот микрометрического винта опускает или поднимает тубус на 0,1 мм, одно деление на кольце этого винта соответствует 0,001 мм;

в) фокусируя объектив на верхней или нижней поверхности пластинки шлифа, следует учитывать, что сами детали зерна в этом случае будут вне фокуса. У низкопреломляющих минералов — полевых шпатов и др. — лучше фокус устанавливать по пылинкам на поверхности шлифа. У высокопреломляющих минералов — пироксенов, амфиболов и др. — пылинки видны хуже, но лучше наблюдаются детали неровностей поверхности кристаллической пластинки;

г) толщина замеряется не менее чем в 3—5 местах выбранного в шлифе зерна и проверяется по другим 15—20 зернам того же минерала в том же шлифе (края у шлифа обычно тоньше, чем середина, кроме того, по разному ориентированные в шлифе зерна одного минерала по разному сошлифовываются — одни больше, другие меньше). Из полученных замеров отбрасываются все ниже 0,025 и выше 0,035 как случайные. Остальные усредняются.

Характер погасания и определение углов погасания

При вращении шлифа на столике микроскопа в скрещенных николях погасание каждого отдельного зерна минерала наступает в момент совмещения направления световых колебаний, возникающих в нем (или осей эллиптического сечения индикатрисы), с главными сечениями николей. Если в момент погасания с нитями окуляра совпадает ясно выраженное кристаллографическое направление минерала (обычно это трещины спайности, реже удлинение или направление граней), то погасание считается прямым относительно этого направления. Если же в момент погасания между нитями окуляра и хорошо заметными кристаллографическим направлением образуется некоторый угол — погасание считается косым.

Характер погасания зависит от положения оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим осям. В кристаллах разных сингоний, как уже отмечалось, оптическая индикатриса ориентирована различным образом.

Кристаллы средних сингоний — тригональной, тетрагональной и гексагональной — характеризуются совпадением оси симметрии с осью наименования, т. е. вертикальной кристаллографической осью, с оптической осью индикатрисы (с L_3 , L_4 или L_6 совпадает N_e индикатрисы). Таким образом, кристаллы средних сингоний всегда обладают прямым погасанием относительно удлинения.

Более разнообразна ориентировка индикатрисы в кристаллах

низших сингоний. Для кристаллов ромбической сингонии характерно совпадение осей индикатрисы с кристаллографическими осями. Поэтому минералы ромбической сингонии отличаются на ориентированных разрезах прямым погасанием относительно всех кристаллографических осей.

В моноклинной сингонии только одна ось индикатрисы, чаще всего Nm , совпадает с кристаллографической осью b или (010) . Две другие оси (Ng и Np) не совпадают с кристаллографическими осями (a и c), но находятся с ними с одной плоскости. Соответственно этому в моноклинных минералах прямое погасание наблюдается только в одной кристаллографической зоне, в зоне второго пинакоида, на всех других разрезах погасание всегда косое.

В триклинной сингонии ни одна из осей индикатрисы не совпадает ни с одной из кристаллографических осей. На всех разрезах триклинных минералов наблюдаются косые погасания.

Углы косого погасания, или просто углы погасания, имеют большое значение для диагностики минералов, кристаллизующихся в моноклинной и триклинной сингониях. Замеренные на ориентированных разрезах, они являются важными диагностическими признаками, характеризующими отдельные минералогические группы в целом и видовые отличия минералов внутри группы.

Углы погасания обычно определяют на разрезах минералов, параллельных главному сечению индикатрисы $NgNp$. Это сечение узнается по наивысшей интерференционной окраске. Для замера угла погасания выбранное зерно минерала совмещают с крестом нитей. Определяют ориентировку индикатрисы и их наименование. Затем, поворачивая столик микроскопа, измеряют угол между кристаллографическим направлением (обычно трещинами спайности в зерне минерала) и ближайшей осью индикатрисы, т. е. ближайшим положением погасания.

При записи угла погасания индекс кристаллографического направления пишут во всех случаях, когда это направление известно. Так, для амфиболов и пироксенов направление трещин спайности на ориентированных продольных разрезах совпадает с направлением третьей кристаллографической оси c , для плагиоклазов и оливинов — с плоскостью второго пинакоида (010) , для слюд — с плоскостью третьего пинакоида (001) .

Если сведения о кристаллографическом направлении нуждаются в уточнении, в рабочей записи надо оставить знак «Сп» — спайность. То же относится и к индексам осей индикатрисы. Если кристаллооптическая ориентировка разреза не подвергалась специальной проверке (о чем будет сказано ниже), над индексом оси ставится штрих: Ng' , Np' .

Углы погасания удобно определять на амфиболах.

Для начала рекомендуется такая последовательность:

1) найти зерно с наивысшей интерференционной окраской и

хорошо выраженными трещинами спайности, определить на нем ориентировку осей индикатрисы и их наименования (Ng' и Np'); 2) поворотом столика вернуть зерно в положение погасания и взять отсчет на лимбе столика по одному из нониусов.

Затем снова поворотом столика совместить полоски спайности с вертикальной нитью и взять второй отсчет по тому же нониусу. Разность отсчетов даст величину угла погасания. В любом зерне будет два таких угла: между трещиной спайности и осью Ng' и между трещиной спайности и осью Np' . В сумме они дадут

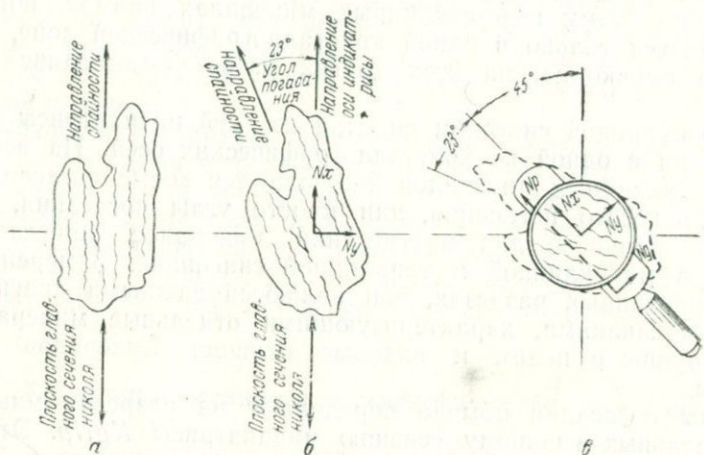


Рис. 59. Схема определения угла погасания и осей индикатрисы

а — трещины спайности параллельны вертикальной нити — первый отсчет на лимбе столика; б — кристалл повернут в положение ближайшего погасания — второй отсчет; в — кристалл повернут на 45° против часовой стрелки (в положение максимального просветления), введен компенсатор

90° . Из двух углов обычно принимают за константу и записывают меньший. Например, угол погасания $C_{II} : Ng' = 43^\circ$, $C_{II} : Np' = 47^\circ$; записывается угол $C_{II} : Ng' = 43^\circ$.

После того как будут приобретены навыки по отдельному определению наименования осей индикатрисы и угла погасания, можно приступить к совместному определению этих констант. Смысл операций при этом остается тот же, но порядок работы несколько меняется.

1. Найти зерно минерала с наивысшей интерференционной окраской и установить его на перекрестии нитей.

2. Поворотом столика совместить трещины спайности с вертикальной нитью окуляра. Взять отсчет и зарисовать зерно в этом положении (рис. 59).

3. Повернуть столик микроскопа в сторону ближайшего положения погасания и установить зерно в положение полного погасания.

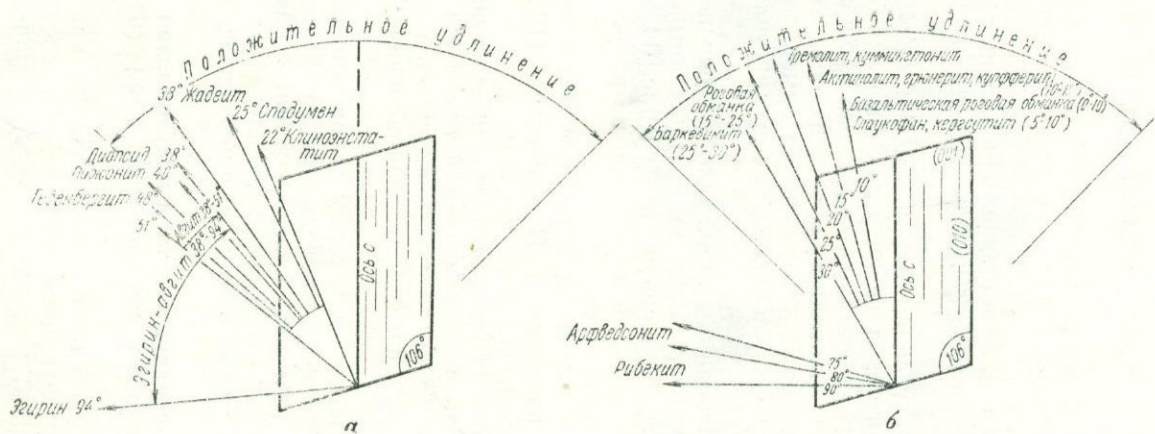


Рис. 60. Диаграмма углов погасания моноклинных пироксенов (а) и амфиболов (б)

4. Зарисовать зерно в этом положении. Нанести на рисунок ориентировку осей индикатрисы кристалла и главных сечений николей. Пометить оси индикатрисы через Nx и Ny (см. рис. 59, б).

5. Взять отсчет и записать условный угол погасания, например: $C_{II} : N_x = 24^\circ$.

6. Повернуть столик микроскопа на 45° против часовой стрелки.

7. Ввести компенсатор, зарисовать зерно минерала в этом положении (рис. 59, в).

8. Сделать выводы о совпадении одноименных осей индикатрисы минерала и компенсатора. Пометить на рисунке значение осей индикатрисы.

9. Записать угол погасания, например: $C_{II} : Ng' = 24^\circ$.

Описанный способ определения углов погасания наиболее удобен для моноклинных кристаллов, у которых в одной плоскости с Ng и Np лежат две кристаллографические оси. Таким образом, на ориентированном разрезе здесь можно замерять важную константу — угол между осью индикатрисы и кристаллографической осью.

При изучении моноклинных минералов, а они пользуются значительным распространением среди цветных компонентов пород, полезно иметь под рукой приведенные на рис. 60 две диаграммы углов погасания амфиболов и пироксенов на разрезах, параллельных плоскости оптических осей.

Более подробные данные о характере углов погасания этих групп минералов приводятся В. И. Лучицким (1947), В. Н. Лодочниковым (1947), Винчеллом (1953) и др.

У триклинных кристаллов в связи с особенностями расположения в них осей индикатрисы замеренный таким же способом угол погасания представляет собой угол между осью индикатрисы и проекцией кристаллографического направления на плоскость $NgNp$.

Замер углов погасания некоторых групп триклинных кристаллов (плагноклазов, калиевых полевых шпатов) принято производить на кристаллографически ориентированных разрезах. В этом случае определяется угол между кристаллографическим направлением и проекцией оси индикатрисы на плоскость среза.

Определение состава плагноклазов по величине углов погасания в зоне (010)

Величина углов погасания в определенных кристаллографических зонах является функцией химического состава отдельных групп минералов таких, как плагноклазы, эгирин-авгиты и некоторые другие.

Возможность быстрого и точного определения состава плагноклазов кристаллооптическим методом имеет исключительное значение для диагностики пород. Состав плагноклазов является свое-

образным индикатором, указывающим на химико-минералогическую группу пород, поэтому изучение вещественного состава последних, как правило, начинается с исследования плагиоклазов.

Необходимо кратко напомнить некоторые данные о них, известные из курса минералогии, и ознакомить с методикой определения их состава по углам погасания на обычном столике микроскопа.

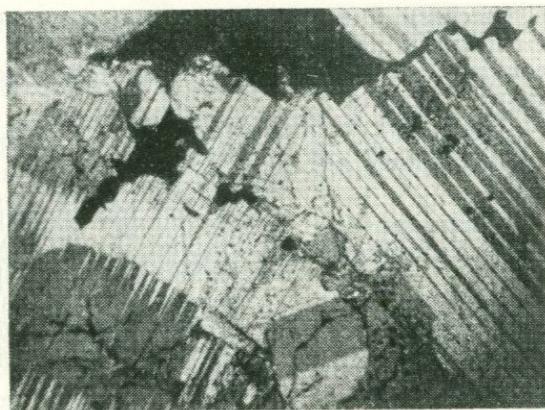


Рис. 61. Двойники плагиоклаза в скрещенных николях

Плагиоклазы входят в группу алюмосиликатов, кристаллические структуры которых представляют непрерывные трехмерные каркасы. Они состоят из тетраэдров, сложенных анионными комплексами SiO_4 и AlO_4 . В пустотах или объемных полостях каркаса располагаются катионы, среди которых наиболее характерны для алюмосиликатов Na, K, Ca, (Ba).

