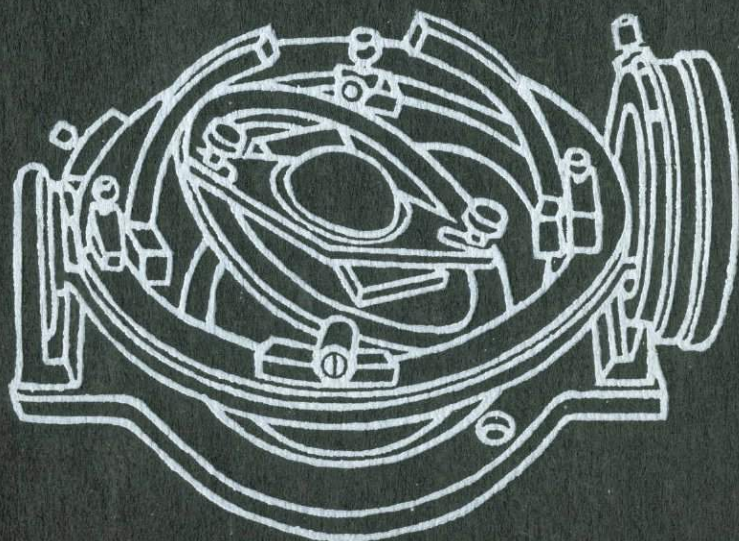
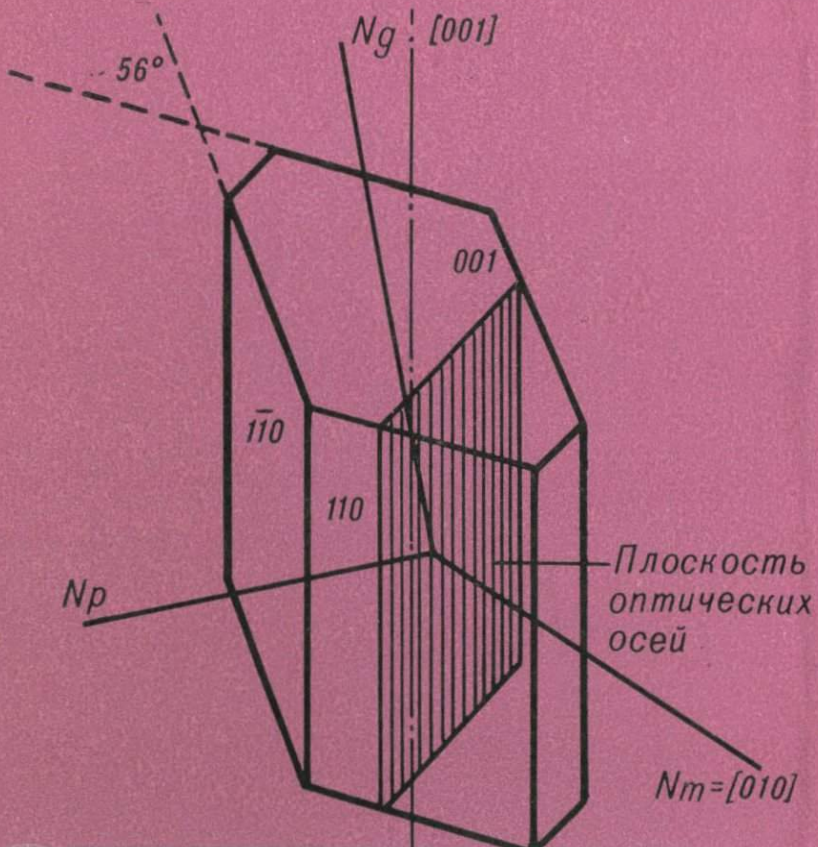


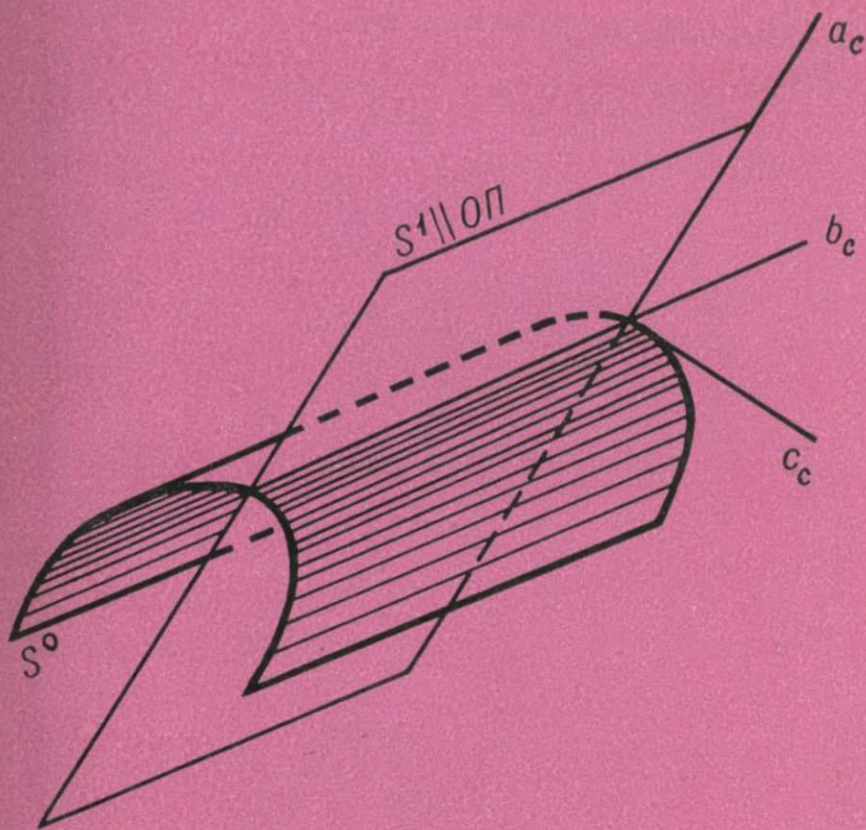
Г. М. Саранчина
В. Н. Кожевников

ФЕДОРОВСКИЙ МЕТОД



ИЗДАНИЕ





Г. М. Саранчина
В. Н. Кожевников

ФЕДОРОВСКИЙ МЕТОД

Определение минералов,
микроструктурный анализ



Ленинград
«Недра»
Ленинградское отделение
1985



В. А. Кожевников

5342

Саранчина Г. М., Кожевников В. Н. Федоровский метод (определение минералов, микроструктурный анализ). — Л.: Недра, 1985. — 208 с.

Дан краткий обзор истории развития и совершенствования Федоровского метода, который, несмотря на значительное время с момента его создания и успешное развитие иных методов изучения кристаллического вещества, остается одним из полных разносторонних методов познания минеральных агрегатов благодаря его доступности и универсальности. Описаны устройство и принципы работы на четырехосном федоровском столике. Основное внимание уделено изучению оптических свойств одноосных и двuosных кристаллов. Приведены приемы сопоставления кристаллооптических и кристаллографических признаков разнообразных минералов.

Рассмотрены особенности сбора полевого материала и его систематического изучения при геолого-структурных исследованиях.

Освещены характер процессов деформаций кристаллического вещества, динамика перекристаллизации и другие вопросы структурно-метаморфической петрологии. Приведены примеры использования микроструктурного анализа в решении задач структурно-метаморфической петрологии.

Для геологов и петрологов, изучающих магматические, метаморфические и осадочные горные породы, а также студентов геологических специальностей.

Табл. 16, ил. 120, список лит. 73 назв.

*Галина Михайловна Саранчина
Владимир Николаевич Кожевников*

ФЕДОРОВСКИЙ МЕТОД
(определение минералов,
микроструктурный анализ)

Редактор издательства В. С. Селиванов
Переплет художника А. А. Власова
Технический редактор И. Г. Сидорова
Корректор В. Н. Малахова

ИБ № 6095

Сдано в набор 23.10.84. Подписано в печать 20.03.85. М-32125. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага тип. № 1 и картографическая. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 13,60, в т. ч. 4 вкл. Усл. кр.-отт. 19,65. Уч.-изд. л. 14,91. Тираж 3500 экз.
Заказ 2165/696. Цена 1 р. 30 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра». Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Типография № 2 Ленуприздата. 191104, Ленинград, Литейный пр., 55.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Федоровский метод широко используется в настоящее время в различных областях петрографии, геологии, минералогии и кристаллографии. Первоначально он применялся главным образом для точного определения кристаллооптических свойств (констант) минералов. С 30-х годов текущего столетия федоровский метод стал основой для проведения микроструктурных исследований, что позволило подойти к решению целого ряда геолого-петрологических проблем. Настоящая книга и посвящена этим двум направлениям — методике определения на федоровском столике кристаллооптических констант минералов и микроструктурному анализу.

В первой части кратко освещены история развития федоровского метода и его значение в петрографии и родственных науках. Здесь же дано описание устройства четырехосного федоровского столика и принципов работы на нем (гл. I и II). Сведения, приведенные в этой части, были изложены нами ранее [32] и в настоящей работе изменены незначительно.

Вторая часть книги посвящена изучению на федоровском столике оптической индикатрисы одноосных и двуосных минералов (гл. III), определению силы двупреломления (гл. IV) и методике исследования главных порообразующих минералов — плагноклазов (гл. V), калиево-натриевых полевых шпатов (гл. VI) и феррических минералов — пироксенов и амфиболов (гл. VII). Данная часть работы значительно дополнена в соответствии с современным уровнем знаний. Особенно это касается определения главной группы порообразующих минералов — полевых шпатов. В их исследовании за последние десятилетия появилось много новых данных, полученных рентгеноскопическими методами; это позволило с большей точностью судить об их структурном состоянии, степени упорядоченности и триклинности. Однако при комплексном изучении химизма, структурного состояния полевых шпатов, законов их двойникования и других кристаллооптических свойств федоровский метод остается незаменимым.

Определение кристаллооптических свойств на федоровском столике в сочетании с рентгеноструктурными данными исполь-

зуется в настоящее время и для изучения фемических минералов, в частности для определения их кристаллохимических особенностей.

Глава VIII посвящена рассмотрению методики работы на пятиосном столике. В этой главе дано описание устройства столика, приемов установки оптической индикатрисы, определения кристаллооптических констант и исследования плагиоклазов. Методика работы на пятиосном столике является в целом той же, что на четырехосном, однако отличается рядом специфических особенностей. Она требует значительно меньше времени на определение констант и диагностику минералов и позволяет обходиться без графических построений на сетке Вульфа. Метод работы на пятиосном столике не освещен в учебных руководствах, что заставило авторов включить его в издаваемую книгу.

Части первая и вторая написаны Г. М. Саранчиной на основе многолетнего опыта преподавания федоровского метода на геологическом факультете Ленинградского университета.

Третья часть книги, написанная В. Н. Кожевниковым, содержит основные сведения по проведению микроструктурных исследований и их использованию для решения задач структурно-метаморфической петрологии. Она начинается с краткого введения, в котором дано определение микроструктурного анализа, сформулированы его задачи и рассмотрена история развития. Глава IX содержит детальное описание техники проведения микроструктурного анализа и расшифровки полученных диаграмм. Главы X и XI посвящены рассмотрению элементов динамики и кинематики твердого тела и механизмов, контролирующих пространственную ориентировку минералов. В гл. XII приведено описание динамически равновесных ориентировок минералов метаморфических тектонитов. В гл. XIII приведены примеры использования микроструктурного анализа в структурно-метаморфической петрологии (определение механизма ультраметаморфогенного процесса и др.). Данные, приведенные в третьей части работы, публикуются впервые.

Авторы всемерно стремились так изложить материал, довольно сложный для восприятия, чтобы представленная работа могла служить методическим руководством для лиц, самостоятельно осваивающих федоровскую методику и микроструктурный анализ, а также пособием при проведении студенческих занятий на геологических факультетах. Они выражают глубокую благодарность [К. О. Кратцу], Л. П. Никитиной, О. Г. Сметанниковой, Ю. В. Ванде-Киркову, Д. К. Романову, Ю. И. Лазареву за полезные и конструктивные замечания и обсуждение вопросов, разбираемых в данной работе, а также Л. Н. Копыловой и Э. Л. Абрамовой за помощь в оформлении рукописи.

Глава I

ЧЕТЫРЕХОСНЫЙ ФЕДОРОВСКИЙ (УНИВЕРСАЛЬНЫЙ) СТОЛИК. ФЕДОРОВСКИЙ МЕТОД

§ 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ФЕДОРОВСКОГО МЕТОДА И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУКАХ

В конце XIX в. академиком Евграфом Степановичем Федоровым был создан новый способ микроскопического исследования кристаллов, названный им первоначально «теодолитным методом». В предисловии к своей классической монографии «Теодолитный метод в минералогии и петрографии», изданной в 1893 г. в «Трудах Геологического комитета» [38, с. 24—61], Е. С. Федоров пишет: «В первый раз идея применения метода, изложенного в этом сочинении, была публично заявлена мною в ноябре 1889 г. на заседании С.-Петербургского минералогического общества». Однако первая работа была опубликована Е. С. Федоровым лишь два года спустя, в 1891 г., под названием «Новый метод оптического исследования кристаллических пластинок в параллельном свете» [38, с. 16—23]. В том же году Федоров сделал заявку в Геологическом комитете на изобретенный им универсальный столик, который был сконструирован в конце 1891 г. В 1892 г. первоначальная модель была усовершенствована Е. С. Федоровым. Сам Е. С. Федоров следующим образом характеризует изобретенный им прибор: «Универсальным столиком я называю такое приспособление к обыкновенному поляризационному микроскопу, которое устанавливается на его столике (и может быть снято) и которое дает возможность подвергать препарат вращению около двух взаимно перпендикулярных осей» [38, с. 28].

Основной особенностью теодолитного метода является возможность совмещать линии и плоскости кристалла (кристаллографические и кристаллооптические) с установочными направлениями прибора и измерять их координаты. Установочными направлениями являются или плоскость симметрии микроскопа, перпендикулярная к оси I , или оптическая ось A микроскопа. Совмещение линий или плоскостей в кристалле с установочными направлениями осуществляется вращением вокруг двух взаимно перпендикулярных осей — неподвижной оси I и подвижной M . Углы поворота столика вокруг этих осей, измеренные по соответствующим лимбам, определяют пространственное положение данного направле-

ния в кристалле. Первоначальные приборы и представляли собой двуосные столики с осями I и M .

К 90-м годам XIX в. относится и введение Е. С. Федоровым стеклянных сегментов, между которыми помещается шлиф. Важным усовершенствованием явилась новая конструкция столика, имеющего дополнительное внутреннее кольцо; это дополнительное кольцо укреплено во внешнем кольце m (см. § 2). Внешнее кольцо вместе с внутренним (и осями N и H) может наклоняться вокруг неподвижной оси столика I . Вращением столика вокруг оси M ось H устанавливается перпендикулярно к оси I , и при дальнейшей работе к вращению вокруг оси M прибегают редко. В связи с этим Е. С. Федоров новый прибор назвал трехосным столиком. Этот столик стал известен под названием четырехосного федоровского столика. Важнейшей особенностью работы на нем является возможность «не только привести произвольное направление в положение оси трубы микроскопа, но и при таком избранном положении препарата подвергать его вращению вокруг оси I ». Это позволяет «непосредственно определять положение плоскостей симметрии оптического эллипсоида» и устанавливать взаимоотношения его с кристаллографическими элементами [38, с. 276—282].

Связь между кристаллографическими и кристаллооптическими элементами имеет особенно важное значение для кристаллов триклинной и моноклинной сингоний, и этим объясняется то, что федоровский метод развивался в основном применительно к изучению группы полевых шпатов, главным образом плагиоклазов. Положение оптической индикатрисы по отношению к геометрическим элементам кристалла (элементам двойникования, плоскостям спайности, кристаллографическим осям и др.) связано с химическим составом этой важнейшей группы породообразующих минералов. Во многих работах помимо описания приемов использования федоровского метода имеются специальные диаграммы для определения состава плагиоклазов, законов их двойникования, символов граней и т. д. [38, с. 567—651, 760—762].

Е. С. Федоров в течение десяти с лишним лет развивал и совершенствовал как сам прибор — универсальный столик, так и методику работы с ним. В дальнейшем федоровский метод разрабатывался его учениками и последователями главным образом в Петербургском горном институте, где в течение многих лет работал сам Е. С. Федоров. Среди последователей Е. С. Федорова, сыгравших важную роль в развитии федоровского метода и внедрении его в практику петрографической работы, следует назвать В. В. Никитина, М. А. Усова, в более позднее время — М. А. Сушинского, Г. Л. Пузырева, Е. Д. Стратоновича, В. Н. Лодочникова, А. Н. Заварицкого, Л. А. Варданянца и других. В начале XX в. федоровский метод распространился за границу, чему способствовало как опубликование многочисленных статей Е. С. Федорова в России и Германии, так и появление руководств по федоровской методике. Первые руководства по этому методу в России были опубликованы М. А. Усовым в 1911 г. в Томске и В. В. Никитиным в 1911—1912 и 1915—1923 гг. в Петрограде.

За границей специальные исследования и руководства были опубликованы в 20-х годах XX в. Дюпарком, Рейнгардом и Фуке (Франция), Береком, Бекке и Вюльфingом (Германия) и многими другими исследователями. Дюпарком была переведена на французский язык монография В. В. Никитина, посвященная федоровскому методу.

В последние десятилетия в СССР изучение федоровского метода введено в программу всех горных вузов и геологических факультетов университетов.

Усовершенствованием в конструкции федоровского столика явилось введение пятой оси вращения, позволяющей применить к исследованию кристаллического вещества так называемый двойной теодолитный метод (см. гл. VIII). Ввел пятую ось вращения и создал пятносный столик американский исследователь Эммонс. Приемы работы на пятносном столике и применение его к исследованию породообразующих минералов изложены в работах Эммонса и Гейта [53, 54], А. Н. Заварицкого [15, 38, с. 381—384], Г. М. Сарачиной [32, с. 128—146].

Как видно из краткого исторического обзора, в течение свыше 60 лет непрерывно совершенствовались конструкция столика и метод работы с ним. Двухосный столик был заменен четырехосным еще самим Е. С. Федоровым. Был увеличен размер столика и радиус стеклянных сегментов, что резко расширило поле зрения и предел видимости препарата при наклонах, а также дало возможность работать со шлифами нормального размера; на старых моделях приходилось работать со шлифами малых размеров. Стали изготавливаться стеклянные полусферы с различными показателями преломления, соответствующими показателям преломления важнейших породообразующих минералов. При помощи специального устройства стало возможным устранять эксцентриситет и т. п. С введением пятой оси вращения столика стало возможным непосредственно измерять ориентировку оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим элементам; применение двойного теодолитного метода внесло некоторые изменения в методику работы и последовательность операций при изучении кристаллического вещества; например, появилась возможность обходиться без построения стереографических проекций, являющихся обычно необходимыми при исследовании на четырехосном столике.

В настоящее время отечественные заводы выпускают пятиосные федоровские столики, имеющие много дополнительных усовершенствований и мало похожие на первоначальные приборы, которые изготавливались в конце XIX в. Однако, несмотря на все видоизменения, основная идея федоровского метода — именно возможность совмещения кристаллографических и кристаллооптических элементов кристалла с установочными направлениями столика и измерения их координат — полностью сохранилась. При работе на плоском столике поляризационного микроскопа исследуемые зерна минералов можно изучать лишь в одной плоскости — именно в том случайном разрезе, по которому данное зерно рассечено плоскостью шлифа. Определение оптических свойств минералов приходится производить в различных, специально подобранных разрезах, а если таковые в шлифе отсутствуют, то изучение часто не может быть доведено до конца. Эти ограничения в изучении минералов были устранены введением в практику кристаллографических, минералогических и петрографических исследований федоровского метода, который дал возможность определять тип оптической индикатрисы (т. е. осьность и оптический знак кристалла, угол оптических осей) и ориентировку ее относительно кристаллографических элементов, а также производить точные измерения силы двупреломления, изучать законы двойникования, устанавливать особенности плеохроизма и абсорбции и т. д.

Особенно важное значение федоровский метод приобрел для определения важнейшей группы породообразующих минералов — полевых шпатов, изучению которых посвящены многочисленные работы русских и иностранных исследователей. В последнее время много сделано также для изучения амфиболов, пироксенов, группы оливина и ряда других минералов. На основании точного определения кристаллооптических свойств путем корреляции стало возможным определять химический состав названных минералов, представляющих собой изоморфные смеси сложного химического состава.

Наряду с широким использованием для точного определения кристаллооптических свойств минералов федоровский метод нашел широкое применение в области микроструктурного исследования горных пород.

Л. А. Варданянцем разработана теория федоровского метода, которая даст возможность в дальнейшем ввести в методику работы на федоровском столике ряд дополнительных приемов, устраняющих затруднения, иногда встречающиеся в практике, особенно при исследовании минералов с малыми углами оптических осей [6, 38, с. 826—830].

§ 2. УСТРОЙСТВО ЧЕТЫРЕХОСНОГО ФЕДОРОВСКОГО СТОЛИКА

Описание устройства столика

Четырехосный федоровский столик имеет четыре оси вращения, благодаря которым исследуемому минеральному зерну можно придавать нужное положение в пространстве. На рис. 1 схематически показаны расположение осей федоровского столика и оптическая ось микроскопа A .

Название осей дано от немецких слов: ось I — *Immobilachse* неподвижная ось; ось M — *Mobilachse* — подвижная ось; ось N — *Normalachse* — эта ось всегда перпендикулярна (нормальна) к плоскости шлифа; ось H — *Hilfachse* — вспомогательная ось. Все оси M , N , I и H должны пересекаться в центре федоровского столика; это условие должно быть обеспечено при изготовлении прибора.

Схема устройства четырехосного федоровского столика приведена на рис. 2. Федоровский столик монтируется на металлическом основании — кольце Q , имеющем два отверстия, куда вставляются специальные винты, которыми универсальный столик привинчивается к предметному столику микроскопа. Предварительно из последнего должен быть вынут внутренний металлический круг. Металлическое кольцо имеет две вертикальные стойки, в которых укреплено кольцо m , вращающееся вокруг оси I .

Ось I расположена в горизонтальной плоскости и при основном положении столика перпендикулярна к плоскости симметрии микроскопа. На одном конце оси I имеется вертикальный лимб оси I , разделенный на 360° , нониус лимба оси I и винт i , которым ось I может закрепляться неподвижно. Вертикальный лимб, совмещенный с рукояткой для вращения вокруг оси I , следует помещать справа от наблюдателя.

