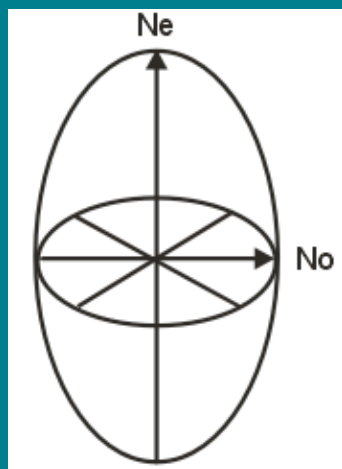
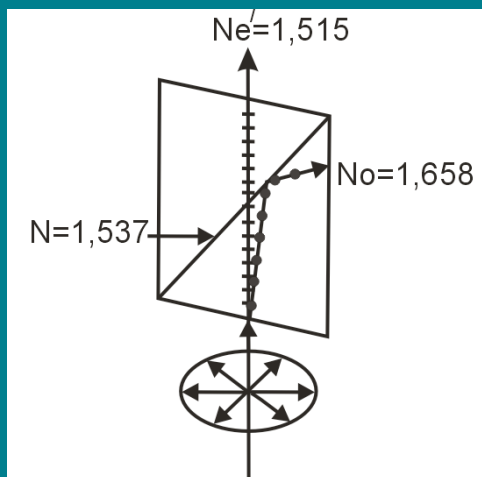


А.И. Чернышов, И.В. Володина

КРИСТАЛЛООПТИКА



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Томский государственный университет

А.И. Чернышов, И.В. Вологодина

КРИСТАЛЛООПТИКА

Учебное пособие

Томск 2017

УДК 553.086+552.086
ББК 22.374

Чернышов А.И., Вологодина И.В. Кристаллооптика: учебное пособие. – Томск: ЦНТИ, 2017. – 76 с.

ISBN 978-5-89702-417-9

В учебном пособии изложены основные сведения о кристаллооптике, которые необходимо знать при исследовании породообразующих минералов и пород в поляризационном микроскопе.

В первом разделе рассматривается устройство поляризационного петрографического микроскопа. Вторым раздел посвящен характеристике поляризованного света. В третьем разделе рассматривают особенности оптической индикатрисы для минералов различных сингоний. Последующие три раздела посвящены исследованию минералов при одном николе, в скрещенных николях и в сходящемся свете.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 05.03.01 – Геология (квалификация «бакалавр»), а также для геологов, детально изучающих петрографический состав горных пород.

Рецензент: доктор геолого-минералогических наук,
профессор В.Г. Ворошилов

ISBN 978-5-89702-417-9

© Чернышов А.И., Вологодина И.В., 2017
© Томский государственный университет, 2017

Предисловие

Наиболее трудоемким при геологических исследованиях является петрографическое изучение горных пород. Главную роль при этом играет оптические исследования породообразующих минералов и пород в поляризационном микроскопе. Методы исследования породообразующих минералов основаны на законах кристаллооптики, которая является специальной учебной дисциплиной и отличается сложностью и строгой разработанностью основных положений.

Минералы, слагающие горные породы, определяются в поляризационном микроскопе, главным образом, по оптическим свойствам. Поляризованный свет, то есть свет с ориентированным колебанием, создается в микроскопе особыми устройствами и дает нам возможность исследовать оптические свойства минералов в различных направлениях, которые позволяют их уверенно определять.

В учебном пособии изложены методы исследования минералов в поляризационном микроскопе. В нее вошли разделы, посвященные основам кристаллооптики, устройству поляризационного микроскопа и исследованию минералов при одном николе, в скрещенных николях и в сходящемся свете.

Учебное пособие будет полезным для студентов, обучающихся по направлению «геология», а также для широкого круга геологов, которые специализируются на петрографической обработке материалов геологических исследований.

1. ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП

1.1. Устройство микроскопа

Петрографический, поляризационный микроскоп состоит из следующих основных частей: 1) осветительного устройства; 2) предметного столика, на который помещается наблюдаемый объект; 3) тубуса с оптической системой; 4) штатива, на котором укреплены все перечисленные части. Петрографический микроскоп предназначен для исследований в проходящем поляризованном свете, поэтому его осветительное устройство обязательно содержит поляризатор для получения поляризованного света, в оптическую систему входит также анализатор. Предметный столик должен быть вращающимся и снабжен лимбом для измерения углов поворота.

Существует много различных моделей петрографических микроскопов. До настоящего времени широко использовались микроскопы серии МИН (например, МИН-4, МИН-5, МИН-8), ПОЛАМЫ (модели С-111, С-112, Р-211 и др.). В настоящее время используются в основном микроскопы зарубежных фирм («Zeiss», «Leica»). В основу нашего описания положен студенческий микроскоп «Leica DM750P» (рис. 1), который состоит из осветительного устройства, предметного столика, тубуса, штатива,

Осветительное устройство. Оно состоит из осветителя и конденсорного устройства со встроенным поляризатором. Светодиодный осветитель (1) интегрирован в основание штатива. Яркость осветителя регулируется ручкой реостата (2). Сверху на осветителе располагается полевая диафрагма (16), регулирующая количество выходящего из него света. При обычной работе она должна быть полностью открыта. В нижней части конденсорного устройства помещается поляризатор (нижний николю) (15), превращающий обычный свет в поляризованный. Поляризатор заключен в цилиндри-

ческую оправу, которая может вращаться, и закрепляется в определенном положении с помощью винта. Конденсорное устройство снабжено диафрагмой с кольцом (14), поворачивая которое можно увеличивать и уменьшать количество проходящего света. В некоторых моделях сверху на конденсорном устройстве находится дополнительная конденсорная линза (линза Лазо), применяемая для получения сходящегося пучка света.

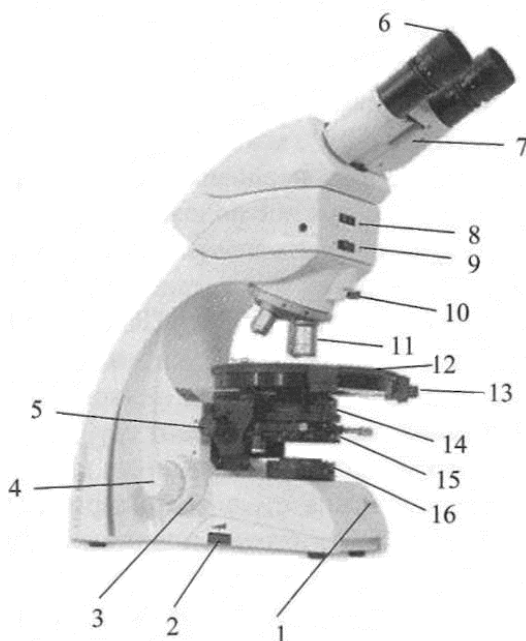


Рис. 1. Микроскоп Leica DM750P.

Предметный столик. Вращающийся столик (12) снабжен лимбом с градусными делениями и нониусом, позволяющим брать отсчеты углов поворота с точностью до $0,1^\circ$, хотя обычно достаточно измерять углы с точностью до $0,5^\circ$. Сбоку имеется стопорный винт (13), с помощью которого можно установить столик в непо-

движное положение. В верхней поверхности столика имеются отверстия, в которые вставляются «лапки» для прижимания препарата к столику, а также отверстия для установки на столик дополнительных приспособлений. В микроскопах DM750P столик всегда находится в горизонтальном положении и для фокусировки объективов может подниматься и опускаться с помощью подъемных винтов, расположенных в нижней части штатива. Подъемных винтов два – винт грубой фокусировки (3) и микрометрический винт (4). Рукоятка микрометрического винта имеет шкалу, позволяющую измерять небольшие перемещения столика по вертикали. При вращении рукояток подъемных винтов «от себя» столик поднимается, при вращении «на себя» – опускается. При перемещении столика с помощью подъемных винтов одновременно перемещается и укрепленное на кронштейне столика конденсорное устройство.

Тубус микроскопа. В оптическую систему тубуса входят объективы, окуляры и анализатор, а также линза Бертрана для работы со сходящимся светом. К микроскопу DM750P прилагаются объективы с увеличением $4\times$, $10\times$, $40\times$ и $60\times$, смонтированные на вращающемся револьверном устройстве (11). Смена объективов при этом осуществляется поворотом револьвера с объективами до момента фиксации нужного объектива. На корпусе каждого объектива нанесены цифры, обозначающие его увеличение.

В нижней части тубуса помещен анализатор, который можно вывести и ввести в оптическую систему поворотом рычажка (9) на лицевой стороне тубуса из положения «О» в положение «А». Ниже и правее анализатора в тубусе имеется прорезь (10), расположенная под углом 45° к плоскости симметрии микроскопа и предназначенная для введения компенсатора или кварцевого клина. Выше анализатора в тубусе расположена линза Бертрана, которую можно вводить поворотом рукоятки (8), расположенной над анализатором. Она вводится только при работе в сходящемся свете.

Линзу Бертрана при необходимости можно центрировать с помощью двух винтов, расположенных в тубусе.

В верхней части тубуса находятся два окуляра (6) с увеличением $10\times$. В одном из окуляров видны две взаимно перпендикулярные линии – «крест нитей». Для установки перекрестия на резкость верхнюю линзу окуляра можно перемещать, поворачивая ее оправу относительно корпуса окуляра. При обычной работе линии перекрестия должны быть расположены параллельно направлениям колебаний света в поляризаторе и анализаторе. Для фиксации нужного положения окуляра на его корпусе имеется выступ, который должен войти в один из двух вырезов на верхнем крае окулярной трубки. Второй вырез предназначен для установки окулярного креста под углом 45° к плоскости симметрии микроскопа. В поле зрения окуляров иногда установлена шкала с делениями. При работе с обоими объективами (бинокуляр) следует настроить их в соответствии с расстоянием между глазами наблюдателя, перемещая один объектив относительно другого до получения бинокулярного изображения (7).

Штатив. У микроскопов «Leica DM» штатив выполнен в виде жесткой конструкции, неподвижно соединенной с тубусом, нижняя часть которого составляет одно целое со штативом. В штативе располагается подъемный механизм столика для фокусировки микроскопа.

1.2. Подготовка микроскопа к работе (поверки микроскопа)

При включении освещения надо соблюдать следующую последовательность: сначала повернуть колесико реостата от себя до упора, затем выключателем (справа на основании штатива) включить блок питания и после этого, вращая колесико реостата на себя, установить нужное освещение. Для выключения освещения

после окончания работы действуют в обратной последовательности.

Включив освещение, нужно установить окуляры (по глазам) и нужный объектив, обычно начинать надо с малого увеличения. Диафрагмы должны быть полностью открыты, анализатор и линза Бертрана – выключены. Затем нежно произвести необходимые проверки.

Установка объектива. Объективы меняются поворотом револьверного устройства как против, так и по часовой стрелке. При повороте следует вращать корпус револьверного устройства, *не трогая сами объективы*, так как в противном случае нарушается их центрировка.

Поместив шлиф на столик микроскопа, надо отфокусировать объектив. Фокусировка объективов увеличения $4\times$, $10\times$ производится вращением винта грубой наводки. Несколько сложнее фокусировка объективов большого увеличения ($20\times$, $40\times$, $60\times$). У таких объективов рабочее расстояние между фронтальной линзой и шлифом очень мало (меньше 1 мм), поэтому, поднимая столик при фокусировке, можно раздавить шлиф и повредить линзу объектива. Для фокусировки таких объективов следует сначала, наблюдая сбоку, осторожно поднять столик так, чтобы объектив почти касался покровного стекла шлифа, а затем, наблюдая в окуляр, уловить момент появления изображения при *опускании* столика подъемным винтом. После этого окончательная наводка на резкость производится микрометренным винтом. Следует также помнить, что у современных микроскопов с револьверным устройством рабочие расстояния согласованы друг с другом, т.е. при переходе с меньшего увеличения на большее требуется лишь небольшая подстройка. Наиболее «ходовым» при рядовом петрографическом исследовании являются объективы $4\times$, $10\times$; с установки которых обычно начинают работу со шлифом.

Центрировка объектива. Для работы необходимо, чтобы объект, видимый в поле зрения на пере-

крестии нитей окулярного креста при вращении столика микроскопа не смещался в сторону. Для этого нужно, чтобы микроскоп был отцентрирован, т.е. оптическая ось системы объектив – окуляр совпадала с осью вращения столика. Для центрировки в револьверном устройстве непосредственно над каждым объективом имеются два центрировочных винта, для вращения которых на их головки надевают центрировочные ключи.

Центрировка проверяется так: передвигая шлиф по предметному столику, устанавливают на перекрестие заметный мелкий объект – зернышко, пузырек и т.п. Если микроскоп центрирован, то при вращении столика этот объект будет оставаться на перекрестии; если не отцентрирован, то при вращении столика объект сойдет с креста и будет описывать окружность с центром, смещенным относительно перекрестия. В этом случае объектив следует отцентрировать.

Рекомендуется следующая последовательность операций при центрировке:

1. Находим в поле зрения хорошо заметное мелкое зерно (лучше рудного черного минерала), *движением шлифа по столику* помещаем его в перекрестие нитей.

2. Поворачиваем столик и уводим зерно на наиболее удаленное расстояние.

3. Вращаем центрировочные винты с помощью центрировочных ключей и выводим зерно в центр описываемой им окружности.

4. Двигаем шлиф по столику и совмещаем зерно с перекрестием нитей. Если эти операции были произведены точно, центрировка будет достигнута.

5. Однако из-за неточности при выполнении производимой на глаз третьей операции сразу не удастся достигнуть необходимой центрировки, в этом случае операции 1-4 следует повторить. Наиболее тщательная центрировка требуется, при использовании объективов с большим увеличением.

Установка поляризатора и анализатора в скрещенное положение. В отрегулированном микроскопе плоскости колебаний света, пропускаемого поляризатором и анализатором, должны быть взаимно перпендикулярны. Поэтому при введении анализатора поле зрения должно стать темным. Если этого не происходит, нужно повернуть поляризатор, предварительно ослабив его закрепительный винт, до наибольшего потемнения поля зрения. Добившись максимального потемнения, поляризатор следует закрепить в найденном положении.

Определение плоскости поляризации проводится при выключенном анализаторе. Для этого используют шлиф с зернами биотита, имеющими отчетливо выраженную спайность. Найдя нужное сечение биотита, перемещением шлифа по столику устанавливают его в перекрестие нитей. Вращая столик, увидим, что зерна биотита меняют интенсивность окраски (плеохроирует). Добившись поворотом столика наиболее темной окраски биотита, определяем, с какой из нитей креста совпадает направление спайности, направление которой будет отражать направление плоскости поляризации нижнего николя. Обычно оно совпадает с горизонтальной нитью окуляра.