Существует определенная зависимость между стехиометрическим соотношением анионов и составом катионов. Для соотношения $\text{Si} : \text{Al} = 3 : 1$ характерны катионы Na^+ и K^+ ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — альбит, KAlSi_3O_8 — микроклин), для соотношения $\text{Si} : \text{Al} = 1 : 1$ характерны катионы Ca^{2+} реже Ba^{2+} ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ — анортит, $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ — цельзиан).

Отличительной особенностью группы является способность давать изоморфные бинарные ряды. Именно такой ряд и образуют плагиоклазы. Конечные члены его представлены альбитом — Ab — и анортитом — An.

Классифицировать минералы этого ряда принято по соотношению альбитовой и анортитовой составляющих. При этом процентное содержание анортитовой составляющей принято обозначать номерами от 0 до 100. Так, при соотношении $\text{An} : \text{Ab} = 32 : 68$ в плагиоклазе его состав обозначает $N = 32$.

Весь ряд плагиоклазов, кроме того, принято делить на шесть групп. Перечень групп и пределы номеров входящих в них плагиоклазов приведены ниже:

альбиты от № 0 до № 10,
олигоклазы от № 11 до № 30,
андезины от № 31 до № 50,
лабрадоры от № 51 до № 70,
битовниты от № 71 до № 90,
анортиты от № 91 до № 100.

И, наконец, по связи плагиоклазов с главными химико-минералогическими группами пород их делят на кислые (альбиты и олигоклазы), средние (андезины) и основные (лабрадоры, битовниты и анортиты).

В природных условиях монокристаллы плагиоклазов образуются редко. Как правило, это кристаллы-двойники, имеющие в скрещенных николях вид зерен с более или менее равномерно чередующимися светлыми и темными полосами неодновременно погасающих индивидов (рис. 61).

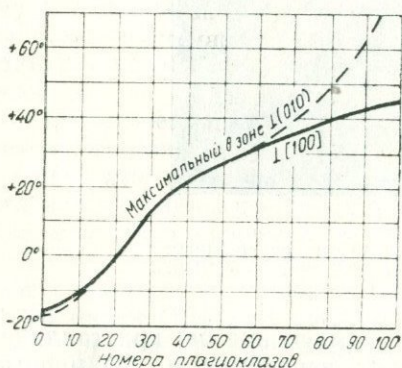


Рис. 62. Диаграмма углов погасания плагиоклазов на ориентированных разрезах в зоне (010)

Подавляющее большинство двойников плагиоклазов сростается по плоскости второго пинакоида (010). Проекция меньшей оси сечения индикатрисы Np^1 в зоне сростания (010) во всех ее направлениях образует с этой плоскостью острые углы. Для значительной части ряда они не превышают 45° .

Плоскость сростания наблюдается под микроскопом как очень тонкая прямая черта — двойниковый шов, разграничи-

вающий индивиды двойника. Он хорошо виден в скрещенных и при одном николях. Положение оси Np' обнаруживается в скрещенных николях только в момент совпадения ее направления с плоскостью главного сечения николя по наступлению погасания индивида. Таким образом, величина угла между плоскостью (010) и осью Np' определяется как угол погасания $Np' : (010)$.

Между величиной углов погасания $Np' : (010)$ и составом плагиоклазов существует закономерная связь. Характер этой связи выражен диаграммой углов погасания в зоне (010) (рис. 62).

Существует несколько приемов определения состава плагиоклазов по углам погасания при исследовании их на столике микроскопа. К ним относятся: определение плагиоклазов по максимальному углу $Np' : (010)$; определение плагиоклазов по углу погасания $Np' : (010)$ на разрезе, перпендикулярном первой кристаллографической оси [100].

Из всех имеющихся в шлифе разрезов для замеров пригодны только те из них, которые обладают: а) наиболее четкими и тонкими двойниковыми швами и б) симметричным погасанием двойников.

Определение состава плагиоклазов по наибольшему углу погасания Np' : (010) производится следующим образом:

а) выбранный разрез кристалла совмещается с перекрестием окуляра;

б) двойниковый шов совмещается с вертикальной нитью окуляра;

в) берется отсчет на лимбе столика;

г) столик поворачивается сначала в одну сторону до полного погасания одного из двойников, а затем в другую до погасания другого двойника. И в первом, и во втором случаях берутся отсчеты и вычисляются углы погасания;

д) проверяются наименования осей индикатрисы двойников тех из них, которые были в момент погасания совмещены с вертикальной нитью окуляра.

Плагиоклазы имеют низкие интерференционные окраски от серых до желто-белых первого порядка. При вводе гипсового (красного) компенсатора окраска повысится, если Np компенсатора совпадет с Np' минерала, и станет синей второго порядка. При несопадении осей интерференционная окраска компенсатора понизится до желтой или желто-оранжевой первого порядка.

Выбранный разрез считается пригодным для замера, если разница углов погасания двойников не превышает $2-3^\circ$.

Далее можно перейти к другим разрезам.

Этот способ трудоемок, он обычно требует нескольких десятков замеров. Определение состава плагиоклаза производится по наибольшему углу погасания из всех замеров с помощью приведенной диаграммы (см. рис. 62).

На вертикальной оси от нулевой точки откладывают величины углов погасания выше нулевой линии, если показатель преломления плагиоклаза выше, чем у канадского бальзама, и, наоборот, ниже нулевой линии, если показатель преломления ниже, чем у канадского бальзама. От полученной отметки проводим горизонтальную линию до пересечения с кривой диаграммы. Затем от точки пересечения опускаем перпендикуляр на горизонтальную ось, где и определяется номер плагиоклаза.

Определение состава плагиоклазов по углам погасания на разрезе, перпендикулярном первой кристаллографической оси [100], начинается с поисков нужного разреза. Он узнается по наличию спайности поперечной (010) — спайности по третьему пинакoidу (001) (см. рис. 50).

При соблюдении тех же требований относительно четкости шва срастания и симметричности погасания определение ведется в той же последовательности, что и в первом случае.

Этот прием не требует большого количества замеров — для точного определения достаточно одного ориентированного разреза. Однако найти его бывает не так просто.

Состав плагиоклаза определяется по той же диаграмме, но по другой кривой (см. рис. 62).

Для определения знака угла погасания можно использовать уже упомянутый критерий — показатель преломления плагиоклаза. Но для данного разреза принято пользоваться другим, более надежным признаком — положением проекции оси Np' относительно углов спайности. Плоскости спайности по второму и третьему пинакондам у минералов этой группы пересекаются не под прямым углом, а образуют острый — около 88° и тупой (смежный) — около 92° углы.

Если в момент погасания двойника вертикальная нить окуляра (ось Np') направлена в острый угол между плоскостями спайности, то угол погасания считается положительным и откладывается выше нулевой линии на диаграмме. И, наоборот, если вертикальная нить пересекает тупой угол, угол погасания считается отрицательным и откладывается ниже нулевой линии.

Для того чтобы освоиться с диаграммой, полезно разобрать несколько примеров.

1. Условия. Разрез $[100]$, угол погасания Np' : $(010) = 10^\circ$, в тупом углу.

Определение. Отсчет угла ведется на отрезке кривой ниже нулевой линии. От отметки 10° проводится горизонтальная прямая до пересечения со сплошной кривой, а от точки пересечения опускается перпендикуляр на основание диаграммы, где берется отсчет номера плагиоклаза. Он равен № 11.

2. Условия. Разрез в зоне (010) , максимальный угол Np' : $(010) = 23^\circ$, показатель преломления выше канадского бальзама.

Определение. Отсчет угла погасания ведется на отрезке кривой выше нулевой линии. Делается это по двум причинам: во-первых, учтена величина показателя преломления, во-вторых, учтено, что отрицательные значения угла погасания имеют абсолютные величины не более 16° (см. рис. 62). От отметки 23° проводится горизонтальная прямая до пересечения со штриховой линией (на этом участке обе кривые сливаются в одну линию). В основании диаграммы берется отсчет номера плагиоклаза. Он равен № 42.

Рассмотренными приемами удобно определять состав зональных плагиоклазов, измеряя углы погасания отдельно для внутренних частей кристаллов, для периферии и для промежуточной зоны.

Характер удлинения минерала (знак главной зоны)

Большинство породообразующих минералов обладает отчетливо выраженным удлинением кристаллов по какому-либо кристаллографическому направлению. Так, амфиболы, пироксены и часто

полевые шпаты удлинены в направлении третьей кристаллографической оси. Пластинчатые кристаллы слюд, наоборот, сплюснуты в направлении третьей кристаллографической оси.

У таких минералов, как апатит, турмалин, волластонит и силлиманит, удлинение обычно выражено резко. Исключение представляют относительно немногие минералы, образующие изометричные зерна, к ним относятся гранат, кварц, часто оливин.

Под характером удлинения минерала или знаком его главной зоны подразумевается взаимное расположение осей индикатрисы и того кристаллографического направления, в котором вытя-

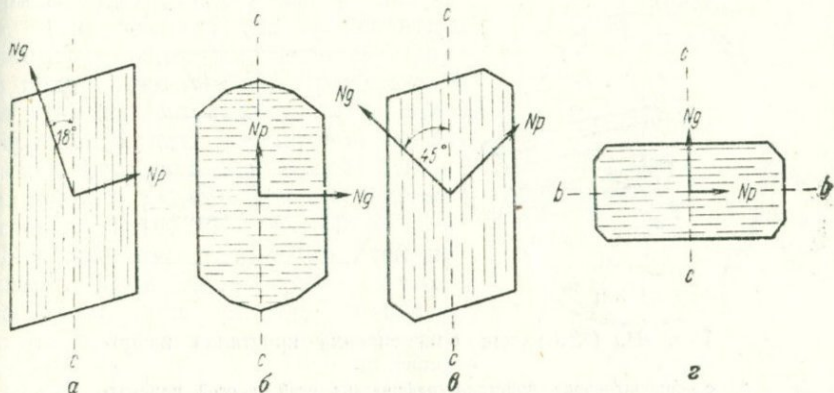


Рис. 63. Удлинение минералов

a — положительное удлинение, ближайшая ось индикатрисы *Ng* расположена к направлению удлинения минерала под углом менее 45° ; *b* и *г* — отрицательное удлинение, с направлением удлинения минерала совпадает ось *Np*; *г* — нейтральное удлинение, оси индикатрисы расположены под углом 45° по отношению к направлению удлинения

нут кристалл. Удлинение минерала считается положительным, если ближайшей осью индикатрисы по отношению к длинной стороне кристалла является ось *Ng* (рис. 63, *a*), и отрицательным, если этой осью является *Np* (рис. 63, *б*). Знак удлинения определяется в том случае, если угловое расстояние между осью индикатрисы и осью удлинения меньше 45° .

Если минерал обладает ясно выраженным удлинением, но угловое расстояние между длинной его стороной и ближайшей осью индикатрисы равно 45° , знак удлинения считается нейтральным. В качестве минералов с нейтральным знаком удлинения можно назвать некоторые моноклинные пироксены (авгит, диопсид—геденбергит и др.).

Случай неопределимости характера удлинения. В практике микроскопических исследований может быть случай, когда у одного и того же минерала с хорошо выраженным удлинением на одних разрезах фиксируется положительный знак удлинения, а на других — отрицательный. Это явление наблюдается тогда, когда с удлинением кристалла совпадает или близка к нему ось индикатрисы *Nm*.

Если такой кристалл разрезать вдоль длинной оси произвольно ориентированным плоскостям, то во всех возможных сечениях ось Nm всегда будет лежать в плоскости среза. Второй осью в одном случае будет ось Ng' , в другом — Np' . На первом разрезе с помощью компенсатора будет определен отрицательный знак удлинения, поскольку с длинной стороной совпадает более короткая ось индикатрисы $Nm = (Nm > Np')$. На втором — будет определен положительный знак удлинения, так как с длинной стороной совпадает более длинная ось индикатрисы.

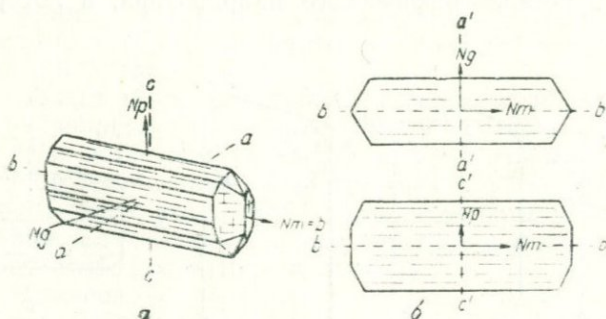


Рис. 64. Оптическая ориентировка кристалла клиноцоизита

a — ориентировка кристаллографических осей и осей индикатрисы (по В. С. Трегеру); b — два варианта разреза кристалла клиноцоизита по оси удлинения

Примером минерала с неопределимым знаком удлинения является клиноцоизит. Кристаллы клиноцоизита имеют удлиненно-призматическую форму (рис. 64). Они вытянуты в направлении второй кристаллографической оси, с которой совпадает ось индикатрисы Nm . Оси Ng и Np лежат в плоскости второго пинакоида. Неопределимым удлинением обладают цоизит, волластонит, ортит, тулит, пьомонит и др.