Кольцо m расположено перпендикулярно к оси M и при основном положении столика — параллельно предметному столику микроскопа. Это кольцо разделено на 360° и имеет нониус лимба для отсчетов по оси M и винт t для ее закрепления.

В кольце m имеются специальные цапфы, в которые вставлена ось H . На кольце m на шарнирах привинчены две откидывающиеся дужки d , на которых нанесены градусные деления. По этим дужкам производится измерение углов наклона вокруг оси H (при измерении углов наклона вокруг оси H дужки ставятся перпендикулярно к кольцу m). Винтом h ось H закрепляется в неподвижное положение. На оси H расположено внутреннее кольцо n , всегда перпендикулярное к оси N ; в плоскости этого кольца располагается шлиф. Кольцо n разделено на 360° и имеет специальный указатель, по которому можно отсчитывать углы поворота вокруг оси N . Повороты вокруг последней

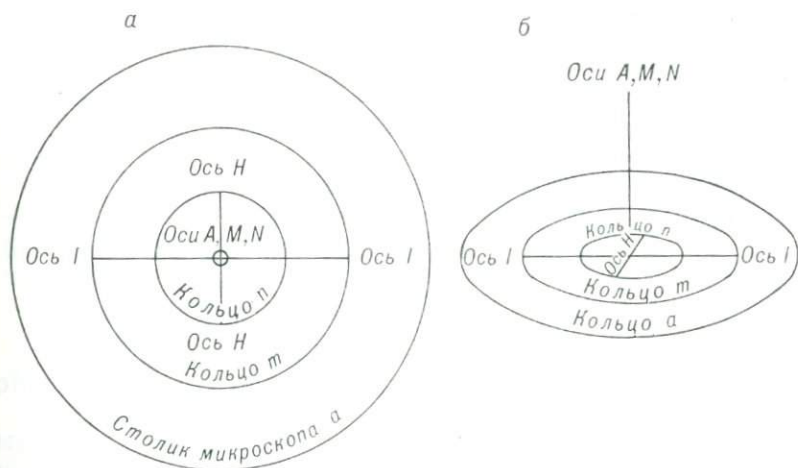


Рис. 1. Схема расположения осей и колец четырехосного федоровского столика.

a — вид сверху; *б* — вид сбоку.

A — оптическая ось микроскопа (совпадающая с осью вращения столика микроскопа); *M*, *N*, *H* и *I* — оси федоровского столика.

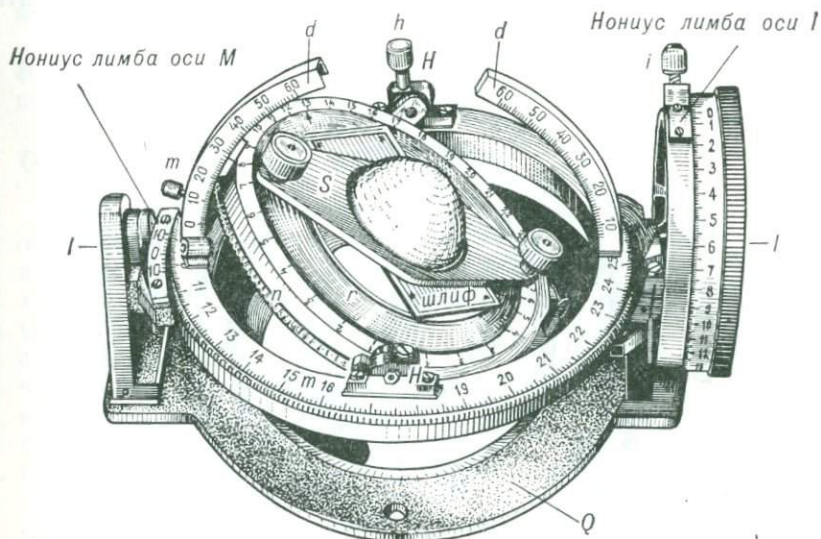


Рис. 2. Схема устройства четырехосного федоровского столика.

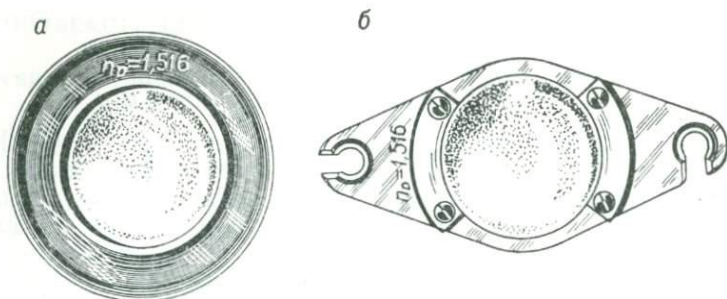


Рис. 3. Стекло́нные сегменты (а — нижний, б — верхний).

производятся при помощи винтов, которыми привинчивается верхний стеклянный сегмент S.

К столику обычно прикладываются три пары стеклянных сегментов с показателями преломления 1,516; 1,548; 1,647, соответствующими показателям преломления главнейших породообразующих минералов — полевых шпатов и фемических минералов. Различают нижний и верхний сегменты. Первый вставлен в круглую металлическую обойму, диаметр которой в последних моделях равен диаметру отверстия кольца r ; второй имеет форму полусферы с отверстиями для привинчивания к столику (рис. 3). При работе следует выбирать сегменты

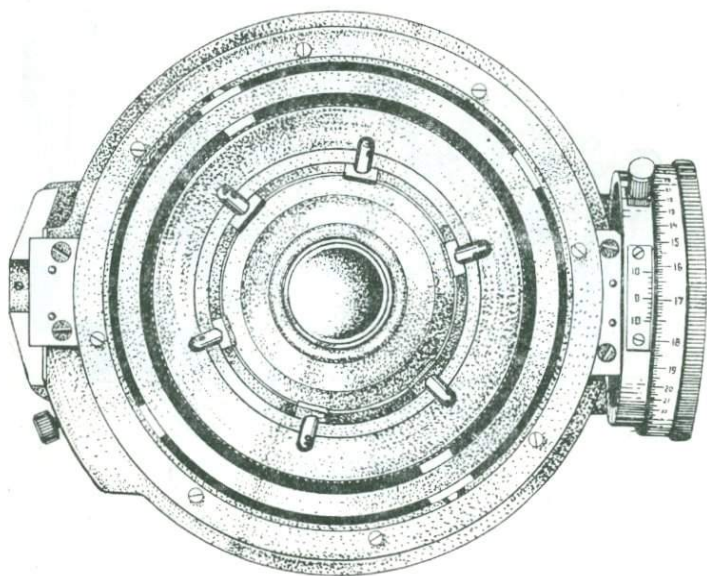


Рис. 4. Штурвальное устройство для юстировки столика.

с показателем преломления, наиболее близким к показателю преломления изучаемого минерала (см. § 4).

При основном положении столика шлиф должен находиться в той же плоскости, в которой расположены оси федоровского столика H и J . Для придания шлифу нужного для этого условия положения его помещают на вставленное в кольцо n металлическое кольцо r . Этот круг имеет винтовую нарезку, благодаря которой можно опускать или приподнимать его плоскость в случае увеличенной или уменьшенной толщины предметного стекла. Вращение кольца r производится штурвальным приспособлением, расположенным под нижней поверхностью кольца n (рис. 4).

Монтировка шлифа

Перед тем как приступить к работе на федоровском столике, шлиф необходимо приклеить глицерином к нижнему и верхнему стеклянным сегментам. Для этого выбирают нужные сегменты и нижний вставляют в отверстие кольца r . На плоскую поверхность последнего при помощи стеклянной палочки или пипетки опускают каплю глицерина, на которую осторожно кладут шлиф. Шлиф приклеивается предметным стеклом, т. е. покровное стекло обращено вверх. На покровное стекло шлифа глицерином же приклеивают верхнюю стеклянную полусферу, которая дополнительно закрепляется винтами на кольце r .

При приклеивании шлифа надо следить, чтобы глицерин не содержал пузырьков воздуха, которые в дальнейшем будут мешать работе, вызывая явление полного внутреннего отражения.

Объективы. Юстировка микроскопа

В комплектах современных федоровских столиков имеются обычно два объектива — $3,7\times$ и $5,5\times$, с которыми преимущественно и производится работа на столике. На столиках фирмы «Лейтц» можно пользоваться объективами 1 и 3. Отечественный комплект состоит из пяти объективов: $5\times$, $10\times$, $16\times$, $22\times$, $40\times$. Эти специальные длиннофокусные объективы дают возможность изучать коноскопические фигуры на федоровском столике, а также исследовать мелкозернистые породы. Большим удобством этих объективов является возможность их диафрагмирования, что позволяет устранять дефокусировку при наклонах шлифа.

Перед привинчиванием федоровского столика и приведением его в основное положение необходимо произвести проверку и налаживание самого микроскопа и его юстировку. Ниже перечисляются главные операции, необходимые для этого.

1. Центрировка микроскопа. Производится обычным способом на плоском столике для того объектива, с которым будут проводить намеченные исследования. Замечают какую-либо

особенно приметную точку на пересечении окулярных нитей и поворачивают столик примерно на 180° вокруг оси A . Если выбранный объект смещается с точки пересечения окулярных нитей, то движением центрировочных винтов объектива передвигают его на половину того максимального расстояния, на которое он отошел от этой точки, т. е. совмещают с центром описываемой им окружности. Эта операция повторяется до полного устранения децентрировки.

2. Установка николей в скрещенное положение.

3. Проверка окулярных нитей на четкость.

4. Проверка взаимной перпендикулярности окулярных нитей.

5. Проверка параллельности окулярных нитей сечениями анализатор-поляризатор. Вертикальная нить должна располагаться параллельно плоскости симметрии микроскопа.

6. Определение направления колебаний, пропускаемых поляризатором.

Перечисленные проверки и методы юстировки микроскопа здесь не рассматриваются. Подробные сведения о них можно найти в учебниках В. Б. Татарского [37, с. 48—55], В. Н. Лодочникова [24, с. 122—130] и др.

После проведения указанной юстировки микроскопа вынимают внутренний диск столика микроскопа и при помощи специальных винтов привинчивают федоровский столик к столику микроскопа.

§ 3. УСТАНОВКА ФЕДОРОВСКОГО СТОЛИКА В ОСНОВНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Перед началом работы универсальный столик должен быть обязательно установлен в основное положение. Основным положением федоровского столика называется такое, при котором:

1) оси M и N универсального столика совпадают с оптической осью микроскопа A , являющейся осью вращения предметного столика;

2) ось I универсального столика перпендикулярна к плоскости симметрии микроскопа;

3) ось H перпендикулярна к оси I ;

4) шлиф находится в той же плоскости (перпендикулярной к осям M , N и A), в которой расположены оси H и I (юстировка шлифа).

Последовательность работы при установке федоровского столика в основное положение

Для приведения федоровского столика в основное положение производят следующие операции.

1. Центрировка федоровского столика. Она необходима для того, чтобы оси столика M и N совпали с оптической осью

микроскопа *A*. Центрировку следует производить только при вертикальном положении тубуса микроскопа, соблюдая при этом следующую последовательность:

а) в шлифе замечают приметную точку (рудное зернышко, пылинку, пересечение трещинок спайности и т. п.), которая расположена в центре окулярных нитей или приводится туда путем поворота столика вокруг оси *N*. Ранее рекомендовалось для нахождения такой точки передвигать шлиф руками. Однако без крайней необходимости этого делать не стоит, так как при ослаблении винтов верхней сферы в прослой глицерина могут попасть пузырьки воздуха, а если передвигать шлиф, не ослабляя винтов, то можно поцарапать сегменты;

б) поворачивают федоровский столик вокруг оси *N* на 180° ; при этом выбранная точка оказывается на конце диаметра той окружности, которую она описывает при полном повороте вокруг оси *N*;

в) ослабляют винты, привинчивающие федоровский столик, и, двигая его руками по предметному столику микроскопа, приводят выбранную точку в центр описываемой ею окружности. Затем плотно закрепляют винты.

Обычно с первого раза достичь полной центрировки не удастся и указанную операцию производят несколько раз.

2. Приведение оси *I* в положение, перпендикулярное к плоскости симметрии микроскопа. Для этого поступают следующим образом:

а) вынимают объектив и вводят в тубус микроскопа линзу Бертрана;

б) поворачивают столик вокруг оси *I* до вертикального положения кольца *m*, подняв тубус микроскопа до такого положения, при котором ребристый край кольца *m* будет ясно виден в поле зрения (рис. 5);

в) поворотом предметного столика микроскопа точно совмещают ребристый край кольца *m* с горизонтальной нитью окуляра, после чего закрепляют винтом столик микроскопа. Записывают отсчет по нониусу столика микроскопа, который и будет соответствовать основному положению оси *I*. Отсчет на столике микроскопа при этом соответствует 90° на правом нониусе и 0° на левом или незначительно отличается от этих цифр (на $1-3^\circ$). После проверки столик микроскопа должен быть закреплен.

Установку оси *I* в основное положение можно производить и другим способом. Для этого фокусируют объектив на поверхность верхнего сегмента и замечают на ней пылинки. Наклоняют столик вокруг оси *I* в обе стороны и наблюдают, как передвигаются при этом пылинки по отношению к вертикальной нити окуляра, проектирующей плоскость симметрии микроскопа. Если пылинки двигаются косо по отношению к вертикальной нити окуляра, то поворотом столика вокруг оси *A* и провер-

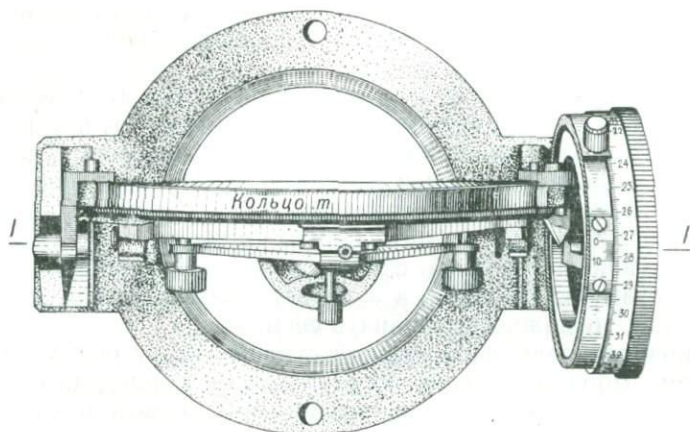


Рис. 5. Положение кольца t при проверке установки оси I в основное положение.

кой наклонами вокруг оси I добиваются такого положения, при котором пылинки будут перемещаться параллельно вертикальной нити. Отсчеты на столике микроскопа при этом и соответствуют основному положению оси I .

3. Приведение оси H в положение, перпендикулярное к оси I (установка оси H в основное положение). Для этого сначала поворотом вокруг оси M ставят ось H приблизительно перпендикулярно к оси I (последняя уже приведена в основное положение). Затем необходимо произвести следующие операции:

а) поворотом вокруг оси H поставить кольцо n в вертикальное положение;

б) вынуть объектив, ввести линзу Бертрана и отфокусировать на ясную видимость ребристый край кольца n ;

в) вращением вокруг оси M поставить ребристый край кольца в положение, параллельное вертикальной нити окуляра, закрепить кольцо t и записать отсчет по нониусу лимба оси M . Этот отсчет обычно соответствует 0° или незначительно отличается от него. При основном положении оси H дужки, служащие для отсчетов наклона по этой оси, должны быть обращены к наблюдателю.

Удобно производить установку оси H в положение, перпендикулярное к оси I , по пылинкам. Для этого фокусируют объектив на пылинки верхнего сегмента и, наклоняя шлиф в обе стороны по оси H , наблюдают за передвижением пылинок. Если они перемещаются под углом к горизонтальной нити, то поворотом вокруг оси M (с проверкой наклонами вокруг оси H) добиваются такого положения, при котором пылинки будут передвигаться параллельно горизонтальной нити. Данное положение фиксируется отсчетом по нониусу лимба оси M .

После приведения оси H в основное положение отсчет, соответствующий ему, записывают и кольцо m закрепляют.

Указанные проверки по установке осей I и H при работе с одним и тем же федоровским столиком и микроскопом можно не повторять, а просто перед работой закреплять столик на соответствующих отсчетах.

4. Юстировка шлифа на федоровском столике и определение места нуля лимба оси I . Шлиф должен находиться в той же плоскости, в которой расположены оси H и I . Толщина предметного стекла (примерно 1 мм) может быть разной в различных шлифах и вызывать эксцентриситет, который характеризуется смещением зерна с центра нитей при наклонах вокруг осей I или H . Эксцентриситет возникает оттого, что препарат расположен не в центральной плоскости, а выше при увеличенной толщине препарата или ниже этой плоскости при уменьшенной его толщине. Устраняется эксцентриситет с помощью находящейся под внутренней частью кольца n специальной винтовой нарезки, которой регулируется высота препарата и придается ему нужное положение. Так, если толщина препарата больше 1 мм, то внутреннее кольцо ввинчивается вниз; при малой толщине препарата внутреннее кольцо вывинчивается кверху. Рекомендуется следующая последовательность работы при юстировке шлифа на федоровском столике:

а) привести столик в основные положения и закрепить винты, зажимающие оси A , M и H ;

б) заметить на пересечении окулярных нитей какое-либо приметное зерно или точку. Наклонить столик вокруг оси I и посмотреть, смещается ли при этом выбранное зерно с центра нитей. Если не смещается, то, закрепив ось I в основное положение, можно приступить к работе — столик отъюстирован;

в) если при повороте вокруг оси I выбранное зерно смещается с центра нитей, тогда, предварительно слегка ослабив винты, которыми прикреплен верхний стеклянный сегмент S , опускают или поднимают внутреннее металлическое кольцо r с прикрепленным шлифом, ввинчивая или вывинчивая его; для удобства к кольцу с нижней его поверхности приделаны специальные ручки типа штурвального колесика (см. рис. 4). Операция производится до полного устранения эксцентриситета.

Здесь следует иметь в виду, что если зерно находится выше пересечения осей H и I , то оно при наклонах вокруг указанных осей будет смещаться в сторону, обратную наклону; если зерно расположено ниже, то в микроскопе мы увидим смещение зерна в сторону наклона (так как микроскоп дает обратное изображение).

В качестве удобного мнемонического правила можно рекомендовать следующее: а) если при наклонах вокруг оси I зерно описывает выпуклую поверхность (как бы «горку»), то, поставив круг n вертикально, ручки штурвала поворачивают к себе

(кольцо r опускают); б) если зерно описывает вогнутую поверхность («ям»), то ручки штурвала поворачивают от себя (кольцо r вывинчивают вверх).

Положению, когда ось I находится в плоскости шлифа, должен соответствовать отсчет по лимбу оси I , равный 0° . Однако нередко это положение не соответствует точно 0° и должно быть определено. Для этого наклоняют столик вокруг оси I к себе до тех пор, пока центр конца оси H не совпадает с пересечением окулярных нитей (объектив при этом надо вынуть и ввести линзу Бертрана); замечают соответствующий этому положению отсчет по лимбу оси I , затем наклоняют столик в обратную сторону (от себя) до такого положения, чтобы другой конец оси H совпал с центром окулярных нитей, и вновь замечают отсчет. Пусть, например, первый отсчет соответствовал 92° , второй — 272° . Место нуля может быть определено как разница отсчетов: $92^\circ - 90^\circ = 2^\circ$ или $272^\circ - 270^\circ = 2^\circ$.

Отсюда ясно, что надо брать соответствующие поправки на наклоны вокруг оси I . Для данного примера следует вычитать 2° из полученных значений по барабану оси I при значениях отсчетов от 0 до 90° и прибавлять 2° при значениях отсчетов от 0 (360) до 270° . Если бы место нуля соответствовало, например, 357° , то 3° следовало бы прибавлять к значению каждого измеренного угла при наклонах от 0 до 90° и отнимать при наклонах от 0 (360) до 270° .

§ 4. СТЕКЛЯННЫЕ СЕГМЕНТЫ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТИННОГО УГЛА НАКЛОНА

Назначение стеклянных сегментов

Стеклянные сегменты вместе со шлифом и прослойками глицерина должны составлять правильную сферу, в центре которой пересекаются оси столика и в экваториальной плоскости которой располагается шлиф. Однородность такой сферы достигается подбором стеклянных сегментов с показателем преломления n_c , наиболее близким к показателю преломления изучаемого минерала n_m . Для исследования существенно калиевых полевых шпатов следует брать сегменты с $n_c = 1,516$; для исследования плагиоклазов употребляют сегменты с $n_c = 1,548$; при определении пироксенов и амфиболов удобнее всего пользоваться сегментами с $n_c = 1,647$. Лучи, проходящие через такую сфероидальную систему, не будут испытывать преломления, так как касательная к шаровой поверхности в любой ее точке перпендикулярна к направлению луча. При наличии однородной сферы можно производить вращение шлифа вокруг любой оси столика, не искажая при этом хода лучей в кристалле.

На рис. 6 схематично показан ход луча в рассмотренной системе при одинаковых показателях преломления стеклянных

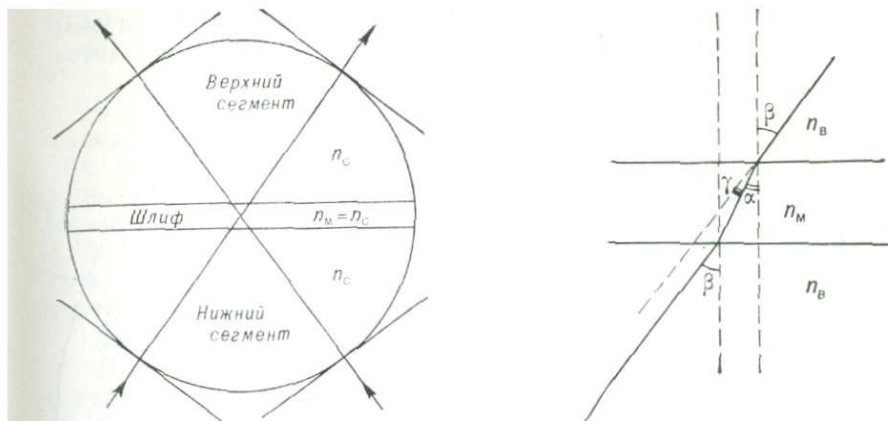


Рис. 6. Ход лучей в правильной однородной сфере.

n_m и n_c — показатель преломления соответственно минерала и сегментов.

Рис. 7. Ход лучей без сегментов.

α — истинный угол между лучом и нормалью к кристаллической пластинке; β — видимый угол; γ — угол, на который видимый угол больше истинного; n_m — показатель преломления минерала; n_v — показатель преломления воздуха.