Определение взаимной перпендикулярности нитей окулярного креста. Находим зерно биотита с отчетливо выраженной спайностью и помещаем его в перекрестие нитей. Совмещаем спайность с вертикальной нитью и берем отчет на лимбе предметного столика по нониусу. Затем совмещаем спайность с горизонтальной нитью и снова берем отчет. Разница отчетов должна быть $90 \pm 3^\circ$. Если больше, нужно переклеивать нити.

1.3. Петрографические шлифы

Препаратами для микроскопического исследования горных пород и минералов являются *петрографиче-*

ческие шлифы. Они представляют собой тонкие плоскопараллельные пластинки породы или минерала, которые приклеены к предметному стеклу специальными смолами (канадским бальзамом и какими-либо другими смолами). Иногда пластинки сверху заклеены покровным стеклом. Идеальная толщина шлифа должна составлять 0,027 мм, часто отмечаются отклонения $\pm 0,003$ мм. При такой толщине большинство породообразующих минералов обычно прозрачные, что позволяет проводить исследования в проходящем свете. Предметное стекло имеет толщину около 2 мм и размеры обычно около 25х50 мм. Толщина покровного стекла 0,15-0,20 мм, обычные размеры от 15х15 до 25х25 мм. Канадский бальзам (либо соответствующая смола) должны быть изотропными и иметь постоянный показатель преломления, равный 1,537.

Шлифы изготавливают в специальной мастерской, для чего берут небольшой образец породы, от которого отрезают тонкую пластинку (~ 3 мм). Затем одну ее сторону отшлифовывают и приклеивают канадским бальзамом либо специальным клеем к предметному стеклу. После этого приклеенную к стеклу пластинку сошлифовывают до толщины 0,027 мм.

2. ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

2.1. Природа света. Обыкновенный и поляризованный свет

Природа света двойственна. С одной стороны – это пучок частиц энергии фотонов или световых квантов, а отсюда и квантовая природа света. Она проявляется, например, в таких явлениях, как фотоэффект, люминесценция и др.

С другой стороны свет обладает волновой природой, то есть представляет собой гармоническое колебательное движение, которое распространяется волнообразно, во все стороны от светящегося тела. С этой точки зрения свет рассматривается как электромагнитные колебания с определенными длинами волн. Волновая природа света проявляется в таких явлениях как светопреломление, интерференция, отражение, прохождение света через прозрачные минералы и т.д.

В дальнейшем, при рассмотрении кристаллооптических явлений мы будем исходить из волновой природы света.

В естественном луче колебания происходят во всех направлениях перпендикулярно к направлению распространения света. Такой свет называется **обыкновенным** (рис. 2,а).

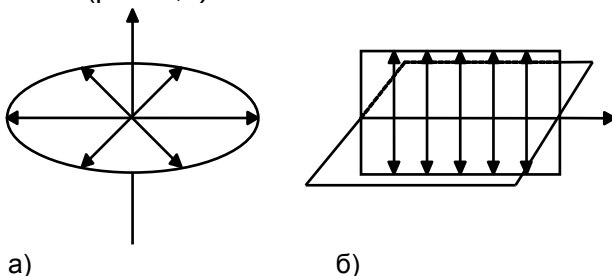


Рис. 2. Направление колебаний света: а) обыкновенного, б) поляризованного.

В результате преломления или отражения обыкновенный луч приобретает специфические свойства — колебания происходят только в определенном направлении. Такой луч, в котором колебания происходят только в определенной плоскости, называется **поляризованным** (рис. 2,б).

Поляризация бывает частичная и полная. **Полная поляризация** происходит в результате двупреломления, то есть при преломлении света в анизотропных кристаллах. При прохождении света через анизотропные кристаллы возникают два луча, колебания которых происходят в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Получение поляризованного света. При исследовании минералов лучше всего применять поляризованный свет, направление колебаний которого происходит в одной плоскости. Для получения поляризованного света используются различные устройства, наиболее распространенными из которых являются призмы Николя (николи) и поляроиды.

Если взять спайный осколок исландского шпата (прозрачная разновидность кальцита) и положить его на лист бумаги поверх изображенной на листе точки, то мы увидим удвоенное изображение точки. При вращении осколка одно из изображений точки остается неподвижным, а другое будет вращаться по окружности около первого (рис. 3). Это явление объясняется тем, что при прохождении через кристалл света обыкновенный луч распался на два поляризованных луча: луч обыкновенный (изображение точки остается неподвижным) и луч необыкновенный (изображение при вращении кристалла вращается). Эти два луча поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях, т.е. колебания обыкновенного и необыкновенного лучей происходит во взаимно перпендикулярных плоскостях.

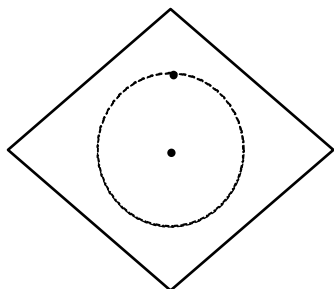


Рис. 3. Раздвоение изображения точки при прохождении света через кристалл исландского шпата.

Этим свойством разлагать обычный свет на два луча обладают все минералы средних и низших сингоний, но наиболее резко эти свойства выражены у некоторых веществ, в частности, у кальцита. На этой особенности кальцита и было основано его применение в николях, представляющих поляризационное устройство в микроскопах (*англичанин Николь, 1828*).

2.2. Устройство николя

Николи изготавливаются из совершенно прозрачных кристаллов исландского шпата. Из отдельных кристаллов выкалывается по спайности удлинённый ромбоэдр, таким образом чтобы его длинные ребра AA^1 , BB^1 и др. образуют с концевыми гранями (AB) и (A^1B^1) углы $70^\circ 52'$ и $109^\circ 08'$. Эти концевые грани шлифуют таким образом, чтобы они составляли с длинными ребрами 68° и 112° (рис. 4).

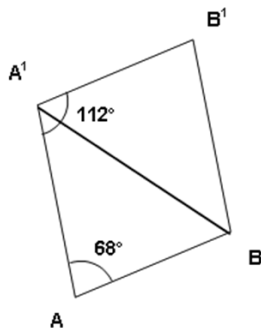


Рис. 4. Устройство призмы Николя.

Затем ромбоэдр распиливают по короткой диагонали (диагональной плоскости) и обе половинки отшлифовав, склеивают канадским бальзамом. Бока николей окрашивают черным лаком и вставляют в оправу.

2.3. Прохождение света через николь

Пусть на нижнюю поверхность николя падает обыкновенный свет, таким образом, чтобы лучи света были параллельны длинным сторонам николя. При входе в николь свет преломляется и одновременно распадается на два поляризованных луча с взаимно перпендикулярными направлениями колебаний (луч обыкновенный и луч необыкновенный). Колебания луча обыкновенного (N_o) происходят в плоскости перпендикулярной чертежу, а луча необыкновенного (N_e) в плоскости рисунка (рис. 5).

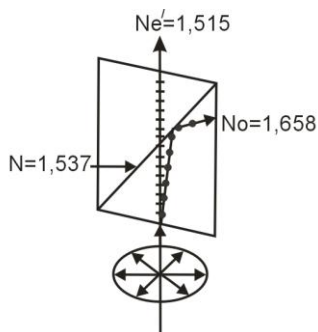


Рис. 5. Прохождение света через николь.

Проследим ход лучей в николе. Луч обыкновенный (N_o) имеет показатель преломления для кальцита $N_o=1,658$, (канадского бальзама $N=1,537$). При таких соотношениях луч, дойдя до слоя канадского бальзама, испытывает полное внутреннее отражение на границе кальцита и канадского бальзама. Таким образом, обыкновенный луч на границе канадского бальзама и исландского шпата испытывает внутреннее отражение и поглощается черной оправой николя.

Луч необыкновенный распространяется в кальците под углом к оптической оси и поэтому его показатель преломления (N_e'), будет проекцией показателя N_e и соответствовать величине 1,516, который оказывается близким показателю преломления канадского бальзама ($N=1,537$). Поэтому необыкновенный луч почти без преломления проходит в верхнюю половину николя, а затем при выходе из него сохраняет первоначальное направление.

Таким образом, из николя выйдет один необыкновенный луч, колебания которого происходят в строго определенном направлении. Все без исключения аппараты поляризации устроены на этом принципе: естественный свет разлагается на два поляризованных луча, один из которых затем устраняется.

В современных микроскопах применяются двойные поляризационные призмы, в которых для улучшения освещенности и увеличения угла обзора сделано две пересекающиеся плоскости распила, склеенные канадским бальзамом (*Призмы Глана-Томсона или призмы Франка Риттера*).

В последнее время в микроскопах для получения поляризованного света вместо поляризационных призм Николя применяются, так называемые, поляроиды. Поляроид представляет собой прозрачную пленку, на поверхность которой нанесен слой целлюлозы, содержащий множество одинаково ориентированных очень мелких кристалликов герпатита (йодистое соединение сернокислого хинина). Эти кристаллики обладают способностью поглощать одно из распространяющихся в такой среде колебаний (N_o) и пропускают другое (N_e) Поляроиды очень удобны в работе, более дешевы, не боятся колебаний температуры. Достоинством поляроидов является большой угол (120°) полезного действия. Нужно помнить, что при прохождении света через николь (поляроид) освещение (сила света) равняется половине первоначальной, т.к. из двух лучей N_o и N_e , воз-

никающих в николе, один (No) не проходит, а гасится в обойме николя или поглощается в поляроиде.

2.4. Система поляризатор (P) – анализатор (A)

Далее рассмотрим, как будет вести себя свет в системе 2-х николей.

Если над первым николем (P – поляризатором) мы поместим второй николь (A – анализатор), то при вращении второго мы будем наблюдать следующие явления. В двух положениях мы будем наблюдать наиболее яркое освещение, в двух полную тьму, а во всех других – промежуточный эффект (полусвет–полутьма).

Таким образом, мы имеем три случая взаимного расположения николей (рис. 6).

Николи скрещены. То есть они повернуты друг относительно друга на 90° (рис. 6, а). В этом случае поляризатор и анализатор пропускают лучи с различными направлениями колебаний. Поляризованный луч, вышедший из поляризатора, попадая в анализатор, окажется на положении луча обыкновенного, т.е. он на границе исландского шпата и канадского бальзама претерпевает полное внутреннее отражение и гасится, поэтому мы будем наблюдать темноту.

Николи параллельны. В этом случае анализатор и поляризатор пропускают лучи с одинаковыми направлениями колебаний (рис. 6, б). Очевидно, что луч, вышедший из поляризатора, свободно проходит через верхний николь-анализатор и мы будем наблюдать наиболее яркое освещение.

Николи не параллельны и не скрещены (случайное расположение). Здесь будет наблюдаться промежуточный эффект (рис. 6, в). Если николи не

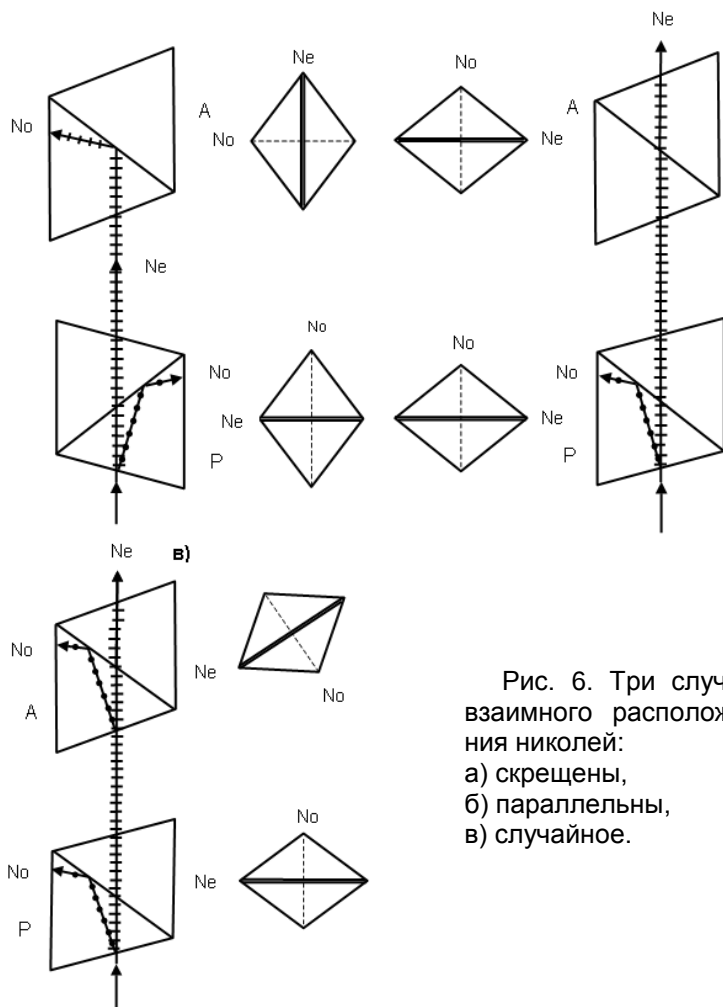


Рис. 6. Три случая взаимного расположения николей:
а) скрещены,
б) параллельны,
в) случайное.

полностью скрещены, то колебания луча, вышедшего из поляризатора, направлены под некоторым углом к главному сечению анализатора. Поэтому в последнем луч расщепляется на два с колебаниями по осям No и Ne'. Один из них (No=1,658) претерпевает полное внутреннее отражение и гасится, а второй (Ne'=1,515) проходит через анализатор и мы будем наблюдать промежуточное освещение.

3. ОПТИЧЕСКАЯ ИНДИКАТРИСА

Все вещества в зависимости от их оптических свойств четко разделяются на две большие группы.

Вещества изотропные к ним относятся минералы кубической сингонии, а также некристаллические (аморфные) вещества, в которых атомы расположены беспорядочно (воздух, вода, стекло и т.д.). Оптически изотропным веществом называется такое, в котором свет распространяется одинаково по всем направлениям, т.е. все направления в нем равнозначны по отношению к распространению света. Пластинка изотропного вещества, помещенная между скрещенными николями, не действует на поляризованный свет.

Вещества анизотропные. Их свойства изменяются в зависимости от направления. К анизотропным веществам относятся минералы, кристаллизующиеся в средних и низших сингониях. Если пластинку анизотропного вещества (минерала) поместить между скрещенными николями, то эта пластинка будет действовать на поляризованный свет и окрашиваться в определенный цвет. Эта окраска анизотропных веществ называется *интерференционной окраской*.