Отличительной особенностью минералов с неопределимым знаком удлинения является их способность на разрезах с отчетливо выраженным удлинением проявлять промежуточные интерференционные окраски. Разрезы с наивысшими окрасками обладают нечетким удлинением.

Особые условия определения угла погасания. (Дисперсия погасания). В отдельных относительно редких случаях определение величины угла погасания затрудняется тем обстоятельством, что минерал не обнаруживает четко обозначенного момента погасания. При погасании зерно минерала не становится черным, оно лишь темнеет, приобретает синевато-серые окраски, которые потом переходят в красновато-бурые или, наоборот, красновато-бурые переходят в синевато-серые. При дальнейшем вращении столика зерно постепенно светлеет, проявляются обычные интер-

ференционные окраски. Момент полного погасания кристалла, таким образом, установить не удастся. Наблюдается относительно широкая зона потемнения.

Подобное явление можно наблюдать при изучении некоторых моноклинных минералов из групп амфиболов (кроссит, арфведсонит, рибекит и др.) и титанавгита, на некоторых разрезах сфена и т. д.

Явление неполного погасания наступает в результате несовпадения положения осей индикатрисы Ng и Np для волн разной длины. Эллиптическое сечение индикатрисы $NgNp$, построенное, например, для красной части спектра, окажется смещенным, т. е. повернутым вокруг оси Nm на определенный угол относительно такого же сечения, построенного для фиолетовой части спектра. Величина смещения бывает различной, например, для арфведсонита она достигает 20° (рис. 65).

Несовпадение положения осей индикатрис Ng и Np (острой и тупой биссектрис) для разных участков спектра называется дисперсией биссектрис*.

Угол погасания в этом случае иногда измеряют от положения направления трещин спайности до того положения, когда синевато-серая окраска переходит в красновато-бурую. Но правильнее будет воспользоваться светофильтрами и измерять углы погасания в красном и синем свете, оформив это соответствующей записью. Например: «Минерал обладает резко выраженной дисперсией погасания (рис. 65). Угол погасания $c:Ng$, замеренный в красном свете ($\lambda_{кр}=620 \text{ м.м.}$), равен 26° , угол погасания в синем свете ($\lambda_{син}=468 \text{ м.м.}$) равен 10° ».

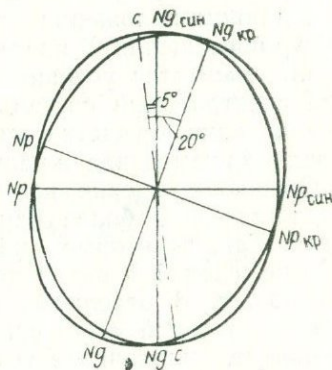


Рис. 65. Дисперсия погасания. Оси индикатрис, построенных для синего и красного света, образуют с кристаллографической осью c углы разной величины

Ориентированное светопоглощение и плеохроизм

Большинство окрашенных минералов при исследовании их при одном никеле обнаруживают способность изменять окраску по мере вращения столика микроскопа. Характер изменения окрасок сложный: у одних минералов изменяется интенсивность окраски, она становится то гуще, то светлее, но при этом сохраняется ее тон. У других минералов приблизительно сохраняется интенсивность, но меняется тон. Часто изменяется и то, и другое.

Способность минерала изменять окраску в зависимости от по-

* Здесь рассмотрен резко выраженный случай наклонной дисперсии. Подробнее о дисперсиях см. в работе С. Д. Четверикова (1947).

ложения плоскости световых колебаний, проходящего через него поляризованного света, называется плеохроизмом.

В основе плеохроизма лежат те же причины, которые вызывают и окраску. Однако в случае плеохроизма поглощение света находится в большой зависимости от пространственного положения ионов-хромофоров и густоты насыщения ими конкретных направлений в кристалле, от асимметрии электронных оболочек ионов и т. д. В отличие от обыкновенного света, в створ плоской световой волны попадают ионы вещества, расположенные и ориентированные в кристаллической решетке определенным образом. При данном положении кристалла складывается характерный спектр поглощения. В новом створе, при другом расположении кристалла, меняются условия прохождения световых волн, изменяется спектральный состав света — зона поглощения волн смещается из одного участка видимой области спектра в другой, обуславливая изменение окраски.

Обычно смещение происходит в нешироком диапазоне волн, вследствие чего более или менее сохраняется основной тон окраски. Так, некоторые амфиболы плеохроируют в зеленых тонах от сине-зеленой окраски по *Ng* до зеленой по *Nm* и желто-зеленой по *Np*. В отдельных случаях зона поглощения волн может исчезать в одной части спектра и появляться в другой, например, пьмонтит, марганцовистый эпидот, может плеохроировать от ярко-красной окраски по *Ng* до фиолетовой по *Nm* и лимонно-желтой по *Np*.

Может измениться ширина спектрального поглощения, что определяет полноту поглощения волн той или иной длины.

В зависимости от состава минерала и особенностей его кристаллической решетки, поглощение волн может происходить одновременно в нескольких участках спектра. При этом появляются смешанные («не спектральные») окраски — бурая, коричневая и т. д.

При изучении характера поглощения минералом световых волн обычно прибегают к визуальному сопоставлению интенсивности окрасок зерна в основных кристаллооптических направлениях: последовательно совмещая положение осей индикатрисы с плоскостью световых колебаний поляризованного света.

Плеохроизм одноосного минерала изучают на разрезе, параллельном оптической оси. На выбранном разрезе сначала определяется положение и наименование осей индикатрисы *Ng* и *Np*. После этого с плоскостью главного сечения поляризатора совмещается направление одной оси и при выключенном анализаторе определяется и записывается окраска зерна, затем то же проделывается для другой оси. Разрез параллельной оптической оси, как известно, имеет наивысшую интерференционную окраску (рис. 66).

Для полной характеристики плеохроизма двуосного кристалла необходимы два ориентированных разреза — параллельный

плоскости оптических осей (для определения плеохроизма по Ng и Np) и перпендикулярный оптической оси (для определения плеохроизма по Nm). Первый разрез узнается по максимальной, второй — по минимальной интерференционным окраскам в скрещенных николях.

Пример записи. Плеохроизм минералов по осям выражен резко: по Ng окраска зеленая, по Np бледно-зеленая, по Nm — темная, синевато-зеленая.

На основании изучения способностей светопоглощения минерала в разных кристаллооптических направлениях следует выяснить, в каком из них светопоглощение происходит наиболее сильно и в каком слабее. Результат такого сравнения обычно записывают в виде неравенства, которое называется схемой светопоглощения, или формулой абсорбции.

Так, в приведенном выше примере записи наиболее густая темная (сине-зеленая) окраска наблюдается по оси Nm , наиболее светлая (бледно-зеленая) — по оси Np . Схема светопоглощения или формула абсорбции в этом случае запишется так: $Nm > Ng > Np$.

Отметим, что неравенство здесь символическое, условное. Оно не отражает соотношений величин показателей преломления минерала, а лишь указывает, что в направлении Nm происходит наиболее интенсивное поглощение света, а в направлении Np — наиболее слабое.

Интенсивность светопоглощения минерала обычно связана с его удлинением (если оно выражено), а точнее с направлением или плоскостью плотнейшей упаковки кристаллической решетки (Соболев, 1964). Так, все окрашенные слюды — биотит, флогопит и т. д. — имеют в плоскости $NgNm$, т. е. в плоскости спайности по (001), силу светопоглощения значительно большую, чем в направлении Np . Формула абсорбции биотита может быть записана так: $Ng \approx Nm \gg Np$.

Приведенная здесь методика изучения светопоглощения пригодна только для самых приближенных представлений об этой особенности минералов.

При точных исследованиях наблюдения ведутся в монохроматическом свете. Величина интенсивности светопоглощения в этом случае замеряется с помощью электронного фотоумножителя и

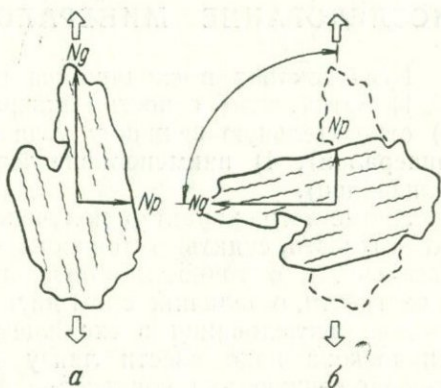


Рис. 66. Последовательность совмещения осей индикатрисы кристалла с главным сечением поляризатора

a — с главным сечением поляризатора совмещена ось Ng (положение погасания); b — поворотом на 90° (в любую сторону) с направлением главного сечения совмещена ось Np

осциллографа (лучше с самописцем). Применение монохроматоров с поворачиваемой призмой позволяет вести исследование светопоглощения по всей видимой области спектра.

Использование специальных устройств, перечисленных выше, дает возможность получения объективной и сопоставимой информации.

Глава пятая

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ

Исследования в сходящемся свете позволяют установить:

- 1) оптическую осность минерала; 2) его оптический знак;
- 3) относительную величину угла оптических осей (для двuosных минералов); 4) наименование осей индикатрисы (для одноосных минералов).

Кроме того, характер полученной фигуры интерференции дает возможность судить о точности ориентировки разреза, а следовательно, и о точности полученных на таком разрезе констант, в частности, о величине силы двупреломления.

Для исследования в сходящемся свете в оптическую систему микроскопа надо ввести линзу Лазо, короткофокусную линзу, расположенную над конденсорной линзой осветительного устройства, и линзу Бертрана. Можно также, не вводя линзы Бертрана, вынуть из тубуса окуляр.

Перед началом работы необходимо проверить, до конца ли поднято осветительное устройство, затем вставить наиболее короткофокусный (60 \times) широкоугольный объектив.

В сходящемся свете изучается не непосредственно зерно минерала, а суммарный оптический эффект, полученный при прохождении через зерно скрещенного светового пучка, т. е. фигура интерференции. В зависимости от оптической осности минерала и ориентировки разреза фигуры интерференции имеют различные формы и свойства. Однако одна особенность характерна для всех фигур интерференции на ориентированном разрезе — они всегда создают симметричную окраску поля.

Исследование в сходящемся свете одноосных кристаллов

В одноосных кристаллах по кристаллооптическим признакам различают два ориентированных разреза: 1) разрез, перпендикулярный оптической оси кристалла, узнается по наиболее низкой интерференционной окраске; 2) разрез, параллельный оптической оси, узнается по наиболее высокой интерференционной окраске.

Характер фигуры интерференции на этих разрезах определяется направлением колебаний обыкновенной и необыкновенной

волн в кристалле. Ориентировка световых колебаний в кристаллах моделируется с помощью скиндром — условных шаровых поверхностей, описываемых вокруг кристаллов. Направления световых колебаний обыкновенных и необыкновенных волн, выходящих из кристалла, спроектированных на такую поверхность, напоминают градусную сетку географических полушарий. При этом в меридиональных направлениях спроектируются колебания необыкновенной, а в широтном — обыкновенной волны.

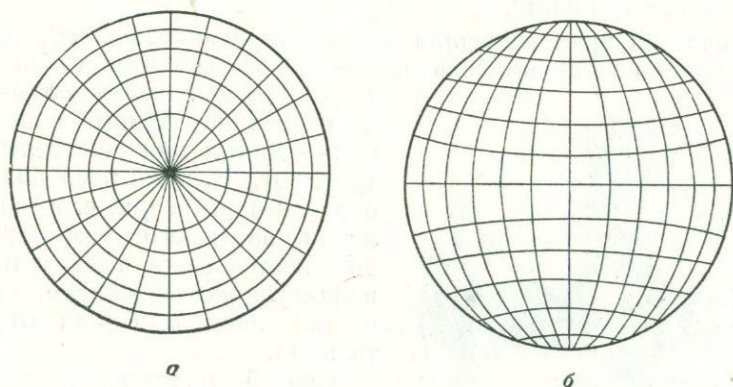


Рис. 67. Ориентированные положения скиндром одноосного кристалла
a — вид в направлении оптической оси; *b* — вид в направлении, перпендикулярном оси

Если рассматривать такую поверхность в направлении оптической оси, то она будет напоминать полярное полушарие, а в направлении, перпендикулярном оптической оси, — экваториальное полушарие (рис. 67). Оптические свойства фигуры интерференции одноосного кристалла, полученной в сходящемся свете, в каждой ее точке определяются именно таким расположением плоскостей колебания волн.

Из методики исследований в скрещенных николях известно, что погашение наступает в тех случаях, когда направления световых колебаний в минерале совпадают с направлениями главных сечений николей. Это положение распространяется на фигуру интерференции. Погашены будут и те части фигуры, в которых направления световых колебаний в данный момент параллельны главным сечениям николей.