534
сегментов и кристаллического вещества и нормальной толщине препарата. Если бы изучение минерала производилось без сегментов, то видимый угол всегда резко отличался бы от истинного угла в кристаллической пластинке, не испытывая отклонения лишь в том случае, когда луч в воздухе распространяется перпендикулярно к шлифу. На рис. 7 схематично показан ход луча в кристаллическом веществе и воздухе без сегментов.

При увеличенной толщине препарата сфероидальность системы будет нарушена и луч света, выйдя из верхнего стеклянного сегмента, отклонится от своего первоначального направления. Погрешность, возникающая в такой неоднородной сфере, прямо пропорциональна углу наклона и превышению толщины препарата и обратно пропорциональна радиусу сегментов; чем больше радиус сегментов, тем меньше эта погрешность. Погрешность в современных федоровских столиках легко устраняется юстировкой шлифа. Данные о работе с неоднородной сферой можно найти в руководстве А. К. Подногина [29, с. 14].

Вычисление истинного угла наклона

В правильной, но неоднородной сфере, т. е. при различающихся показателях преломления изучаемого кристаллического зерна и стеклянных сегментов, видимый угол будет отличаться от угла в кристаллической пластинке. Если показатель $n_m > n_c$, то видимый угол будет больше истинного (под последним в дальнейшем будем понимать угол в изучаемом кристалле),

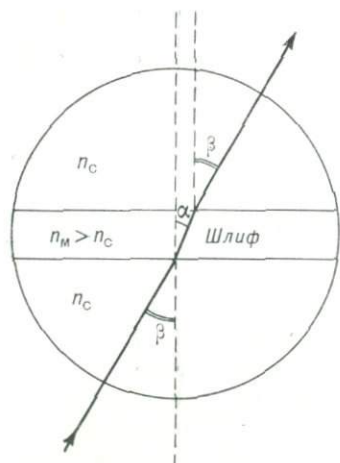


Рис. 8. Ход лучей в правильной, но неоднородной сфере.

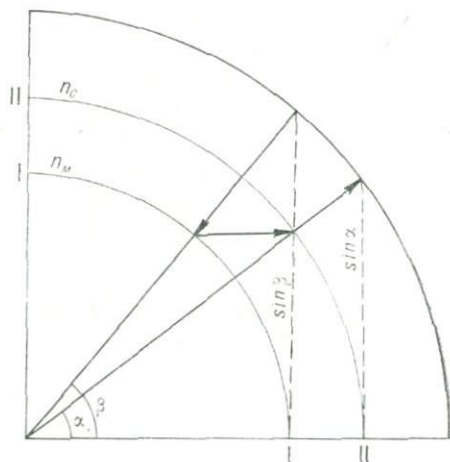


Рис. 9. Схема вычисления истинного угла α по видимому углу β .

Окружности I-I и II-II проведены пропорционально показателям преломления минерала n_m и сегментов n_c . Стрелки указывают направление движения при вычислении.

если $n_m < n_c$, то видимый угол будет меньше истинного. На рис. 8 изображен ход луча в правильной, но неоднородной сфере при $n_m > n_c$.

Следовательно, при различии показателей преломления минерала и сфер видимый угол не соответствует истинному и надо вносить соответствующие поправки в углы наклона вокруг осей H и I , например, при измерении выходов оптических осей $2v$, плоскостей спайности, плоскостей срастания двойников и др. При измерении $2v$ поправка вводится отдельно в каждое значение угла наклона вокруг оси I и $2v$ получают сложением исправленных углов (см. § 10). При нанесении главных сечений оптической индикатрисы поправки не вводятся [24, с. 232].

Внести поправку* — это значит вычислить истинный угол α в препарате по углу β , измеренному на столике (рис. 9). Истинный угол вычисляют, используя зависимость между показателями преломления сред и направлением в них лучей: $n_m/n_c = \sin \beta / \sin \alpha$, откуда $\sin \alpha = (n_c/n_m) \sin \beta$.

Пример Угол β , измеренный по нониусу лимба оси $I = 50^\circ$ (соответственно, например, выходу оптической оси), $n_m = 1,89$, $n_c = 1,516$, $n_c/n_m = 0,8$. $\sin \alpha = 0,8 \sin 50^\circ = 0,8 \cdot 0,766 = 0,6128$; откуда $\alpha = 37^\circ 48'$.

Проще можно определить угол α графически, пользуясь диаграммой Федорова.

* Поправки надо вносить в тех случаях, когда разница между показателями преломления исследуемого минерала и сегментов составляет более 0,04—0,05, так как при меньшей разнице введение поправок существенно не отражается на результатах измерений.

Диаграмма Федорова для определения истинного угла наклона

Е. С. Федоровым в 1896 г. была составлена диаграмма для определения истинных углов наклона вокруг осей I и H (рис. 10). Она представляет собой квадрант, разделенный внутренними концентрическими окружностями, сплошными и штриховыми, проведенными радиусами 1,00; 1,02; 1,05; 1,07; 1,10; 1,12; 1,15; 1,17; 1,20 и далее до 2,00 через значения, увеличивающиеся на 0,05. Эти радиусы соответствуют отношениям показателей преломления минерала и сегментов.

Далее диаграмма разделена радиусами, проведенными через 1° . Для практической работы используется не весь квадрант, а сектор в диапазоне от $5-10$ до $55-60^\circ$; наклоны вокруг осей H и I под углом больше $60-65^\circ$ не могут производиться, так как шлиф становится невидимым. При углах, меньших 5° , видимый угол практически не отличается от истинного. Для удобства пользования квадрант разделен также горизонтальными линиями, проведенными через каждые 5° внешней окружности.

Диаграммой Федорова пользоваться удобнее всего способом, рассмотренным ниже на конкретных примерах, изображенных на рис. 10.

Пример 1. Угол $\beta=55^\circ$ (угол наклона вокруг оси I , соответствующий выходу оптической оси), $n_m=1,65^*$, $n_c=1,50$. Определение истинного угла по диаграмме Федорова производится следующим образом.

1. От 55° на внешней окружности передвигаются по радиусу до пересечения с окружностью 1,65 (соответствующей показателю преломления минерала) и получают точку 1.

2. От точки 1 передвигаются вправо по горизонтальной линии до пересечения с окружностью 1,50 (соответствующей показателю преломления сегментов) и получают точку 2.

3. От точки 2 передвигаются вновь по радиусу до пересечения с внешней окружностью диаграммы, на которой и получают значение истинного угла α . В данном примере он равен 48° ; отсчеты берут с точностью до $30'$.

Пример 2. При измерении $2v$ в одном выходе оптической оси соответствует отсчет по лимбу оси I 40° , другому — 340° (т. е. 20°), $n_m=1,70$, $n_c=1,55$. В данном примере истинные углы определяют по обоим видимым углам — 40 и 20° — и равны соответственно 36 и 18° ; $2v=36+18=54^\circ$.

Оба примера взяты для случаев, когда показатель преломления минерала больше показателя преломления сегментов. Эти соотношения всегда выгоднее, так как при них видимый угол больше истинного и можно производить большие наклоны вокруг осей I и H . Если соотношения будут обратными, то видимый угол, полученный по лимбам указанных осей, надо увеличить; для этого производят рассмотренные выше операции на диаграмме Федорова в направлении, противоположном указанному на рис. 10.

* Показатель преломления изучаемого минерала берется из таблиц с точностью до второго знака; если изучаемый минерал неизвестен, то его показатель преломления определяется иммерсионным методом.

Глава II

ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ФЕДОРОВСКИМ МЕТОДОМ

§ 5. ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ НА ЧЕТЫРЕХОСНОМ ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

Кристаллографические и кристаллооптические элементы в кристалле благодаря вращению вокруг осей столика можно совмещать с определенными направлениями прибора — плоскостью симметрии микроскопа, осями и плоскостями столика. Главнейшими кристаллографическими элементами, нужными для диагностики минералов, являются плоскости спайности и отдельности, грани и ребра кристалла, кристаллографические оси, плоскости сростания, двойниковые оси и др. К кристаллооптическим направлениям относятся плоскости симметрии оптической индикатрисы одноосных и двуосных кристаллов, оси оптической индикатрисы Ng , Nm , Np и оптические оси.

Федоровский метод дает возможность определять взаимоотношения между кристаллооптическими и кристаллографическими направлениями и особенности оптической индикатрисы: осность, угол оптических осей, оптический знак и др. Эти особенности кристаллов определяют на универсальном столике обычно графическим путем при помощи стереоскопической проекции.

В основу федоровского метода положен теодолитный принцип, заключающийся в том, что любая (в пределах возможных углов наклона) плоскость в кристалле вращением вокруг двух взаимно перпендикулярных осей N и H может быть совмещена с так называемой установочной плоскостью, которой является обычно плоскость симметрии микроскопа. Линейные направления в кристалле (оси оптической индикатрисы, двойниковые оси, кристаллографические оси и др.) совмещаются с осями I или A .

После совмещения плоскостей в кристалле с плоскостью симметрии микроскопа, а линий с осями столика определяют (по лимбам соответствующих осей) их координаты; по координатам элементы кристалла изображают в стереографической проекции на сетке Вульфа. На этой стереоскопической проекции обычно графически определяют главнейшие кристаллооптические свойства минералов, например угол Ng : $[001]$ для амфиболов и пироксенов, ориентировки осей оптической индикатрисы полевых шпатов относительно спайности, элементы двойникования, плоскости ограничения и др. Лишь некоторые кристаллооптические свойства минералов могут быть определены без построения стереографических проекций; к ним можно отнести определение осности, оптического знака одноосных минералов,

определение угла оптических осей в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе. Таким образом, работа сводится к описанию и совмещению кристаллографических и кристаллооптических направлений с плоскостями или осями столика. Для определения кристаллооптических констант необходимо эти направления изобразить в виде стереографических проекций на сетке Вульфа.

§ 6. ПОСТРОЕНИЕ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ. СЕТКА ВУЛЬФА

Для графического изображения кристаллографических и кристаллооптических элементов кристаллического вещества при исследованиях на федоровском столике пользуются стереографическими проекциями. Они наиболее удобны, так как на них не искажаются взаимоотношения между кристаллографическими направлениями (например, углы между гранями) и между кристаллографическими и кристаллооптическими элементами. Принципы построения стереографических проекций приводятся в учебниках О. М. Аншелеса [1952 г., с. 61—64], Г. М. Попова, И. И. Шафрановского [1952 г., с. 61—64], Н. К. Разумовского [1927 г.].

Плоскости на стереографической проекции изображаются дугами большого круга. Вертикальные плоскости проектируются в виде прямых линий, проходящих через центр проекции, горизонтальные плоскости, совпадая с полюсом чертежа, проектируются основным кругом проекции. Линии изображаются точками. Грани можно проектировать или как плоскости, или как перпендикуляры к плоскостям (полюсы граней).

Для построения стереографических проекций при работе на федоровском столике пользуются сеткой Вульфа. Последняя получила название по имени кристаллографа профессора Московского университета Ю. В. Вульфа, который впервые применил ее для проектирования кристаллов. Эта сетка является стереографической проекцией градусной сети. Ею пользуются как транспарантом, накладывая на нее кальку или матовое стекло, на которых и строят стереографическую проекцию исследуемого минерала.

Сетка Вульфа представляет собой круг радиусом 10 см, на котором через 2° нанесены широтные и меридиональные дуги. По принципу построения она подобна географической карте полушарий; широтные дуги аналогичны географическим параллелям, меридиональные — меридианам (рис. 11). Разница состоит в том, что 0° (360°) помещен внизу сетки, соответственно расположению 0° на круге n универсального столика. Для удобства работы сетка Вульфа наклеивается на фанеру или толстый картон; в центре сетки помещают металлический шпенек, который служит центром вращения диаграммы. На матовом

стекле или кальке, которые накладывают на сетку при построении диаграмм, отмечают место нуля в виде черточки или стрелки, центр сетки, а также обводят внешний круг проекции. При построении диаграмм надо следить, чтобы центр сетки и внешний круг проекции не смещались с исходного положения. При работе на кальке это смещение может быть обусловлено тем, что металлический шпенек, укрепленный в центре сетки, прорывает ее. Для устранения этого рекомендуется под кальку, там где она накаливается на шпенек, подклеивать небольшой кусочек обычной писчей бумаги или ватмана.

При построении стереографических проекций следует помнить, что расположение делений на сетке Вульфа соответствует расположению делений на федоровском столике. Основной круг проекции сетки Вульфа соответствует кольцу n столика и плоскости шлифа, перпендикулярной к оси A . Оптическая ось микроскопа A и ось N совпадают с центром сетки Вульфа. Градусные деления на кольце n федоровского столика и на основном круге сетки Вульфа соответствуют друг другу. На кольце столика имеется черточка, по расположению которой измеряются углы поворота вокруг оси N . Эта черточка (или стрелка) соответствует значку, отмечающему место нуля на кальке или матовом стекле, где строится стереографическая проекция. Отсчеты по n откладываются на сетке по основному кругу проекции.

Ось H при основном положении столика совпадает с вертикальным диаметром сетки, а отсчеты по H откладываются от центра сетки либо вправо, либо влево. При этом наклоны вокруг оси H , отсчитанные по правой дужке, наносятся от центра сетки вправо. Так делается потому, что изучаемая плоскость при основном положении столика была наклонена влево и для того, чтобы совместить ее с плоскостью симметрии микроскопа, необходимо было поднять правый край столика. Аналогично отсчеты, взятые по левой дужке, откладываются влево. Проекция плоскости на стереографической проекции показывает ее положение в пространстве при основном положении столика.

При записи координат для наклонов вокруг оси H необходимо обозначить, по какой дужке был взят отсчет. Это удобнее всего указывать стрелкой: например, запись $H \leftarrow 20^\circ$ показывает, что отсчет взят по левой дужке.

В некоторых пособиях вместо стрелки после указания градусов пишется «пр.» (право) и «л.» (лево) или r и l (соответственно немецким словам rechts и links).

При основном положении столика ось I совпадает с горизонтальным диаметром сетки, а отсчеты по ней откладываются по вертикальному диаметру сетки: от 0 до 90° от центра сетки вниз, к «южному полюсу»; от 0 (360) до 270° от центра сетки вверх, к «северному полюсу».

При практической работе наклоны вокруг осей N и I обычно не превышают $55-60^\circ$, так как при больших углах наклона шлиф становится невидимым.

На сетке Вульфа (см. рис. 11) дана схема нанесения координат (отсчетов по осям столика). Любая плоскость или линия в кристалле по соответствующим координатам может быть изображена при помощи сетки Вульфа в виде стереографической проекции.

Чтобы изобразить какую-либо плоскость кристалла в виде стереографической проекции, ее надо поворотами вокруг осей N и H совместить с плоскостью симметрии микроскопа. Полученные координаты, читаемые по лимбам этих осей, будут характеризовать положение данной плоскости в кристалле, которое она имела при основном положении столика. По этим координатам и строится стереографическая проекция этой плоскости.

Линейные направления в кристалле совмещают или с оптической осью микроскопа A или с осью столика I путем совмещения перпендикулярных к ним плоскостей с установочной плоскостью микроскопа. В этом случае проекцию искомого линейного направления находят как полюс проекции данной плоскости. Для того чтобы определить полюс, надо от совпадающей с меридианом дуги большого круга, проектирующей вспомогательную плоскость, по горизонтальному диаметру отложить 90° . Полученная точка и будет полюсом данной плоскости. Этот полюс будет проектировать искомое линейное направление, которое совместится при данном положении с осью I (полюс изображается точкой или крестиком, обведенными кружком). Указанным способом проектируются оси оптической индикатрисы, полюсы спайности и ряд других линейных направлений в кристаллах. Ниже в качестве примера приведено построение стереографической проекции плоскостей спайности, а также определение графическим путем угла между ними.

*Последовательность работы при определении угла спайности**

1. Находят разрез изучаемого минерала с хорошо выраженной пересекающейся спайностью и приводят его к центру нитей.
2. Совмещают первую систему трещин спайности с плоскостью симметрии микроскопа. Для этого вращением вокруг оси N трещинки первой системы спайности ставят параллельно вертикальной нити микроскопа. Затем наклоном вокруг оси H добиваются максимальной тонкости и четкости трещинок спай-

* Перед началом работы столик должен быть приведен в основное положение. Отсчет 0° (360°) на сетке Вульфа должен быть расположен внизу у южного полюса, что соответствует 0° на кольце n столика.

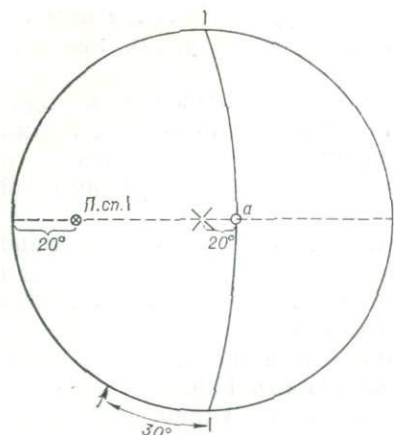


Рис. 12. Стереографическая проекция первой системы спайности $I-I$ и ее полюс $П.с. I$.

Координаты спайности: $I-I$ $N-30^\circ$, $H-20^\circ$.

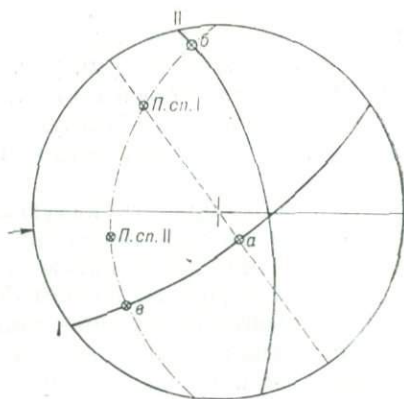


Рис. 13. Стереографическая проекция плоскостей пересекающейся спайности.

Координаты спайности: $I-I$ $N-30^\circ$, $H-20^\circ$; $II-II$ $N-96^\circ$, $H-30^\circ$.

ности; при опускании и поднятии тубуса микроскопа линии спайности не должны смещаться.

3. Записываются полученные координаты, которые читают по лимбам осей N и H . Например, первая система спайности имеет координаты $N-30^\circ$, $H-20^\circ$.

4. По полученным координатам строят при помощи сетки Вульфа стереографическую проекцию первой системы спайности. Для этого место нуля диаграммы, отмеченное на кальке или матовом стекле, совмещают с отсчетом 30° на внешнем круге сетки; после этого (не смещая стрелки с 30°) по горизонтальному диаметру сетки вправо откладывают 20° и через полученную точку a (рис. 12) прочерчивают меридиан $I-I$, который и будет стереографической проекцией плоскости первой спайности.

5. К полученной спайности находят полюс, т. е. проектируют на стереографическую проекцию перпендикуляр к плоскости спайности. Для этого от дуги большого круга, проектирующей спайность, по экватору (т. е. от точки a на рис. 12) откладывают 90° и получают точку $П.с. I$, которая и будет являться полюсом первой системы спайности*.

6. Аналогичным образом устанавливают и проектируют вторую систему спайности (на рис. 13 обозначенной $II-II$) и получают полюс $П.с. II$.

* Полюс спайности можно обозначить и как \perp сп. Ниже будут употребляться оба обозначения, так как и то и другое часто встречается в литературе.

7. Определяют угол между плоскостями спайности. Для этого оба полюса приводят вращением диаграммы вокруг центра сетки на одну дугу большого круга. Точка пересечения обеих плоскостей спайности при этом будет находиться на горизонтальном диаметре сетки Вульфа и отстоять от дуги большого круга на 90° (см. рис. 13). Градусное расстояние между полюсами спайности соответствует острому углу спайности; в приведенном примере он равен 60° . Дуга *бв* соответствует тупому углу между плоскостями спайности, равному 120° . Этот угол является дополнением до 180° ($60+120=180^\circ$). Точки *б* и *в* расположены на пересечении плоскостей спайности *I—I* и *II—II* с дугой большого круга, соединяющей их полюсы.

Глава III

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ ОДНООСНЫХ И ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ

§ 7. УСТАНОВКА ПЛОСКОСТЕЙ СИММЕТРИИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ И ПОСТРОЕНИЕ ИХ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ

Федоровский метод дает возможность определять анизотропию кристаллов, осьность, оптический знак, угол оптических осей, двупреломление и ряд других констант. При изучении кристаллического вещества необходимо также установить соотношения между названными выше кристаллооптическими константами и кристаллографическими элементами (например, угол между Ng : [001] в пироксенах и амфиболах, ориентировки Ng , Nm , Np по отношению к двойниковой оси в полевых шпатах и т. п.).

Для решения всех этих задач прежде всего необходимо определить расположение главных сечений оптической индикатрисы кристалла. Эти сечения могут быть совмещены с установочной плоскостью — плоскостью симметрии микроскопа — поворотом вокруг осей N и H , хотя в некоторых случаях главные сечения могут быть приведены в совмещение с установочной плоскостью поворотом лишь только вокруг оси N (см. § 9 и 12). Главные сечения оптической индикатрисы нельзя видеть непосредственно, как, например, плоскости ограничения кристалла, плоскости спайности и другие кристаллографические элементы кристалла. О моменте совмещения этих сечений с плоскостью симметрии микроскопа судят по наступлению темноты, которая, будучи получена вращением вокруг осей N и H , не исчезает при наклоне вокруг оси I . Это связано с тем, что при совмещении одного из главных

ЧАСТЬ ВТОРАЯ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИХ
КОНСТАНТ.
ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОРОДОБРАЗУЮЩИХ
МИНЕРАЛОВ
НА ЧЕТЫРЕХОСНОМ
И ПЯТИОСНОМ
СТОЛИКАХ

сечений оптической индикатрисы с плоскостью симметрии микроскопа ось оптической индикатрисы, перпендикулярная к главному сечению, совмещается с осью I ; при повороте вокруг последней главное сечение остается параллельным плоскости симметрии микроскопа и кристалл не просветляется. В дальнейшем постоянно будет употребляться выражение «установить плоскость»; это означает, что ее надо совместить с плоскостью симметрии микроскопа.

Техника построения стереографических проекций аналогична описанной выше при построении проекции плоскостей спайности. Плоскости главных сечений наносятся на кальку или на матовое стекло по координатам осей N и H и проектируются в виде дуг большого круга; оси оптической индикатрисы получаются как полюсы установленных сечений. На стереографической проекции дуги больших кругов (меридианы), проектирующие главные сечения оптической индикатрисы, должны проходить через точки, проектирующие оси оптической индикатрисы. Эта особенность стереографической проекции является критерием правильности работы. Если этого не произошло, то следует проверить правильность установки главных сечений, особенно тех из них, при установке которых потребовались большие наклоны вокруг оси H . Третье главное сечение обычно лежит близко к плоскости шлифа и его не удается наблюдать непосредственно; оно строится графически — проводится через полученные ранее оси оптической индикатрисы, которые для этого приводятся на один меридиан (дугу большого круга). Более подробно об исследовании оптической индикатрисы и ее ориентировке по отношению к кристаллографическим элементам см. § 9—11.