При изучении минералов под микроскопом определяется многие оптические константы, которые можно изображать в виде пространственной фигуры, которая носит название **«оптическая индикатриса»**.

Оптическая индикатриса – пространственно воображаемая фигура, построенная в минералах на величинах показателей преломления, отложенных по направлению световых колебаний.

Соппротивление, которое оказывает среда распространению световых колебаний, выражается показателем преломления данной среды.

3.1. Оптическая индикатриса изотропных минералов

В изотропных минералах световые колебания происходят одинаково в любом направлении. По всем направлениям колебательные движения встречают одинаковое сопротивление среды, от которой зависит скорость распространения этих колебаний. Таким образом, если из любой точки изотропного вещества отложить векторы, так чтобы длина каждого соответствовала показателю преломления, то есть определенной величине сопротивления среды световым колебаниям, то все векторы будут иметь одну длину и концы их образуют правильную сферическую поверхность. То есть оптическая индикатриса будет иметь форму шара. Такая сферическая поверхность будет являться оптической индикатрисой изотропного минерала. Она полностью выразит его оптические свойства, если знать величину его радиуса – вектора, соответствующего показателю преломления.

3.2. Оптическая индикатриса минералов средних сингоний

Для кристаллов средних сингоний оптические свойства могут быть выражены оптической индикатрисой, имеющей форму эллипсоида вращения (рис. 7). Такая фигура получается при вращении эллипса вокруг одной из его осей. Ось вращения эллипсоида называется оптической осью, перпендикулярно к которой располагается круговое сечение.

Оптическая ось – это такое направление в кристалле, по которому свет распространяется не двупреломляясь. Поскольку для оптической индикатрисы средних сингоний характерно наличие только одной оптической оси, поэтому они называются одноосными.

В оптической индикатрисе одноосных веществ имеются два главных показателя преломления: один

показатель равен радиусу кругового сечения, этот показатель обозначается N_o (направление этого показателя преломления отвечает колебаниям обыкновенного луча); второй показатель равен полуоси вращения эллипсоида (то есть, половины оптической оси) и обозначается как N_e .

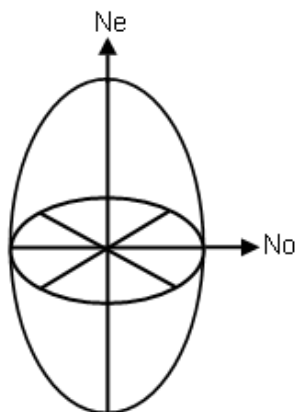


Рис. 7. Оптическая индикатриса кристаллов средних сингоний.

В зависимости от форм одноосных эллипсоидов различают **одноосные положительные и одноосные отрицательные минералы**.

Если радиус кругового сечения будет меньше половины оптической оси ($N_o < N_e$), то эллипсоид имеет вытянутую форму и называется положительным.

Если радиус кругового сечения меньше половины оптической оси ($N_o > N_e$), то эллипсоид имеет сплюснутую форму и называется отрицательным.

Таким образом, в оптической индикатрисе одноосных веществ имеется оптическая ось и перпендикулярное к ней круговое сечение. Кроме того, для этих веществ характерно два главных показателя преломления.

Рассмотрим, какие характерные направления и сечения наблюдаются в одноосных веществах:

1. При прохождении света в направлении оптической оси перпендикулярно будет наблюдаться круговое сечение. В этом сечении одноосный минерал будет ве-

сти себя, как изотропный. При этом будет наблюдаться полная темнота (свойства по всем направлениям в этом сечении одинаковы). Для этого сечения характерен только один показатель преломления.

2. При прохождении света перпендикулярно оптической оси индикатрисы, то есть вдоль радиуса кругового сечения, перпендикулярно будет наблюдаться главное (центральное) сечение индикатрисы, которое будет иметь форму эллипса с двумя неравными полуосями. В этом сечении наблюдаются два главных показателя преломления (максимальный и минимальный), поэтому разность между ними будет максимальной. В этом сечении будет возникать максимальное двупреломление. И это сечение минерала в скрещенных николях будет приобретать максимальную интерференционную окраску, характер которой определяется величиной двупреломления.

3. При случайном прохождении света в направлении не параллельном и не перпендикулярном оптической оси будет величина двупреломления будет изменяться от 0 до максимальной. При этом интерференционная окраска будет иметь промежуточный эффект, то есть полутьма–полусвет.

При изучении одноосных минералов необходимо помнить, что, *во-первых*, в любом сечении одноосного минерала всегда будет присутствовать ось N_o , *во-вторых*, в косом случайном сечении оптической индикатрисы, кроме оси N_o будет присутствовать проекция оси N_e' , которая по величине меньше, чем N_e .

3.3. Оптическая индикатриса минералов низших сингоний

Оптические свойства минералов низших сингоний могут быть выражены оптической индикатрисой, имеющей форму эллипсоида с тремя неравными полуосями (рис. 8). Все три полуоси такого эллипсоида взаимно перпендикулярны, но не равны между собой. Эти полу-

оси обозначаются как N_g , N_m , N_p и соответствуют трем главным показателям преломления.

Из аналитической геометрии известно, что такой эллипсоид с тремя неравными полуосями имеет два центральных круговых сечения, перпендикулярно которым располагаются две оптические оси. Именно, благодаря наличию в таком эллипсоиде двух оптических осей он и называется **двуосным**. Для двуосного эллипсоида характерны три главных показателя преломления N_g , N_m , N_p , три главных сечения N_g - N_p , N_g - N_m , N_m - N_p , две оптические оси (О.о) и два круговых сечения (рис. 8).

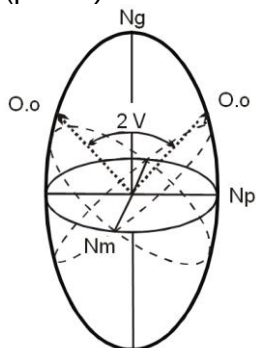


Рис. 8. Оптическая индикатриса кристаллов низших сингоний.

Характерной величиной является угол $2V$ – угол между оптическими осями. При рассмотрении двуосного эллипсоида видно, что оптические оси всегда лежат в плоскости N_g - N_p и, что оси N_g и N_p являются биссектрисами угла между оптическими осями. В зависимости от того, какая из осей N_g или N_p является биссектрисой острого угла между оптическими осями, различают двуосные положительные и двуосные отрицательные (рис. 9). Если биссектрисой острого угла между оптическими осями является ось N_g , то минерал называется **двуосным положительным** (рис. 9, а). Если же биссектрисой острого угла между оптическими осями является ось N_p , то минерал будет **двуосным отрицательным** (рис. 9, б).

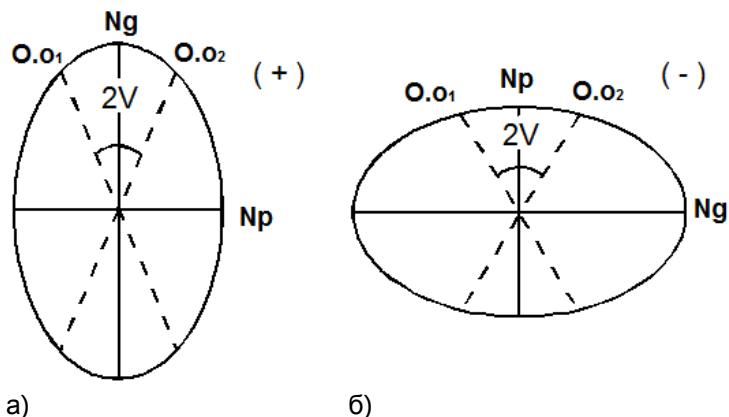


Рис. 9. Оптически двуосные минералы: а) положительные, б) отрицательные.

Двупреломление двуосных минералов может быть выражено двумя способами в виде разностей $Ng-Np$, $Ng-Nm$, $Nm-Np$. Очевидно, что наибольшей величине двупреломления отвечает разность $Ng-Np$, которая обычно и определяется при кристаллооптических исследованиях.

Рассмотрим характерные направления и сечения в двуосных веществах:

1. При прохождении света в направлении одной из двух оптических осей перпендикулярно будет наблюдаться круговое сечение. В таких сечениях двуосный минерал будет наблюдаться как изотропный, то есть будет наблюдаться полная темнота. Для этих сечений характерен только один показатель преломления и двупреломления не происходит.

2. При прохождении света вдоль оси Nm , то есть перпендикулярно главному сечению индикатрисы $Ng-Np$. В этом сечении наблюдаются два главных показателя преломления (максимальный и минимальный), поэтому в таком сечении будет максимальное двупрелом-

ление. Это сечение минерала в скрещенных николях будет иметь максимальную интерференционную окраску, определяемую величиной двупреломления.

3. При случайном прохождении света в двuosных минералах в направлении не параллельном оптическим осям и оси N_m величина двупреломления будет изменяться от 0 до максимальной. Поэтому интерференционная окраска будет иметь промежуточный эффект от полутьмы до полусвета.

3.4. Ориентировка индикатрисы в минералах различных сингоний

При изучении минералов и при определении их кристаллооптических свойств, мы всегда мысленно должны себе представлять, что оптические свойства выражаются оптической индикатрисой.

Существует определенная зависимость между симметрией кристалла, формой оптической индикатрисы и положением осей индикатрисы по отношению к осям кристалла. Существует общее правило: если кристалл обладает осью симметрии, то какая-либо из кристаллооптических осей индикатрисы N_g , N_m или N_p должна совпадать с этой осью симметрии.

1. В кристаллах кубической сингонии оптическая индикатриса имеет форму сферы (шара). Так как здесь имеются не менее четырех главных осей симметрии, перпендикулярно которым должны быть круговые сечения, поэтому кристаллы кубической сингонии являются изотропными. Иначе говоря, никакой речи об ориентировке оптической индикатрисы здесь быть не может.

2. В кристаллах средних сингоний (гексагональная, тригональная, тетрагональная) эллипсоид оптической индикатрисы имеет форму эллипсоида вращения, оптическая ось которого совпадает с осью симметрии второго порядка.

3. Двуосная оптическая индикатриса может быть только у кристаллов низших сингоний – триклинной, моноклинной или ромбической.

а) В триклинной сингонии, где кристаллографические оси не взаимно перпендикулярны и не являются осями симметрии кристалла, кристаллооптические оси индикатрисы N_g , N_m и N_p не совпадают с кристаллографическими осями $[010]$, $[100]$, $[001]$. Характерными особенностями для ориентировки эллипсоида оптической индикатрисы триклинных кристаллов являются углы, которые образуют кристаллооптические оси N_g , N_m , и N_p с кристаллографическими осями, которые сохраняют постоянную величину для одного минерального вида и являются его диагностическим признаком.

б) Минералы моноклинной сингонии характеризуются тем, что одна из кристаллооптических осей (чаще всего N_m совпадает со второй кристаллографической осью $[010]$). Две другие оси эллипсоида лежат в плоскости второго пинакоида, но не совпадают с третьей и первой кристаллографическими осями (рис. 10).

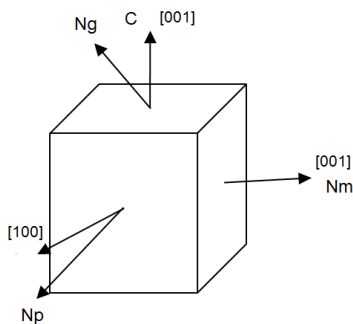


Рис. 10. Ориентировка эллипсоида оптической индикатрисы в кристалле моноклинной сингонии.

Углы, образуемые кристаллооптическими и кристаллографическими осями, являются важной характеристикой для минералов моноклинной сингонии. Обычно измеряется угол, составляемый осью N_g и $[001]$. Этот угол обозначается $N_g:[001]$, либо $C:N_g$ и называется углом погасания.

в) Минералы ромбической сингонии характеризуются тем, что кристаллооптические оси совпадают с кристаллографическими осями. В различных минералах ромбической сингонии кристаллооптические оси N_g , N_m и N_p совпадают с кристаллографическими осями $[001]$, $[010]$ и $[100]$ в различных комбинациях.

Таким образом, определить оптические свойства – это значит, определить величины, характеризующие относительный размер, форму и положение индикатрисы в кристалле.

Таковыми величинами будут следующие.

1. Величины главных показателей преломления N_g , N_m и N_p . Поскольку обычно они мало отличаются друг от друга, то представление об относительных размерах оптической индикатрисы можно получить, определив даже одну из этих величин приблизительно.

2. Величина разности между наибольшим и наименьшим показателем преломления ($N_g - N_p$), то есть величина двупреломления минерала.

а) $N_g - N_p > 0,100$ – минерал очень сильно анизотропен и имеет аномально высокое двупреломление. Например, у кальцита $N_g = 1,658$; $N_p = 1,486$ и $N_g - N_p = 0,172$.

б) $N_g - N_p = 0,020 - 0,050$ – минерал сильно анизотропен и имеет высокое двупреломление.

в) $N_g - N_p = 0,005 - 0,015$ минерал слабо анизотропен, то есть имеет низкое двупреломление.

г) $N_g - N_p < 0,005$ минерал почти изотропен.

3. Величина и знак угла оптических осей $2V$, которая вместе с величиной двупреломления дает представление о форме оптической индикатрисы.

4. Величины углов, определяющих положение кристаллооптических осей по отношению к кристаллографическим осям, то есть определяющих положение индикатрисы в кристалле.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ ПРИ ОДНОМ НИКОЛЕ

При одном николе обычно изучают следующие свойства: формы ограничения, спайность, показатель преломления, окраску и плеохроизм, плеохроичные дворики и рудные минералы.

4.1. Форма ограничения

В горных породах хорошо ограненные кристаллы встречаются редко. Обычно ограничение их бывает первичным и не первичным. Для определения минерала в первую очередь могут быть использованы зерна, обладающие хорошей огранкой. В зависимости от степени совершенства огранки минеральные зерна горных пород можно разделить на три группы (рис. 11):

а) идиоморфные – обладающие собственной огранкой и не имеющие входящих углов;

б) гипидиоморфные – частично обладающие собственной огранкой и имеющие входящие углы;

в) ксеноморфные – не имеющие собственной огранкой и выполняющие неправильные по форме промежутки между другими зернами.

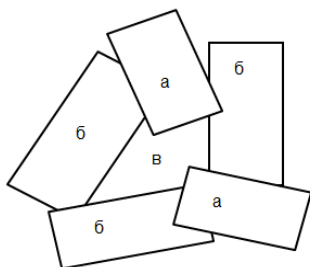


Рис. 11. Три группы минеральных зерен в зависимости от степени совершенства огранки:

- а) идиоморфные,
- б) гипидиоморфные,
- в) ксеноморфные.