Разрез, перпендикулярный оптической оси

Рассматривая схему расположения направления световых колебаний в одноосном кристалле (см. рис. 67), нетрудно представить, что на разрезе, перпендикулярном оптической оси, погашенные участки расположатся по двум пересекающимся линиям, параллельным главным сечениям николей. Фигура интерферен-

дии представляет собой черный крест с несколько расширяющимися ветвями, при вращении столика микроскопа крест остается неподвижным (рис. 68).

Этот разрез очень удобен для выяснения оптического знака минерала. Определение производится с помощью гипсового (красного) компенсатора. При введении компенсатора крест окрашивается в цвет компенсатора, а вершины накрест лежащих сегментов у перекрестия окрашиваются попарно в сине-зеленые и оранжево-желтые цвета.

Оптический знак минерала считается положительным, если в направлении ввода компенсатора вершины сегментов стали жел-

тыми или оранжево-желтыми, а в перпендикулярном направлении — синими или сине-зелеными (рис. 69). Если же расположение окрасок обратное, т. е. в направлении вводимого компенсатора появляются синие тона, а в перпендикулярном — желтые, оптический знак минерала отрицательный.

Способ определения оптического знака кристалла по изменению окрасок станет понятным, если отметить следующее. Световые волны, проходя через кристалл, передают не только направление колебаний обыкновенной и необыкновенной волн, но и векторные значения показателей преломления этих волн в

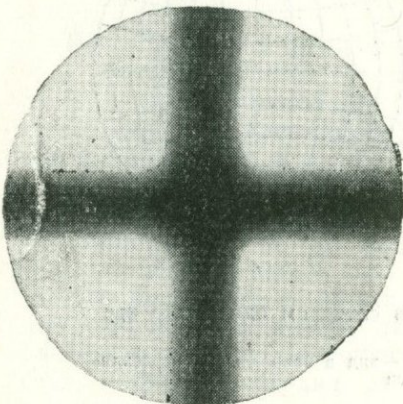


Рис. 68. Фигура интерференции одноосного кристалла на разрезе, перпендикулярном оптической оси

каждом направлении. Если для различных элементарных точек скиодромы эти значения изобразить в виде условных сечений индикатрисы, то получают схемы, дополняющие скиодрому (рис. 70). Они удобны в том отношении, что позволяют, с одной стороны, понять, как образуется фигура интерференции, а с другой — характер реакции на ввод компенсатора. Во всех случаях компенсатор вводится в направлении колебаний необыкновенной волны, т. е. в радиальном направлении, при этом N_p компенсатора параллельно N_e кристалла, а N_g компенсатора параллельно N_o кристалла. Далее, в зависимости от того, чем является N_e в кристалле, большей или меньшей осью индикатрисы (N_g или N_p), определяется характер окраски. Если N_e кристалла — это N_g , т. е. большая ось эллиптического сечения, и совпали разноименные оси индикатрисы компенсатора и минерала, то окраска в секторах по направлению ввода компенсатора понизится, вместо красного цвета (у компенсатора) появится оранжево-желтый — знак кристалла плюс. Если N_e — это N_p , то окраска повысится,

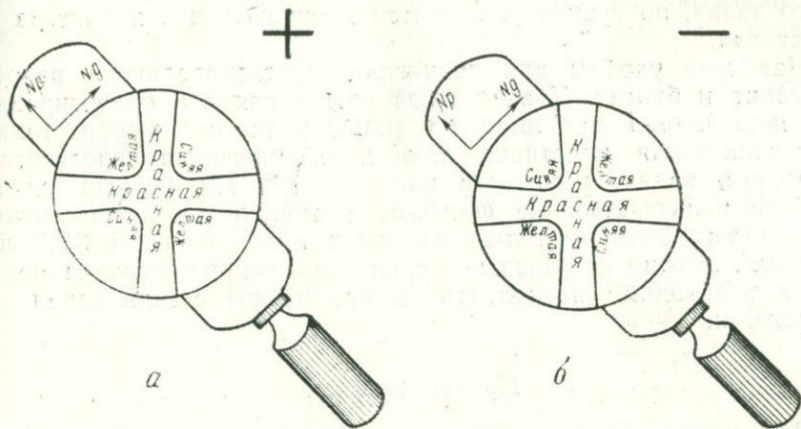


Рис. 69. Определение оптического знака одноосного кристалла с помощью красного (гипсового) компенсатора на разрезе, перпендикулярном оптической оси

a — оптически положительный, *b* — оптически отрицательный кристаллы

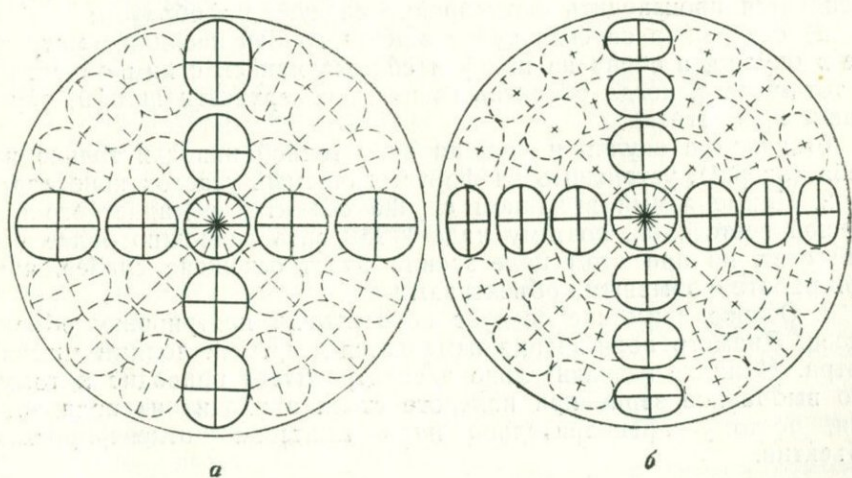


Рис. 70. Распределение световых колебаний и векторных значений амплитуд обыкновенной и необыкновенной волн в пределах поля зрения на разрезе, перпендикулярном оптической оси одноосного положительного (*a*) и отрицательного (*b*) кристаллов. Сплошными линиями показаны направления, совпадающие с главными сечениями николей

станет сине-зеленой второго порядка, следовательно, знак кристалла минус. Таким образом, операция по определению оптического знака, по существу, сводится к определению характера N_e кристалла.

Наиболее удобны для получения ориентированного разреза флогопит и биотит. У этих слюд оптическая ось ориентирована перпендикулярно спайности по (001), и потому любая тонкая просвечивающая пластинка слюды, ограниченная плоскостями спайности, является готовым препаратом*. На первый случай удобнее пользоваться не шлифом, а именно такой пластинкой; она должна быть не толще 0,2 мм и иметь площадь 3×3 или 2×2 см². Можно пользоваться и пластинками меньших размеров, но их необходимо наклеивать на предметное стекло канадским бальзамом.

Предупреждение

Для получения сходящегося света используют объективы с наиболее коротким фокусным расстоянием, с незначительной светосилой и небольшим диаметром поля зрения. В связи с этим необходимо соблюдать следующие меры предосторожности в работе.

1. При работе с прозрачным шлифом малейшая неточность или неаккуратность приводит к раздавливанию шлифа объективом и к порче шлифа и объектива. Во избежание аварии рекомендуется производить фокусировку следующим образом:

а) осторожно опуская тубус винтом грубой наводки, смотреть не в окуляр, а сбоку на шлиф и сближающийся с ним объектив; в тот момент, когда объектив коснется поверхности шлифа, опускание прекратить;

б) глядя в окуляр и вращая винт точной наводки только на себя (вверх!), установить на фокус изучаемый участок кристалла.

2. Применяемый в данном случае объектив обладает ограниченной светосилой, поэтому надо установить возможно более яркий свет, но при этом поле зрения будет освещено слабее, чем при работе с обычными объективами.

3. Особое внимание следует обратить на центрировку объективов. Диаметр поля зрения измеряется десятными долями миллиметра. Наличие незначительно эксцентриситета приводит к тому, что выбранное зерно при повороте столика уходит из поля зрения, поэтому предварительно надо тщательно отцентрировать объектив.

Первую работу с пластинкой слюды можно проделать в следующей последовательности.

* Здесь допускается неточность: биотит и флогопит—двуосные минералы, но углы оптических осей у них настолько малы, что в сходящемся свете они обычно не отличимы от одноосных минералов.

1. Уложить пластинку биотита или флогопита на столик микроскопа и закрепить ее зажимами.

2. Заменить объектив с обычным увеличением объективом с увеличением $60\times$, отфокусировать его по поверхности пластинки и установить зеркалом наиболее яркое освещение.

3. Поднять до конца осветительное устройство и полностью открыть диафрагму.

5. Включить линзу Лазо.

6. Включить верхний николь.

7. Включить линзу Бертрана и слегка затянуть ею диафрагму или, не включая линзы Бертрана, снять окуляр и наложить кольцевую диафрагму.

8. Проверить изображение фигуры интерференции.

9. Убедившись в четком ее изображении, сделать несколько поворотов столика, крест фигуры должен оставаться неподвижным.

10. Ввести гипсовый компенсатор. Обратить внимание на изменение окрасок в вершинах секторов у самого перекрестия в направлении введения компенсатора и сделать выводы об оптическом знаке минерала.

При невыполнении даже одного из упомянутых пунктов нельзя получить четкого изображения в сходящемся свете. Но и при правильной последовательности в работе могут возникнуть неполадки, которые устраняют следующим образом:

а) если изображение фигуры интерференции получилось расплывчатое, то, вращая кремальерный винт линзы Бертрана, надо установить наибольшую ясность изображения;

б) если поле зрения выглядит не круглым, а четырехугольным, следует устроить осветительное устройство;

в) если поле зрения освещено не полностью, очевидно, не отрегулировано включение линзы Лазо, и микроскоп необходимо передать для проверки мастеру.

При достаточной толщине пластинки слюды в поле зрения появляются концентрические цветные окружности — изохроматические кольца. Количество колец зависит от толщины пластинки, величины двупреломления минерала и характеристики применяемой оптики.

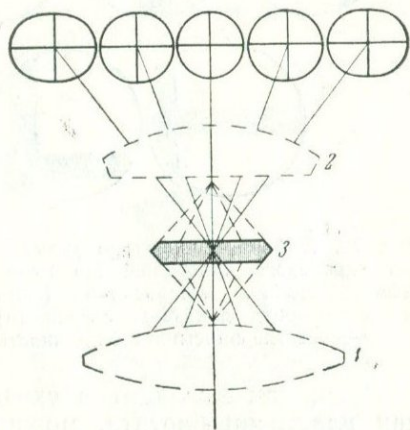


Рис. 71. Схема, поясняющая изменение соотношений векторных величин световых колебаний обыкновенной и необыкновенной волн в зависимости от направления лучей в кристалле при коноскопическом его исследовании (разрез \perp оптической оси).

1 — линза Лазо; 2 — линза объектива; 3 — разрез кристалла (шлиф)

Из схематических рисунков (рис. 70 и 71), показывающих соотношение векторных величин показателей преломления в пределах фигуры интерференции, видно, что по мере приближения к границам поля зрения величина двупреломления в каждой элементарной точке фигуры постепенно возрастает. В шлифе обычной толщины (0,03 мм) это приводит к постепенному повышению окраски до желтой, желто-оранжевой (для биотита). В пластинках, толщина которых больше, т. е. возрастает значение d , а отсюда и значение R — из формулы $R = d(n_g - n_p)$, — интерференционные окраски возрастают до нескольких порядков и наблюдаются в виде упомянутых колец. Однако в практике петрографических исследований они не используются для получения констант.

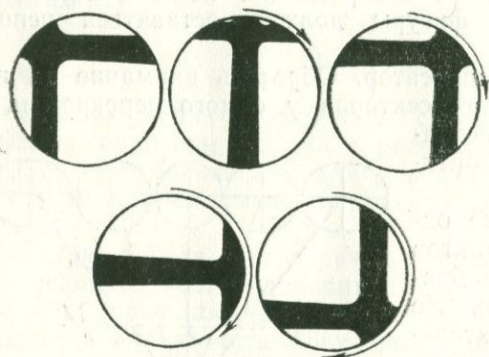


Рис. 72. Неточно ориентированный разрез одноосного кристалла. По мере вращения столика микроскопа (величины углов поворота показаны стрелками) перекрестие описывает окружность

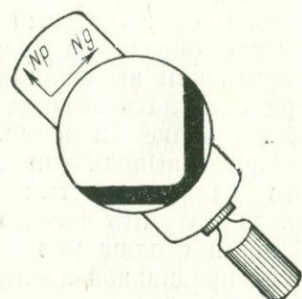


Рис. 73. Определение оптического знака на неточно ориентированном разрезе одноосного кристалла

Зная, как выглядит в сходящемся свете фигура интерференции пластинки биотита, можно приступить к работе с прозрачным шлифом. Работа со шлифом усложняется необходимостью найти нужный разрез. Разрез, перпендикулярный оптической оси одноосного кристалла, узнается по наименьшей интерференционной окраске. Хорошо ориентированный разрез выглядит совершенно черным и при вращении столика не просветляется. Для окрашенных минералов может быть использован еще один признак — при одном николе на этом разрезе минерал не меняет окраску при вращении столика, т. е. он не плеохроит.