§ 8. ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ КРИСТАЛЛОВ

При микроскопическом исследовании кристаллов прежде всего необходимо установить, являются ли они оптически анизотропными или изотропными. Оптически анизотропные кристаллы в скрещенных николях обладают интерференционной окраской и имеют четырехкратное погасание при полном повороте столика микроскопа. Если же исследуемое зерно не просветляется при повороте столика, то оно или является оптически изотропным кристаллом, или представляет собой особый срез (круговое сечение) анизотропного кристалла. В этом случае отличить анизотропный кристалл от изотропного можно на плоском столике, применяя коноскопический метод (за исключением кристаллов с очень малой силой двупреломления), или при помощи федоровского столика.

При исследовании на федоровском столике задача сводится к тому, чтобы оптическую ось в случае анизотропного кристалла вывести из совпадения с осью A . Для общего случая анизотропного кристалла достаточно при этом исследуемое зерно накло-

нять в обе стороны вокруг оси I . Зерно при этом будет просветляться, так как его оптическая ось не будет совпадать с осью A . В частном случае анизотропных минералов, когда одно из главных сечений оптической индикатрисы совмещено с плоскостью симметрии микроскопа, темнота будет сохраняться и при наклонах вокруг оси I . Для установления анизотропности кристалла в этом случае достаточно наклонить столик вокруг оси I и (закрепив винт) вновь сделать проверку вращением по A . В случае анизотропного минерала в противоположность изотропному темнота будет нарушаться, так как наклоном вокруг оси I оптическая ось будет выведена из положения, параллельного оси A .

В редких случаях при наклоне вокруг оси I вторая оптическая ось двусосного кристалла может совпасть с осью A и при повороте вокруг нее кристалл не будет просветляться. В этом случае столик следует еще раз наклонить вокруг оси I , но в противоположную сторону и вновь проверить поворотом вокруг оси A . При вращении вокруг оси A темнота будет нарушаться.

§ 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОСОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Особенности исследования оптической индикатрисы на федоровском столике

Ниже приводится методика исследования на федоровском столике оптически одноосных кристаллов. Следует указать, что двусосные кристаллы с малым углом оптических осей в ряде случаев невозможно отличить от одноосных как на федоровском столике, так и при помощи коноскопии. Двусосные кристаллы с сильным двупреломлением ведут себя как одноосные при $2v = 10 \div 12^\circ$, а со слабым двупреломлением — при $2v = 20 \div 25^\circ$.

В случаях, когда $2v$ меньше 10° в минералах с сильным двупреломлением, а со слабым двупреломлением при $2v$ меньше 20° , даже коноскопическим методом одноосные кристаллы не всегда могут быть отличимы от двусосных. В этих случаях установление осности и угла $2v$ может быть произведено лишь стереоконоскопическим методом [6].

При исследовании на федоровском столике двусосных кристаллов с $2v = 20 \div 40^\circ$ часто тоже возникают затруднения, в связи с чем методика их исследования выделена особо (см. § 11).

Исследование одноосных кристаллов начинают с установления расположения в них одного из главных сечений оптической индикатрисы ($NgNp$), кругового сечения и построения их стереографических проекций на сетке Вульфа. Затем определяют оптический знак, двупреломление, а также, в случае надобности, ориентировки осей Ng , Nm и Np относительно кристаллографических элементов.

В любом разрезе одноосного кристалла колебания необыкновенного луча совершаются в плоскости, проходящей через оптическую ось; сечения, проходящие через оптическую ось, называются главными, и их в одноосных кристаллах можно провести бесчисленное множество. Колебания второго (обыкновенного) луча совершаются по радиусу кругового сечения в плоскости, перпендикулярной к оптической оси.

Установка сечений оптической индикатрисы и их определение. Построение стереографических проекций и определение оптического знака

Главное сечение одноосного кристалла всегда можно совместить с плоскостью симметрии микроскопа поворотом вокруг оси N . Это связано с тем, что каждый радиус кругового сечения оптической индикатрисы одноосных кристаллов является осью индикатрисы, а перпендикулярное к нему сечение является главным. Один из радиусов кругового сечения всегда лежит в плоскости шлифа и, следовательно, одно из главных сечений всегда перпендикулярно к шлифу.

При совмещении главного сечения с плоскостью симметрии микроскопа, а следовательно, одной из осей индикатрисы (соответствующей радиусу кругового сечения) с осью I наступит темнота, которая будет сохраняться при наклонах вокруг оси I .

Это наглядно иллюстрируется на шаре Бера, который представляет собой сферу, описанную вокруг оптической индикатрисы. В каждой точке этой сферы нанесены направления колебаний лучей, совершающихся в плоскости, перпендикулярной к заданному направлению луча. Такой шар для одноосных кристаллов подобен географическому глобусу. Меридианы проектируют главные сечения одноосной индикатрисы, проходящие через оптическую ось, и показывают направление колебаний необыкновенного луча. Как видно на рис. 14 в одноосном кристалле можно провести бесчисленное множество главных сечений. Параллели проектируют направления колебаний обыкновенных лучей. При совмещении любого радиуса экваториального сечения шара Бера с осью I одно из главных сечений всегда совместится с плоскостью



Рис. 14. Шар Бера для одноосного кристалла.

a — косой разрез одноосного кристалла (общий случай); b — разрез, параллельный оптической оси (частный случай). Главные сечения нанесены сплошными линиями, круговые — штриховыми.

симметрии микроскопа. Полученная при этом темнота будет сохраняться при наклонах столика вокруг оси I .

В одноосных кристаллах следует различать общий и частный случаи установки оптической индикатрисы. Точки a и b на рис. 14 иллюстрируют исходное положение одноосного кристалла в шлифе. Эти точки представляют собой выходы нормалей к плоскости шлифа. Точка a соответствует косому разрезу одноосного кристалла (общему случаю), точка b — разрезу кристалла, параллельному оптической оси, т. е. сечению $NgNp$ (частный случай). Этот разрез будет характеризоваться наивысшей интерференционной окраской. Частным же случаем будет и разрез одноосного кристалла, перпендикулярный к оптической оси (см. § 12).

Ниже на конкретных примерах разбираются приемы исследования для общего и частного случаев одноосных кристаллов.

ОБЩИЙ СЛУЧАЙ (КОСОЙ РАЗРЕЗ)

Исследуемый кристалл приводят к центру пересечения окулярных нитей и поворотом вокруг оси N устанавливают темноту, которая будет сохраняться при наклонах вокруг оси I . Следовательно, с установочной плоскостью совмещено главное сечение индикатрисы $NgNp$.

Отмечают и записывают его координаты по лимбу оси N ; отсчет по лимбу оси N для одного из главных сечений всегда равен 0° .

По полученным координатам строят стереографическую проекцию установленного сечения. Это сечение будет проектироваться в виде прямой линии, проходящей через центр сетки (см. рис. 15 и 16, сечение $I-I$).

После установки главного сечения, т. е. совмещения его с плоскостью симметрии микроскопа, поворачивают столик вокруг оси A на 45° и, наклоняя вокруг оси I , определяют, выходит ли оптическая ось в поле зрения и можно ли совместить ее с осью A . При этом возможны два варианта.

1. Оптическая ось не выходит в поле зрения (рис. 15). В этом случае она образует большой угол с оптической осью микроскопа. Такие разрезы характеризуются сравнительно высокой интерференционной окраской. Положение оптической оси в указанном случае определяют графическим путем. Для этого устанавливают и наносят на сетку круговое сечение. При его совмещении с плоскостью симметрии микроскопа от положения главного сечения поворачивают вокруг оси N на 90° и наклоном вокруг оси H добиваются такого положения темноты, которое сохраняется при повороте вокруг оси I . Установив круговое сечение, наносят его по полученным координатам N и H на стереографическую проекцию. Оптическая ось будет являться полюсом кругового сечения.

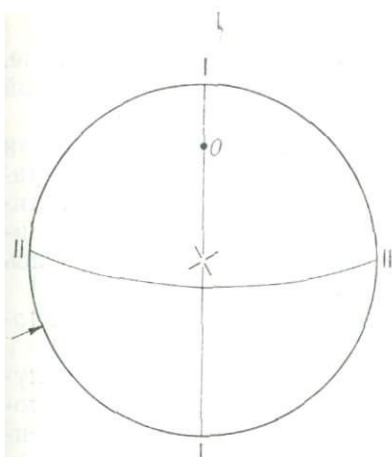


Рис. 15. Стереографическая проекция оптической индикатрисы одноосного кристалла. Оптическая ось не выходит в поле зрения.

$I-I$ — главное сечение: $N - 65^\circ$, $H - 0^\circ$; $II-II$ — круговое сечение: $N - 155^\circ$, $H - 20^\circ$; O — оптическая ось, построенная графически.

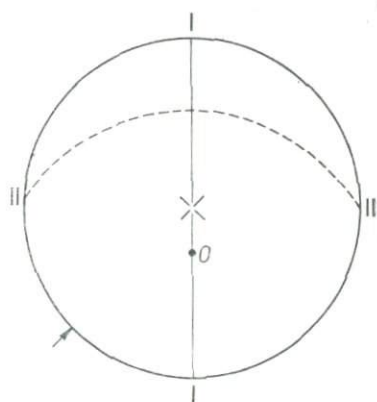


Рис. 16. Стереографическая проекция оптической индикатрисы одноосного кристалла. Оптическая ось выходит в поле зрения.

$I-I$ — главное сечение: $N - 45^\circ$, $H - 0^\circ$; $II-II$ — круговое сечение, построенное графически; O — оптическая ось: $I - 30^\circ$.

Пусть главное сечение: $N - 65^\circ$, $H - 0^\circ$; круговое сечение: $N - 155^\circ$, $H - 20^\circ$ (см. рис. 15). При определении оптического знака в этом случае следует определить, какая ось оптической индикатрисы, Ng или Np , является оптической осью кристалла. Для этого главное сечение $I-I$ поворачивают на 45° против часовой стрелки, т. е. ставят его под прорезь микроскопа. При помощи гипсовой пластинки или кварцевого клина определяют, какая ось оптической индикатрисы лежит в плоскости главного сечения. Если при вдвигании гипсовой пластинки произошло понижение интерференционной окраски (или полная компенсация), то в данном сечении лежит ось Ng , т. е. минерал является положительным. Можно поставить в данное положение и круговое сечение и определить пластинкой или клином, какая ось расположена в нем. В случае положительного кристалла в круговом сечении будет лежать ось Np .

2. Оптическая ось выходит в поле зрения (рис. 16). В этом случае оптическая ось образует небольшой угол с оптической осью микроскопа; наклоном вокруг оси I она может быть совмещена с последней (разрезы характеризуются сравнительно низкой интерференционной окраской). Совместив главное сечение с плоскостью симметрии микроскопа, поворачивают его на 45° вокруг оси A и наклоняют вокруг оси I до совмещения оптической оси с осью A , в результате чего наступает темнота, которая не будет исчезать при повороте вокруг оси A , так как пер-

пендикулярно к оси A будет располагаться круговое сечение. Отсчет по лимбу оси I , соответствующий выходу оптической оси, записывается и наносится на диаграмму.

Пусть главное сечение: $N - 45^\circ$, $H - 0^\circ$, I (оптическая ось) $- 30^\circ$. Круговое сечение здесь может быть построено графически; это такое сечение, полюсом которого является оптическая ось (см. рис. 16). Для построения плоскости по заданному полюсу надо сделать следующие операции, пользуясь сеткой Вульфа:

— повернуть кальку (или матовое стекло) до такого положения, чтобы полюс попал на экватор сетки Вульфа;

— отсчитать от полюса по экватору сетки 90° и через полученную точку провести дугу большого круга (меридиан), который и будет стереографической проекцией плоскости, перпендикулярной к заданному направлению. Эта плоскость будет круговым сечением, перпендикулярным к оптической оси.

При определении оптического знака в данном случае главное сечение $I-I$ ставят в диагональное положение, под прорезь микроскопа; далее наклоняют вокруг оси I на возможно больший угол, для того чтобы оптическая ось приняла положение, приближающееся к горизонтальному; это особенно важно для слабодвупреломляющих минералов, в которых значения N_g и N_p незначительно отличаются друг от друга. Наименование оптической оси (сечения $I-I$) определяют при помощи гипсовой пластинки или кварцевого клина, как и в первом варианте.

При микроструктурных исследованиях, когда требуется установить в минералах только положение оптической оси, употребляют более быстрый способ, заключающийся в том, что на столике поочередно устанавливают два любых главных сечения индикатрисы. Точка пересечения этих сечений будет являться проекцией оптической оси. Практически это делается следующим образом: сначала устанавливают и наносят на стереографическую проекцию главное сечение, нормальное к плоскости шлифа, затем столик наклоняют вокруг оси H примерно на $30-35^\circ$ до просветления и вращением вокруг оси N устанавливают второе главное сечение. Точка пересечения этих сечений на проекции дает выход оптической оси.

ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ (РАЗРЕЗ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ)

В этом случае в плоскости шлифа лежат оси N_g и N_p , следовательно, обе темноты, полученные поворотом только вокруг оси N , будут сохраняться при наклонах вокруг оси I . Такие сечения характеризуются наивысшей интерференционной окраской.

Для определения положения главного сечения, а также оптического знака, в плоскости которого лежит оптическая ось, исследуют поочередно обе полученные темноты. Для этого кри-

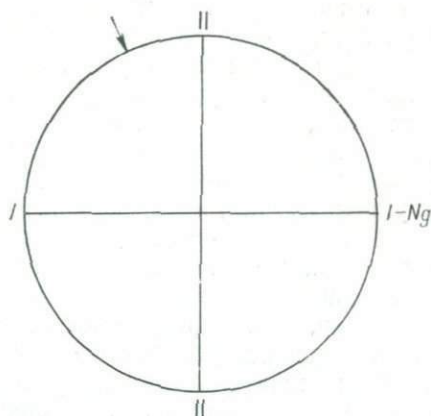
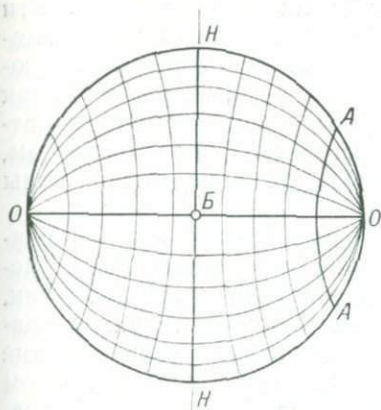


Рис. 17. Проекция шара Бера для одноосного минерала в разрезе, параллельном оптической оси.

B — нормаль к плоскости шлифа; $H-H$ — направление расположения оси H , с которым совпадает круговое сечение; $O-O$ — проекция оптической оси; $A-A$ — положение кругового сечения после наклона вокруг оси H .

Рис. 18. Стереографическая проекция оптической индикатрисы одноосного минерала в разрезе, параллельном оптической оси.

$I-I$ — главное сечение: $N - 60^\circ$, $H - 0^\circ$; $II-II$ — круговое сечение: $N - 150^\circ$, $H - 0^\circ$.

сталл наклоняют в каждом положении темноты по оси H на возможно больший угол и проверяют, сохраняется ли исходная темнота при повороте вокруг оси I . Положение главного сечения будет характеризоваться тем, что и после наклона вокруг оси H темнота будет сохраняться при повороте вокруг оси I . Темнота, соответствующая круговому сечению, при тех же операциях сохраняться не будет, так как после наклона вокруг оси H ни одна из плоскостей симметрии оптической индикатрисы не будет совпадать с плоскостью симметрии микроскопа. На рис. 17 изображена проекция шара Бера на плоскость для одноосного кристалла в разрезе, параллельном оптической оси.

Определив положение главного и кругового сечений, обычным способом определяют знак минерала.

Пример Главное сечение ($I-I$): $N - 60^\circ$, $H - 0^\circ$; круговое сечение ($II-II$): $N - 150^\circ$, $H - 0^\circ$. Знак «+» (рис. 18).

§ 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Особенности исследования двуосных кристаллов на федоровском столике

При исследовании двуосных кристаллов на федоровском столике необходимо прежде всего установить главные сечения оптической индикатрисы, определить их наименования и пост-

роить их стереографические проекции на сетке Вульфа. Эти проекции, показывающие пространственное расположение плоскостей и осей индикатрисы, дают возможность в соответствующих разрезах определить угол оптических осей, оптический знак минерала, плеохроизм, ориентировку осей оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим элементам, а также установить сечения, нужные для определения силы двупреломления, и другие константы.

При работе на федоровском столике надо выбирать разрезы, нужные для определения тех или иных констант, с учетом кристаллооптических свойств изучаемого минерала. Так, например, для определения угла оптических осей нужны разрезы, перпендикулярные к острой биссектрисе (или близкие к ним); желательно предварительно проверить их на плоском столике, применив коноскопический метод. Найдя такой разрез, следует запомнить или отметить его и уже после этого приступать к работе на федоровском столике. Предварительная проверка экономит время и даст хорошие результаты.

Поведение двусосных минералов на столике обусловлено особенностями их оптической индикатрисы.

В двусосных минералах (в отличие от однососных) ни одна из осей оптической индикатрисы не лежит в плоскости шлифа; следовательно, ни одна темнота, полученная вращением только вокруг оси N , не будет сохраняться при повороте вокруг оси I . Напомним, что темнота сохраняется при вращении вокруг оси I тогда, когда из осей симметрии оптической индикатрисы совмещено с осью I , а с плоскостью симметрии микроскопа совмещено одно из ее главных сечений.

Ниже приведена методика установки главных сечений оптической индикатрисы двусосных кристаллов (со средним и большим $2v$) и определения их наименований и главнейших констант. Особенности исследования двусосных минералов с малым $2v$ даны в § 11. Определение силы двупреломления кристаллов рассмотрено в гл. IV.

Установка главных сечений оптической индикатрисы двусосных кристаллов и их определение

УСТАНОВКА ПЕРВОГО ГЛАВНОГО СЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО НАИМЕНОВАНИЯ

Выбрав и приведя к центру поля зрения изучаемое зерно, поворотом вокруг оси N ставят его на затемнение, затем наклоняют вокруг оси I до максимального просветления и наклоном вокруг оси N ставят кристалл на затемнение; затем вновь наклоняют вокруг оси I в другую сторону до просветления, поворачивают вокруг оси N до наступления темноты и т. д. Схема движений при этом следующая: 1) установка на темноту вра-

щением вокруг оси N ; 2) проверка темноты вращением вокруг оси I , 3) установка на темноту вращением вокруг оси H , 4) проверка темноты вращением вокруг оси I и т. д. Если темнота не сохраняется, вся операция повторяется вновь.

Добившись такого положения, при котором темнота сохраняется при наклонах вокруг оси I , т. е. главное сечение совмещено с плоскостью симметрии микроскопа, а перпендикулярная к нему ось — с осью I , необходимо определить, какая ось индикатрисы совмещена с осью I и какое из сечений оптической индикатрисы совмещено с плоскостью симметрии микроскопа. Установив это главное сечение на столике, надо записать его координаты по N и H , построить его стереографическую проекцию на сетке Вульфа и определить его наименование.

Для определения наименования установленного главного сечения поворачивают федоровский столик вокруг оси A на 45° против часовой стрелки, так чтобы это сечение приняло диагональное по отношению к сечениям николей положение и находилось параллельно прорези микроскопа. После этого наклоняют столик вокруг оси I на возможно большие углы и смотрят на происходящие оптические явления.

1. Если установленное сечение индикатрисы перпендикулярно к оси Nm (т. е. сечение является плоскостью оптических осей), то оно характеризуется следующими признаками:

а) выходом оптической оси в тот момент, когда оптическая ось совместится с осью A (что достигается наклоном вокруг оси I) и зерно станет темным; эта темнота будет сохраняться при повороте вокруг оси A . При дальнейшем наклоне вокруг оси I темнота будет исчезать. Отсчет по I , соответствующий выходу оптической оси, надо записать и нанести оптическую ось на стереографическую проекцию.

Вследствие дисперсии угла оптических осей у многих двуосных минералов круговые сечения будут не черными, а темно-серыми. При очень резкой дисперсии уточнение положения оптических осей производится в монохроматическом свете.

б) выходом двух оптических осей. В этих случаях при наклонах вокруг оси I поочередно наступают две темноты, разделенные просветлением; каждая из них сохраняется при повороте вокруг оси A . Необходимо записать и отметить на стереографической проекции оба выхода оптических осей; по отсчетам на лимбе оси I непосредственно определяют угол оптических осей.

в) снижением интерференционной окраски в крайних положениях наклона. Сечение плоскостью шлифа будет перпендикулярно к тупой биссектрисе.

Это может быть наглядно объяснено на шарах Бера, принцип построения которых дан в § 9. Шар Бера для двуосных кристаллов отличается от такового для одноосных; здесь имеется

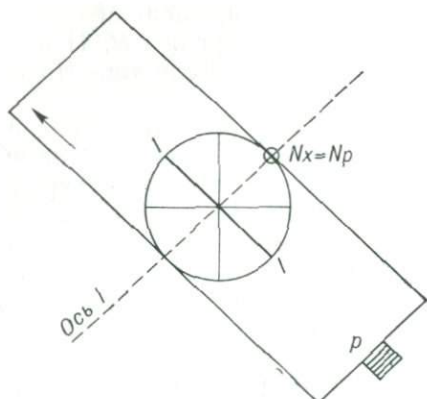


Рис. 19. Схема определения наименования главного сечения и его положения по отношению к окулярным нитям.

$I-I$ — главное сечение; $Nx = Np$ — полюс главного сечения; p — гипсовая пластинка.

не бесчисленное множество главных сечений индикатрисы, как в одноосных кристаллах, а всего три главных сечения — $NgNp$, $NgNm$ и $NmNp$, расположенных взаимно перпендикулярно.

В каждой точке поверхности шара Бера нанесены колебания двух необыкновенных лучей: одни сплошными линиями, другие — штриховыми. Так же как и в одноосных кристаллах, точки a и b показывают выходы нормалей к плоскости шлифа (см. рис. 26).