Это разделение минералов по степени идиоморфизма очень важно, так как позволяет установить порядок их выделения.

Кроме того, по морфологии можно различать зерна (сечения): изометричные, округлые, ромбовидные, прямоугольные, квадратные, игольчатые, чешуйчатые, шестоватые и т.д.

В то же время необходимо помнить, что в шлифе мы имеем дело с сечениями (разрезами) минералов. А форма сечения не всегда может соответствовать истинной кристаллической форме минерала. Она в сильной степени зависит от ориентировки среза.

Для того, чтобы правильно восстановить форму кристалла по его сечению нужно учитывать толщину линии ограничения, которая зависит от ориентировки среза (рис. 12).

а) Если плоскость среза перпендикулярна граням кристалла (рис. 12,а), то линии ограничения будут тонкими, с резкими краями, а при перемещении тубуса микроскопа они не будут смещаться.

б) Если же плоскость среза ориентирована косо к граням кристалла (рис. 12,б), то линии ограничения будут толстыми с нечеткими, расплывчатыми краями, а при перемещении тубуса они будут смещаться. Чем меньше угол между плоскостью среза и гранью кристалла, тем шире, толще линии ограничения.

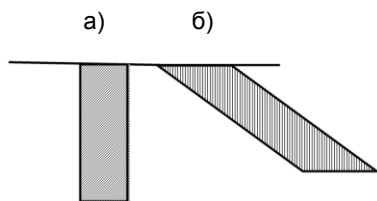


Рис. 12. Ориентировка срезов по отношению к граням кристаллов: а) перпендикулярный, б) косой.

Нередко приходится измерять углы между линиями ограничения (например, при диагностике пироксенов и амфиболов). Эти углы нужно измерять лишь в срезах перпендикулярных граням кристалла.

Для измерения углов между линиями ограничения (гранями кристаллов) необходимо:

а) вершину угла совместить с перекрестием нитей окуляра;

б) вращением столика совмещаем одну из линий ограничения (грань) с какой-либо нитью окулярного креста и берут на столике отсчет по лимбу (α^1);

в) вращением столика с той же нитью окулярного креста совмещают другую линию ограничения (другую грань) и берут отсчет по лимбу (α^2);

г) искомый угол (α) равен разности отсчетов α^2 и α^1 .

4.2. Спайность

Спайность в шлифах проявляется в результате натяжений, возникающих при изготовлении шлифа. Численность этих трещинок и четкость зависит от степени совершенства спайности, от показателя преломления минерала и от ориентировки среза.

а) У минералов с весьма совершенной спайностью трещинки спайности будут наблюдаться в виде непрерывных параллельных линий. С совершенной – они проявляются в виде прерывистых параллельных линий. И с несовершенной – они будут прерывистые и не строго параллельные (субпараллельные);

б) Если показатели преломления минерала близки к показателю канадского бальзама, то линии спайности не будут проявляться. И чем больше разница между показателями преломления минерала и канадского бальзама, тем резче и грубее будут видны трещинки спайности;

в) Чем больше угол среза к спайности, тем линии спайности четче видны. Если трещинки спайности перпендикулярны к плоскости шлифа, то они четкие, тонкие и не смещаются при поднятии и опускании тубуса. При средних углах они толстые с расплывчатыми границами. При малых углах ($<20^\circ$) трещинки спайности перестают быть видимыми.

Измерение углов между трещинками спайности (пироксены, амфиболы) проводится в разрезах, когда трещинки спайности перпендикулярны плоскости шлифа.

Также различают спайности: пинакоидальную (слюды), призматическую (амфиболы, пироксены) и др.

4.3. Показатели преломления минералов

Показатель преломления – один из важнейших диагностических признаков минералов и зависит от химического состава и кристаллической структуры минерала.

Под микроскопом показатели преломления минералов могут быть определены точно, например, с помощью иммерсионного метода, либо приближенно по отношению к показателям преломления окружающих минералов или к показателю преломления канадского бальзама. В кристаллооптической практике чаще всего применяют метод приближенного определения показателей преломления минералов.

Для определения показателей преломления в шлифах используется ряд признаков, к числу которых относятся:

- а) характер линий ограничения минералов;
- б) рельеф;
- в) характер поверхности минерала;
- г) полоска Бекке;

Характер линий ограничения. Границы между минералами в шлифе не наблюдаются, если их показатели преломления равны или близки показателю преломления канадского бальзама (кварц). И чем больше показатели минералов отличаются от канадского бальзама, тем резче и отчетливее проявляются их границы (пироксены, гранат).

Например: глаз обычно не замечает или почти не замечает границы между канадским бальзамом (1,537)

и кварцем (1,544-1,553). Граница между кварцем и апатитом (1,63-1,65) является резкой, а между кварцем и гранатом (1,7) становится грубой и толстой. Также резко выделяются пустотки или пузырьки (N=1) в канадском бальзаме.

Рельеф. Вследствие неравномерного распределения освещения в двух смежных разнопреломляющих минералах возникает эффект, выражающийся в том, что минералы с более высоким показателем преломления кажутся более толстыми и рельефно выступают на фоне низкопреломляющих минералов.

Наоборот, минералы с более низким показателем преломления кажутся на фоне более высокопреломляющих минералов в виде углублений. На самом деле, конечно, толщина всех этих зерен одинакова. Различают, таким образом, рельеф положительный и отрицательный (рис. 13), а также рельеф слабый, ясный, резкий, грубый. Например, зерна апатита среди кварца имеют ясный рельеф, а зерна граната – очень грубый.

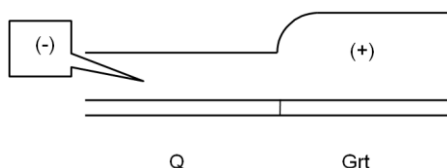


Рис. 13. Рельеф: положительный (+) у граната (Grt) и отрицательный (-) у кварца (Q).

Характер поверхности минералов. Если рельеф минералов обусловлен различием их показателей преломления, то характер поверхности минералов в шлифах зависит:

- 1) от способа изготовления шлифа, точнее, от качества его приготовления;
- 2) от различия показателей преломления минерала и окружающей среды сверху и снизу (воздух, канадский бальзам).

Так как поверхность шлифа не является идеально ровной, а имеет ряд неровностей (является шероховатой) (рис. 14), то вследствие этого возникает неравномерное освещение различных участков минерала в шлифе, и тем более неравномерное, чем больше разница между показателями преломления и окружающей среды (канадский бальзам – воздух).



Рис. 14. Проявление эффекта неравномерного освещения в минерале.

Поэтому поверхность одних минералов (с показателем преломления, значительно отличающимся от показателя преломления канадского бальзама) как бы мелкобугристая, а поверхность других (с показателем преломления, мало отличающимся от показателя преломления канадского бальзама) более ровной и чистой.

Такая мелкобугристая поверхность называется шагреневой поверхностью и выражена она тем резче, чем больше разница в показателях преломления минерала и канадского бальзама и наоборот.

В степени проявления шагреневой поверхности имеет значение, является ли шлиф покрытым или непокрытым (непокрытый шлиф рекомендуется смачивать глицерином).

По характеру линий ограничения, рельефу и шагреневой поверхности минералы с разными показателями преломления делятся на группы (таблица).

Полоска Бекке. Полоска Бекке возникает на границе двух минералов, имеющих различные показатели преломления. В сложных горных породах, состоящих из нескольких различных минералов, часто бывает важно

определить, какой из двух соседних минералов имеет больший показатель преломления.

Таблица

Разделение породообразующих минералов
по показателям преломления

Группа	Показатели преломления	Рельеф по отношению к канадскому балъзаму	Линии ограничения и шагреневая поверхность	Характерные минералы
1	1,53 – 1,56	отсутствует	не заметны	кварц, плагиоклаз
2	1,57 – 1,60	слабый положительный	слабо выражены	мусковит
3	1,52 – 1,48	слабый отрицательный		ортоклаз
4	1,61 – 1,65	ясный положительный	ясные	апатит
5	1,47 – 1,41	ясный отрицательный		флюорит
6	1,66 – 1,78	резкий положительный	резкие	пироксен
7	>1,78	грубый положительный	очень резкие	гранат

Рассмотрим, каким образом, возникает световая полоска Бекке (рис. 15). К нижней поверхности шлифа подходят лучи A_1 и B_1 . Преломив свой путь и войдя в шлиф, оба луча достигают границы, разделяющей два минерала, например, кварца и апатита. Далее их судьба делается различной. Луч A_1 , который подошел к границе со стороны кварца, то есть минерала, показатель преломления которого меньше, свободно входит в апатит и затем, покидая его, направляется по линии A_2 .

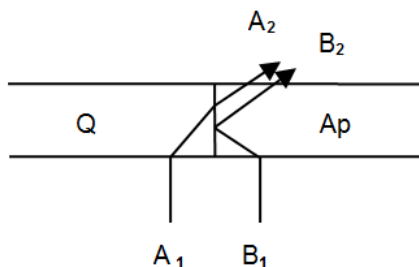


Рис. 15. Возникновение световой полоски Бекке на границе двух минералов.

Луч B_1 , который подходит к границе двух минералов со стороны апатита не всегда бывает способен проникнуть в пределы кварца. Он испытывает полное внутреннее отражение и, оттолкнувшись от границы, направляется по линии B_2 . Поэтому, пограничная линия между кварцем и апатитом делается очень заметной. Она очерчена очень резко и помимо того, благодаря явлению внутреннего отражения света в апатите, его край, которым он соприкасается с кварцем, окаймляется белой полосой, отразившегося света. Эта белая кайма отраженных лучей располагается вдоль края апатита и служит указателем того, что его показатель преломления больше, и чем он больше между соседними минералами, тем более резче и шире эта полоска.

При поднятии и опускании столика микроскопа эта полоска смещается. Если столик будем опускать, световая полоска будет перемещаться в сторону минерала с большим показателем преломления, и, наоборот, при поднятии столика микроскопа, полоска Бекке бежит в сторону минерала с меньшим показателем преломления.

Условия для четкой видимости световой полоски Бекке.

1. Шлиф должен быть покрытым, либо смазан глицерином.

2. Стык между двумя минералами должен быть чистым и ровным, а плоскость стыка должна быть по возможности субперпендикулярна поверхности шлифа.

3. Осветительное устройство должно быть опущенным, а диафрагма сужена.

4. Увеличение должно быть средним или большим ($20\times$, $40\times$).

Условия наблюдения полосы Бекке, рельефа и шагреновой поверхности у анизотропных минералов. У анизотропных минералов показатели преломления различны по различным направлениям. Поэтому, чтобы избежать неправильного определения показателей преломления таких минералов, необходимо обязательно соблюдать определенные условия установки зерна минерала перед определением его показателя преломления.

Перед определением показателя преломления нужно включить анализатор и повернуть столик микроскопа так, чтобы минерал стал на погасание. Затем выключить анализатор и провести наблюдение показателя преломления (по характеру линии ограничения, шагреновой поверхности, линии Бекке) минерала. Этим самым мы определим тот показатель преломления минерала, который совпадает с направлением колебаний поляризатора. Затем включив анализатор, поворачиваем столик микроскопа на 90° (до следующего погасания минерала) и выключаем анализатор. Теперь мы будем наблюдать показатель преломления минерала, соответствующий другому направлению, сейчас также совпадающему с направлением колебаний поляризатора.

4.4. Псевдоабсорбция

Явление псевдоабсорбции свойственно минералам, имеющим высокое двупреломление, и проявляется в том, что при вращении столика микроскопа такие минералы обнаруживают резкие изменения в рельефе,

характере поверхности, линиях ограничения и спайности.

Особенно резко псевдоабсорбция проявляется у таких минералов, у которых один показатель преломления примерно равен показателю преломления канадского бальзама, а другой резко от него отличается. Например, мусковит $n_p=1,54$, $n_g=1,59$, кальцит $n_o=1,49$, $n_e=1,66$.

4.5. Окраска и плеохроизм

В зависимости от количества поглощаемого света минералы делятся на прозрачные, полупрозрачные (окрашенные) и непрозрачные. Окраска минерала зависит от направления, по которому поляризованный свет проходит через кристаллы. Таким образом, окраска минерала обуславливается способностью минералов поглощать те или иные световые лучи сложного белого света. Поглощение света минералами может быть выражено поверхностью, которая для изотропных минералов представляет собой шар, а для анизотропных - эллипсоид (двуосный или трехосный).

У изотропных минералов и аморфных тел поглощающая способность будет постоянной по всем направлениям, поэтому их окраска не будет меняться при вращении столика микроскопа.

У анизотропных минералов мы очень часто будем наблюдать явление плеохроизма, то есть изменение окраски в зависимости от направления (в поляризованном свете). Различают три рода плеохроизма:

- 1) окраска не изменяется, изменяется ее интенсивность (биотит);
- 2) изменяется окраска, интенсивность не изменяется (гиперстен);
- 3) изменяется и окраска и интенсивность (роговая обманка).

Эллипсоид плеохроизма у анизотропных минералов, бывает двуосным (эллипсоид вращения) – для оп-

тически одноосных минералов и трехосным (для оптически двуосных минералов). Оси эллипсоида плеохроизма совпадают с осями эллипсоида оптической индикатрисы.

При характеристике плеохроизма необходимо указывать цвет плеохроизма по Ng, Nm и Np для двуосных минералов и по Ne, No для одноосных минералов. Нужно помнить, что характер и интенсивность плеохроизма зависит от ориентировки среза (биотит).

4.6. Плеохроичные дворики

В некоторых минералах проявляются плеохроичные дворики в виде окрашенных кружков (пятнышек). Они возникают вокруг очень мелких зернышек акцессорных минералов, включенных в данный минерал, и которые содержат в своем составе радиоактивные элементы (например, циркон). Окраска этих двориков изменяется при вращении столика микроскопа. Плеохроичные дворики наиболее отчетливо проявляются в биотите и кордиерите.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ В СКРЕЩЕННЫХ НИКОЛЯХ

5.1. Прохождение света через систему поляризатор – кристаллическая пластинка – анализатор

При исследовании минералов мы часто сталкиваемся именно с этой системой, то есть проводим изучение минералов горных пород в скрещенных николях. Предположим, что между скрещенными николями помещена кристаллическая пластинка анизотропного минерала, причем направления двух взаимно перпендикулярных колебаний, совершающихся в этой пластинке, не совпадают с колебаниями в николях и составляют углы ($\alpha=45^\circ$) с этими направлениями (рис. 16).