При работе с биотитом или флогопитом можно, кроме того, использовать частный признак — на разрезе, перпендикулярном оптической оси, трещины спайности отсутствуют. Искать ориентированный разрез следует при обычном увеличении ($8\times$ или $9\times$).

При работе со шлифом разрез биотита может быть не точно

ориентирован. На таком разрезе выбранное зерно минерала слабо просветляется в скрещенных николях и слабо плеохроирует при одном николе, хотя в нем нет трещин спайности. В этом случае в сходящемся свете фигура интерференции имеет вид черного креста с перекрестием, сильно смещенным к краю поля зерна. При вращении столика перекрестие описывает окружность, а ветви креста перемещаются параллельно самим себе (рис. 72).

Для того чтобы определить знак минерала, надо повернуть столик микроскопа так, чтобы компенсатор вошел между ветвями креста (рис. 73). На таком разрезе в пределах поля зрения должна быть ясно видна хотя бы часть перекрестия.

Разрез, параллельный оптической оси

На разрезе, параллельном оптической оси одноосного кристалла, в момент совпадения оси с главным сечением одного из николей (в параллельном свете при скрещенных николях это будет положение погасания) почти все поле зрения будет закрыто широким размытым крестом (рис. 74). При повороте столика крест разрывается на две изогнутые балки, которые по мере поворота (иногда даже при повороте на угол около 15°) быстро уходят за пределы поля, а далее при вращении снова равномерно надвигаются и, когда угол поворота достигает 90° , снова полностью закроют поле зрения.

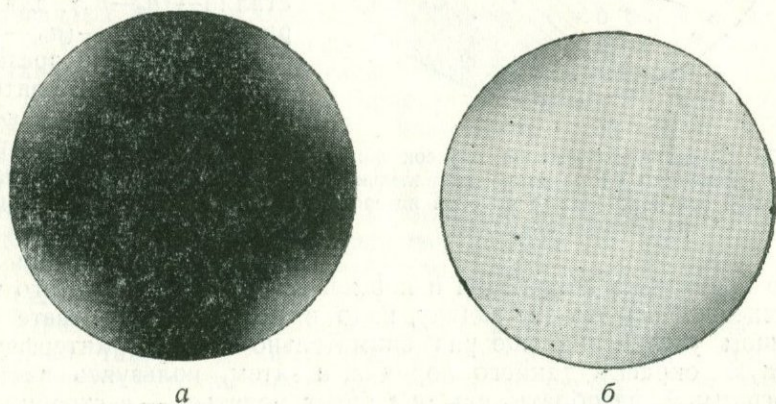


Рис. 74. Фигуры интерференции одноосного кристалла на разрезе, параллельном оптической оси в положении погасания (а) и в положении просветления (б)

В момент выхода балок из поля зрения микроскопа поле зрения приобретает бледные интерференционные окраски. При этом внутренней части поля соответствует интерференционная окраска зерна. К периферии она меняется: в одном направлении происходит ее понижение, в другом — повышение (рис. 75).

Направление понижения окрасок указывает на ориентировку оптической оси кристалла или оси N_e .

Этот разрез может быть использован для определения оптического знака минерала. Задача сводится к определению значения оси N_e , являющейся оптической осью минерала. Если N_e — большая ось индикатрисы, т. е. N_g , то знак минерала положительный, если N_p — знак отрицательный.

На точно ориентированном разрезе по высоте интерференционной окраски можно определить величину двупреломления, пользуясь параллельным пучком света и малым увеличением.

Доказательством точной ориентировки разреза является симметричное надвигание теневидных балок, сливающихся в центре поля зрения в размытый крест, а также симметричная окраска поля зрения. Индексы n_e и n_o в этом случае пишут без штрихов. Например: для оптически положительного кристалла — $(n_e - n_o)$, для отрицательного — $(n_o - n_e)$.

Работа с разрезами, параллельными оптической оси, осложняется тем, что фигура интерференции часто очень бледна, и переходы одного цвета в другой едва заметны. Поэтому не так

легко определить понижения и повышения окрасок. Для того чтобы успешно решить эту задачу, надо в параллельном свете при большом увеличении еще раз внимательно изучить интерференционную окраску данного порядка, а затем, пользуясь цветной номограммой, разобрать, как она будет меняться — в сторону повышения или понижения. После этого можно приступить к изучению фигуры интерференции в сходящемся свете.

Для начала исследование следует вести на минералах с достаточно высоким двупреломлением. Для этой цели больше всего подходят турмалин и скаполит, меньше биотит и флогопит.

Для закрепления изложенного полезно сделать следующую работу.

1. Пользуясь увеличением $8\times$ или $9\times$, найти разрез с наивысшей интерференционной окраской. У окрашенных минералов на

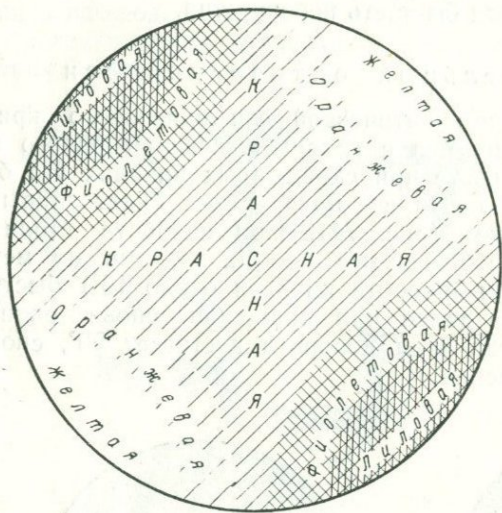


Рис. 75. Схема расположения окрасок фигуры интерференции на разрезе, параллельном оптической оси кристалла с высокой интерференционной окраской

этом разрезе обычно наиболее резко проявляется плеохроизм.

2. Включить короткофокусный объектив ($60\times$) и перевести оптическую систему микроскопа на сходящийся свет.

3. Вращая столик микроскопа, проверить по равномерности продвижения балок и симметричности окрасок точность ориентировки разреза. Определить величину ($n_g - n_p$).

4. Повернуть столик микроскопа так, чтобы направление понижения окрасок совпало с направлением ввода компенсатора, и закрепить столик в этом положении.

5. Перейти на параллельный свет и малое увеличение и, пользуясь компенсатором, произвести определение значения N_e (является ли она большей N_g или меньшей N_p осью индикатрисы). Уточнить запись силы двупреломления ($n_e - n_o$ или $n_o - n_e$).

6. Сделать вывод об оптическом знаке минерала.

Исследование в сходящемся свете двuosных кристаллов

В двuosных кристаллах по кристаллооптическим признакам различают четыре ориентированных разреза: 1) перпендикулярный оптической оси; 2) параллельный плоскости оптических осей; 3) перпендикулярный острой биссектрисе; 4) перпендикулярный тупой биссектрисе.

Эти разрезы характеризуются следующими признаками.

Разрез, перпендикулярный оптической оси, обладает самыми низкими интерференционными окрасками. В отличие от окрасок аналогичных разрезов одноосных кристаллов это окраски не черные, а серые или темно-серые, но при вращении столика они не становятся светлее и не гаснут. Разрез используется для определения оптической осности кристалла, его оптического знака, относительной величины угла оптических осей (угла $2V$) и характера их дисперсии.

Разрез, параллельный плоскости оптических осей, устанавливается по наивысшей интерференционной окраске; в этом его сходство с разрезом, параллельным оптической оси одноосных кристаллов. Разрез используется для определения величины силы двупреломления и иногда для определения оптического знака.

Разрезы, перпендикулярные острой и тупой биссектрисам, не обладают такими четкими признаками, как первые два. Они имеют промежуточные интерференционные окраски, при этом на разрезе, перпендикулярном острой биссектрисе, величина силы двупреломления всегда меньше половины максимального значения ($n_g - n_p$) для данного минерала. На разрезе, перпендикулярном тупой биссектрисе, величина силы двупреломления всегда больше половины максимального значения ($n_g - n_p$).

Разрез, перпендикулярный острой биссектрисе, очень удобен для определения оптической осности, оптического знака, относительной величины угла $2V$ и характера дисперсии. Разрез, перпендикулярный тупой биссектрисе, пригоден для тех же целей, но практически используется очень редко.

Двуосные кристаллы по сравнению с одноосными характеризуются более низкими классами симметрии; в связи с этим распределение направлений световых колебаний в них имеет более сложный вид. Если спроектировать эти направления на сферическую поверхность, описанную вокруг кристалла, то на основных разрезах они расположатся примерно так, как это показано на рис. 76.

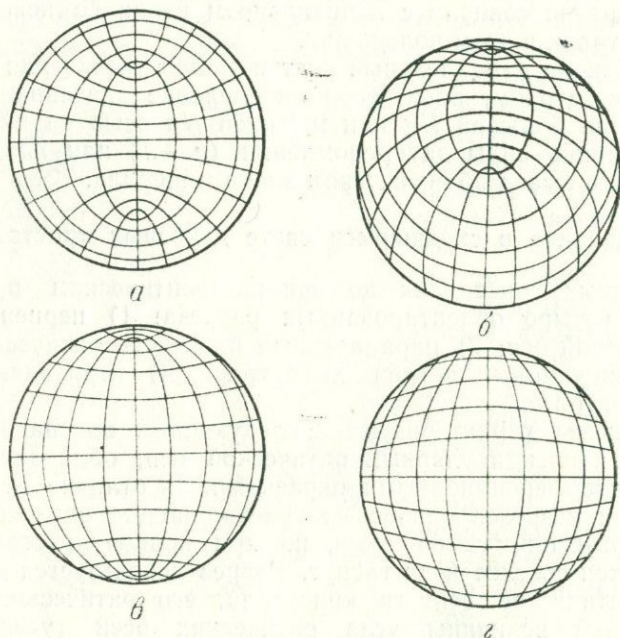


Рис. 76. Ориентированные положения скиндром двуосного кристалла.

Виды в направлениях:

a — острой биссектрисы; *б* — оптической оси; *в* — тупой биссектрисы; *г* — перпендикулярном плоскости оптических осей

Знакомство с оптическими свойствами фигуры интерференции двуосных кристаллов удобнее начать с разреза, перпендикулярного острой биссектрисе.

Разрез, перпендикулярный острой биссектрисе

Если разрез кристалла, перпендикулярный острой биссектрисе, установить на столике микроскопа так, чтобы плоскость оптических осей стала параллельно главному сечению одного из николей, то оптическая нормаль—ось *Nm*—расположится параллельно главному сечению другого николя. В сходящемся свете фигура интерференции, как это следует из схемы распределения световых колебаний (см. рис. 76), представлена черным крестом

на серо-белом поле. Ветви креста четко видны и имеют различную ширину.

При вращении столика крест разрывается на две изогнутые балки — гиперболы или изогирь, которые раздвигаются по диагонали. При повороте столика на 45° они расходятся на предельное расстояние, при дальнейшем повороте начинают сближаться и снова сходятся в центре.

Величина расхождения гипербол зависит от величины угла $2V$: чем больше этот угол, тем быстрее и дальше расходятся ветви. Если угол $2V$ мал и достигает $30\text{--}35^\circ$, балки остаются в пределах поля зрения, если этот угол средней величины (30--

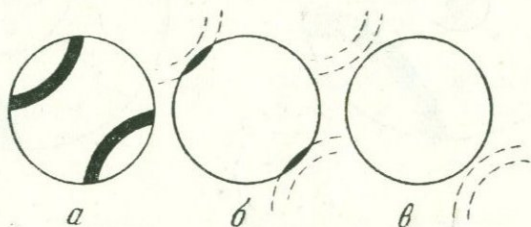


Рис. 77. Определение относительной величины угла оптических осей $2V$ по величине максимального расхождения балок
 a — угол $2V$ мал — до 30° ; $б$ — угол $2V$ средний — от 30 до 60° ; $в$ — угол $2V$ большой — более 60°

60°) — балки доходят до границы поля зрения или на короткое время уходят за нее. При больших углах оптических осей — свыше 60° — балки быстро уходят из поля зрения* (рис. 77).

Для определения оптического знака кристалла столик поворачивают так, чтобы балки разошлись на предельное расстояние в направлении введения компенсатора. В момент максимального расхождения балок кристаллооптические элементы в исследуемом кристалле расположатся следующим образом: а) острая биссектриса направлена в объектив; б) оптические оси выходят в точках перегиба балок; в) тупая биссектриса расположена параллельно направлению компенсатора; в) оптическая нормаль Nm перпендикулярна направлению введения компенсатора.