2. Если установленное сечение индикатрисы перпендикулярно к оси Ng или Np ,

темноты или резкого снижения интерференционной окраски при наклонах вокруг оси I не наступает. Наименование этих сечений (т. е. осей индикатрисы, перпендикулярных к ним) определяется при помощи гипсовой пластинки или кварцевого клина. В том случае, когда столик повернут на 45° против часовой стрелки, будут наблюдаться следующие оптические явления:

а) сечение, перпендикулярное к оси Np (т. е. установлено сечение $NgNm^*$), характеризуется понижением интерференционной окраски или в частном случае полной компенсацией. Это связано с тем, что с осью Np пластинки (клина) совпадает большая ось Ng' кристалла. На стереографическую же проекцию наносится полюс данного сечения $NgNm$, т. е. ось Np . На рис. 19 схематически показано расположение главного сечения $I-I$, соответствующего $NgNm$, по отношению к окулярным нитям и оси Np пластинки. Nx соответствует в разбираемом случае оси Np .

б) сечение индикатрисы, перпендикулярное к оси Ng , характеризуется повышением интерференционной окраски.

При повороте столика по часовой стрелке явления будут обратными, так как в этом случае параллельно прорези микроскопа будет располагаться ось оптической индикатрисы, перпендикулярная к данному сечению.

* В дальнейшем сечение, перпендикулярное к оси Ng , называется сечением Ng или сечением $NmNp$, перпендикулярное к оси Np — сечениями Np или сечением $NgNm$ и перпендикулярное к оси Nm — сечением Nm или сечением $NgNp$.

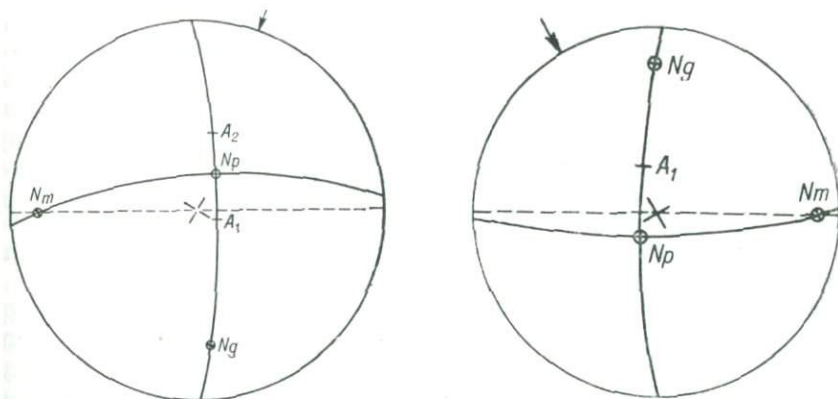


Рис. 20. Стереографическая проекция оптической индикатрисы двуосного минерала. Угол $2v$ определен по двум выходам.

Сечение Nm : $N = 200^\circ$, $H = 10^\circ$, $A_1 = 5^\circ$, $A_2 = 315^\circ$, $2v = -50^\circ$ (\times); сечение Ng — 114° , $H = 20^\circ$.

Рис. 21. Стереографическая проекция оптической индикатрисы двуосного минерала. Угол $2v$ определен по одному выходу.

Сечение Nm : $N = 149^\circ$, $H = 10^\circ$, $A_1 = 333^\circ$, $2v = -84^\circ$ (\times); сечение Ng : $N = 240^\circ$, $H = 15^\circ$.

УСТАНОВКА ВТОРОГО ГЛАВНОГО СЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО НАИМЕНОВАНИЯ

Перед совмещением второго главного сечения двуосного минерала с установочной плоскостью столика необходимо привести в основное положение, так как при определении наименования первого сечения индикатрисы он был повернут от него на 45° .

Установка второго главного сечения и его определение производится так же, как и первого. При нанесении его на стереографическую проекцию оно должно пройти через полюс первого сечения; полюс же второго сечения должен лежать в первом сечении (рис. 20 и 21).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕТЬЕГО ГЛАВНОГО СЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ

Третье главное сечение оптической индикатрисы находится графически; для этого совмещают на один меридиан две оси оптической индикатрисы, полученные как полюсы первых двух сечений; прочерченный через эти две оси меридиан и будет являться проекцией третьего сечения оптической индикатрисы двуосного кристалла. Обычно при практической работе это сечение не используется.

Определение оптического знака и угла оптических осей

Прежде чем приступить к описанию порядка работы при определении $2v$, следует кратко остановиться на выборе нужных для этого разрезов. Интерференционная окраска разрезов, перпендикулярных к острой биссектрисе, зависит от силы дву-

преломления минерала и от угла оптических осей. При малом угле оптических осей эти разрезы будут характеризоваться наиболее низкой интерференционной окраской; так, например, для мусковита с $2v = -40^\circ$ и силой двупреломления $Ng - Np = 0,030$ разрезы, перпендикулярные к острой биссектрисе Np , будут иметь в шлифах нормальной толщины темно-серую интерференционную окраску* ($Ng - Nm$ в этих разрезах равно $0,002 - 0,003$).

Если же минерал имеет средний или большой угол оптических осей, то в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе, двупреломление будет выше относительно первого случая. Так, например, у пироксена с $2v = +60^\circ$ и $Ng - Np = 0,030$ в разрезах $\perp Ng$ двупреломление $Nm - Np = 0,006 - 0,007$, что соответствует в шлифах нормальной толщины светло-серой или белой интерференционной окраске. Более подробно о связи между $2v$ и двупреломлением главных сечений см. в § 17. Так как значение $2v$ обычно неизвестно, то для его оценки приходится применять коноскопический метод.

Последовательность работы при определении $2v$

1. Выбирают разрез изучаемого минерала, приблизительно перпендикулярный к острой биссектрисе, и приводят его в центр поля зрения.

2. Устанавливают одно из главных сечений и определяют его наименование. Например, при повороте столика на 45° наблюдаются выходы оптических осей; следовательно, установленное сечение перпендикулярно к оси Nm , т. е. это сечение $NgNp$ (см. рис. 20).

3. Записывают координаты этого сечения (по лимбам осей N и H) и оптических осей (по лимбу оси I). Запись производится следующим образом: сечение $Nm : N - 200^\circ$, $H \rightarrow 10^\circ$, $A_1 = 5^\circ$, $A_2 = 315^\circ$ (A_1 и A_2 — выходы оптических осей). Полученные данные наносят на стереографическую проекцию, поворачивают кальку (или матовое стекло) до совмещения значка, отмечающего место нуля с делением 200° внешнего круга проекции; далее не смещая этого отсчета, откладывают по экватору сетки вправо 10° и прочерчивают меридиан, который и будет являться стереографической проекцией сечения $NgNp$. На эту проекцию наносят полюс установленного сечения — ось Nm ; для этого от точки пересечения установленного сечения с экватором откладывают по экватору (т. е. горизонтальному диаметру) 90° и отмечают полученную точку значком $\oplus Nm$. Выход оси Nm можно также получить, отложив от противоположного конца экватора (от внешнего круга проекции) 10° .

* В том случае, если нет разрезов, перпендикулярных к острой биссектрисе, выбирается разрез с наиболее низкой интерференционной окраской и $2v$ определяется по одному выходу оптической оси.

От точки пересечения плоскости $NgNp$ с экватором откладывают по дуге большого круга, проектирующей эту плоскость, 5° вниз, отмечают эту точку индексом A_1 ; она является проекцией оптической оси. Вверх от экватора по той же дуге большого круга откладывают 45° ($360^\circ - 315^\circ = 45^\circ$) и отмечают проекцию выхода второй оптической оси A_2 .

Если показатель преломления минерала сильно отличается от показателя преломления сфер, необходимо определять исправленные значения углов по диаграмме Федорова (см. § 4).

Выходы оптических осей должны располагаться симметрично относительно оси Ng , составляя с ней равные углы. Относительно оси Np они в свою очередь тоже размещаются симметрично, но углы между выходами оптических осей, расположенными симметрично относительно осей Ng и Np , не равны, за исключением нейтральных кристаллов с $2v = 90^\circ$. Та ось оптической индикатрисы, которая делит острый угол между оптическими осями, называется условно острой биссектрисой; та, которая делит тупой угол, называется тупой биссектрисой.

4. Устанавливают второе главное сечение. Для этого поворачивают столик вокруг оси N от положения первого сечения примерно на 90° и поочередным вращением вокруг осей N и H (проверяя наклонами вокруг оси I) добиваются положения сохраняющейся темноты. Пластинкой или клином определяют наименование сечения. Если произошло повышение интерференционной окраски, то, следовательно, это сечение перпендикулярно к оси Ng (т. е. $NmNp$).

5. Записывают координаты сечения: сечение Ng : $N - 114^\circ$, $H \leftarrow 20^\circ$. Наносят сечение на стереографическую проекцию и определяют его полюс (см. рис. 20).

6. Определяют $2v$ и оптический знак. Для определения угла оптических осей измеряют градусное расстояние между A_1 и A_2 . В рассматриваемом примере оно равно $50^\circ (\times)$ *

Для определения оптического знака минерала смотрят по диаграмме, какая ось оптической индикатрисы, Ng или Np , является острой биссектрисой угла оптических осей. В приведенном примере оптический знак минерала является отрицательным, так как ось Np является биссектрисой острого угла между оптическими осями. Полученные результаты удобно записывать так: сечение Nm : $N - 200^\circ$, $H \rightarrow 10^\circ$, $A_1 = 5^\circ$, $A_2 = 315^\circ$, $2v = -50^\circ (\times)$; сечение Ng : $N - 114^\circ$, $H \leftarrow 20^\circ$.

В том случае, когда в сечении Nm в поле зрения выходит одна оптическая ось, угол оптических осей $2v$ вычисляется следующим образом: определяется градусное расстояние от A_1 (выхода оптической оси) до ближайшей оси индикатрисы Ng или

* Значок (\times) или $(:)$ показывает, что угол оптических осей определен по выходам двух осей, значок (\times) — по выходу одной оптической оси.

Np и полученное значение умножается на 2. При записи необходимо указать, что $2v$ вычислялось по одному выходу оптической оси. Например (см. рис. 21): сечение Nm : $N - 149^\circ$, $H \rightarrow 10^\circ$, $A_1 = 333^\circ$, $2v = -84^\circ$ (\times); сечение Ng : $N - 240^\circ$, $H \leftarrow 15^\circ$. (При практической работе обычно название сечения ставится после записи координат: $N - 240^\circ$, $H \leftarrow 15^\circ$, Ng).

Определение ориентировки оптической индикатрисы по отношению к спайности

Определение осей оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим элементам производится обычно на стереографической проекции и только в редких случаях непосредственно на столике (см. § 36). Задача сводится к нанесению на стереографическую проекцию как осей оптической индикатрисы, так и кристаллографических элементов, например, спайности, и определению углов между ними.

Последовательность работы при определении ориентировки оптической индикатрисы по отношению к спайности

1. Выбирают разрез с хорошо выраженной спайностью и приводят его в центр поля зрения.

2. Устанавливают плоскости симметрии оптической индикатрисы и наносят их на стереографическую проекцию.

3. Совмещают плоскость спайности с установочной плоскостью. По полученным отсчетам по N и H наносят плоскость спайности и ее полюс на стереографическую проекцию. Полюс спайности обозначают как $\Pi. сп.$

4. Измеряют градусное расстояние от $\Pi. сп.$ до оси Ng , а затем до осей Nm и Np ; для этого поочередно приводят на один меридиан $\Pi. сп.$ с Ng , с Nm и с Np и считают градусные расстояния между ними. Полученные значения и будут характеризовать ориентировку осей оптической индикатрисы по отношению к полюсу спайности.

По тому же принципу определяется ориентировка осей оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей, элементов двойникования и других кристаллографических элементов (см. гл. V—VII).

Определение плеохроизма (и абсорбции)

В одноосных кристаллах и кристаллах ромбической сингонии главные оси эллипсоида поглощения света совпадают с осями оптической индикатрисы; в моноклинных кристаллах только одна ось эллипсоида поглощения света совпадает с осью индикатрисы, а две другие составляют с осями оптической ин-

дикатрисы некоторые углы. В кристаллах триклинной сингонии оси эллипсоида поглощения не совпадают с осями оптической индикатрисы. В. Н. Лодочников указывает, что при строгой спектрофотометрической характеристике явлений плеохроизма в двусосных кристаллах следовало бы поэтому не только характеризовать наиболее различающиеся цвета, но и давать для кристаллов моноклинной и триклинной сингоний углы, которые образуют направления для наиболее различающихся цветов с направлениями осей оптической индикатрисы.

На практике для характеристики плеохроизма двусосных минералов оказывается достаточным приведение цветов по направлению осей Ng , Nm и Np оптической индикатрисы, хотя иногда направления наиболее характерной окраски, ясной для глаза, не совпадают с направлением главных осей оптической индикатрисы. При работе на федоровском столике эту особенность кристаллов следует отмечать [Саранчина Г. М., 1952 г.].

На федоровском столике определение плеохроизма и абсорбции можно производить с большей точностью, чем на плоском столике, так как, пользуясь федоровским методом, можно точно совместить оси Ng , Nm и Np с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором. Для определения цвета по осям Ng и Np надо брать разрезы с наивысшей интерференционной окраской, так как эти разрезы перпендикулярны или почти перпендикулярны к оси Nm . Для определения цвета по оси Nm надо выбирать разрезы, перпендикулярные или почти перпендикулярные к оси Ng или Np , т. е. разрезы, перпендикулярные к тупой или острой биссектрисе. В этих разрезах в плоскости шлифа будет лежать ось Nm или близкое к ней направление.

Последовательность работы при определении цвета по осям Ng и Np

1. Выбирают разрез с наивысшей интерференционной окраской и приводят его к центру поля зрения.

2. Устанавливают поочередно оба главных сечения оптической индикатрисы, определяют их наименование и наносят их на стереографическую проекцию. Например, координаты главных сечений следующие: сечение $Ng : N - 45^\circ$, $H \leftarrow 20^\circ$; сечение $Np : N - 315^\circ$, $H \rightarrow 10^\circ$.

3. Совмещают ось Nm с осью A . Выбирают то сечение, в котором ось Nm делает меньший угол с осью A . В данном примере для этого устанавливают на столике сечение $NmNp$. В этом сечении ось Nm делает угол с оптической осью микроскопа A , равный 10° . Следовательно, если наклонить вокруг оси I данное сечение на 10° от себя, то ось Nm будет совмещена с осью A , а в плоскости шлифа будут лежать истинные оси Ng и Np (от себя надо повернуть потому, что при отсчете по I , равном 0° , ось

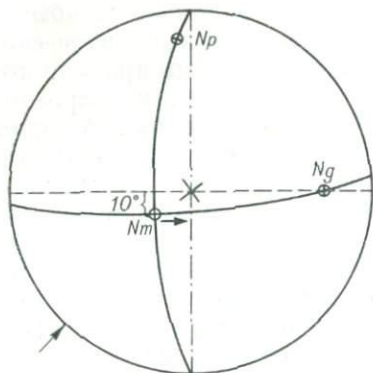


Рис. 22. Стереографическая проекция сечения двусного минерала, выбранного для определения плеохроизма по осям Ng и Np .

Сечение Ng : $N - 45^\circ$, $H - 20^\circ$; сечение Np : $N - 315^\circ$, $H - 10^\circ$.

Nm была наклонена в сторону наблюдателя на 10° — в направлении южного полюса). Здесь следует еще раз напомнить, что сечение, перпендикулярное к оси Ng , занимало положение в виде дуги большого круга, проходящей через проекцию осей Np и Nm при основном положении столика. При совмещении сечения, перпендикулярного к оси Ng , с плоскостью симметрии микроскопа оно будет расположено вертикально; его можно было бы изобразить прямой линией, проходящей через центр сетки Вульфа и перпендикулярной к экватору (рис. 22).

4. Вращая столик по оси A , совмещают поочередно оси Ng и Np с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором, и, выдвинув анализатор, отмечают цвет минерала (абсорбцию).

Последовательность работы при определении цвета по оси Nm

1. Выбирают сечение со средней интерференционной окраской, т. е. сечение, приблизительно перпендикулярное к осям Ng и Np , в котором будет располагаться ось Nm или близкое к ней направление. Приводят выбранное сечение к центру поля зрения.

2. Устанавливают поочередно оба главных сечения оптической индикатрисы, определяют наименование и наносят их на стереографическую проекцию.

3. Совмещают ось Ng или Np с осью A указанным выше способом. Совмещать с осью A надо ту ось, которая составляет с ней меньший угол.

4. Ось Nm совмещают с направлением колебаний поляризатора и отмечают цвет минерала; в разрезах, перпендикулярных к оси Ng , ось Nm будет являться большей осью, в разрезах, перпендикулярных к оси Np , — меньшей осью сечения; это определяется гипсовой пластинкой или кварцевым клином.

Цвет (абсорбцию) по Nm можно определить и другими приемами: в круговом сечении, в кристаллографически ориентированных разрезах, например, в разрезах, перпендикулярных к $[001]$ для амфиболов и пироксенов, где ось Nm будет являться биссектрисой острого угла между плоскостями спайности.

Методика исследования на федоровском столике
двуосных кристаллов с малым 2σ

При изучении кристаллов с малым углом оптических осей ($20-40^\circ$) часто встречаются затруднения в определении наименования главных сечений оптической индикатрисы, перпендикулярных к оси Nm и к тупой биссектрисе, что связано с близкими значениями этих осей*. Часто оказывается, что они характеризуются сходными оптическими явлениями и это нередко приводит к недоразумениям при практической работе. Так, например, сечение, перпендикулярное к тупой биссектрисе, после поворота вокруг оси A на 45° от основного положения при наклонах вокруг оси I обнаруживает резкое снижение интерференционной окраски до полного затемнения. Это явление можно легко принять за выход оптической оси и, следовательно, неверно определить это сечение индикатрисы как перпендикулярное к оси Nm . На самом деле указанное затемнение соответствует совмещению с осью A острой биссектрисы.

Сечение, перпендикулярное к оси Nm , ведет себя различно в зависимости от исходного размера исследуемого зерна. В случае, когда плоскость шлифа пересекает зерно примерно перпендикулярно к острой биссектрисе, в этом разрезе вполне можно отличить главные сечения индикатрисы, перпендикулярные к оси Nm и к тупой биссектрисе. Сечение индикатрисы, перпендикулярное к оси Nm , характеризуется в этих разрезах (после поворота вокруг оси A на 45°) выходом двух оптических осей. При наклонах вокруг оси соответственно наблюдаются два положения темноты, разделенные просветлением (для минералов с сильным двупреломлением) или появлением темно-серой интерференционной окраски (для минералов со слабым двупреломлением) при меньших 2σ обе темноты сливаются в одну; об угле 2σ в этом случае можно судить по наклонам вокруг оси I , соответствующим началу и концу затемнения.

Во всех разрезах кристаллов с малым 2σ , в которых острая биссектриса образует малые углы с плоскостью шлифа или лежит в этой плоскости, невозможно отличить друг от друга ось Nm и тупую биссектрису** (рис. 23). Сечения индикатрисы, перпендикулярные к этим осям, находящиеся в диагональном положении, характеризуются при наклонах вокруг оси I незна-

* Двуосные кристаллы с очень малыми значениями 2σ на федоровском столике, так же как и в коноскопе, невозможно отличить от одноосных, и методика их исследования аналогична таковой для одноосных кристаллов (см. § 9).

** Это косые разрезы, а также перпендикулярные к оси Nm или к тупой биссектрисе.

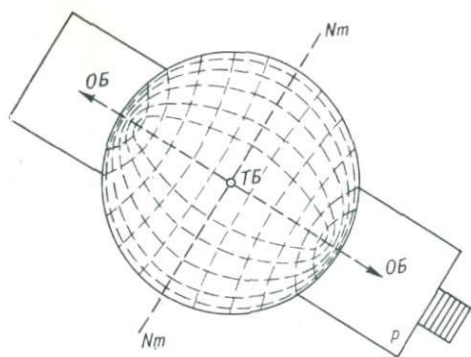


Рис. 23. Схема расположения осей оптической индикатрисы в разрезах, перпендикулярных к тупой биссектрисе.

OB и *TB* — соответственно острая и тупая биссектрисы кристалла; *p* — гипсовая пластинка.

Следовательно, при изучении обычным федоровским методом кристаллов с малыми $2v$ надо пользоваться только разрезами, перпендикулярными к острой биссектрисе, или близкими к ним.

Последовательность работы при определении $2v$ в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе (или близких к ним)

1. Выбирают разрез кристалла с наиболее низкой интерференционной окраской (вплоть до черной) и приводят его к центру поля зрения. Устанавливают на столике одно из главных сечений индикатрисы. Это нужно делать очень тщательно. Затем строят его стереографическую проекцию.

2. Определяют наименование данного сечения; для этого поворачивают столик вокруг оси *A* и наклоняют вокруг оси *I*; при этом возможны два случая:

а) сечение перпендикулярно к оси *Nm*; это сечение при наклонах вокруг оси *I* характеризуется двумя положениями темноты, разделенными просветлением или темно-серой интерференционной окраской. В минералах с очень малым $2v$ и при низком двупреломлении просветления между оптическими осями не наблюдается, а темнота сохраняется в определенном интервале наклонов вокруг оси *I*;

б) сечение перпендикулярно к тупой биссектрисе; это сечение (поставленное в диагональное положение) характеризуется при наклонах вокруг оси *I* резким снижением интерференционной окраски или наступлением полного затемнения (для кристаллов с малым $2v$ и низким двупреломлением).

чительным снижением интерференционной окраски. Только при значениях $2v > 40^\circ$ сечения $\perp Nm$ в противоположность сечениям, перпендикулярным к тупой биссектрисе, дадут резкое снижение интерференционной окраски (до затемнения). При вставлении гипсовой пластинки и ось *Nm* и тупая биссектриса дадут одинаковые изменения интерференционной окраски пластинки — желтый цвет в оптически отрицательных кристаллах и синий в положительных.

3. Определяют угол $2v$; производят это в разрезах $\perp Nm$, считывая по лимбу оси I значения, соответствующие выходам оптических осей. При малом $2v$, когда нет просветления между оптическими осями, отсчеты берут от начала до конца затемнения.

4. Определяют оптический знак кристалла; эту операцию рациональнее всего производить одновременно с определением $2v$ в том же сечении, перпендикулярном к оси Nm . Для этого указанное сечение поворачивают вокруг оси A против часовой стрелки и наклоняют вокруг оси I до максимального просветления; при этом во взятом сечении будет располагаться проекция острой биссектрисы, наименование которой определяют при помощи пластинки или клина. Повышение интерференционной окраски в данном случае будет соответствовать отрицательному знаку кристалла (острая биссектриса — Np).

При исследовании кристаллов с малым $2v$ нужно составлять на сетке Вульфа стереографические проекции; это помогает работе при нахождении главных сечений индикатрисы, а также является необходимым при определении ориентировки осей Ng , Nm , Np по отношению к кристаллографическим элементам.