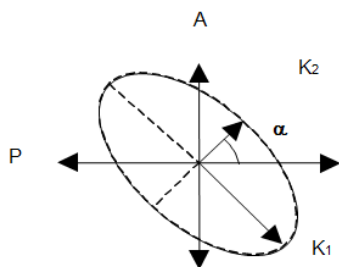


Рис. 16. Положение колебаний в кристаллической пластинке (K_1 и K_2), повернутой на 45° по отношению к световым колебаниям поляризатора (P) и анализатора (A).

При таком расположении кристаллической пластинки луч обыкновенного света, попадая в поляризатор, разлагается на два поляризованных луча со взаимно перпендикулярными направлениями колебаний. Один из этих лучей (луч обыкновенный) претерпевает на границе исландского шпата и канадского бальзама полное внутреннее отражение и не проходит в верхнюю половину николя (поляризатора). Таким образом, из поляризатора выходит один луч, колебания которого проходят в плоскости рисунка. Этот поляризованный луч входит в кристаллическую пластинку и, в свою очередь, разлагается на два луча, направление колебаний кото-

рых (K_1 и K_2) определяется направлением разреза эллипсоида оптической индикатрисы изучаемого минерала и являются взаимно перпендикулярными. Эти два луча имеют различные показатели преломления и, следовательно, различные скорости распространения.

Таким образом, по мере движений лучей в кристаллической пластинке один луч обгоняет второй и между ними возникает разность хода (**Δ либо R**), которая будет возрастать, по мере прохождения лучей сквозь кристаллическую пластинку, толщина которой обозначается, как **d** .

Разность хода – это расстояние, на которое более быстрая волна обгоняет более медленную при прохождении через кристаллическую пластинку. Таким образом, возникающая разность хода Δ зависит от величины N_g-N_p (то есть от разницы в скоростях распространения света) и от толщины пластинки d . Эта зависимость выражается $\Delta=(N_g-N_p)\times d$.

Из кристаллической пластинки выходят два луча, колебания которых происходят во взаимно перпендикулярных направлениях и, которые обладают разностью хода (Δ). В воздухе эти лучи распространяются с одинаковой скоростью и разность хода между ними сохраняется при движении в сторону анализатора.

Входя в анализатор, эти два луча вновь разлагаются каждый на два луча, два из которых идут по пути луча обыкновенного и поглощаются оправой, а два других проходят и затем выходят из анализатора. При выходе из анализатора эти два луча (две волны) совершают колебания в одной плоскости с одинаковой скоростью, то есть с одинаковыми периодами колебаний. А как известно из законов физики, такие колебания должны взаимодействовать между собой – *интерферировать*.

Прежде чем переходить к дальнейшему обсуждению, необходимо вспомнить некоторые *основные положения интерференции*.

1. Два колебательных движения, обладающие одинаковой длиной волны и распространяющиеся по одному и тому же направлению, взаимодействуют между собой или, как говорят, интерферируют.

2. Наиболее простой случай интерференции – интерференция 2-х плоско-поляризованных лучей.

Возможны три основных случая интерференции:

а) когда две волны, обладающие одинаковой длиной и одинаковыми фазами колебания, различаются только размахом своих колебаний, своими амплитудами, то результирующая амплитуда будет равна сумме двух амплитуд (рис. 17). Длина волны и фазы колебаний волны результирующей будут такие же, как и у волн слагающих, но интенсивность или амплитуда будут значительно большей.

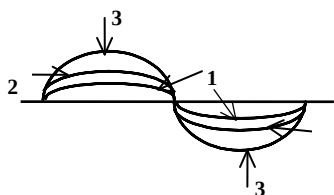


Рис. 17. Результирующая амплитуда волны (3) в случае сложения двух волн (1, 2), обладающих одинаковой длиной и одинаковыми фазами колебания.

Подобное сложение волн, образующих новые волны, называют **интерференцией**. Иначе можно сказать так: *амплитуда результирующего колебательного движения равна сумме амплитуд слагаемых движений $A_3=A_1+A_2$. Если $A_1=A_2$, то $A_3=2A$, то есть амплитуда удваивается, а интенсивность света при этом учетверяется $I=4$;*

б) колебания обоих лучей находятся в противоположных фазах. Амплитуда результирующего колебательного движения равняется разности амплитуд слагаемых движений: $A_3=A_1-A_2$ (рис. 18). Происходит ослабление света, а если слагаемые амплитуды равны между собой, то происходит полное его погасание $A_3=0$, $I=0$;

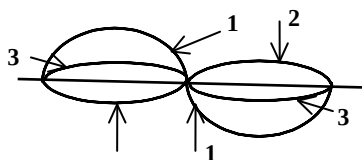


Рис. 18. Резуль-
тивная амплитуда вол-
ны (3) в случае сложения двух волн (1, 2), обладающих одинаковой длиной, но разными фазами колебания.

в) разность фаз слагаемых колебательных движений является промежуточной между двумя предыдущими случаями. Соответственно и *амплитуда результирующего колебательного движения A_3 является промежуточной между $(A_1 + A_2)$ или $(A_1 - A_2)$* . Результирующая синусоида передвинута относительно слагаемых синусоид (рис. 19). Такие же явления происходят при интерференции двух волн в анализаторе

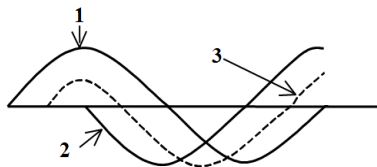


Рис. 19. Резуль-
тивная амплитуда вол-
ны (3) в случае сложения двух волн (1, 2), обладающих различной длиной.

Однако следует напомнить, что здесь уменьшение света происходит при обратном соотношении разности хода: **усиление света происходит при разности хода (Δ) равной нечетному числу полуволн, а ослабление при разности хода равной четному числу полуволн**. Здесь создается видимое противоречие, которое устраняется очень просто. Обратимся к рисунку 20, где показано колебание лучей в разбираемой системе. Из рисунка видно, что колебания K_1 и K_2 направлены в противоположные стороны (имеют противоположные знаки), следовательно, входя в анализатор, они будут находиться в противоположных фазах.

Это значит, что к той разности хода, которая получилась в кристаллической пластинке, мы должны прибавить еще полволны, то есть $\lambda/2$. Значит, какова бы ни была разность хода (Δ), возникающая в пластинке, к ней прибавляется еще половина волны.

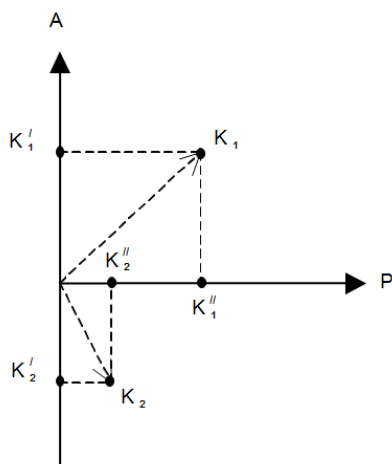


Рис. 20. Колебание лучей в системе поляризатор (P) – анализатор (A).

Таким образом, в результате прохождения света через систему P–кристаллическая пластинка–A происходит либо усиление света, либо его ослабление, благодаря интерференции двух волн, обладающих разностью хода.

Все выше приведенные рассуждения действительны в том случае, когда колебания, возникающие в кристаллической пластинке, по направлению не совпадают с направлениями колебаний в P и A.

Если направление колебаний в кристаллической пластинке совпадает с направлениям колебаний в поляризаторе и анализаторе, то есть в этом случае в кристаллической пластинке не происходит разложения поляризованного света и не возникает разности хода, то есть в этот момент, наступает погасание минерала. Если мы будем вращать минерал (кристаллическую пла-

стинку) вокруг оси распространения света, то, очевидно, мы четыре раза будем наблюдать темноту (угасание) и четыре раза просветление пластинки.

Таким образом, темнота появляется в момент совмещения осей эллипсоида оптической индикатрисы кристаллической пластинки (минерала) с направлением колебаний николей, а максимальная интерференционная окраска (наблюдающаяся 4 раза) кристаллической пластинки (минерала), наблюдается в том случае, когда направление колебаний в ней будет составлять угол 45° по отношению к направлению колебаний в николях.

Все изложенное об усилении и ослаблении света при интерференции двух волн по выходе из анализатора действительно только для монохроматического света, а в белом свете при интерференции происходит его окрашивание в тот или иной цвет. Окраска эта называется интерференционной и целиком зависит от разности хода. А именно, из белого света выпадают (ослабляются) те цвета спектра, для которых разность хода равна четному числу полуволн. Приведем длины волн для всего спектра белого света (в $\mu\text{м}$): красный – 760, оранжевый – 656, зеленый – 517, голубой – 486, синий – 430, фиолетовый – 393.

Так, например, при разности хода равной 575 $\mu\text{м}$, усиливается фиолетовая часть спектра, так как $\lambda(f)=393 \mu\text{м}$ и, очевидно, разность хода $575 \mu\text{м}=3/2 \cdot 393 \mu\text{м}$, то есть нечетному числу полуволн.

Таким образом, мы можем построить последовательный ряд цветов, которые возникают при интерференции для различных разностей хода. Такая шкала интерференционных окрасок построена и носит название таблицы Мишель-Леви или цветной номограммы.

Номограмма Мишель-Леви выражает собой взаимозависимость величины двупреломления (N_g-N_p), разности хода (Δ) и толщины шлифа (d), которая отражается в формуле $\Delta=(N_g-N_p)\times d$.

По оси абсцисс откладываются разности хода, при этом вертикальными полосами обозначаются цвета ин-

терференции, соответствующие различным разностям хода, которые отмечены вертикальными линиями. Интерференционные цвета на таблице разделены на порядки. Наиболее интенсивными и насыщенными являются цвета 3 и 4 порядков. Чем дальше цветная полоска расположена от начала координат, тем интерференционная окраска для нее считается выше.

По оси ординат диаграммы откладываются величины толщины пластинки – шлифа (d), которая отмечается также линиями, параллельными оси абсцисс.

Из левого нижнего угла таблицы выходит пучок радиусов-векторов (или расходящихся линий) на концах которых нанесены числа, соответствующие величинам $Ng-Np$ (рис. 21).

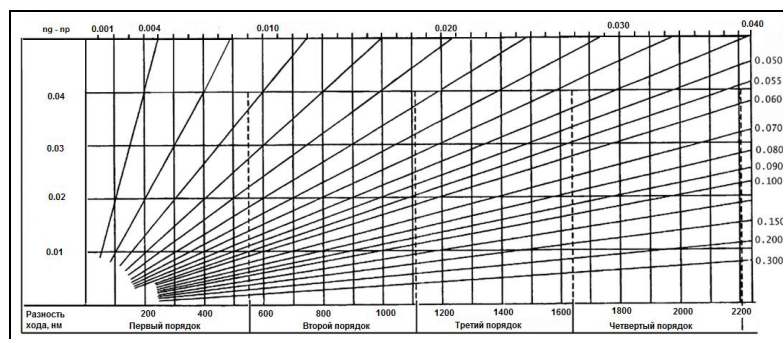


Рис. 21. Номограмма Мишель-Леви.

Таблица Мишель-Леви служит для определения двупреломления ($Ng-Np$), разности хода (Δ), толщины пластинки шлифа (d), когда известны из них две величины. Зная Δ и d , мы можем по диаграмме определить $Ng-Np$, например при $\Delta=700$ $\mu\text{м}$ и $d=0,03$ мм $Ng-Np=0,023$.

Таким образом, в скрещенных николях можно определять целый ряд важнейших кристаллооптических свойств: величину $Ng-Np$, углы погасания, знак зоны, схему абсорбции, двойники, оптические аномалии.

5.2. Определение величины двупреломления ($N_g - N_p$)

Определение величины двупреломления основано на взаимозависимости величины $N_g - N_p$ от величины Δ и d . $N_g - N_p = \Delta/d$, т.е. для определения двупреломления ($N_g - N_p$) необходимо определить разность хода (Δ) и толщину шлифа (d).

Определение разности хода. Разность хода (Δ) может быть определена приближенно, в тех случаях, если известен порядок интерференционной окраски. Например, если в минерале возникает серая или белая интерференционные окраски, мы уверенно можем говорить о принадлежности этой окраски к 1-му порядку, а по характеру цвета с помощью таблицы Мишель-Леви определить и разность хода.

Однако, в том случае, если мы имеем, например, красную, оранжевую или желтую окраску, которые встречаются как в 1-м, так и во 2-м и в 3-м порядках – определить порядок интерференционной окраски затруднительно. Такая же трудность возникает и в случае синей или зеленой интерференционной окраски минерала, хотя в этом случае мы уже можем сказать о том, что эта интерференционная окраска может быть окраской 2, 3 или более высшего порядка, но никак не может быть интерференционной окраской 1-го порядка, в котором отсутствуют синие и зеленые цвета.

В таких случаях определение порядка интерференционной окраски и разности хода производится с помощью специальных пластинок, называемых компенсаторами.

Компенсаторы – это приготовленные из анизотропного вещества пластинки, обладающие или постоянной, или переменной разностью хода.

Компенсаторы с постоянной разностью хода.

1. Гипсовые и кварцевые пластинки. Это тонкие пластинки, изготовленные из крупного кристалла гипса или кварца. В плоскости пластинки гипса лежат

оси Ng и Np эллипсоида оптической индикатрисы, при этом ось Ng ориентирована перпендикулярно длинной стороне обоймы компенсатора (рис. 22). В плоскости кварцевой пластинки лежат оси Ne и No, при этом ось Ne (=Np) ориентирована вдоль длинной стороны компенсатора, а ось Ne (=Ng) перпендикулярна ей. Таким образом, ориентировка эллипсоида оптической индикатрисы в обеих пластинках одинакова. Одинакова и толщина этих пластинок, а так же и величина двупреломления, возникающая в них (т.к. у гипса Ng-Np = 0,009, а у кварца Ne-No = 0,009).

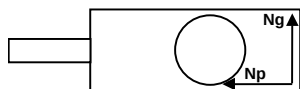


Рис. 22. Схематическое изображение компенсатора.

Если такую пластинку поместить между скрещенными николями в прорезь тубуса микроскопа, т.е. придать ей диагональное положение к плоскости симметрии микроскопа, то эта пластинка будет иметь красную или красно-фиолетовую интерференционную окраску ($\Delta = 540\text{--}550 \text{ мкм}$) 1-го порядка.

2. Слюдяные пластинки. Приготовлены из мусковита таким образом, что создаваемая его разность хода равна 150 мкм . В скрещенных николях такая пластинка дает обычно светло-серую интерференционную окраску. По длинной оси ориентирована Np, а Ng ей перпендикулярна.