При таком расположении кристаллооптических элементов в пространстве между балками наибольший оптический эффект

* Величина расхождения балок зависит не только от величины $2V$, но и от ширины коноскопического угла применяемого объектива, от кратности окуляра. Кроме того, наблюдаемый угол расхождения балок кажущийся, он отличается от действительного угла $2V$ кристалла на величину угла преломления, образованного при переходе луча из минерала в воздух. Кажущийся угол называется $2E$ и связан с величиной $2V$ следующей зависимостью:

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

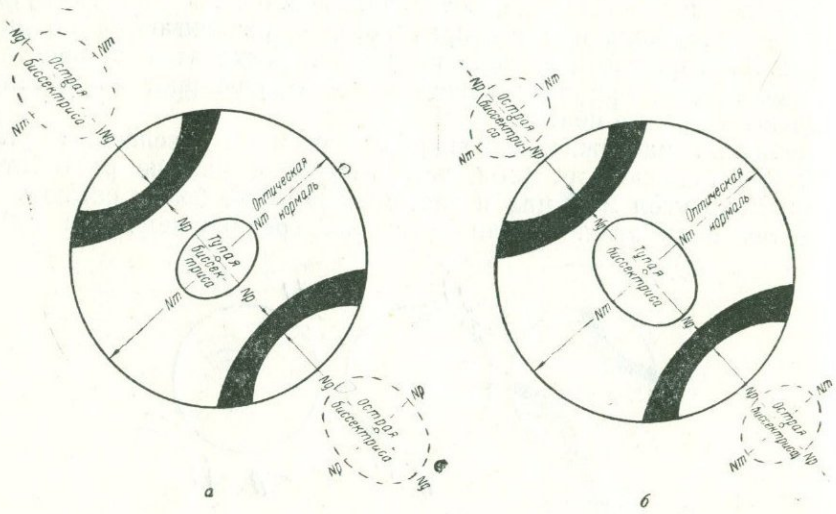


Рис. 78. Расположение кристаллооптических элементов на разрезах, перпендикулярных острой биссектрисе в оптически положительных (а) и отрицательных (б) кристаллах

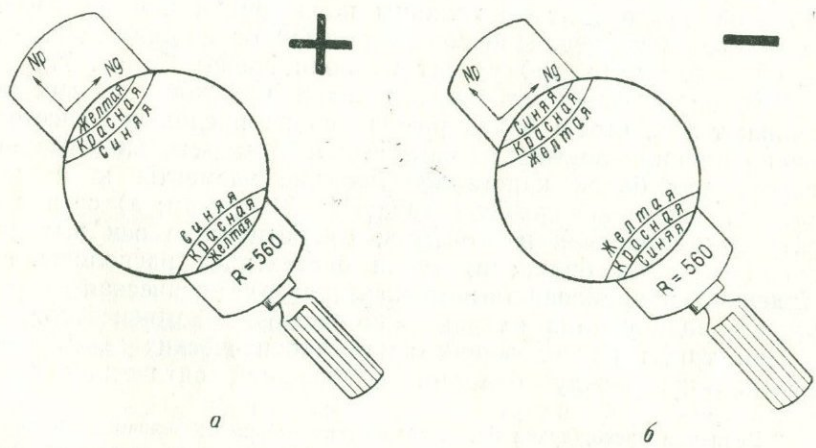


Рис. 79. Определение оптического знака на разрезах, перпендикулярных острой биссектрисе. Характер расположения интерференционных окрасок в оптически положительном (а) и оптически отрицательном (б) кристаллах при вводе красного компенсатора

будет иметь направление тупой биссектрисы и оптической нормали, расположенных параллельно осям Np и Ng в компенсаторе (рис. 78). Влияние острой биссектрисы исключено, так как она расположена перпендикулярно к плоскости осей индикатрисы компенсатора.

С введением гипсового компенсатора характер изменения окраски в этом поле будет зависеть от того, чем является тупая биссектриса. Если это ось Np , то в пространстве между балками более длинной полуосью эллиптического сечения индикатрисы будет оптическая нормаль Nm . Окраска в этом случае повысится и станет синей (рис. 79, а), следовательно, кристалл оптически положительный. Если тупая биссектриса является осью Ng , то окраска понизится и станет желтой (рис. 79, б) — кристалл оптически отрицательный.

В пространстве за ветвями креста резко возрастает влияние острой биссектрисы, и реакция кристалла на введение компенсатора в этих участках станет обратной — у оптически положительных кристаллов появится желтая окраска, у отрицательных — синяя.

На рис. 78 приведена схема расположения кристаллооптических элементов на разрезах, перпендикулярных острой биссектрисе у кристаллов с малым углом $2V$. В этом случае балки изогир находятся в пределах поля зрения, что позволяет отчетливо наблюдать реакцию кристаллов на ввод компенсатора, как в области влияния тупой биссектрисы (в пространстве между балками), так и в области влияния острой биссектрисы (в пространстве за балками).

На аналогичных разрезах кристаллов со средней или большой величиной $2V$ при повороте шлифа в положение 45° балки изогир окажутся вне пределов поля зрения, и доступной наблюдению будет только область влияния тупой биссектрисы.

Цветовой сигнал, отчетливо указывающий на знак минерала, наблюдается только в непосредственной близости от изогир (см. рис. 79). Изучая кристалл, обладающий большим углом $2V$ ($80-90^\circ$), надо быть готовым к такой ситуации, когда в положении 45° , т. е. при наибольшем расхождении изогир, после ввода компенсатора сигнала не последует — изогир оказались слишком «далеко» за пределами поля зрения.

В этом случае рекомендуется поступать следующим образом.

Выбранный разрез устанавливается в положение полного погасания — в поле зрения виден широкий размытый крест. Далее, не поворачивая шлиф в положение 45° , ввести компенсатор. Медленно вращая столик микроскопа, проследить за появлением цветового сигнала «в разрыве» креста, между расходящимися изогирами. Вращение столика прекратить, как только изогир исчезнут из поля зрения, и записать окраску.

Изучение двусных минералов на разрезах, перпендикулярных острой биссектрисе, наиболее удобно начинать на пластинках

мусковита. В кристаллах этого минерала острая биссектриса ориентирована перпендикулярно спайности, т. е. перпендикулярно плоскости третьего пинакоида (001). Поэтому любая пластинка мусковита небольших размеров (2×3 см), расщепленная до толщины 0,2—0,1 мм, является готовым препаратом, пригодным для наблюдения.

То же следует проделать с прозрачным шлифом. В шлифе ориентированные разрезы мусковита имеют светло-серые интерференционные окраски и лишены спайности. Для них характерно также «искристое погасание».

Разрез, перпендикулярный оптической оси

Если разрез кристалла, перпендикулярный к одной из его оптических осей, повернуть так, чтобы плоскость оптических осей расположилась параллельно главному сечению одного из николей, то фигура интерференции (см. рис. 76) будет представлять собой прямую балку (рис. 80). При вращении столика балка вращается в противоположную сторону и, изгибаясь, приобретает форму гиперболы, направленной выпуклостью в сторону острой биссектрисы. В момент совмещения плоскости оптических осей кристалла с главной плоскостью другого николя она вновь выпрямляется и т. д.

Степень изогнутости балки зависит от величины угла оптических осей и может быть критерием для определения его относительной величины. Чем больше угол $2V$, тем балка прямее (рис. 81). Если угол $2V$ велик, то балка при вращении столика вращается, почти не изгибаясь, если угол мал, то балка изгибается круто, при этом ее изгиб достигает наибольшей крутизны при диагональном положении плоскости оптических осей кристалла по отношению к главным сечениям николей. На рис. 81 приведены примерные величины изгибов балки, соответствующие различным величинам угла $2V$.

Для того чтобы определить оптический знак минерала на этом разрезе, необходимо повернуть столик микроскопа так, чтобы балка расположилась поперек направления введения компенсатора, фигуру интерференции на таком разрезе можно рассматривать как часть фигуры разреза, перпендикулярного острой биссектрисе. Реакция кристалла на введение компенсатора будет точно такой же. У положительного кристалла на вогнутой стороне балки будет желтая окраска, на выпуклой — синяя (рис. 82, а), у отрицательного, наоборот, на вогнутой — синяя, на выпуклой — желтая (рис. 82, б).

Изучение двусосных минералов на разрезах, перпендикулярных острой биссектрисе и перпендикулярных оптической оси, следует продолжить на кристаллах роговой обманки. Разрез, перпендикулярный оптической оси, узнается по наименьшей интерференционной окраске. У роговой обманки такие разрезы обычно имеют темно-серую или зеленовато-серую окраску. При вращении сто-

Рис. 80. Изменение ориентировки и конфигурации балки при вращении столика микроскопа (величины углов поворота показаны стрелками; пл. о. о. — плоскость оптических осей)

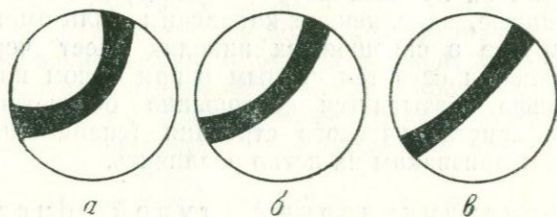
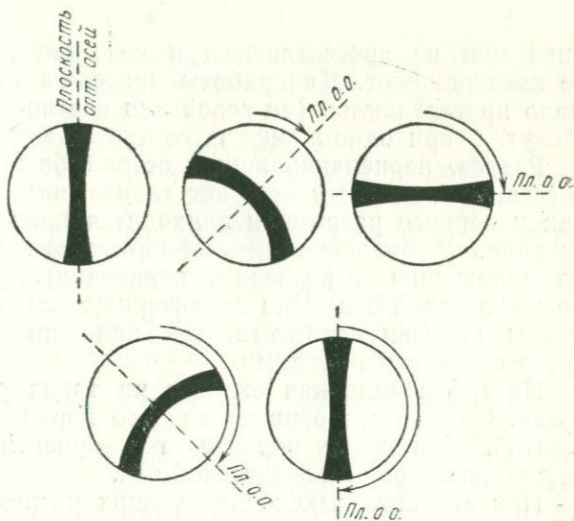


Рис. 81. Определение относительных величин углов $2V$ по крутизне изгиба балок (разрез, перпендикулярный оптической оси)
 а — угол $2V$ мал — до 30° ; б — угол $2V$ средний — до $30-60^\circ$; в — угол $2V$ большой — более 60°

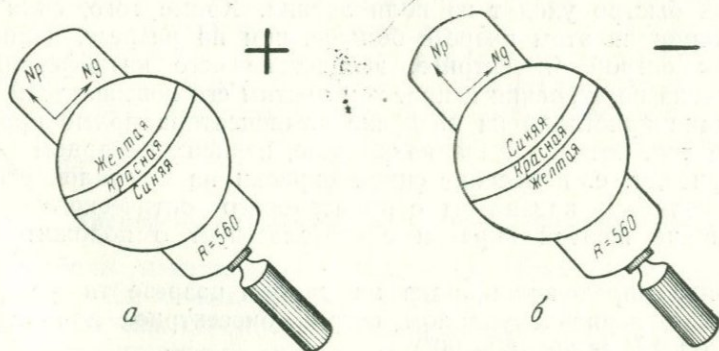


Рис. 82. Определение оптического знака двуосного кристалла на разрезе, перпендикулярном оптической оси. Характер расположения окрасок в оптически положительном (а) и отрицательном (б) кристаллах при вводе красного компенсатора

лика они не просветляются и не гаснут, а при одном никеле не плеохроируют. Для работы пригодны также разрезы, которые мало просветляются (до серой или светло-серой окраски) и слабо гаснут, а при одном никеле, соответственно, слабо плеохроируют.

Разрез, перпендикулярный острой биссектрисе, найти труднее в связи с тем, что у него нет таких ясных оптических признаков, как у первого разреза, и приходится привлекать дополнительные отличия. У большинства амфиболов эти разрезы очень близки по положению к разрезам, перпендикулярным первой кристаллографической оси. Они характеризуются тем, что на них незаметны полосы спайности, так как они подходят к плоскости среза под острыми углами.

Интерференционная окраска на таких разрезах довольно высокая. Однако это окраска первого порядка, обычно от белой до желтой. Чем ниже окраска, тем ориентировка разреза ближе перпендикулярной к оптической оси.

При поисках низкополяризующих разрезов необходимо всякий раз проверять найденный разрез при одном никеле. Начинаящие часто принимают за нужный разрез зерна рудного минерала или отверстие в шлифе, заполненное канадским бальзамом, поскольку и то, и другое в скрещенных николях имеет черный цвет. Но рудный минерал остается черным и при одном никеле, а отверстие в шлифе оказывается совершенно бесцветным пятном без признаков кристаллического строения (спайности, трещинок и т. д.). По этим признакам их легко различить.