В настоящее время имеются специальные объективы, дающие возможность применять коноскопический метод при исследовании двусосных кристаллов с малым $2v$.

Применение коноскопического метода при исследовании двусосных кристаллов с малым $2v$ на федоровском столике

При исследовании на федоровском столике таких кристаллов, как еще в 1912 г. указывал А. Н. Заварицкий, удобно использовать дополнительно коноскопический метод, который позволяет легко уточнить положение тупой биссектрисы и оси Nm в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе (или близких к ним) и определить угол $2v$. Для этого в соответствующем разрезе кристалла устанавливают одно из главных сечений индикатрисы. Затем берут коноскопический объектив, вводят линзу Бертрана в специальный однолинзовый конденсор и получают коноскопическую фигуру. В сечении, перпендикулярном к острой биссектрисе, виден темный крест, который при повороте столика микроскопа вокруг оси A , распадается на две гиперболы. Эти ги-

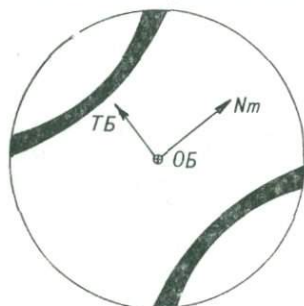


Рис. 24. Схема расположения осей оптической индикатрисы в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе (вид в коноскопе).

Условные обозначения см. на рис. 23.

перболы расходятся в направлении тупой биссектрисы. На рис. 24 показано расположение осей индикатрисы при диагональном положении главного сечения, перпендикулярного к оси Nm , по отношению к окулярным нитям.

В этих же разрезах кристалла можно определить угол $2v$. Для этого сечение индикатрисы, перпендикулярное к оси Nm , ставят в диагональное положение и наклоняют вокруг оси I до поочередного совмещения выходов оптических осей с осью A ; оптические оси выходят в вершинах гипербол. Положение темноты, соответствующее выходу оптических осей, отмечают на лимбе оси I и обычным способом определяют $2v$ (см. § 10).

§ 12. ПРИЕМЫ ОТЛИЧИЯ ОДНООСНЫХ КРИСТАЛЛОВ ОТ ДВУОСНЫХ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

При небольшом количестве зерен изучаемого минерала в шлифе и отсутствии разрезов, необходимых для коноскопического исследования на плоском столике, часто определить осьность минерала можно лишь федоровским методом. В общем случае одноосный минерал легко отличить от двуосного, так как одно из положений темноты в одноосном кристалле, достигнутое поворотом вокруг оси N сохраняется при наклоне вокруг оси I ; в общем случае двуосного кристалла ни одна темнота, полученная вращением только вокруг оси N , не будет сохраняться при наклоне вокруг I .

В каких же случаях сохраняется темнота при вращении вокруг оси I ? Она сохраняется тогда, когда с осью I совмещена одна из осей оптической индикатрисы, а с плоскостью симметрии микроскопа совмещено одно из главных сечений оптической индикатрисы. В любом разрезе одноосного кристалла в плоскости шлифа всегда расположена одна из осей оптической индикатрисы, являющаяся диаметром кругового сечения. Следовательно, при повороте вокруг оси N (при любых наклонах вокруг оси H) ось, совпадающая с диаметром кругового сечения, может быть совмещена с осью I , и при вращении вокруг последней будет сохраняться темнота, так как одно из сечений $NgNp$ (которых бесчисленное множество) будет совмещено с плоскостью симметрии микроскопа.

В общем же случае в двуосном минерале ни одна из осей оптической индикатрисы не лежит в плоскости шлифа и, следовательно, одним поворотом вокруг оси N не может быть совмещена с осью I . Для установки одного из главных сечений оптической индикатрисы двуосного минерала следует наряду с вращением вокруг оси N производить дополнительно наклоны вокруг оси H (см. § 10).

В частном случае одноосного минерала, когда в плоскости шлифа лежат оси Ng и Np , т. е. сечения параллельны оптической оси, поворотом вокруг оси N обе оси могут быть поочередно

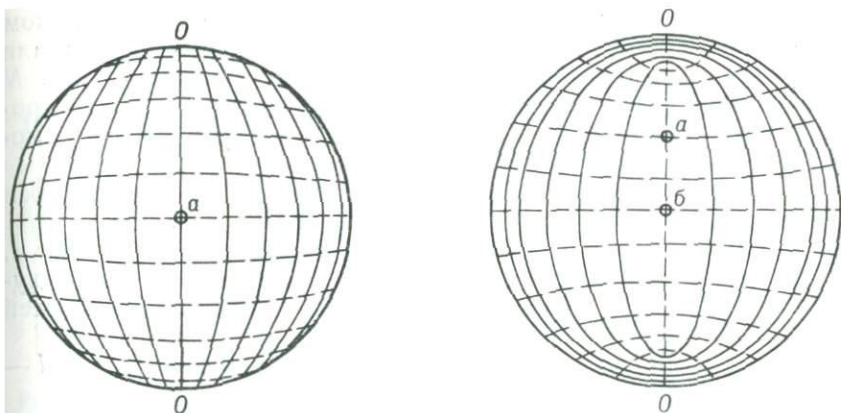


Рис. 25. Проекция шара Бера для одноосного кристалла.

a — нормаль к плоскости кристалла, параллельной оптической оси; $O-O$ — проекция оптической оси.

Рис. 26. Проекция шара Бера для двуосного кристалла.

a — первый частный случай; $б$ — второй частный случай.

совмещены с осью I и при повороте вокруг последней темнота будет сохраняться* (рис. 25, точка a).

В двуосных кристаллах возможны также особые положения (частные случаи), при которых в них наблюдаются те же оптические явления, что и у одноосных: 1) когда в плоскости шлифа лежит одна ось оптической индикатрисы, одна темнота, полученная вращением вокруг оси N , сохраняется при поворотах вокруг оси I (рис. 26, точка a); 2) когда в плоскости шлифа лежат две оси оптической индикатрисы (т. е. в плоскости шлифа лежит одно из главных сечений оптической индикатрисы, перпендикулярное к Ng , Nt или Np), обе темноты, установленные вращением только вокруг оси N , сохраняются при вращении вокруг оси I (рис. 26, точка $б$).

В этих частных случаях надо произвести лишь дополнительный наклон вокруг оси N для того, чтобы этот частный случай привести к общему, т. е. получить косой разрез двуосного минерала, в котором легко отличается двуосный кристалл от одноосного.

Последовательность работы при отличии одноосного минерала от двуосного

В анизотропном сечении. Выбрав зерно и приведя его к центру поля зрения, поворотом вокруг оси N ставят его на

* Это наблюдается лишь в тех случаях, когда разрез кристалла точно параллелен оптической оси; в противном случае круговое сечение индикатрисы устанавливается способом, указанным выше.

угасание (первая темнота). Проверяют эту темноту наклоном вокруг оси I в обе стороны и замечают, сохраняется она или наступает просветление зерна. Затем вращением вокруг оси N ставят зерно вновь на угасание* (вторая темнота) и вновь проверяют ее наклоном вокруг оси I . При указанной проверке могут быть три случая:

а) ни одна темнота не сохраняется при вращении вокруг оси I — это может быть только двуосный минерал;

б) одна темнота сохраняется при вращении вокруг оси I , другая исчезает — одноосный минерал или частный случай двуосного минерала, когда в плоскости шлифа лежит одна из осей оптической индикатрисы;

в) обе темноты сохраняются при вращении вокруг оси I — частный случай для одноосного или двуосного минерала.

Первый частный случай. Если в плоскости шлифа лежит одна из осей оптической индикатрисы двуосного минерала, то наблюдающиеся оптические явления те же, что и в одноосном минерале. Для отличия их применяется следующий прием: ставят минерал в положение темноты, сохраняющейся при вращении вокруг оси I ; наклоняют вокруг оси H (если темнота при этом немного нарушилась, то, поворачивая вокруг оси N на небольшие углы, добиваются максимального затемнения изучаемого зерна) и вновь проверяют ее вращением вокруг оси I . В одноосных минералах и после наклона вокруг оси H темнота, полученная вращением лишь вокруг оси N , будет сохраняться при вращении вокруг оси I (так как с установочной плоскостью всегда будет совмещено одно из главных сечений, которых в одноосных кристаллах бесчисленное множество). В двуосных кристаллах темнота сохраняться не будет, так как ни одно из главных сечений после наклона вокруг оси H не будет совпадать при вращении вокруг оси I с установочной плоскостью микроскопа и зерно будет просветляться (см. рис. 26, точка a).

Второй частный случай (см. рис. 26, точка b , рис. 28, точка b). Второе положение двуосного минерала является еще более редким и соответствует тому случаю, когда в плоскости шлифа лежат две оси оптической индикатрисы и обе темноты, полученные вращением вокруг оси N , будут сохраняться при наклонах вокруг оси I . Для отличия одноосного минерала от двуосного в этих случаях надо поочередно проверить обе сохраняющиеся темноты приемом, изложенным для первого частного случая. Если при такой проверке одна темнота будет сохраняться, то минерал является одноосным.

В изотропном сечении. В одноосных и двуосных кристаллах сечение не просветляется при повороте вокруг оси A в том случае, когда с ней совмещена оптическая ось кристалла, а перпендикулярно к ней лежит круговое сечение. Требуется

* Оно отстоит на 90° от первого положения угасания.

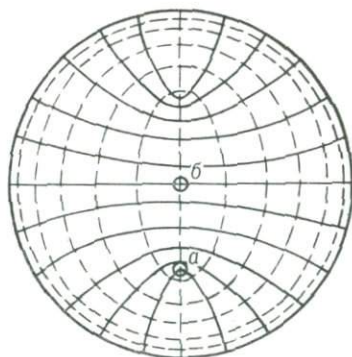
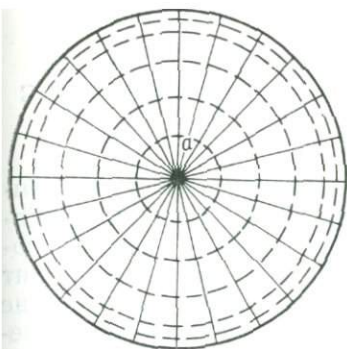


Рис. 27. Проекция шара Бера для одноосного минерала в разрезе, перпендикулярном к оптической оси.

a — нормаль к плоскости шлифа, совпадающая с оптической осью.

Рис. 28. Проекция шара Бера для двуосного кристалла.

a — нормаль к плоскости шлифа, совпадающая с оптической осью; *б* — нормаль, совпадающая с острой биссектрисой (второй частный случай).

отличить в изотропном сечении одноосный минерал от двуосного. Для этого исследуем данное изотропное сечение вращением вокруг оси *I* в обе стороны (на угол $40-50^\circ$):

а) темнота нарушается — двуосный кристалл. Темнота нарушается в общем случае для двуосного кристалла потому, что с осью *I* не совпадает ни одна из осей симметрии индикатрисы двуосного кристалла (см. шары Бера);

б) темнота сохраняется — одноосный кристалл или частный случай двуосного кристалла. В одноосном минерале темнота сохраняется потому, что с осью *I* совпадает *Ng* или *Np* (в зависимости от оптического знака), а с плоскостью симметрии микроскопа — главное сечение оптической индикатрисы (рис. 27). В частном случае для двуосного минерала темнота сохраняется при повороте вокруг оси *I* потому, что ось *Nm* (являющаяся осью симметрии индикатрисы) совмещена с осью *I*, а с плоскостью симметрии микроскопа совмещено сечение *NgNp* (рис. 28, точка *a*).

Для отличия частных случаев в двуосных и одноосных минералах поворачивают вокруг оси *N* на $40-50^\circ$ и проверяют вновь наклонами вокруг оси *I*: если темнота нарушается, минерал двуосный (предварительным поворотом вокруг оси *N* мы вывели ось *Nm* из совмещения с осью *I*); если же темнота сохраняется, минерал одноосный.

Глава IV

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ $Ng - Np$

Методика определения силы двупреломления кристаллов выделена в отдельную главу, так как она содержит обширный и специфический материал, не употребляющийся при определении других кристаллооптических констант на федоровском столике. Сюда относятся, например, описание специальных дополнительных приборов — компенсаторов, определение толщины шлифа и др.

Сила двупреломления $Ng - Np$ прямо пропорциональна разности хода и обратно пропорциональна толщине шлифа, т. е. $Ng - Np = \Delta/d$, где Δ — разность хода, d — толщина шлифа. Для того чтобы определить силу двупреломления минерала, следует:

1) установить на федоровском столике сечение $NgNp$ в положение, перпендикулярное к оптической оси микроскопа A , т. е. совместить с ней ось Nm ;

2) в установленном сечении $NgNp$ измерить разность хода компенсатором Берека (или другим);

3) измерить толщину шлифа (толщину шлифа можно измерить и перед привинчиванием федоровского столика. Измерение должно производиться вблизи того зерна, в котором в дальнейшем будет определяться сила двупреломления);

4) вычислить силу двупреломления $Ng - Np$.

§ 13. УСТАНОВКА СЕЧЕНИЯ $NgNp$ В ПОЛОЖЕНИЕ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЕ К ОСИ A (СОВМЕЩЕНИЕ ОСИ Nm С ОСЬЮ A)

Измерение разности хода производится в разрезах $NgNp$, так как именно в этих разрезах она максимальна. Эти разрезы должны быть приведены на федоровском столике в положение, перпендикулярное к оптической оси микроскопа; для этого ось Nm в двuosных минералах или радиус кругового сечения в одноосных совмещается с осью A . Выше, в разделе об определении плеохроизма по осям Ng и Np , подробно описана техника работы или совмещение оси Nm с осью A (см. рис. 22); здесь лишь кратко это повторим.

*Последовательность работы при совмещении
оси Nm с осью A*

1. Выбирают разрез исследуемого кристалла с наивысшей интерференционной окраской (в этих разрезах ось Nm составляет небольшой угол с осью A); эти разрезы выбирают для

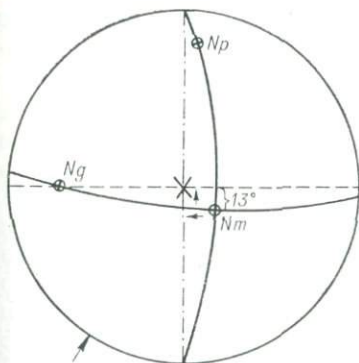


Рис. 29. Стереорафическая проекция сечения $NgNp$ двуосного минерала, выбранного для определения силы двупреломления.

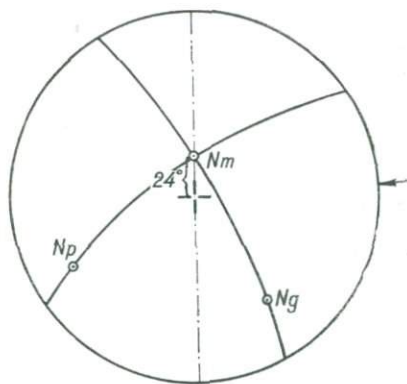


Рис. 30. Приведение оси Nm на вертикальный диаметр сетки Вульфа.

того, чтобы при дальнейшей работе поправки на угол наклона вокруг осей I и H были минимальными.

2. Устанавливают главные сечения индикатрисы и наносят их на стереографическую проекцию.

3. Совмещают ось Nm с оптической осью микроскопа A . Например, I сечение: $N—30^\circ$, $H—20^\circ$, Ng ; II сечение: $N—296^\circ$, $H—13^\circ$, Np . Для совмещения оси Nm с осью A устанавливают на столике по имеющимся координатам сечение Ng (сечение $NmNp$). В этом сечении, как видно из рис. 29, ось Nm образует угол с осью A , равный 13° . Следовательно, для совмещения оси Nm с осью A теперь надо наклонить столик вокруг оси I от себя на 13° (см. § 10). Ось I надо закрепить в неподвижное положение. После указанных операций перпендикулярно к оптической оси микроскопа A будет располагаться сечение $NgNp$, нужное для определения силы двупреломления.

При наклоне шлифа будет увеличиваться его толщина, т. е. путь прохождения луча; вследствие этого при вычислении силы двупреломления надо вводить поправку к углам наклона вокруг осей I и H при совмещении оси Nm с осью A .

Для того чтобы не вводить дважды поправку к углам наклона вокруг осей I и H , удобно определить один угол наклона на стереографической проекции, пользуясь сеткой Вульфа. Для этого вращением листка кальки (или матового стекла) приводят ось Nm на вертикальный (или горизонтальный) диаметр сетки и смотрят, на сколько градусов ось Nm отстоит от ее центра (т. е. от оси A). В данном примере этот угол равен 24° (рис. 30); следовательно, на $\cos 24^\circ = 0,914$ надо умножить в дальнейшем полученную разность хода. Поправка будет той же, если сложить косинусы углов наклона вокруг осей H и I . В приведенном примере (см. рис. 29), таким образом, получится $\cos 20^\circ + \cos 13^\circ = 0,940 + 0,974 = 1,914$.

При малых углах наклона (до 20°) поправкой можно пренебречь, так как она существенно не отражается на результа-

тах измерений, особенно для минералов со слабым двупреломлением. При больших углах наклона, особенно для минералов со средним или сильным двупреломлением, поправки необходимо вводить.

§ 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ХОДА ПРИ ПОМОЩИ КОМПЕНСАТОРА КПК

Для точного определения разности хода служат специальные приборы, носящие названия компенсаторов. Наиболее употребителен в петрографической практике компенсатор Берека, который является видоизменением вращающегося компенсатора, сконструированного впервые В. В. Никитиным (рис. 31). Отечественная промышленность с 1952 г. выпускает кальцитовые поворотные компенсаторы (КПК).

Основной частью компенсатора КПК (рис. 32) является кальцитовая пластинка 3 толщиной около 0,1 мм, вставленная в металлическую опору и вращающаяся вокруг оси 2, расположенной внутри компенсатора параллельно длинной его стороне. Ось 2 соединена с барабаном 1, по которому можно отсчитывать углы наклона вокруг оси 2. Плоскость кальцитовой пластинки перпендикулярна к оптической оси кристалла и, следовательно, при горизонтальном положении двупреломление в ней равно нулю; по длине компенсатора расположена ось N_g . Если вставить компенсатор (без шлифа), находящийся в горизонтальном положении, в тубус микроскопа, то в поле зрения будет виден темный крест, ветви которого ориентированы параллельно окулярным нитям (рис. 33). Вставлять компенсатор КПК в прорезь тубуса микроскопа и вынимать его можно только при таком положении барабана, при котором кальцитовая пластинка находится в горизонтальном положении. Место нуля компенсатора, т. е. отсчет барабана при горизонтальном положении пластинки, определяется по отсчету, который будет соответствовать совмещению центра темного креста с пересечением окулярных

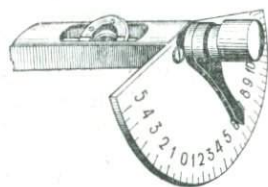


Рис. 31. Вращающийся компенсатор Никитина.

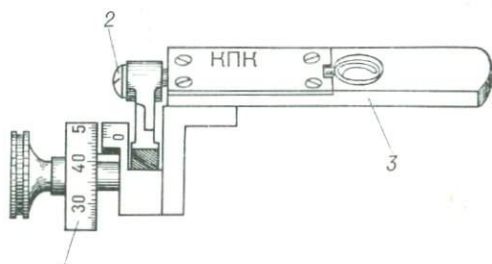


Рис. 32. Компенсатор КПК.

1 — барабан; 2 — ось; 3 — кальцитовая пластинка.

нитей. Обычно место нуля равно 30° или немногим отличается от этого значения.

Вставляя компенсатор необходимо только при горизонтальном положении в нем кальцитовый пластинки, иначе он будет испорчен. При наклоне компенсатора от горизонтального положения как вправо, так и влево, оптическая ось кальцитовый пластинки выходит из вертикального положения, вследствие чего возникает разность хода. При исследовании в скрещенных николях по мере увеличения угла наклона через центр поля зрения проходят последовательно интерференционные цвета четырех-пяти порядков. На этом и основан принцип работы с компенсатором; именно путем наклона кальцитовый пластинки можно создать нужную разность хода* и добиться компенсации в исследуемом кристалле.

Разность хода Δ , возникающая при различных наклонах компенсатора, является функцией угла наклона кальцитовый пластинки компенсатора и ее толщины: $\Delta = Cf(i)$, где $f(i)$ — функция угла наклона компенсатора; она вычислена для различных значений угла наклона (удобнее пользоваться логарифмами этой величины, приведенными в табл. 1); C — постоянная компенсатора, зависящая от толщины кальцитовый пластинки.

Значения C (и $\lg C$) вычисляются обычно заводом, изготовляющим компенсатор, и прилагаются к паспорту компенсатора. Во избежание ошибок в работе рекомендуется постоянную компенсатора вычислить самим. Для этого компенсатор вдвигают в тубус микроскопа (без шлифа) и поворачивают в обе стороны до получения в центре поля зрения чувствительно фиолетового цвета первого порядка, которому соответствует разность хода $\Delta = 550$ нм. Записывают отсчеты, полученные при наклонах вправо i_1 и влево i_2 . Полуразность их $(i_1 - i_2)/2$ будет соответствовать углу наклона, на который нужно повернуть кальцитовый пластинку компенсатора для получения чувствительно фиолетового цвета. Из формулы $\Delta = Cf(i)$, зная Δ и i , легко вычислить постоянную компенсатора и ее логарифм.

Пример вычисления $\lg C$ для компенсатора КПК: $i_1 = 50^\circ$; $i_2 = 20,8^\circ$; $i = (50^\circ - 20,8^\circ)/2 = 14,6^\circ$; $C = \Delta/f(i)$; $\lg C = \lg \Delta - \lg f(i)$; $\lg C = \lg 550 - \lg f(14,6^\circ) = 2,740 - 8,809 = \overline{7,931} = 3,931$ **.

* В пределах указанных четырех-пяти порядков интерференционных цветов, т. е. при силе двупреломления кристалла примерно до 0,075—0,085.

** Чтобы не иметь дело с отрицательными величинами, вместо отрицательных характеристик дается их дополнение до 10.

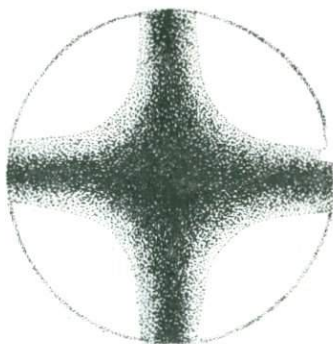


Рис. 33. Вид поля зрения при нулевом положении КПК (без шлифа).