Принцип действия компенсаторов состоит в том, что, будучи введены в систему Р-кристаллическая пластинка—А (в диагональном положении) эти пластинки создают добавочную постоянную разность хода, которая или прибавляется к разности хода определяемого минерала и в этом случае наблюдается повышение интерференционной окраски, или вычитается из разности хода определяемого минерала, частично или полно-

стью компенсируя последнюю и тогда наблюдается понижение интерференционной окраски.

В том случае, если оси эллипсоида оптической индикатрисы минерала и компенсатора не совпадают по направлению и окажутся разноименными (т.е. большая с меньшей, а меньшая с большей), то результирующая разность хода $\Delta\Sigma = \Delta_m - \Delta_k$, если $\Delta_m > \Delta_k$ и $\Delta\Sigma = \Delta_k - \Delta_m$, если $\Delta_k > \Delta_m$. Таким образом, вследствие вычитания разностей хода интерференционная окраска минерала будет понижаться.

Кварцевым или гипсовым компенсаторами, имеющим $\Delta = 540\text{--}550\text{ }\mu\text{м}$, пользуются обычно в случае, когда интерференционная окраска минерала варьирует от красной 1-го порядка до желто-зеленой 2-го порядка ($\Delta = 850\text{ }\mu\text{м}$). При более высоких разностях хода удобнее пользоваться кварцевым клином.

Порядок работы при определении разности хода с помощью компенсатора.

1. Просматривая шлиф, составляем список цветов интерференции определяемого минерала в различных срезах и отыскиваем из них наивысший. При анализе полученных данных может возникнуть несколько случаев:

а) Среди записанных цветов интерференции отсутствуют синие и зеленые.

Вывод: минерал имеет цвета интерференции не выше цветов первого порядка. Из всех цветов выбирается цвет, который располагается правее остальных в таблице Мишель-Леви. Этот цвет и будет являться наивысшим. Дополнительных исследований не требуется.

б) Среди записанных цветов присутствуют синие и зеленые цвета (либо какой-нибудь из этих цветов).

Вывод: наивысшие интерференционные окраски, наблюдающиеся у данного минерала, не ниже 2-го порядка, а может быть даже и выше. Для определения порядка окраски требуется применение компенсаторов или клина.

в) Палитра цветов отличается большой полнотой, цвета очень яркие, нередко одно и то же зерно имеет пятнистую окраску.

Вывод: у минерала наблюдаются аномальные цвета интерференции высоких порядков. Для выбора наивысшей интерференционной окраски необходимо применение клина.

г) Все зерна изучаемого минерала имеют палевые или перламутровые окраски. При вставлении кварцевой пластинки в таких зернах характер интерференционной окраски существенно не меняется.

Вывод: минерал обладает аномальными цветами интерференции высших порядков. Дальнейшие исследования не нужны.

д) Все зерна исследуемого минерала обладают густо-синими, густо-фиолетовыми, ржаво-бурыми, сиреневыми цветами интерференции или являются изотропными.

Вывод: минерал обладает аномальными цветами интерференции низших порядков; двупреломление имеет очень низкую величину.

2. Анализируемое зерно ставят на угасание и поворачивают на 45° против часовой стрелки.

3. Вставляют компенсатор и фиксируют получившуюся интерференционную окраску.

4. Затем вращают столик микроскопа на 90° , вновь вставляют компенсатор и фиксируют окраску.

5. Сравнивая две получившиеся после введения компенсатора интерференционные окраски между собой, определяем в каком случае произошло ее понижение, а в каком повышение.

При этом, если интерференционная окраска не выше интерференционной окраски 2-го порядка при ее понижении с компенсатором, обычно получаются белые или серые окраски 1-го порядка (частичная компенсация), что сразу позволяет определить порядок интерференционной окраски минерала. С помощью же таблицы Мишель-Леви, используя понижающую интерфе-

ренционную окраску, получаемую при введении компенсатора, определяем ее разность хода, к которой затем добавляем разность хода компенсатора (550 μm) и получаем разность хода минерала, которой соответствует интерференционная окраска на номограмме и которая также соответствует интерференционной окраске минерала до введения компенсатора.

Компенсаторы с переменной разностью хода.

К компенсаторам с переменной разностью хода относятся **кварцевый клин и компенсатор Берекка (КПК).**

Кварцевый клин изготавливается из крупного кристалла кварца. Обычно из него вырезается пластинка параллельно оптической оси. Эта пластинка вставляется в металлическую оправу (рис. 23). По длинной оси обычно располагается $N_p(N_o)$, а по короткой $N_g(N_e)$.

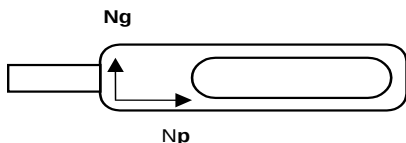


Рис. 23. Схематическое изображение кварцевого клина.

При постепенном введении такого кварцевого клина в тубус микроскопа между скрещенными николями наблюдается постепенное повышение разности хода от серых цветов 1-го порядка до цветов 2-го, 3-го или 4-го порядков.

Порядок определения разности хода минерала с помощью кварцевого клина.

1. В исследуемом зерне минерала с помощью компенсатора определяем ориентировку осей N_g и N_p . Затем ось N_g ориентируем вдоль прорези тубуса
2. После начинаем постепенно вводить кварцевый клин. В этом случае цвета интерференции обязательно будут понижаться, так как совпадают разноименные оси

эллипсоида оптической индикатрисы минерала и кварцевого клина.

3. При определенном положении кварцевого клина наступит момент, когда интерференционная окраска минерала станет белой, потом серой и, наконец, черной, т.е. разность хода будет приравнена к нулю. Момент затемнения минерала отвечает моменту компенсации, т.е. разность хода минерала и разность хода компенсатора будут равны.

4. Убедиться в этом мы можем так. Убираем шлиф с предметного столика, при этом в поле зрения наблюдаем интерференционную окраску, которая соответствует исходной окраске минерала до введения кварцевого клина.

5. Затем постепенно выводим кварцевый клин и следим за последовательностью убывания интерференционных окрасок, при этом выбираем какой-то определенный цвет (например синий). Если при этом, если через поле зрения проходит один раз синий цвет, то это значит, что интерференционная окраска минерала относится ко 2-му порядку. Если пройдет два синих цвета – к 3-му порядку и т.д. Таким образом, мы устанавливаем в таблице Мишель-Леви порядок интерференционной окраски, в котором выбираем интерференционную окраску, соответствующую исследуемому минералу, и по ней определяем его разность хода.

Определение толщины шлифа. Из формулы $\Delta = (N_g - N_p) \cdot d$ следует, что толщина шлифа $d = \Delta / (N_g - N_p)$. Для определения толщины шлифа используются минералы с известной и постоянной величиной двупреломления $(N_g - N_p)$. Таким типичным минералом является кварц, для которого $N_g - N_p = 0,009$.

Отыскиваем зерно кварца с наибольшей интерференционной окраской (чаще белая, либо желтоватобелая). Затем по этой окраске на таблице Мишель-Леви определяем разность хода кварца (Δ) в данном шлифе. После находим точку пересечения разности хода с лучом его двупреломления ($N_g - N_p = 0,009$), из которой

опускаем перпендикуляр на вертикальную координату таблицы и определяем величину толщины шлифа (d).

Если в шлифе кварц отсутствует, то d можно определить по плагиоклазу, для которого условно принимаем $Ng-Np=0,008$.

Определение двупреломления. Величина двупреломления определяется в сечениях минералов с наивысшей интерференционной окраской. В таком сечении вначале определяем разность хода (Δ) исследуемого минерала, затем толщину шлифа (d). После с помощью таблицы Мишель-Леви устанавливаем величину двупреломления ($Ng-Np$) по соответствующему лучу, который находится на пересечении (Δ) и толщины шлифа (d).

Следует иметь в виду, что у бесцветных минералов разность хода определяется без особых трудностей, тогда как у густо окрашенных минералов она часто определяется с трудом. При этом интерференционная окраска обычно затушевывается собственной окраской минерала и, таким образом, мешает определению разности хода (щелочные пироксены, амфиболы).

Дисперсия двупреломления, аномальные интерференционные окраски. Рассмотренная выше шкала интерференционных цветов, наблюдаемая у минералов в условиях белого (смешанного цвета), характерна для большинства минералов, обладающих незначительной дисперсией. У таких минералов показатели преломления для волн различной длины мало отличаются друг от друга и поэтому двупреломление практически не изменяется для волн различных частей спектра белого цвета. Подобная окраска называется нормальной интерференционной окраской.

Однако, существуют некоторые минералы (эпидот, хлорит и др.) у которых величины показателей преломления, как и величины двупреломления для волн различной длины существенно отличаются друг от друга. Такие минералы обнаруживают, как говорят, значи-

тельную дисперсию двупреломления и их интерференционные окраски заметно отличаются от обычных интерференционных окрасок нормального интерференционного спектра, будучи аномальными.

Различают следующие виды аномальных интерференционных окрасок:

1. *Супернормальная* – двупреломление для красных лучей меньше, чем для синих, в результате при низкой разности хода вместо темно-серой интерференционной окраски 1-го порядка у таких минералов наблюдается синяя или серо-синяя окраска (цоизит). При более высоких разностях хода наблюдаются пестрые ярко-желтые, красные, голубоватые (сарафанные) аномальные цвета (эпидот).

2. *Субнормальная* – двупреломление для красных лучей больше, чем для синих. В этом случае минералы вместо темно-серой интерференционной окраски 1-го порядка обнаруживают ржаво-бурую, тусклую красно-фиолетовую окраску (хлорит).

3. *Аномальная* – для лучей средней части спектра двупреломления равно 0, для синих – минерал является положительным, а для красных – отрицательным. Такая интерференционная окраска (обычно) темно-синяя или темно-бурая нередко наблюдается у некоторых одноосных минералов (везувиан, хлориты).

5.3. Определение угла погасания

Углом погасания называют постоянный (от 0° до 45°) и характерный для данного минерала угол между какой-либо кристаллооптической осью этого минерала и какой-либо кристаллографической осью [100], [010] и [001]. В качестве кристаллографического направления обычно используются спайность, удлинение минерала, его грани и плоскости срастания двойников. В шлифах угол погасания определяет как угол между какой-либо кристаллооптической осью (чаще всего осью Ng или Np) и спайностью, либо удлинением.

Различают следующие типы погасаний:

а) **прямое погасание** – когда какая-либо кристаллооптическая ось минерала совпадает с направлением спайности, удлинением (рис. 24, а);

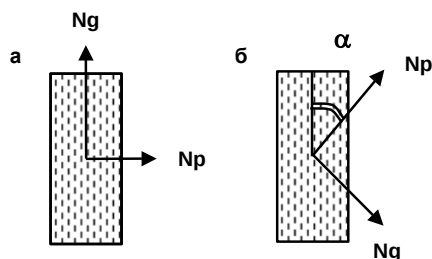


Рис. 24. Типы погасаний минералов:
а) прямое, б) косое.

б) **косое погасание** – когда какая-либо кристаллооптическая ось минерала составляет угол (α) с направлением спайности, удлинением (рис. 24, б);

в) **симметричное погасание** – возможны два варианта: первый – когда кристаллооптическая ось образует равные углы с гранями минерала (рис. 25, а, б); второй – когда кристаллооптические оси минерала образуют равные углы с направлением двойникового шва в сдвойникованном зерне минерала (рис. 25, в).

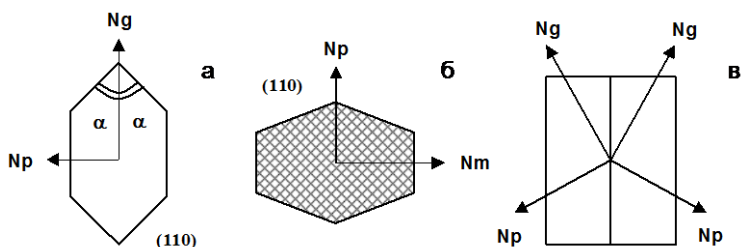


Рис. 25. Симметричное погасание минералов: к граням (а, б), двойниковому шву (в).

Измерение углов погасания производится обычно в сечениях с наивысшей интерференционной окраской.

Определение величины угла погасания проводится в следующей последовательности:

1) находим сечение с наивысшей интерференционной окраской и с хорошо выраженными кристаллографическими элементами;

2) кристаллографический элемент (спайность, удлинение, двойниковый шов) совмещаем с вертикальной нитью окуляра и берем отсчет на лимбе предметного столика;

3) поворачиваем столик до полного погасания минерала (момент темноты устанавливается более точно) и берем снова отсчет на лимбе предметного столика;

4) разность отсчетов дает угол погасания минерала;

5) затем определяем, с какой кристаллооптической осью образуется угол погасания. Для этого столик микроскопа поворачиваем (от положения погасания) на 45° против часовой стрелки. При этом искомая кристаллооптическая ось, которая в момент погасания совпадала с вертикальной нитью, становится параллельно прорези тубуса микроскопа. Вводим компенсатор и определяем наименование искомой кристаллооптической оси. Если наблюдается повышение интерференционной окраски, то эта ось будет осью N_p . Если же будет интерференционная окраска понижаться, то эта ось будет осью N_g .

Таким образом, измеренный угол будет углом, образованным найденной кристаллооптической осью с каким-либо кристаллографическим направлением. Так как углы погасания определяются чаще по отношению к оси N_g . В зависимости от результатов определения наименования оси величину измеренного угла принимают за угол погасания, если это будет ось N_g , если же это ось N_p , тогда угол погасания будет соответствовать дополнению до 90° . Например: $C:N_p=86^\circ$, тогда угол погасания $C:N_g=90^\circ-86^\circ=4^\circ$.

Характер погасания в кристаллах различных сингоний зависит от ориентировки индикатрисы.

Прямое погасание характерно, главным образом, для кристаллов средних сингоний (одноосных), а также для кристаллов ромбической сингонии. Для кристаллов ромбической сингонии, кроме прямого погасания отмечается и симметричное погасание. Минералы моноклинной и триклинной сингоний характеризуются косым погасанием, однако в отдельных сечениях могут устанавливаться как прямое, так и симметричное погасание.

Измерение углов погасания имеет большое значение при диагностике минералов. Каждый минерал характеризуется определенным углом погасания, присущим только ему.

Во многих случаях (например, в случае изоморфных смесей) величина угла погасания является функцией химического состава минерала. Таковы, например, переменные углы погасания характерны для пироксенов (Py), амфиболов (Amf), плагиоклазов (Pl). На этом основаны методы распознавания этих минералов, чаще плагиоклазов. Однако необходимо помнить, что величина угла погасания зависит и от ориентировки среза.