Разрез, перпендикулярный тупой биссектрисе

По свойствам разрез, перпендикулярный тупой биссектрисе, сходен с разрезом, перпендикулярным острой биссектрисе. Различие их заключается в том, что угол оптических осей, измеренный у тупой биссектрисы, всегда больше 90° , и поэтому и изогир очень быстро уходят из поля зрения. Кроме того, сила дупреломления на этом разрезе больше, чем на разрезе, перпендикулярном острой биссектрисе, вследствие чего интерференционная окраска поля зрения к краевым частям его повышается.

Реакция кристалла на введение компенсатора прямо противоположна той, которая была на разрезе, перпендикулярном острой биссектрисе, т. е. появление синей окраски на выпуклой стороне изогир является признаком отрицательного оптического знака, а появление желтой окраски свидетельствует о положительном знаке.

Техника определения знака на данном разрезе та же, что и на разрезе, перпендикулярном острой биссектрисе для случая, когда угол $2V$ велик ($80-90^\circ$).

Для некоторых групп минералов, например для оливинов в магнезиальной части их ряда — для форстерита — хризолита, у которых величина $2V$ колеблется от $+85^\circ$ до -87° (по Винчеллу и Трёгеру), не так просто отличить разрез, перпендикуляр-

ный острой биссектрисе, от разреза, перпендикулярного тупой биссектрисе. Тем более что балки изогир при поворотах столика микроскопа довольно быстро, но примерно с одинаковой скоростью уходят из поля зрения в том, и в другом случае.

Появляется необходимость прибегать к более чутким признакам, позволяющим уверенно различать разрезы. Одним из таких признаков является величина двупреломления. На разрезе, перпендикулярном острой биссектрисе, она всегда меньше $\frac{1}{2}$ ($n_g - n_p$), установленной для данного минерала.

Разрез, параллельный плоскости оптических осей

Оптическим признаком такого разреза является наивысшая интерференционная окраска.

В момент погасания кристалла, т. е. когда положение острой и тупой биссектрис совпадает с плоскостями главных сечений николей, в поле зрения виден широкий размытый крест. При повороте столика крест разрывается на две тенеvidные балки, уходящие по диагонали из поля зрения. При повороте на 45° балки полностью исчезают, а поле зрения приобретает бледную симметрично расположенную окраску. Окраска внутренних частей соответствует интерференционной окраске самого зерна, к периферии в одном направлении — в направлении острой биссектрисы — она понижается, в другом — в направлении тупой биссектрисы — повышается.

Для определения знака минерала в данном положении зерна (при повороте на 45°) достаточно определить наименование осей индикатрисы, являющихся острой и тупой биссектрисами. Эту операцию удобнее выполнять при параллельном свете.

При дальнейшем повороте от положения 45° снова появляются тенеvidные балки, которые, постепенно сближаясь, срastaются в широкий размытый крест, закрывающий почти все поле зрения.

Точность ориентировки разреза определяется по симметричности распределения окрасок и по равномерности расхождения и надвигания тенеvidных балок на перекрестие нитей окуляра. В сходящемся свете этот разрез практически неотличим от разреза одноосного кристалла, параллельного его оптической оси (см. рис. 75).

Дисперсия оптических осей двuosных минералов

Гиперболы некоторых двuosных минералов имеют несколько необычный вид: балки, черные в средней части, окаймлены с одной стороны сизо-серой, а с другой — красно-булой «отмывкой». При этом одноцветные окраски располагаются либо с выпуклой, либо с вогнутой стороны изогир.

Если такую фигуру интерференции исследовать в красном монохроматическом свете, то обнаружится, что общий вид фигуры не изменится, но балки изогир станут более широкими и

займут всю среднюю и сизо-серую части изогир, видимых в обычном белом свете. Если продолжить исследование в синем монохроматическом свете, то балки также расширятся, заняв всю среднюю и на этот раз красно-бурую части изогир, видимых в обычном белом свете.

Результаты таких наблюдений позволяют сделать следующие выводы.

1. При исследовании в сходящемся белом свете появление цветных полосок, окаймляющих изогир, свидетельствует о том, что балки изогир для красной и фиолетовой части спектра смещены одни относительно других, и только частично перекрываются на тех участках, где видна черная средняя часть изогир.

2. Сизо-серая окраска появляется там, где красные волны погашены. Эта окраска возникает как результат активизации фиолетовой части спектра.

3. Красно-бурая окраска появляется как результат активизации красной части спектра там, где фиолетовые лучи погашены.

Расположение одноцветных окрасок либо только с выпуклой, либо только с вогнутой стороны изогир является следствием неравенства углов оптических осей для разных частей спектра. Разберем следующий пример.

Цветные «отмывки» у изогир расположены следующим образом:

сизо-серые каемки находятся с вогнутых сторон изогир, красно-бурые — с выпуклых. В этом случае изогир для красных волн (сизо-серая и черная окраски) будут смещены от центра дальше, чем изогир для фиолетовых волн (красно-бурая и черная окраски). Таким образом, угол $2V$ для красных волн больше, чем для фиолетовых (рис. 83).

Это неравенство принято выражать символами $r > v$ (r — rouge, красный; v — violet, фиолетовый; франц.), т. е. $2V$ для красного цвета больше, чем для фиолетового. В случае если угол оптических осей для фиолетового света будет больше, чем угол для красного, неравенство приобретает вид $v > r$.

Определение угла оптических осей по величинам двупреломления на ориентированных разрезах

Исследование минералов в сходящемся свете не дает возможности точно определить такую важную константу, как величина угла оптических осей $2V$. По величине расхождения изогир или

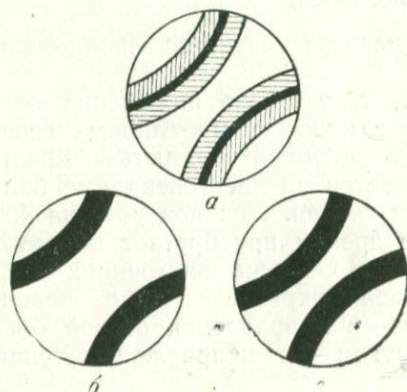


Рис. 83. Дисперсия оптических осей

Вид фигуры интерференции:
 а — в белом свете; б — в красном; в — в синем монохроматическом свете

крутизне изогнутости балки можно различить минералы с малыми углами $2V$ (до 30°), средними (от 30 до 60°) и большими (более 60°). Таким образом, точность определения $2V$ не превышает $20\text{--}30^\circ$. Этого, конечно, недостаточно.

Непосредственно замерить углы оптических осей на обычном столике микроскопа невозможно, для их измерения необходимо специальное устройство — федоровский столик. Однако методика исследования в сходящемся свете позволяет отобрать точно ориентированные разрезы, на которых с помощью компенсатора Берека можно замерять значение силы двупреломления. А это в свою очередь дает возможность для вычислений углов оптических осей со значительной точностью.

На разрезах, перпендикулярных острой и тупой биссектрисам, между величиной двупреломления и значением $2V$ существует математическая зависимость, которая выражается следующей приближенной формулой:

$$\operatorname{tg} V = \pm \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}. \quad (1)$$

(Точная формула имеет более сложный вид — см. главу первую.)

Поскольку величины двупреломления на ориентированных разрезах связаны между собой равенством

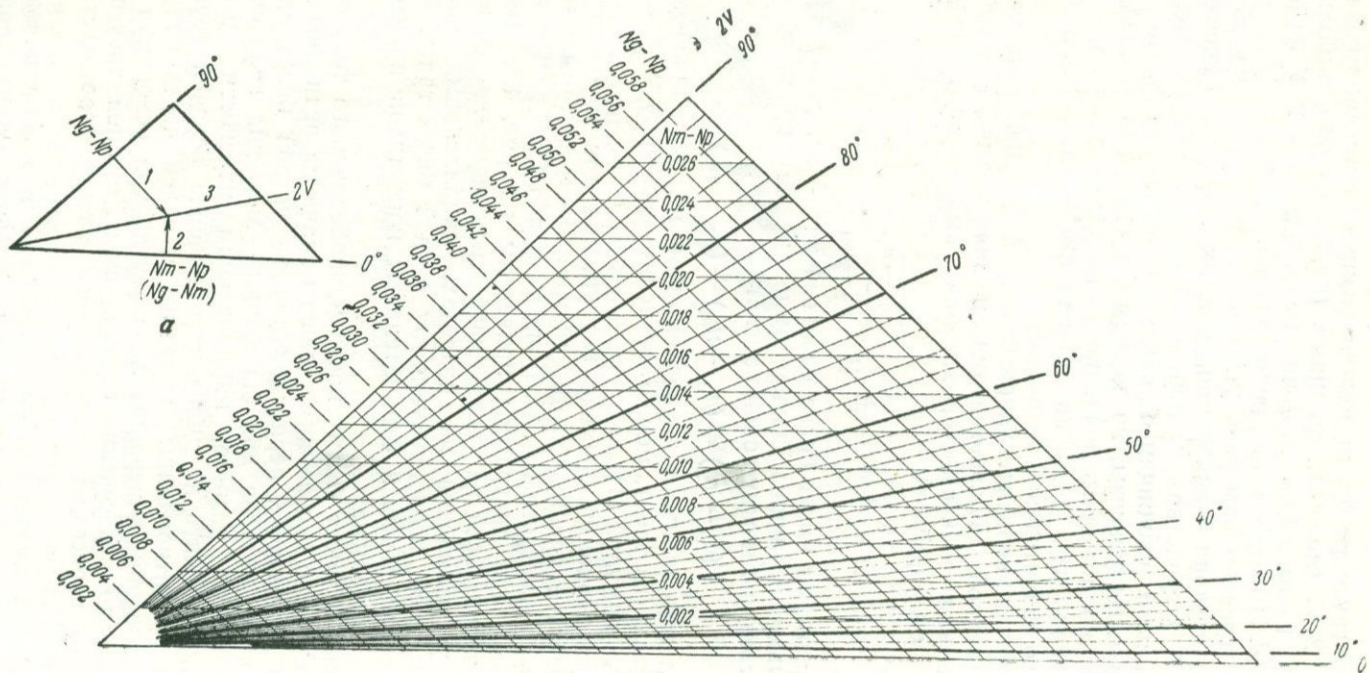
$$(n_g - n_p) = (n_g - n_m) + (n_m - n_p), \quad (2)$$

то, располагая данными двупреломления на двух ориентированных разрезах (из трех), можно вычислить величину $2V$, воспользовавшись формулой (1).

В целях экономии времени без ущерба для точности можно воспользоваться специальными диаграммами, которые впервые рассчитаны и построены А. К. Болдыревым в 1912 г. В несколько измененном виде диаграммы приведены на рис. 84. Величина угла оптических осей на таких диаграммах определяется по величинам двупреломления на разрезах, параллельных плоскости оптических осей, перпендикулярных острой биссектрисе. Определение положительных и отрицательных кристаллов производится на разных диаграммах.

Диаграмма имеет форму почти равнобедренного треугольника. По высоте от его основания отложены значения величины двупреломления на разрезе, перпендикулярном острой биссектрисе; по левой стороне от угла при основании — значения величины двупреломления на разрезе, параллельном плоскости оптических осей. Если отложить на диаграмме значения величин двупреломлений на ориентированных разрезах, а затем через полученную точку пересечения и вершину левого угла при основании провести прямую до пересечения ее с правой стороной треугольника, то в точке пересечения мы получим отсчет, соответствующий значению $2V$.