Таблица 1

Логарифмы $f(i)$ к компенсатору КПК

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		4,484	5,086	5,438	5,688	5,882	6,040	6,174	6,290	6,392
1	6,484	6,566	6,642	6,712	6,776	6,836	6,892	6,945	6,994	7,041
2	7,086	7,128	7,169	7,207	7,244	7,280	7,314	7,346	7,378	7,408
3	7,438	4,466	7,494	7,521	7,547	7,572	7,596	7,620	7,643	7,666
4	7,688	7,709	7,730	7,750	7,770	7,790	7,809	7,828	7,846	7,864
5	7,881	7,898	7,915	7,932	7,948	7,964	7,980	7,995	8,010	8,025
6	8,039	8,054	8,068	8,082	8,095	8,109	8,122	8,135	8,148	8,161
7	8,173	8,185	8,198	8,210	8,221	8,232	8,244	8,256	8,268	8,278
8	8,289	8,300	8,310	8,321	8,331	8,341	8,352	8,361	8,371	8,381
9	8,391	8,400	8,410	8,419	8,429	8,438	8,447	8,456	8,465	8,473
10	8,482	8,491	8,499	8,508	8,516	8,524	8,532	8,541	8,549	8,557
11	8,564	8,572	8,580	8,588	8,595	8,603	8,610	8,618	8,625	8,632
12	8,640	8,647	8,654	8,661	8,668	8,675	8,682	8,689	8,695	8,702
13	8,709	8,715	8,722	8,728	8,735	8,741	8,748	8,754	8,760	8,766
14	8,773	8,779	8,785	8,791	8,797	8,803	8,809	8,815	8,820	8,826
15	8,832	8,838	8,843	8,849	8,855	8,860	8,866	8,871	8,877	8,882
16	8,888	8,893	8,898	8,904	8,909	8,914	8,919	8,924	8,929	8,935
17	8,940	8,945	8,950	8,955	8,960	8,965	8,969	8,974	8,979	8,984
18	8,989	8,993	8,998	9,003	9,007	9,012	9,017	9,021	9,026	9,030
19	9,035	9,039	9,044	9,048	9,053	9,057	9,062	9,066	9,070	9,075
20	9,079	9,083	9,087	9,092	9,096	9,100	9,104	9,108	9,112	9,116
21	9,120	9,124	9,128	9,132	9,136	9,140	9,144	9,148	9,152	9,156
22	9,160	9,164	9,168	9,172	9,175	9,179	9,183	9,187	9,190	9,194
23	9,198	9,201	9,205	9,209	9,212	9,216	9,220	9,223	9,227	9,230
24	9,234	9,237	9,241	9,244	9,248	9,251	9,255	9,258	9,262	9,265
25	9,268	9,272	9,275	9,279	9,282	9,285	9,288	9,292	9,295	9,298
26	9,301	9,305	9,308	9,311	9,314	9,318	9,321	9,324	9,327	9,330
27	9,333	9,336	9,339	9,343	9,346	9,349	9,352	9,355	9,358	9,361
28	9,364	9,367	9,370	9,373	9,376	9,379	9,382	9,384	9,387	9,390
29	9,393	9,396	9,399	9,402	9,405	9,407	9,410	9,413	9,416	9,419
30	9,421	9,424	9,427	9,430	9,432	9,435	9,438	9,441	9,443	9,446
31	9,448	9,451	9,454	9,456	9,459	9,462	9,464	9,467	9,469	9,472

Последовательность работы при определении разности хода компенсатором КПК

1. Выбирают разрез минерала с наивысшей интерференционной окраской, приводят его на центр нитей; устанавливают главные сечения на столике и наносят их на стереографическую проекцию. Совмещают ось Nt с осью A (см. § 13) и закрепляют ось I ; в таком положении зерно будет темным, так как одно из главных сечений совмещено с плоскостью симметрии микроскопа.

2. Поворачивают столик микроскопа вокруг оси A на 45° до максимального просветления зерна и закрепляют его в таком

положении. Затем столик надо повернуть на 45° против часовой стрелки, тогда ось Np минерала будет совмещена с осью Ng компенсатора.

3. Вставляют компенсатор (при горизонтальном положении) и, поворачивая его в обе стороны, добиваются компенсации. При этом необходимо диафрагмировать микроскоп. Момент компенсации будет характеризоваться обычно появлением темной интерференционной окраски минерала (абсолютной компенсации обычно не происходит вследствие дисперсии дупреломления). Записывают углы наклона вправо (i_1) и влево (i_2), которые соответствуют моментам компенсации (измерения эти следует производить многократно и брать среднее значение). Угол поворота кальцитовой пластинки компенсатора от ее горизонтального положения $i = (i_1 - i_2) / 2$. В случае прямой параллельности кристаллической пластинки и компенсатора, по длине которого располагается ось Ng , компенсация не получается; для того чтобы добиться компенсации, столик микроскопа надо повернуть вокруг оси A на 90° от того положения, при котором пытались получить компенсацию.

4. Получив угол наклона i , соответствующий положению компенсатора, и зная постоянную компенсатора, вычисляют разность хода минерала Δ ; удобнее всего для этого прологарифмировать выражение $\Delta = f(i)C$.

Пример. $\lg C = 3,930$ (вычислено заранее); $i_1 = 40,5^\circ$; $i_2 = 19,5^\circ$; $i = (40,5^\circ - 19,5^\circ) / 2 = 10,5^\circ$.

По табл. 1 определяем $\lg 10,5^\circ = 8,524$; $\lg \Delta = 8,524 + 3,930 = 12,454$ (т. е. 2,454). В табл. 2 находим антилогарифм к мантиссе 454, равный 284,5, который и будет соответствовать разности хода Δ , выраженной в нанометрах (место запятой в данном случае определяется по значащей характеристике соответствующего логарифма, которая в этом примере равна 2 (т. е. 12—10), и, следовательно, количество знаков, отделяемых слева направо, будет $2+1=3$; если бы характеристика была равна 13, т. е. 13—10=3, то следовало бы отделить четыре знака и т. д.). Полученную разность хода Δ умножают на косинус угла наклона, равный в данном примере 0,914: $\Delta = 284,5 \cdot 0,914 = 260,03$.

§ 15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ШЛИФА

Определение толщины шлифа d можно производить двумя способами: а) по пылинкам, б) по силе дупреломления кварца или другого минерала, дупреломление которого известно.

Определение толщины шлифа по пылинкам

Исследование этим методом производится на плоском столике.

Сфокусировав на имеющиеся на верхней и нижней поверхности шлифа пылинки и взяв разность отсчетов микрометрен-

Таблица 2
Логарифмы чисел

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	000	004	009	013	017	021	025	029	033	037
11	041	045	049	053	057	061	064	068	072	076
12	079	083	086	090	093	097	100	104	107	111
13	114	117	121	124	127	130	134	137	140	143
14	146	149	152	155	158	161	164	167	170	173
15	176	179	181	185	188	190	193	196	199	201
16	204	207	210	212	215	217	220	223	225	228
17	230	233	236	238	241	243	246	248	250	253
18	255	258	260	262	265	267	270	272	274	276
19	279	281	283	286	288	290	292	294	297	299
20	301	303	305	307	310	312	314	316	318	320
21	322	324	326	328	330	332	334	336	338	340
22	342	344	346	348	350	352	354	356	358	360
23	362	364	365	367	369	371	373	375	377	378
24	380	382	384	386	387	389	391	393	394	396
25	398	400	401	403	405	407	408	410	412	413
26	415	417	418	420	422	423	425	427	428	430
27	431	433	435	436	438	439	441	442	444	446
28	447	449	450	452	453	455	456	458	459	461
29	462	464	465	467	468	470	471	473	474	476
30	477	479	480	481	483	484	486	487	489	490
31	491	493	494	496	497	498	500	501	502	504
32	505	507	508	509	511	512	513	515	516	517
33	519	520	521	522	524	525	526	528	529	530
34	531	533	534	535	537	538	539	540	542	543
35	544	545	547	548	549	550	551	553	554	555
36	556	558	559	560	561	562	563	565	566	567
37	568	569	571	572	573	574	575	576	577	579
38	580	581	582	583	584	585	587	588	589	590
39	591	592	593	594	595	597	598	599	600	601
40	602	603	604	605	606	607	609	610	611	612
41	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622
42	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632
43	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642
44	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652
45	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662
46	663	664	665	666	667	667	668	669	670	671
47	672	673	674	675	676	677	678	679	679	680
48	681	682	683	684	685	686	687	688	688	689
49	690	691	692	693	694	695	695	696	697	698
50	699	700	701	702	702	703	704	705	706	707
51	708	708	709	710	711	712	713	713	714	715
52	716	717	718	718	719	720	721	722	723	723
53	724	725	726	727	728	728	729	730	731	732
54	732	733	734	735	736	736	737	738	739	740
55	740	741	742	743	744	744	745	746	747	747

Продолжение табл. 2

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
56	748	749	750	751	751	752	753	754	754	755
57	756	757	757	758	759	760	760	7.1	762	763
58	763	764	765	766	766	767	768	769	769	770
59	771	772	772	773	774	775	775	776	777	777
60	778	779	780	780	781	782	782	783	784	785
61	785	786	787	787	788	789	790	790	791	792
62	792	793	794	794	795	796	797	797	798	799
63	799	800	801	801	802	803	803	804	805	805
64	806	807	808	808	809	810	810	811	812	812
65	813	814	814	815	816	816	817	818	818	819
66	820	820	821	822	822	823	823	824	825	825
67	826	827	827	828	829	829	830	831	831	832
68	833	833	834	834	835	836	836	837	838	838
69	839	839	840	841	841	842	843	843	844	844
70	845	846	846	847	848	848	849	849	850	851
71	851	852	852	853	854	854	855	856	856	857
72	857	858	859	859	860	860	861	862	862	863
73	863	864	865	865	866	866	867	867	868	869
74	869	870	870	871	872	872	873	873	874	874
75	875	876	876	877	877	878	879	879	880	880
76	881	881	882	882	883	884	884	885	885	886
77	886	887	888	888	889	889	890	890	891	892
78	892	893	893	894	894	895	895	896	897	897
79	898	898	899	899	900	900	901	901	902	903
80	903	904	904	905	905	906	906	907	907	908
81	908	909	910	910	911	911	912	912	913	913
82	914	914	915	915	916	916	917	917	918	919
83	919	920	920	921	921	922	922	923	923	924
84	924	925	925	926	926	927	927	928	928	929
85	929	930	930	931	931	932	932	933	933	934
86	934	935	936	936	937	937	938	938	939	939
87	940	940	941	941	942	942	942	943	943	944
88	944	945	945	946	946	947	947	948	948	949
89	949	950	950	951	951	952	952	053	953	954
90	954	955	955	956	956	957	957	958	958	959
91	959	960	960	960	961	961	962	962	963	963
92	964	964	965	965	966	966	967	967	968	968
93	968	969	969	970	970	971	971	972	972	973
94	973	974	974	975	975	975	976	976	977	977
95	978	978	979	979	980	980	980	981	981	982
96	982	983	983	984	984	985	985	985	986	986
97	987	987	988	988	989	989	989	990	990	991
98	991	992	992	993	993	993	994	994	995	995
99	996	996	997	997	997	998	998	999	999	1000

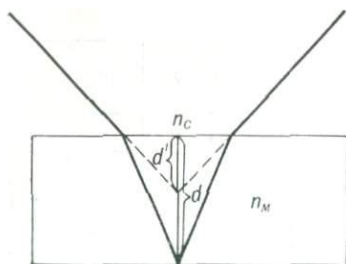


Рис. 34. Соотношения между видимой толщиной шлифа d' и истинной d .

n_m и n_c — показатели преломления соответственно минерала и среды.

истинной и обратно. Если фокусирование производить в воздухе, то $n_c = 1$ и, следовательно, $d = d' n_m$.

Точнее производится фокусировка наиболее сильным из имеющихся объективов, если поместить на него каплю иммерсионной жидкости, показатель преломления которой наиболее близок к показателю преломления исследуемого минерала; тогда видимая толщина шлифа будет равна истинной. Показатель преломления минерала можно брать с точностью до десятых долей; например, для амфиболов $n_m = 1,6$; для моноклиновых пироксенов $n_m = 1,7$. Если исследуются минералы, показатели преломления которых близки к 1,5, например щелочные полевые шпаты, то толщину шлифа можно определять не вводя поправок, поместив на объектив каплю кедрового масла с $n_c = 1,510$ или глицерина с $n_c = 1,47$.

Последовательность работы при определении толщины шлифа по пылинкам

1. На плоском столике на центр нитей ставится исследуемый минерал.

2. Берется иммерсионный объектив (или объектив $60\times$) и иммерсионная жидкость с показателем преломления наиболее близким к показателю преломления минерала**. Фокусируют микроскоп на пылинки нижней поверхности зерна и отмечают отсчет барабана микрометренного винта. Далее фокусируют на пылинки верхней поверхности зерна и также отмечают отсчет.

* Цена деления микрометренного винта (1 интервал) равна обычно 0,002 или 0,001 мм. Цена деления или обозначается на штативе микроскопа, непосредственно у барабана микрометренного винта, или указывается в паспорте микроскопа.

** Если такой жидкости нет, то можно взять глицерин; в этом случае вводят поправку, умножая полученный результат на отношение показателя преломления минерала к показателю преломления глицерина.

Разность отсчетов барабана микрометричного винта, умноженная на цену его деления, даст видимую толщину шлифа в миллиметрах. Для повышения точности необходимо несколько раз произвести измерение видимой толщины шлифа и из полученных данных вычислить среднее арифметическое.

Фокусировку на пылинки для получения кажущейся толщины шлифа производят следующим образом: не глядя в тубус, опускают его вниз так, чтобы объектив касался шлифа; далее, поднимая тубус микрометричным винтом, фокусируют на пылинки нижней поверхности зерна; затем продолжают поднимать тубус до ясной видимости шлифа и далее еще выше, до максимальной видимости пылинок на верхней поверхности зерна. При проверке можно или повторить указанную операцию, поднимая при фокусировке тубус все время вверх, или же опуская тубус микрометричным винтом все время вниз, фокусируя сначала на пылинки верхней поверхности зерна, затем на ясную видимость шлифа и, наконец, на нижние пылинки (при этом приеме надо следить за тем, чтобы не раздавить шлиф). Указанное правило фокусировки устраняет так называемый «мертвый ход» микрометричного винта и тем самым повышает точность измерения.

3. В том случае, если измерения производились с иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой равен показателю преломления минерала, видимая толщина шлифа равна истинной.

4. Если измерения проводились с глицерином, кедровым или касторовым маслом, то $d = d'n_m/1,50$, где d' — видимая толщина шлифа, полученная по разности отсчетов барабана винта, n_m — показатель преломления исследуемого минерала.

Определение толщины шлифа по кварцу

Если в изучаемом шлифе имеются зерна кварца (или другого минерала с известным двупреломлением), то весьма удобно вычислять толщину шлифа по формуле $d = \Delta / (Ng - Np)$; двупреломление кварца $Ng - Np = 0,009$, а Δ может быть измерена компенсатором. Разрезы кварца, нужные для определения, следует брать или параллельные оптической оси, или близкие к ним, так как при больших углах наклона, при совмещении оси Np с осью A , приходится брать поправку — умножать разность хода на косинус углов наклона вокруг осей H и I .

Последовательность работы при определении толщины шлифа по кварцу

1. Выбирают в шлифе зерно кварца с наивысшей интерференционной окраской. Оно должно располагаться вблизи исследуемого минерала, так как шлиф в различных участках мо-

жет быть несколько различной толщины. Устанавливают главное и круговое сечения и наносят их на стереографическую проекцию. Наклоном вокруг оси I совмещают радиус кругового сечения Np с оптической осью микроскопа, закрепляют винт оси I .

2. Поворачивают столик микроскопа на 45° и добиваются компенсации, наклоняя кальцитовую пластинку компенсатора в обе стороны. Берут полуразность полученных углов и, зная $f(i)$ и C , вычисляют разность хода Δ .

3. Вычисляют $d = \Delta / 0,009$; полученное частное определит толщину шлифа в нанометрах; для перевода ее в миллиметры следует полученное значение уменьшить в миллион раз. Например, если $\Delta = 360$ нм, то $d = 360 : 0,009 = 34000$ нм $= 0,034$ мм.

§ 16. ВЫЧИСЛЕНИЕ СИЛЫ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ $Ng - Np$

Установив нужный разрез и измерив в нем разность хода, вычислив толщину шлифа одним из указанных способов, определяют силу двупреломления по формуле $Ng - Np = \Delta / d$.

Пусть, например, $\Delta = 260,03$ нм, $d = 0,034$ мм. Отсюда $Ng - Np = 0,0000260$ мм $: 0,034$ мм $= 0,0076$.

Последовательность работы при окончательном вычислении двупреломления

1. Выбирают разрез минерала с наивысшей интерференционной окраской. Устанавливают главные сечения, наносят их на стереографическую проекцию и совмещают ось Nm с осью A .

2. Поворачивают столик на 45° до максимального просветления зерна и определяют углы наклона кальцитовой пластинки i_1 и i_2 , соответствующие компенсации.

3. По таблицам компенсатора вычисляют разность хода $\Delta = C f(i)$, пользуясь при этом логарифмами.

4. Одним из описанных выше способов определяют толщину шлифа (определение толщины шлифа методом пылинок надо производить на плоском столике).

5. Определив Δ и d , вычисляют силу двупреломления по формуле $Ng - Np = \Delta / d$; при этом величины Δ и d надо привести к одинаковым мерам длины (т. е. превратить в миллиметры). Если при установке сечения $NgNp$ в положение, перпендикулярное к оси A , т. е. при совмещении оси Nm с осью A , были произведены наклоны вокруг осей H и I , большие чем 20° , то на косинус углов наклона вокруг этих осей следует умножить полученное значение двупреломления (см. § 13).

§ 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ $Ng - Nm$ И $Nm - Np$ В ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

В вышеприведенных параграфах речь шла об определении максимального двупреломления кристалла $Ng - Np$. Для двуос-

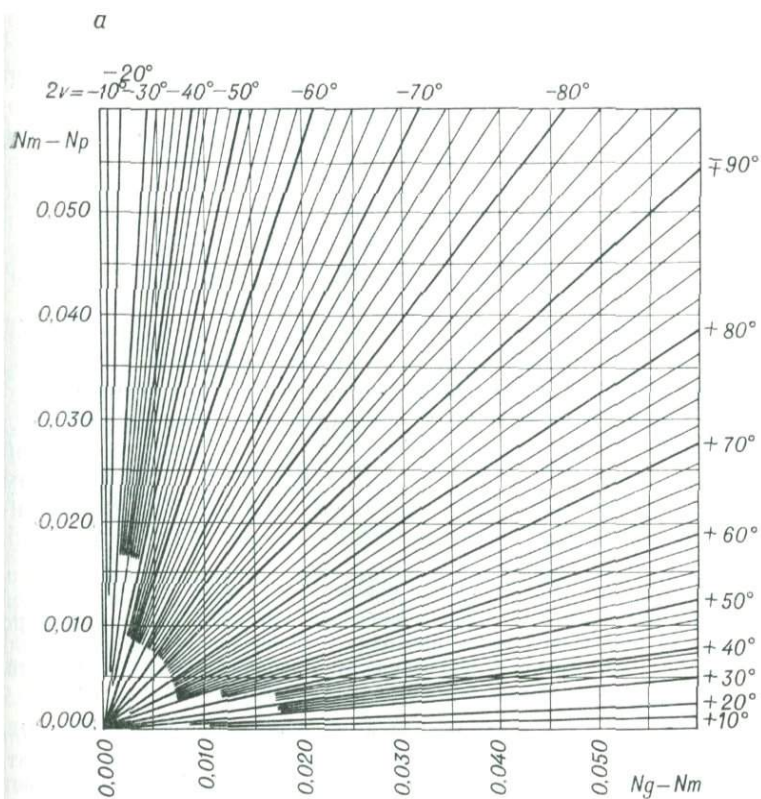


Рис. 35. Зависимость угла оптических осей от двупреломления (по А. К. Болдыреву) (а), пример определения 2ν , когда известны $Ng - Nm$ и $Nm - Np$ (б) и пример определения $Ng - Nm$ и $Nm - Np$, когда известны $Ng - Np$ и 2ν (в).

ных кристаллов иногда представляет интерес определение не только максимального двупреломления $Ng - Np$, но и силы двупреломления двух других главных сечений оптической индикатрисы.

Сила двупреломления этих сечений $Ng-Nm$ и $Nm-Np$ может быть непосредственно измерена в сечениях, перпендикулярных к осям Ng и Np . Для этого выбирают сечения, перпендикулярные к осям Ng' и Np' *, строят стереографические проекции, при помощи которых определяют угол между осью Ng (или Np) и осью A . Наклоном вокруг оси I на этот угол совмещают ось Ng (или Np) с осью A , т. е. устанавливают главное сечение $NmNp$ или $NgNm$ перпендикулярно к оптической оси микроскопа A . После этого, пользуясь компенсатором, определяют силу двупреломления названных сечений способом, описанным выше (см. § 13—16).

Помимо непосредственного определения силы двупреломления главных сечений на федоровском столике эти константы можно определить графически по специальным диаграммам, составленным А. К. Болдыревым; эти диаграммы связывают угол оптических осей и двупреломление главных сечений оптической индикатрисы [38, с. 432—456]. График зависимости между углом оптических осей $2v$ и двупреломлением главных сечений оптической индикатрисы двуосных кристаллов приведен на рис. 35.

Пример 1. Известны $Ng-Nm$ и $Nm-Np$; требуется определить $2v$. Для этого откладывают значение $Ng-Nm$ по оси абсцисс и из полученной точки проводят вертикальную линию. Значение $Nm-Np$ откладывают по оси ординат и из полученной точки проводят горизонтальную линию, параллельную оси абсцисс. Точка пересечения этих линий лежит на прямой, идущей от начала координат и соответствующей искомому углу $2v$ (рис. 35, б).

Пример 2. Известны $Ng-Np$ и $2v$. Требуется определить $Ng-Nm$ и $Nm-Np$; для этого откладывают значение $Ng-Np$ как по оси ординат, так и по оси абсцисс. Прямая, соединяющая концы этих отрезков, пересекает линию $2v$ в точке, координаты которой соответственно равны $Ng-Nm$ и $Nm-Np$ (рис. 35, в).

Пример 3. Известны $Ng-Nm$ и $2v$. Требуется определить $Nm-Np$. Для этого откладывают $Ng-Nm$ по оси абсцисс и от полученной точки следуют по вертикали до линии, соответствующей $2v$; от точки пересечения поворачивают по горизонтали по направлению к оси ординат, на которой и читают значение $Nm-Np$ (рис. 35, в).