5.4. Определение знака зоны минералов

Знак зоны (знак удлинения) определяется сечением и показывает, как ориентированы кристаллооптические оси относительно удлинения минерала. Знак зоны определяется только у более или менее идиоморфных минералов, обладающих вытянутыми, удлинненными разрезами.

- Знак зоны считается положительным, если ось Ng направлена по удлинению или составляет с последним угол менее 45° . Например: роговая обманка (+).

- Знак зоны считается отрицательным, если ось Np совпадает с удлинением или составляет с последним угол менее 45° . Например: эгирин, апатит (-).

- Знак зоны считается нейтральным, если оси Ng и Np составляют с удлинением угол 45° . Например: авгит.

- Знак зоны не определяется, если вдоль удлинения ориентирована ось Nm. Например: эпидот.

Таким образом, знак зоны определяется путем определения наименования кристаллооптических осей и характера погасания минерала.

Чтобы определить знак зоны необходимо определить, какая из кристаллооптических осей расположена по удлинению. Это проверяется в скрещенных николях с помощью компенсатора, если интерференционная окраска не выше второго порядка или кварцевым клином, если она очень высокая.

Зерно устанавливают удлинением вдоль прорези тубуса микроскопа и вводят компенсатор или кварцевый клин и по характеру изменения интерференционной окраски (повышению или понижению) определяют какая кристаллооптическая ось (Ng или Np) ориентирована вдоль удлинения.

5.5. Изучение двойников под микроскопом

Двойниками называются закономерные кристаллические сростания, которые состоят из двух или более индивидов, повернутых друг относительно друга на 180° . В каждом двойнике различают (рис. 26):

а) *двойниковую ось («До»)* – ось (направление), поворотом вокруг которой можно совместить один индивид двойника с другим. «До» обычно совпадает с кристаллографическим направлением;

б) *плоскость сростания* – плоскость, по которой соприкасаются сросшиеся индивиды двойника. Плоскость сростания также совпадает обычно с каким-либо кристаллографическим направлением

в) *двойниковый шов* – является проекцией плоскости сростания в плоскости среза.

Двойниковая ось может лежать перпендикулярно к плоскости сростания (простой закон), либо находится в плоскости сростания (сложный закон).

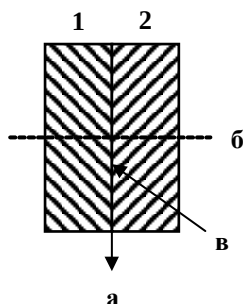


Рис. 26. Элементы двойников: а) плоскость срастания, б) двойниковая ось, в) двойниковый шов.

Двойники различают:

- а) *простые*, состоящие из двух индивидов;
- б) *полисинтетические* – срастание трех или более индивидов;
- в) *секториальные*: *тройники*, *четверники*, *шестерники* и др.

Изучение двойников проводится в скрещенных николях. Двойниковая структура становится хорошо различимой благодаря различию в интерференционной окраске индивидов. При изучении двойников нужно стремиться выбирать сечения, в которых срезы перпендикулярны плоскости шлифа, тогда двойниковые швы тонкие и четко видны.

В случае, когда двойниковая ось перпендикулярна плоскости шлифа, углы погасания индивидов двойника одинаковы и погасание двойников является симметричным. В таких сечениях очень важным диагностическим признаком ряда минералов являются углы погасания относительно двойниковых швов.

5.6. Схема абсорбции

Схема абсорбции отражает поглощение света по осям эллипсоида оптической индикатрисы. При определении схемы абсорбции мы должны относить цвета плеохроизма к осям оптической индикатрисы. Плеохро-

изм по различным осям эллипсоида оптической индикатрисы определяется при выключенном анализаторе.

Порядок работы

1) Схема абсорбции определяется в окрашенных и плеохроирующих минералах.

2) В сечении зерна с наивысшей интерференционной окраской при скрещенных николях определяем ориентировку осей эллипсоида оптической индикатрисы.

3) Совмещаем ось Ng с нитью окулярного креста, которая совпадает с плоскостью поляризации.

4) Выключаем анализатор и наблюдаем окраску плеохроизма по оси Ng. Записываем результат, например, Ng – густо-зеленый.

5) Поворачиваем столик микроскопа на 90° , совмещая с плоскостью поляризации ось Nr и наблюдаем окраску по оси Nr. Записываем: Nr – бледно-желтый.

6) Сопоставляя интенсивность окраски по осям Ng и Nr определяем схему абсорбции.

Схема абсорбции будет **прямой**, если окраска по Ng будет гуще, чем по Nr. Записываем – $Ng > Nr$.

Схема абсорбции будет **обратной**, если окраска по Ng будет менее густой, чем по Nr. Записываем – $Ng < Nr$.

При этом нужно иметь в виду, что для одноосных минералов достаточно указание двух главных цветов плеохроизма – по Ng и Nr, или по No и Ne; схема абсорбции: $Ng > Nr$ либо $No < Ne$.

Для двuosных минералов нужно охарактеризовать цвета плеохроизма по трем осям эллипсоида оптической индикатрисы: Ng, Nm, Nr. Запись – $Ng \geq Nm > Nr$ или $Ng < Nm < Nr$. То есть для полной характеристики плеохроизма двuosного минерала необходимо проводить наблюдения в 2-х разрезах (разрез с наивысшей интерференционной окраской дает цвета плеохроизма по Ng и Nr; разрез Nm и Nr можно найти, зная ориентировку эллипсоида оптической индикатрисы по отноше-

нию к кристаллографическим направлениям. Пример: роговая обманка (рис. 27).

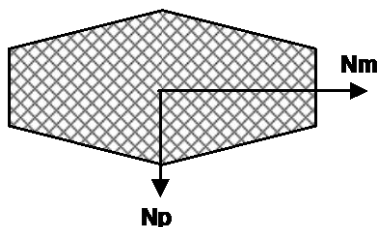


Рис. 27. Поперечные сечения Nm–Np для роговой обманки.

5.7. Оптические аномалии

К оптическим аномалиям относятся обычно такие изменения оптических свойств кристаллов, которые возникают при кристаллизации, либо под влиянием внешнего давления (стрессе). К числу подобных оптических аномалий относятся, например:

1) проявление анизотропии в некоторых кубических минералах (гранатах), обусловленной напряжениями, возникающими при кристаллизации;

2) появление зонального погасания, возникающего при быстрой кристаллизации изоморфных смесей. При этом образуются зерна, имеющие в различных участках различный состав. Наиболее часто зональное погасание проявляется у средних плагиоклазов – андезинов.

3) под влиянием стресса появляется двуосность у одноосных кристаллов (кварц, апатит);

4) появление неоднородного волнистого или облачного погасания, обусловленного искажением кристаллической структуры минералов под влиянием стресса.

Заключение о кристаллооптических свойствах минералов, которые определяются в скрещенных николях

Кристаллооптические свойства, в общем, определяются в том порядке, в котором они охарактеризованы.

1. Определяется величина двупреломления ($N_g - N_p$) в зернах с наивысшей интерференционной окраской с помощью таблицы Мишель-Леви. Предварительно необходимо определить разность хода и толщину шлифа.

2. В зерне с наивысшей интерференционной окраской определяется угол погасания, если в этом зерне имеется кристаллографическое направление (удлинение, либо спайность).

3. В этом зерне определяют знак зоны, если оно имеет удлиненную форму.

4. В этом же зерне с наивысшей интерференционной окраской определяется при выключенном анализаторе схема абсорбции, если минерал обладает плеохроизмом.

5. Двойники изучаются попутно с определением порядка интерференционной окраски, когда мы вынуждены просматривать ряд зерен данного минерала.

6. ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ

До сих пор мы проводили наблюдения при свете, лучи которого идут параллельным пучком. И все же иногда полученные свойства в параллельном свете не всегда позволяют точно определить минерал.

При наличии же в шлифах благоприятных срезов минералов можно получить еще ряд дополнительных признаков, если применить сходящийся свет. Последний получается при введении в систему линзы Лазо.

В сходящемся свете исследуется оптический эффект, который возникает при прохождении через кристалл концентрированного светового пучка. Этот эффект носит название коноскопической или интерференционной фигуры. Интерференционная фигура имеет различные формы и свойства и зависит от того, к какой сингонии относится минерал, а также от формы сечения зерна. Иначе говоря, в сходящемся свете мы можем определять осность минерала, оптический знак и величину угла $2V$ для двусосных минералов.

6.1. Получение сходящегося света

Общие положения

1. Для получения сходящегося света необходима **линза Лазо**, которая расположена под столиком микроскопа и снабжена специальной рукояткой для ввода и вывода из оптической системы.

2. Необходимо применение объективов с большим увеличением ($40\times$, $60\times$, $90\times$).

3. Все исследования проводятся в скрещенных николях.

Сходящийся свет можно получить двумя методами:

а) Метод Лазо

1. В параллельном свете при малом увеличении ($2.5\times$, $3.7\times$, $5\times$) находим зерно исследуемого минерала с сечением, которое имеет **низшую (!) интерференци-**

онную окраску. Затем устанавливаем это зерно в центр окулярного креста.

2. Сменяем объектив на большое увеличение ($40\times$, $60\times$, $90\times$) и последний тщательно центрируем.

3. Убедившись, что определяемое зерно не уходит из перекрестия окулярного креста, вводим линзу Лазо. Таким образом, получаем сходящийся пучок лучей для освещения шлифа.

4. Затем включают анализатор.

5. Вынимают окуляр из тубуса микроскопа и наблюдают в фокальной плоскости объектива маленькую, но отчетливую коноскопическую фигуру.

б) Метод Бертрана

При методе Бертрана все операции, до четвертой включительно, повторяются.

5. Не удаляя окуляр, вводим в тубус линзу Бертрана. Получается сильно увеличенная, но менее ясная, чем при первом способе, фигура в положении перевернутом на 180° по сравнению с истинной картиной.

Основным преимуществом метода сходящегося света является возможность (при наличии благоприятных разрезов) быстро и отчетливо различать одноосный минерал от двуосного. Наиболее благоприятными разрезами являются разрезы, перпендикулярные оптической оси, или острой биссектрисе угла оптических осей, то есть разрезы, обладающие наиболее низкой интерференционной окраской. Отрицательным моментом этого метода является необходимость разыскивать в шлифе сечения минералов, удовлетворяющие поставленным выше условиям.

6.2. Анализ коноскопических фигур

Одноосные минералы. Возможны три варианта коноскопических фигур:

1. В поле зрения появляется черный крест, центр которого располагается в центре поля зрения. Положение креста при поворотах столика не меняется (рис.28).

Вывод: минерал одноосный, разрез перпендикулярен оптической оси.

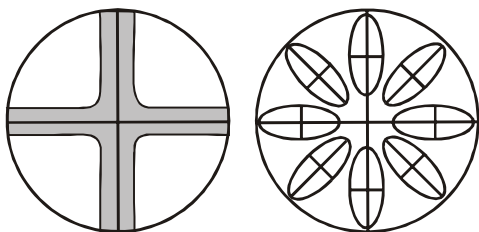


Рис. 28. Коноскопическая фигура одноосного минерала. а) разрез перпендикулярный оптической оси; б) положение осей эллипсов.

Центр креста – это выход оптической оси, то есть направление, по которому свет проходит не двупреломляясь (рис. 28, а). В тех участках интерференционной фигуры, где оси эллипсоида оптической индикатрисы совпадают с направлениями колебаний (PP, AA) наблюдается темнота (балки черного креста), а где располагаются под углом 45° к ним будет светлое поле (рис. 28, б).

Если минерал обладает высоким двупреломлением, то интерференционная фигура креста имеет серию цветных колец, которые называются **изохроматическими кольцами**. Окраска этих колец повышается от центра к периферии поля зрения.

2. В поле зрения появляется черный крест, центр которого не совпадает с центром поля зрения (рис. 29, а). При вращении столика центр креста описывает вокруг центра поля окружность, а балки перемещаются параллельно нитям окулярного креста.

Вывод: минерал одноосный, разрез косой по отношению к оптической оси, выход которой находится в поле зрения.

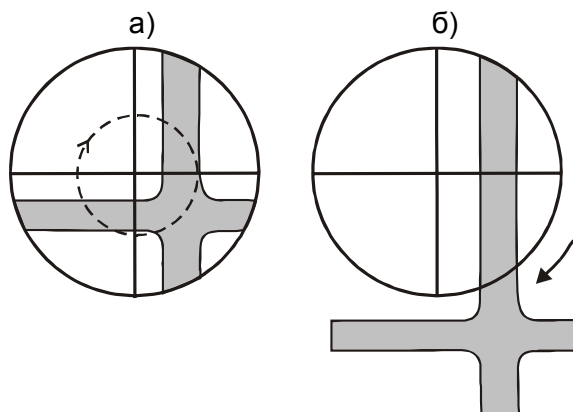


Рис. 29. Варианты коноскопических фигур одноосных минералов. Разрезы косые к оптической оси, которая находится: а) в поле зрения; б) за пределами поля зрения.

в) При вращении столика микроскопа в поле зрения перемещаются горизонтальные и вертикальные балки, расположенные параллельно нитям окулярного креста (рис. 29, б).

Вывод: минерал одноосный, разрез косой по отношению к оптической оси, выход которой находится за пределами поля зрения.

Двуосные минералы. Возможны три варианта коноскопических фигур:

1) В поле зрения наблюдается черная балка, имеющая форму гиперболы (рис. 30, а). При вращении столика микроскопа гипербола вращается вокруг центра окулярного креста в направлении обратном вращению столика. Изгиб гиперболы меняется 4 раза при повороте столика на 360° .

Вывод: минерал двуосный, разрез перпендикулярен оптической оси.

2) В поле зрения наблюдаются две балки (гиперболы), которые при вращении столика микроскопа то

расходятся в диагональном направлении от центра, то сходятся к центру (рис. 30, б).

Вывод: минерал двуосный, разрез перпендикулярный биссектрисе угла $2V$.

3) При вращении столика микроскопа в поле зрения появляются и исчезают ветви гипербол, которые перемещаются в диагональных направлениях (рис. 30, в).