На первых порах для определения $2V$ можно пользоваться мусковитом. У этой слюды легко распознать разрез, перпендику-



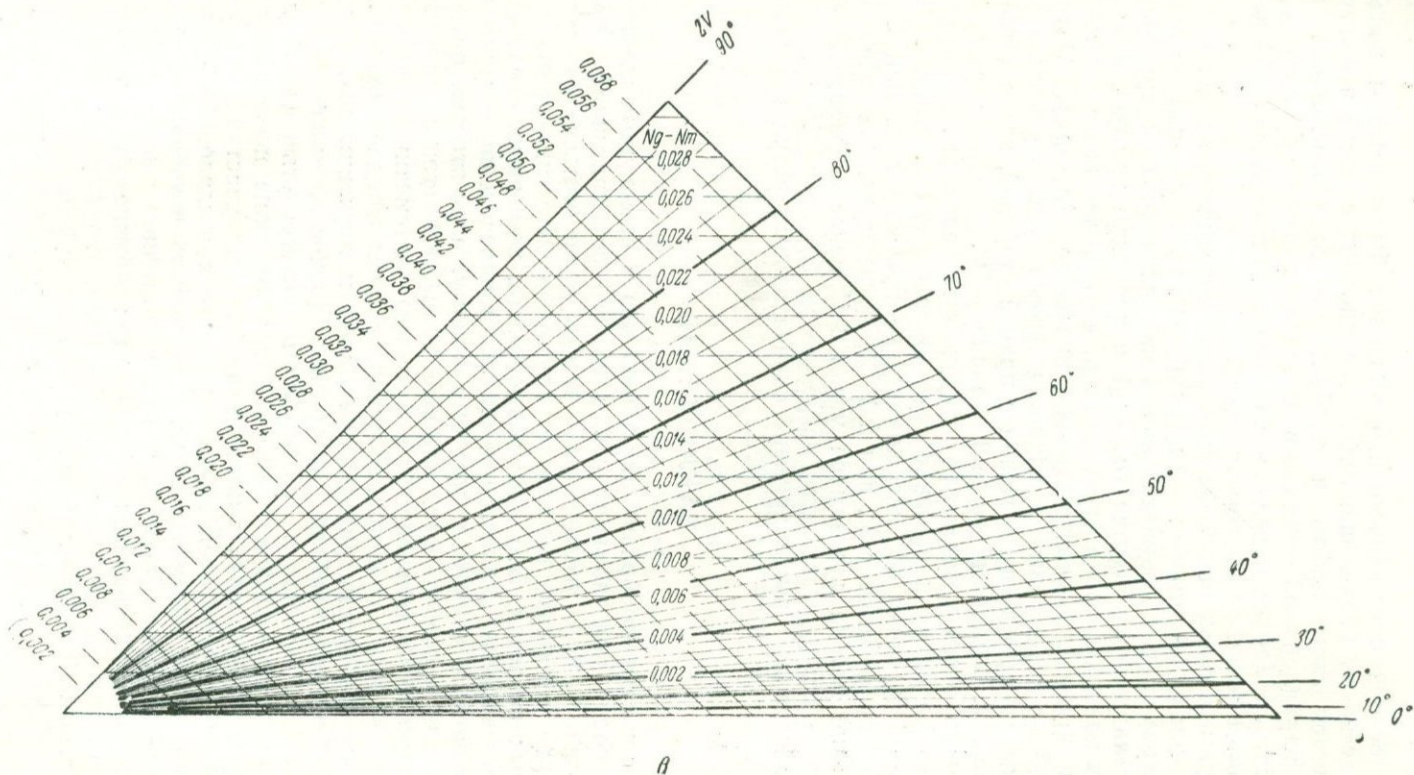


Рис. 84. Диаграммы, связывающие величины двупреломления на ориентированных разрезах с величиной угла $2V$
 а — последовательность работы на диаграммах; б — для положительных кристаллов; в — для отрицательных кристаллов

лярный острой биссектрисе. Его признаки были указаны выше. Также легко по наивысшей интерференционной окраске и фигуре сходящегося света узнать и отобрать точно ориентированный разрез, параллельный плоскости оптических осей. С помощью компенсатора Берека определяется сила двупреломления сначала на одном, а потом на другом разрезах.

Например, были получены следующие исходные данные: оптический знак — минус; $(n_g - n_p) = 0,0398$, $(n_g - n_m) = 0,0062$. На диаграмме для отрицательных кристаллов (второй треугольник) откладываем значение $(n_g - n_p)$ и проводим прямую, параллельную правой стороне треугольника, до пересечения с горизонтальной прямой, соответствующей значению $(n_g - n_m)$. Затем через точку пересечения и вершину левого угла треугольника проводим прямую до пересечения с правой стороной, где и читаем значение $2V$. В данном случае $2V$ равно -44° .

Точность этого метода для разных интервалов углов оптических осей различна и понижается с уменьшением значений $2V$. Так, при $2V$ около 90° погрешность не превышает 2° , при $2V$ около 50° не превышает 3° , при $2V$ 30° погрешность достигает 6° . Применение метода для замера углов $2V$ менее 30° нецелесообразно из-за слишком высокой погрешности (Соболев, 1964).

В приведенном выше примере окончательный результат можно записать так: $2V = -44^\circ \pm 3^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение порообразующих минералов в прозрачных шлифах горных пород полезно начинать с общего осмотра шлифа при обычных ($3\times$, $9\times$) увеличениях, чтобы ознакомиться со всем разнообразием форм, окрасок и других свойств минералов на различных разрезах. Это дает возможность, во-первых, сразу установить наиболее характерные признаки определенного минерала, присущие в данном случае ему одному, а во-вторых, позволяет выделить особенности, которые сближают его с другими минералами, и в дальнейшем, в процессе систематического изучения уточнить его свойства. В начале работы каждое зерно минерала быстро просматривают при одном и двух николях. Мысленно фиксируют наиболее интересные (ориентированные) разрезы с тем, чтобы в дальнейшем подвергнуть их более тщательному изучению и замерам. На этом этапе исследования не следует задерживать внимание на неясных участках шлифа.

После просмотра всех зерен переходят к исследованию наиболее надежных разрезов. Последовательность изучения минералов соответствует построению курса методики исследования.

В процессе предварительного осмотра обычно удается получить достаточно данных о цвете минерала, его форме, спайности и рельефе. Для резко плеохроирующих минералов в записях следует отметить самое общее впечатление об окраске. Более

детально по осям на ориентированных разрезах окраску описывают при изучении плеохроизма.

Необходимо выяснить пределы изменения размеров кристаллов минерала и увязать их с описанием его формы. Отдельно следует остановиться на выяснении характера рельефа, шагреновой поверхности и относительной величины показателя преломления по сравнению с канадским бальзамом.

В краткой форме излагаются сведения о величине силы двупреломления, об угле погасания, характере и знаке удлинения и плеохроизме. В пределах площади одного шлифа не всегда удается собрать точные данные о минерале, поэтому необходимо четко разграничивать надежные замеры, полученные на ориентированных разрезах, и сведения, носящие приближенный, предварительный характер. Индексы осей индикатрисы и показателей преломления можно писать без штрихов в том случае, если точность ориентировки проверена в сходящемся свете; в остальных случаях следует ставить штрихи (например Ng' , Np') и т. д.

Далее фиксируют результаты исследования оптической оси минерала, его оптический знак, величину угла оптических осей (если минерал двуосный) и характер их дисперсии. На основании полученных данных делают выводы о названии минерала или, если данных недостаточно, указывают минералогическую группу, к которой его можно отнести.

Таким образом, процесс исследования минералов можно разделить на следующие этапы:

1) предварительный осмотр всех минералов в шлифе и отбор наиболее надежных разрезов; 2) изучение минерала при одном николе; 3) изучение при двух (скрещенных) николях; 4) изучение в сходящемся свете; 5) выводы.

Описание минерала рекомендуется строить по следующему плану.

I. При одном николе: 1) цвет минерала, размеры его выделений, форма и спайность; 2) рельеф, шагреновая поверхность и показатель преломления.

II. В скрещенных николях: 1) сила двупреломления; 2) угол погасания и удлинение; 3) плеохроизм.

III. В сходящемся свете: 1) осьность; 2) оптический знак; 3) угол оптических осей (для двуосных минералов).

Запись ведется связно и кратко.

Описание минералов не должно сводиться к формальному набору констант. Для тех или иных групп минералов разные константы имеют различное значение. В процессе формирования горной породы минералы не одинаково реагируют на изменения состояния окружающей среды и ее химизм, на динамичность физических параметров, тектоническую обстановку, особенности вторичных процессов и т. д.

Все это отражается на свойствах минералов: их структуре, характере замещений, химическом составе. Так, некоторые груп-

пы минералов образуют изоморфные ряды, различные члены которых могут выделиться только в определенных условиях. Хорошо изучены такие ряды, как альбит—анортит (плагиоклазы), форстерит—фаялит (оливины) и др. По мере изменения обстановки выделения минерала, т. е. его состава и положения в изоморфном ряду, изменяются и его кристаллооптические свойства. В этом случае важно выделить те константы, которые характеризуют не только свойства группы или ряда вообще, но определяют положение конкретного члена изоморфного ряда.

Таким образом, изучение свойств минералов позволяет не только правильно диагностировать их, но в пределах возможного раскрыть особенности различных этапов формирования горной породы.

Рассмотренные методы исследования являются обязательным этапом петрографического изучения пород и минералов, но они не всегда дают точные сведения, необходимые для решения поставленных вопросов. После общего изучения породообразующих минералов под микроскопом переходят к точным методам исследования — иммерсионному, федоровскому и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аршинов В. В. Поляризованный свет и его применение. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1945.
- Бетехин А. Г. Минералогия. М., Госгеолтехиздат, 1950.
- Болдырев А. К. Диаграммы, связывающие величины двупреломления главных сечений и величину угла оптических осей. Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова». М., Госгеолтехиздат, 1953.
- Винчел А. Н. и Винчел Г. Оптическая минералогия. М., Изд-во иностр. лит., 1953.
- Гюйгенс Х. Тракт о свете, в котором объяснены причины того, что происходит при отражении и при преломлении в частности при странном преломлении исландского кристалла. М.—Л., ОНТИ, Главная редакция общетехнической литературы, 1935.
- Лансберг Г. М. Оптика. Изд. 2-е переработ. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
- Лодочников В. Н. Главнейшие порообразующие минералы. Изд. 3-е доп. и переработ. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1947.
- Лучицкий В. И. Петрография. Т. 1. Изд. 6-е переработ. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1947—1949.
- Оникиенко С. К. Практическое руководство по исследованию порообразующих минералов в прозрачных шлифах. М., изд-во «Недра», 1964.
- Соболев В. С. Федоровский метод. Изд. 2-е. М., изд-во «Недра», 1964.
- Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод исследования минералов. М., изд-во «Недра», 1965.
- Трёгер В. Е. Таблицы для оптического определения порообразующих минералов. М., Госгеолтехиздат, 1958.
- Френель О. Избранные труды по оптике. М., Гостехтеоретиздат, 1955.
- Четвериков С. Д. Методика кристаллооптических исследований шлифов. М., Госгеолтехиздат, 1949.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Оптические свойства анизотропных кристаллов	4
Основные этапы развития представлений об оптических свойствах кристаллов	4
Оптические свойства анизотропных кристаллов	8
Направления световых колебаний в анизотропных кристаллах	19
Изменение оптических свойств в зависимости от направлений в анизотропных кристаллах	21
Оптическая индикатриса	28
Кристаллооптическая систематика минералов	34
Глава вторая. Поляризационный микроскоп	35
Поляризаторы и поляроиды	35
Главные части поляризационного микроскопа	37
Новые модели отечественных поляризационных микроскопов	42
Шлиф	45
Приведение микроскопа в рабочее положение	46
Основные поверки	46
Оценка увеличения микроскопа	51
Определение размеров зерен минералов	51
Глава третья. Исследование минералов при одном николе	54
Цвет минерала	54
Форма минерала	55
Спайность	57
Относительная величина показателя преломления	64
Дисперсионный эффект Лодочкикова	68
Глава четвертая. Исследование минералов в скрещенных николях	70
Интерференция световых волн	70
Цветная номограмма Мишель-Леви	73
Определение величины силы двупреломления	74
Определение высоты интерференционной окраски в шлифе	75
Особенности определения некоторых интерференционных окрасок	76
Необычные интерференционные окраски (дисперсия двупреломления)	77
Явление компенсации	78

Определение наименования осей оптической индикатрисы двуосных кристаллов	79
Определение величины разности хода и силы двупреломления с помощью компенсатора Берка	81
Характер погасания и определение углов погасания	86
Определение состава плагиоклазов по величине углов погасания в зоне (010)	90
Характер удлинения минерала (знак главной зоны)	94
Ориентированное светопоглощение и плеохроизм	97
Глава пятая. Исследование минералов в сходящемся свете	100
Исследование в сходящемся свете одноосных кристаллов	100
Исследования в сходящемся свете двуосных кристаллов	109
Дисперсия оптических осей двуосных минералов	117
Определение угла оптических осей по величинам двупреломления на ориентированных разрезах	118
Заключение	122
Список литературы	125
Приложение. Номограмма двойного лучепреломления (вкладка)	

Оникиенко Станислав Кузьмич

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОРОДОБРАЗУЮЩИХ
МИНЕРАЛОВ
В ПРОЗРАЧНЫХ ШЛИФАХ**

Редактор изд. А. М. Антокольская
Техн. редактор Л. Г. Лаврентьева
Художник А. Е. Григорьев
Корректор Н. А. Громова

Сдано в набор 12/V 1971 г.
Подписано в печать 17/XI 1971 г.
Т-19304 Формат 60×90¹/₁₆
Печ. л. 9,13 цв. вкл. Уч.-изд. 8,80
в т. ч. 0,52 цв. вкл. Бумага № 1-офс.
Индекс 1-1-2 Заказ 266/3946-14
Тираж 8000 экз. Цена 41 коп.

Издательство «Недра».
Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19.
Московская типография № 6
Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете
Министров СССР
Москва, Ж-88, 1-й Южно-портовый пр., 17.

41 коп.

73

НЕДРА · 1971

НОМОГРАММА ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ