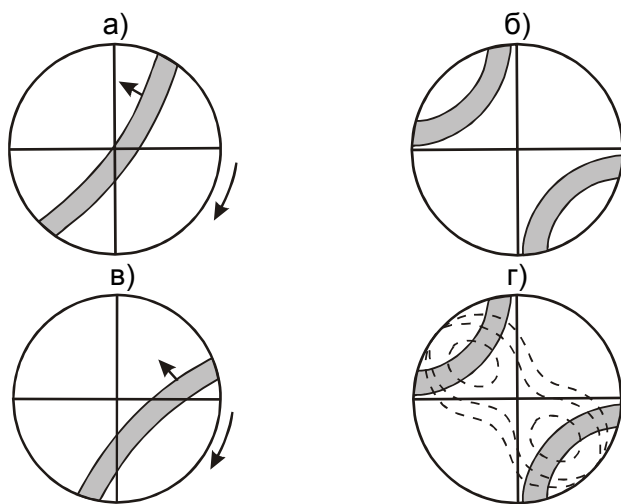


Рис. 30. Варианты коноскопических фигур двуосных минералов. Разрезы: а) перпендикулярный оптической оси, б) перпендикулярный биссектрисе угла $2V$, в) косой разрез к оптическим осям, г) цветные полосы (лемнискаты) у минералов с высоким двупреломлением в разрезе, перпендикулярном биссектрисе угла $2V$.

Вывод: минерал двуосный, разрез косой как по отношению к оптической оси, так и углу $2V$.

4) В том случае, если минерал имеет очень высокое двупреломление, тогда около гипербол появляются цветные полосы, имеющие форму восьмерок (рис. 30, г). Эти полосы называются лемнискатами.

6.3. Определение оптического знака

Определение оптического знака можно проводить как в одноосных, так и двuosных минералах. Лучший вариант определения оптического знака в сечениях перпендикулярном, либо субперпендикулярном оптической оси. Для определения оптического знака для минералов с низким, средним двупреломлением необходим компенсатор, с высоким – кварцевый клин.

Одноосные минералы. Для минералов с низким, средним двупреломлением при введении в прорезь микроскопа компенсатора необходимо установить интерференционную окраску во 2-м и 4-м квадрантах, а также 1-м и 3-м квадрантах черного креста (рис. 31, а, б). Возможны два варианта:

1) При введении компенсатора во 2-м и 4-м квадрантах появляется желтая интерференционная окраска, а в 1-м и 3-м – синяя (рис. 31, а). Делаем вывод: минерал одноосный оптически положительный;

2) При введении компенсатора во 2-м и 4-м квадрантах появляется синяя интерференционная окраска, а в 1-м и 3-м – желтая (рис. 31, б). Делаем вывод: минерал одноосный оптически отрицательный.

В поле зрения появляется одна гипербола, которая при повороте столика перемещается параллельно горизонтальной, либо вертикальной нити окулярного креста (то есть выход оптической оси за пределами поля зрения). Вращаем столик и в поле зрения выводим 4-й квадрант (рис. 31, в). Затем вставляем компенсатор, если появляется желтая окраска – минерал положительный, если синяя – отрицательный.

Для определения оптического знака у минералов с очень высоким двупреломлением нужен разрез перпендикулярный оптической оси. В этом случае вокруг центра креста будут наблюдаться цветовые изохроматические кольца. Для определения оптического знака нужно постепенно вводить кварцевый клин, если при этом кольца будут «разбегаться» от центра – минерал поло-

жительный (рис. 31, г), если будут «сбегаться» к центру – отрицательный.

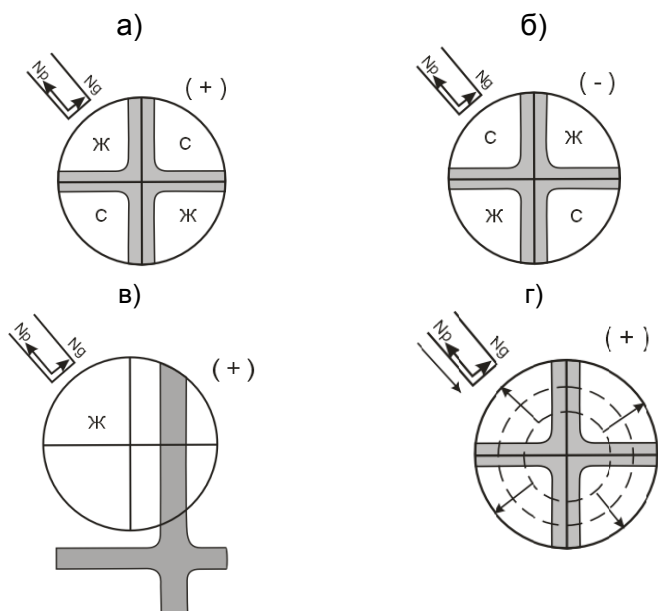


Рис. 31. Варианты определения оптического знака одноосных минералов в различных сечениях.

Двуосные минералы. Оптический знак определяется в сечениях перпендикулярных оптической оси, либо перпендикулярных биссектрисе угла $2V$.

В сечениях перпендикулярных оптической оси будет наблюдаться одна вогнутая гипербола, которая будет вращаться вокруг центра окулярного креста (рис. 32). Поворотом столика вогнутую поверхность обращает в сторону 4-го квадранта и вводим компенсатор. Возможны два случая:

а) со стороны вогнутой поверхности появляется желтая интерференционная окраска, а со стороны выпуклой – синяя (рис. 32, а). Вывод: минерал – положительный;

б) со стороны вогнутой поверхности появляется синяя интерференционная окраска, а со стороны выпуклой – желтая (рис. 32, б). Вывод: минерал – отрицательный.

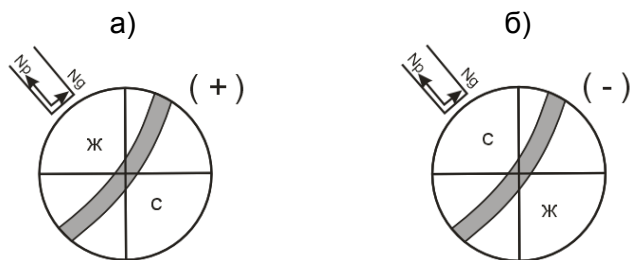


Рис. 32. Варианты определения оптического знака двuosных минералов в сечениях, перпендикулярных оптической оси.

В сечениях перпендикулярных биссектрисе угла $2V$ (углу между оптическими осями) будет наблюдаться две гиперболы, которые при вращении столика будут появляться во 2-м и 4-м квадрантах, либо в 1-м и 3-м. Поворотом столика помещаем их во 2-й и 4-й квадранты (рис. 33).

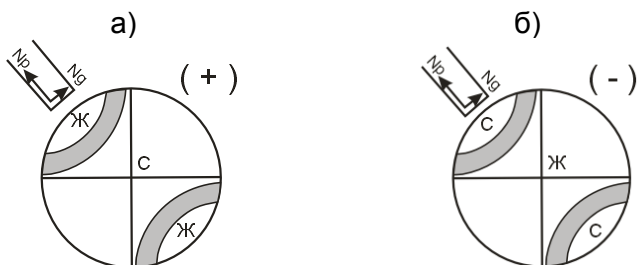


Рис. 33. Варианты определения оптического знака двuosных минералов в сечениях перпендикулярных биссектрисе угла $2V$.

Затем водим компенсатор. Возможны два случая:

а) со стороны вогнутых поверхностей гипербол появляется желтая интерференционная окраска, а между гиперболами (центральная часть) – синяя (рис. 33, а). Вывод: минерал – положительный;

б) со стороны вогнутых поверхностей появляется синяя интерференционная окраска, а между гиперболами (центральная часть) – желтая (рис. 33, б). Вывод: минерал – отрицательный.

У минералов с очень высоким двупреломлением для определения оптического знака нужен разрез перпендикулярный биссектрисе угла $2V$, в таком случае около гипербол появляются цветные полосы лемнискаты, имеющие форму восьмерок (рис.34).

Для определения оптического знака нужно постепенно вводить кварцевый клин, если при этом «восьмерка» будет «растягиваться» в сторону клина – минерал положительный (рис. 34, а), если она будет «сжиматься» – отрицательный (рис. 34, б).

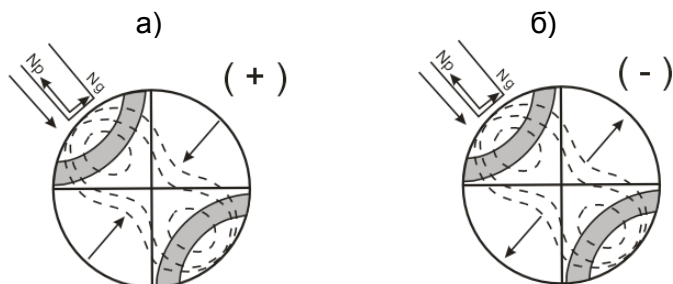


Рис. 34. Варианты определения оптического знака двuosных минералов с высоким двупреломлением.

6.4. Определение величины угла $2V$ у двuosных минералов

Определение величины угла $2V$ у двuosных минералов проводится либо в разрезах перпендикулярных

оптической оси, либо перпендикулярных острой биссектрисе угла $2V$.

Разрезы, перпендикулярные оптической оси.

Относительная величина угла $2V$ определяется по степени изгиба гиперболы при вращении столика микроскопа (рис. 35).

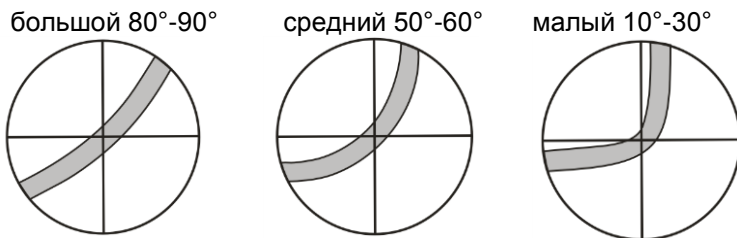


Рис. 35. Варианты определения относительной величины угла $2V$ по изгибу гипербол в разрезах, перпендикулярных оптической оси.

Разрезы перпендикулярные биссектрисе угла $2V$. Относительная величина угла $2V$ определяется также по степени изгиба гипербол (рис. 36) и по степени их расхождения гипербол, чем дальше в диагональных направлениях они расходятся, тем больше угол $2V$.



Рис. 36. Варианты определения относительной величины угла $2V$ по изгибу гипербол в разрезах, перпендикулярных биссектрисе угла $2V$.

6.5. Дисперсия оптических осей двуосных минералов

В некоторых анизотропных минералах световая волна разной длины распространяется с различной скоростью. В связи с этим показатели преломления (N_g , N_m , N_p), например, для красного цвета, отличаются от показателей (N_g , N_m , N_p) синего, фиолетового или другого цветов. Это явление называется *дисперсией*. В кристаллооптике различают *дисперсию двупреломления* (вызывают «аномальные» интерференционные окраски), *дисперсию погасания* (отсутствует полное погасание зерна и оно приобретает синевато-серые или красновато-бурые окраски) и *дисперсию оптических осей*.

Дисперсия оптических осей заключается в том, что угол оптических осей различен для световых волн разной длины. В одних случаях он больше для красного цвета, в других – для синего. Это явление наблюдается в сходящемся свете без компенсатора, когда видна одна или две ветви гиперболы. Если при обычном освещении на выпуклой стороне гиперболы видна узкая каемка красноватого оттенка, а на вогнутой – синеватого, это значит, что угол $2V$ для красного цвета больше $2V$ для синего цвета (рис. 37). Чем сильнее дисперсия, тем резче выражены цветные каемки. Одни минералы с сильной дисперсией, другие со слабой – это отличие.

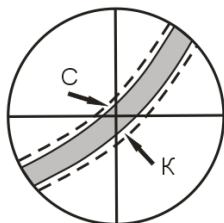


Рис. 37. Дисперсия оптических осей, когда угол $2V$ для красного цвета больше угла $2V$ для синего цвета.

Список рекомендуемой литературы

Лодочников В.Н. Главнейшие породообразующие минералы. – М.: Недра. 1974. 247с.

Оникиенко С.К. Методика исследования породообразующих минералов в прозрачных шлифах. – М.: Недра, 1971. 128 с.

Оптические свойства породообразующих минералов. Учебное пособие / Под ред. А.И. Чернышова, Н.И. Кузоватова. – Томск: ЦНТИ, 2007. – 80 с.

Оптические свойства породообразующих минералов. Учебное пособие) / Под ред. А. И. Чернышова. Томск: ТГУ, 2016. – 54 с.

Сазонов А. М. Лабораторный практикум по петрографическим методам исследования: учебное пособие: Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1990. – 182 с.
URL:<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000500945>

Саранчина Г.М. Породообразующие минералы (методика определения кристаллооптических констант, характеристика минералов). – СПб.: СПб университет, 1998. 155 с.

Сизых А. И., В. А. Буланов Оптический определитель минералов. Учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 279 с.

Сиротин К. М. Практическая петрография: Минералы магматических и метаморфических пород под микроскопом. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1988. 311 с.

Трегер В. Е. Оптическое определение породообразующих минералов: Справочник-определитель – М.: Недра, 1980. 207 с.

Чернышов А. И. Магматические горные породы. Учебное пособие. Томск: Изд. Дом ТГУ, 2015. 182 с.
URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000509092>

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП	4
1.1. Устройство микроскопа	4
1.2. Подготовка микроскопа к работе (поверки микроскопа)	7
1.3. Петрографические шлифы	10
2. ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ	12
2.1. Природа света. Обыкновенный и поляризованный свет	12
2.2. Устройство николя	14
2.3. Прохождение света через николь	15
2.4. Система поляризатор (P) – анализатор (A)	17
3. ОПТИЧЕСКАЯ ИНДИКАТРИСА	19
3.1. Оптическая индикатриса изотропных минералов	20
3.2. Оптическая индикатриса минералов средних сингоний	20
3.3. Оптическая индикатриса минералов низших сингоний	22
3.4. Ориентировка индикатрисы в минералах различных сингоний	25
4. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ ПРИ ОДНОМ НИКОЛЕ	28
4.1. Форма ограничения	28
4.2. Спайность	30
4.3. Показатели преломления минералов	31
4.4. Псевдоабсорбция	36
4.5. Окраска и плеохроизм	37
4.6. Плеохроичные дворики	38
5. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ В СКРЕЩЕННЫХ НИКОЛЯХ	39
5.1. Прохождение света через систему поляризатор – кристаллическая пластинка – анализатор	39
5.2. Определение величины двупреломления ($N_g - N_p$)	46
5.3. Определение угла погасания.....	53
5.4. Определение знака зоны минералов.....	56

5.5. Изучение двойников под микроскопом	57
5.6. Схема абсорбции	58
5.7. Оптические аномалии	60
6. ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ	62
6.1. Получение сходящегося света	62
6.2. Анализ коноскопических фигур	64
6.3. Определение оптического знака	67
6.4. Определение величины угла $2V$ у двuosных минералов.....	70
6.5. Дисперсия оптических осей двuosных минералов	72
Список рекомендуемой литературы	73

***Чернышов Алексей Иванович
Вологодина Ирина Валентиновна***

КРИСТАЛЛООПТИКА

Учебное пособие