Глава V

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАГИОКЛАЗОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

§ 18. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ДИАГРАММА НИКИТИНА

Исследование плагиоклазов имеет важное значение в связи с их широким распространением в горных породах различного генезиса. Их физические (включая кристаллооптические) свойства зависят от химического состава и сте-

* Ng' и Np' — сечения близкие соответственно к Ng и Np .

пени упорядоченности их структуры; последняя обусловлена распределением атомов Si и Al по кристаллографическим позициям.

По степени упорядоченности выделяют неупорядоченные, упорядоченные и промежуточные разновидности. Первые представляют собой непрерывный изоморфный ряд от высокого альбита до анортита. Упорядоченные разновидности характеризуются наличием областей распада твердого раствора (перистериты), вызывающих явление иризации. Однако размер отдельных фаз или доменов не превышает десятков, реже сотен ангстрем и в оптическом отношении они ведут себя как гомогенные кристаллы. Их двухфазовая природа может быть установлена лишь при помощи электронного микроскопа. Для определения состава плагиоклазов наряду с химическим анализом (включая микронзондовый) широко используются различные кристаллооптические методы: иммерсия, измерение на плоском столике ориентировки элементов оптической индикатрисы относительно кристаллографических элементов, федоровский метод.

При изучении структурного состояния плагиоклазов, так же как и щелочных полевых шпатов (см. § 26), ведущая роль в настоящее время принадлежит рентгеноструктурным определениям, отличающимся особой точностью и достоверностью [8, 68, 69 и др.]. Однако и по сей день федоровский метод остается универсальным при комплексном определении химического состава и структурного состояния плагиоклазов, законов их двойникования, характера зональности.

Обычно отдельно рассматриваются высокотемпературные плагиоклазы, встречающиеся в экстрезивных и гипабиссальных породах, и низкотемпературные, являющиеся составной частью глубинных магматических пород и большинства метаморфических. Установлено, что между высокотемпературными и низкотемпературными модификациями имеются переходные типы с промежуточной степенью упорядочения. Ниже приводится описание работы по исследованию плагиоклазов по данным Е. С. Федорова и В. В. Никитина; ими в основном изучались плагиоклазы глубинных магматических пород и гнейсов, т. е. наиболее упорядоченные модификации. (Определению на федоровском столике состава высокотемпературных плагиоклазов и степени упорядочения посвящен § 24.) Указанными исследователями была проделана трудоемкая работа по исследованию полевых шпатов и установлению взаимосвязи между химическим составом и положением оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим элементам.

Практически работа производилась следующим образом: на стереографическую проекцию наносилась оптическая индикатриса для химически исследованных плагиоклазов и определялась ориентировка осей Ng , Nm , Np для каждого плагиоклаза по отношению к определенным кристаллографическим элемен-

там, например к спайности по 010 и другим элементам. По углам, полученным между $\perp 010$ и осями индикатрисы Ng , Nm и Np , каждый исследованный плагиноклаз наносился в виде точки на специальную градусную сеть. Такому изучению подвергались плагиноклазы различного состава — от кислых до основных, а также существенно калиевые полевые шпаты; при этом определялись и наносились на эту градусную сеть значения координат (углов) перпендикуляров спайности, двойниковой оси и другие по отношению к осям Ng , Nm и Np . Для каждого кристаллографического элемента на диаграмме получался ряд точек, которые располагались в виде вытянутой полосы. По полученным точкам строились линии для $\perp 010$, $\perp 001$ и др. Эти линии являются средним геометрическим местом для значений углов осей Ng , Nm , Np с $\perp 010$ (и другими элементами) и в сущности представляют собой полосы.

Е. С. Федоров для нанесения полученных результатов пользовался круговой стереографической сеткой с ценой деления 5° . С экватором круга совмещена ось Ng , с вертикальным диаметром — Np и с центром сетки — Nm . На рис. 36 приведена такая стереографическая сетка, на которой нанесены полюсы граней плагиноклазов, отнесенные к осям оптической индикатрисы. Такие же диаграммы составлены Е. С. Федоровым для осевых и сложных законов.

Для пользования этой диаграммой надо измерить на сетке Вульфа углы (угловые координаты), образуемые осями оптической индикатрисы Ng , Nm и Np с полюсами спайности, плоскостями ограничения, с двойниковой осью и т. д. Для этого на стереографическую проекцию наносят оптическую индикатрису, а также полюс спайности (или другой кристаллографический элемент) и измеряют углы между ними. По полученным координатам, пользуясь диаграммой Федорова, можно определить номер плагиноклаза, символ грани, по которой проходит спайность, или ограничение кристалла и закон двойникования. Неудобством диаграммы Федорова является то, что, проводя малые круги вдоль осей Ng , Nm и Np (радиусом, соответствующим полученным координатам), на диаграмме получают четыре точки, из которых надо выбрать одну, соответствующую исследуемому плагиноклазу; при выборе следует руководствоваться теми же соображениями, которые изложены ниже в § 22, касающемся определения по диаграмме Никитина законов двойникования плагиноклазов. Например, получены следующие угловые координаты: $P.cn.Ng=27^\circ$; $Nm=65^\circ$; $Np=80^\circ$. По этим координатам на диаграмме получаем четыре точки, обозначенные на рис. 36 номерами *I*, *II*, *III* и *IV*; из этих четырех точек лишь одна (*I*) попадает вблизи кривой $\perp 010$; остальные падают в пустые места диаграммы. По указанной кривой определяют плагиноклаз № 49, а символ грани, по которой проходит спайность, как 010.

В настоящее время наиболее употребительной является диаграмма Никитина (рис. 37), представляющая собой один квадрант федоровской стереографической сетки, в котором и расположены все кривые. На этой диаграмме нанесены деления, по которым координаты полюса спайности (или координаты какого-либо другого кристаллографического элемента) относительно оси Np откладываются от Np диаграммы по внешнему кругу проекции, координаты относительно оси Nm — от центра сетки (Nm) по вертикальному радиусу, координаты относительно оси Ng — по горизонтальному радиусу к центру сетки (расстояния между Ng и Nm , Ng и Np , Nm и Np равны 90°). Измерив на стереографической проекции (пользуясь сеткой Вульфа) углы между Ng , Nm и Np и, например, полюсом спайности по 010, наносим их на диаграмму Никитина и получаем точку, определенную для каждого номера плагиоклаза по отношению к взятому кристаллографическому элементу. При соединении точек, соответствующих различным плагиоклазам на диаграмме Никитина, так же как на круговой диаграмме Федорова, получается кривая $\perp 010$, которая представляет собой геометрическое место точек полюсов грани 010 для различных номеров плагиоклазов.

На диаграмме Никитина нанесены все главные кристаллографические элементы плагиоклазов и существенно калиевых полевых шпатов, отнесенные к осям Ng , Nm и Np оптической индикатрисы.

Плагиоклазы можно определять и по координатам плоскостей ограничения. Методика определения аналогична таковой при определении плагиоклаза по координатам плоскостей спайности и сводится к определению ориентировки оптической индикатрисы по отношению к полюсу плоскостей ограничения. К определению состава плагиоклаза при помощи плоскостей ограничения приходится прибегать только в том случае, если не наблюдается ни спайности, ни двойников, так как при установке плоскостей ограничения на федоровском столике нельзя добиться большой точности.

§ 19. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАГИОКЛАЗОВ ПО КООРДИНАТАМ ПЛОСКОСТЕЙ СПАЙНОСТИ 010 И 001

В плагиоклазах чаще всего развита спайность по 010 и 001. Эту спайность обычно используют при определении номера плагиоклаза. Менее совершенная спайность иногда наблюдается по плоскостям 110, $1\bar{1}0$. Определив углы между полюсом спайности и осями индикатрисы, можно по диаграмме Никитина определить номер плагиоклаза и символ той грани, по которой идет спайность.

Последовательность работы при определении плагиоклазов по координатам плоскостей спайности

1. Выбирают разрез плагиоклаза с отчетливо видимой спайностью.

2. Устанавливают индикатрису плагиоклаза (или индикатрису одного индивида двойника для сдвойникованных кристаллов, у которого лучше видна спайность) и наносят ее на стереографическую проекцию.

3. Устанавливают спайность и наносят на стереографическую проекцию полюса спайности — *П. сп.*

4. Пользуясь сеткой Вульфа, определяют по стереографической проекции угловые координаты *П. сп.* относительно осей *Ng*, *Nm* и *Np*. Например, *П. сп. Ng* = 30°, *Nm* = 65°, *Np* = 75°.

5. По полученным координатам на диаграмме Никитина получают точку, которая падает на кривую $\perp 010$ (или вблизи нее) между цифрами 5 и 6, т. е. между номерами плагиоклаза 50 и 60. Плагиоклаз определяется интерполяцией и соответствует № 58. Индекс $\perp 010$, подписанный в крайних точках кривой, указывает, что взятая спайность является спайностью по 010, так как точка упала на кривую $\perp 010$, а кривая второй спайности, развитой в плагиоклазах (кривая $\perp 001$), далеко отстоит от полученной точки.

Если бы точка, полученная по координатам полюса неизвестной спайности с осями *Ng*, *Nm*, *Np*, попала на кривую $\perp 001$ или вблизи нее, то неизвестная спайность являлась бы спайностью по 001, и номер плагиоклаза определялся бы по данной кривой. Если точка, полученная по координатам полюса спайности, попадает на пересечение (или близ него) кривых $\perp 010$ и $\perp 001$, то для выяснения номера плагиоклаза и индекса грани, по которой проходит спайность, следует произвести дополнительные исследования (см. § 22).

Для повышения точности определения плагиоклаза в сдвойникованных кристаллах следует измерять координаты полюса спайности по отношению к осям оптической индикатрисы для одного индивида двойника, а затем координаты полюса спайности, наблюдающейся в другом индивиде двойника, и брать среднее арифметическое. При определении плагиоклазов по отношению к спайности можно пользоваться лишь кривыми $\perp 010$ и $\perp 001$ и иногда $\perp 110$ и $\perp \bar{1}\bar{1}0$. При определении точка редко попадает непосредственно на кривую, а обычно вблизи нее.

§ 20. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАГИОКЛАЗОВ ПО ОРИЕНТИРОВКЕ ОСЕИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ К ЭЛЕМЕНТАМ ДВОЙНИКОВАНИЯ

Основные элементы двойников и законы двойникования

Прежде чем приступить к изложению метода определения плагиоклазов по двойникам, следует напомнить об основных элементах двойников и о законах двойникования.

Двойниковая ось Do — это направление, вокруг которого один индивид двойника повернут на 180° относительно другого. Двойниковой осью у плагноклазов бывают перпендикуляры к граням 010, 001, реже 021 и $0\bar{2}1$, ребра кристаллов, являющиеся кристаллографическими осями [100], [010], [001], и перпендикуляры к этим ребрам, лежащие в плоскостях 010 и 001.

«Важным признаком двойниковой оси является то ее свойство, что если такую двойниковую ось совместить с осью микроскопа или с тем или другим перпендикулярным к ней направлением, лежащим в плоскостях поляризации николей, то оба неделимых одинаково освещены и делаются неразличимыми» [38, с. 768]. При вращении вокруг двойниковой оси двойниковая структура не появляется.

Двойниковая плоскость — это плоскость симметрии двойника, перпендикулярная к двойниковой оси. Если двойниковая плоскость совмещена с плоскостью симметрии микроскопа (Do , следовательно, с осью I), то при наклонах вокруг оси I двойниковая структура не видна. Если Do совместить с осью A , т. е. двойниковая плоскость будет перпендикулярна к оптической оси микроскопа, то двойниковая структура не будет появляться при повороте вокруг оси A .

Плоскость срастания (плоскость двойникового срастания) — это плоскость, по которой срастаются индивиды двойника. Плоскостью срастания являются обычно грани 010, 001, реже 021, $0\bar{2}1$ и так называемое ромбическое сечение RS . След пересечения плоскости срастания с плоскостью шлифа называется двойниковым швом. В том случае, если плоскость срастания совмещена с плоскостью симметрии микроскопа и, следовательно, перпендикулярна к плоскости столика микроскопа, двойниковый шов обнаруживается в виде тонкой линии, не смещающейся при фокусировке микроскопа. Плоскость срастания устанавливается так же, как плоскости спайности.

Плоскость срастания может: 1) совпадать с двойниковой плоскостью, т. е. являться перпендикулярной к двойниковой оси (для законов граней); 2) быть перпендикулярной к двойниковой плоскости (для законов осевых и сложных). В последнем случае двойниковая ось лежит в плоскости срастания. Осевые и сложные законы называют законами второго типа [33].

ЗАКОНЫ ДВОЙНИКОВАНИЯ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ

Законы граней. Для законов граней плоскостью срастания является грань кристалла, а Do перпендикулярна к этой грани. В законах грани двойниковая плоскость совпадает с плоскостью срастания. При совмещении плоскости срастания с плос-

костью симметрии микроскопа (двойниковый шов при этом виден в виде четкой тонкой трещины) и вращении вокруг оси I , с которой совмещена Do , двойниковая структура не видна и сдвойникованный плагиоклаз ведет себя как монокристалл. На диаграмме Никитина законы граней изображены в виде кривых черного цвета.

Законы осей. В законах осей двойниковой осью является одно из ребер кристалла, являющихся кристаллографической осью, т. е. $[100]$, $[010]$ или $[001]$. Двойниковая ось лежит в плоскости срастания, двойниковая плоскость и плоскость срастания взаимно перпендикулярны.

Характерным отличием от законов граней является то, что при совмещении плоскости срастания с плоскостью симметрии микроскопа (двойниковый шов при этом представлен четкой линией) и наклонах вокруг оси I двойниковая структура, выражающаяся в неодинаковой интерференционной окраске двойников, сохраняется. На диаграмме Никитина законы осей изображены синими кривыми.

Сложные законы. В сложных законах Do лежит в плоскости срастания и является перпендикуляром к одному из ребер кристалла (т. е. $\perp[100]$, $\perp[010]$ или $\perp[001]$), лежащему в данной плоскости. Плоскостями срастания являются 010 или 001 . Например, в альбит-карлсбадском двойнике Do перпендикулярна к $[001]$ в плоскости 010 , а плоскостью срастания является 010 (рис. 38).

При совмещении плоскости срастания с плоскостью симметрии микроскопа и наклонах вокруг оси I двойниковая структура сохраняется. Этим сложные законы отличаются от законов граней, но не от законов осей. На диаграмме Никитина сложные законы изображены в виде красных кривых, сплошных и штриховых.

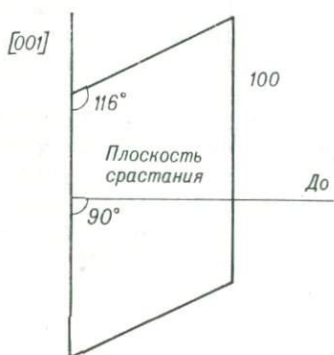


Рис. 38. Схема расположения двойниковой оси $\perp[001]$ в альбит-карлсбадском законе.

В табл. 3 приведены главные законы двойникования плагиоклазов. Частота встречаемости различных законов двойникования плагиоклазов совершенно неодинакова. Наиболее распространен в плагиоклазах альбитовый закон, за ним следует карлсбадский, сложный альбит-карлсбадский, периклиновый. Остальные законы встречаются довольно редко и должны быть тщательно проверены в каждом отдельном случае.

В. Н. Лодочников указывает, что манебахские и бавенские двойники, сравнительно частые

Таблица 3

Наиболее распространенные законы двойникования полевых шпатов

Тип законов	Двойниковая ось	Плоскость срастания		Название закона	Примечания
Законы граней	$\perp 010$	В то же время двойниковая плоскость	010	Альбитовый	Очень част для плагиоклазов. Обычно полисинтетические двойники
	$\perp 001$		001	Манебахский	Част для калиевых полевых шпатов. Обычно простые двойники
	$\perp 021$		021	Бавенский (левый)	Часты у калиевых полевых шпатов, значительно реже у плагиоклазов. Обычно простые двойники
	$\perp 0\bar{2}1$		021	Бавенский (правый)	
Законы осей	[001]	Грани из зоны [001], обычно 010	Карлсбадский	Часто встречается для калиевых полевых шпатов и плагиоклазов. Обычно простые двойники	
	[010]	Ромбическое сечение RS, 001*	Периклиновый (аклиновый)	Част для плагиоклазов и микроклина. Обычно полисинтетические двойники	
	[100]	Грани из зоны [100], обычно 010	Эстерель	Распространен ограниченно	
Сложные законы	$\frac{\perp [001]}{010}$	010	Альбит-карлсбадский	Част для плагиоклазов, полисинтетические двойники	
	$\frac{\perp [010]}{001}$	001	Манебах-периклиновый	Встречается для плагиоклазов	
	$\frac{\perp [100]}{010}$	010	Альбит-эстерель	Сравнительно редок	
	$\frac{\perp [100]}{001}$	001	Манебах-эстерель	То же	

* Периклиновый закон, имеющий плоскость срастания 001, называют аклиновым.

для существенно калиевых полевых шпатов, в плагиоклазах встречаются крайне редко [24, § 394]. Однако, по данным Л. А. Чайка, бавенский закон двойникования весьма обычен для плагиоклазов основных пород района Таймыра.

Определение состава плагиоклаза по координатам двойниковой оси

У различных плагиоклазов ориентировка осей оптической индикатрисы по отношению к элементам двойникования (двойниковой оси, двойниковой плоскости, плоскости срастания) меняется. Следовательно, зная координаты двойниковой оси по отношению к осям Ng , Nm , Np , можно определить состав плагиоклаза.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДВОЙНИКОВОЙ ОСИ ГРАФИЧЕСКИМ ПУТЕМ

При всех законах двойникования оптические индикатрисы обоих индивидов (или ряда сдвойникованных индивидов при полисинтетическом двойниковании) располагаются симметрично относительно Do и двойниковой плоскости. Рядом исследователей было выработано несколько способов нахождения Do графическим путем. Все эти построения основываются на том, что двойниковая плоскость является плоскостью симметрии двойника. Полученную графическим путем Do всегда следует проверять практически.

Последовательность работы при определении Do графическим путем

1. Устанавливают и наносят на стереографическую проекцию индикатрисы обоих индивидов; если плагиоклаз сдвойникован полисинтетически, то под «одним индивидом» понимается «одна система индивидов двойника». Рекомендуются при нанесении индикатрис пользоваться цветными карандашами. Оси индикатрисы первого индивида обозначаются Ng^1 , Nm^1 , Np^1 , второго — Ng^2 , Nm^2 , Np^2 .

2. Приводят поочередно одноименные оси Ng^1 и Ng^2 , Nm^1 и Nm^2 , Np^1 и Np^2 на отдельные меридианы, которые и прочерчивают штриховой линией. Точка пересечения этих меридианов и будет Do (рис. 39). Нередко эти дуги не пересекаются в одной точке, а образуют сферический треугольник — так называемый треугольник погрешности. «Центр тяжести» этого треугольника и будет Do .

3. Проверяют практически двойниковую ось, полученную графическим путем. Для этого на стереографической проекции, пользуясь сеткой Вульфа, находят и прочерчивают плоскость, перпендикулярную к Do , т. е. двойниковую плоскость. Установ-

ленную двойниковую плоскость по полученным координатам (которые определяют по сетке Вульфа) совмещают:

а) или с плоскостью симметрии микроскопа, в том случае, когда наклоны двойниковой плоскости вокруг оси H невелики (до $40-45^\circ$); при этом Do будет совмещена с осью I (рис. 40). Если Do была получена правильно, то при вращении вокруг оси I двойниковая структура появляться не будет. Если двойниковая структура не исчезла, то добиваются ее исчезновения поочередным вращением вокруг осей H и N на незначительные углы и проверкой наклонами вокруг оси I . Целью здесь является получение такого положения, при котором сдвойникованный плагиоклаз будет вести себя как монокристалл. Установив практически положение двойниковой плоскости, исправляют на стереографической проекции положение Do (Do является полюсом к установленной двойниковой плоскости);

б) или с плоскостью столика микроскопа, если наклоны вокруг оси H для двойниковой плоскости велики. В этом случае Do совмещают с осью A ; для этого вращением вокруг оси N приводят ее на вертикальный диаметр и наклоняют вокруг оси I на t (в данном случае от себя, рис. 41). Двойниковый шов при этом будет располагаться параллельно вертикальной или



Рис. 39. Способ графического нахождения двойниковой оси и двойниковой плоскости.

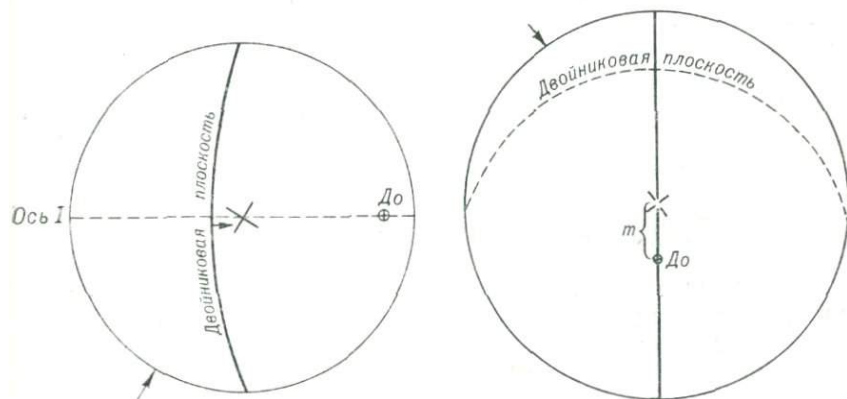


Рис. 40. Проверка расположения двойниковой плоскости. Do совмещена с осью I .

Рис. 41. Проверка расположения двойниковой оси. Do совмещена с осью A .

горизонтальной нити. Если Do была получена правильно, то при повороте вокруг оси A двойниковая структура появляться не будет. Если положение Do получено не точно, то следует исправить его практически, наклоняя вокруг оси I на небольшие углы от полученного положения в обе стороны и вновь проверяя вращением вокруг оси A исчезновение двойниковой структуры.

4. Получив графически и проверив практически Do , вычисляют ее координаты по отношению к осям оптической индикатрисы обоих индивидов двойника. Для этого на сетке Вульфа приводят поочередно на один меридиан Do с Ng^1 и Ng^2 , Do с Nm^1 и Nm^2 , Do с Np^1 и Np^2 . Просчитав градусные расстояния между ними, записывают их в виде табл. 4 и выводят среднее арифметическое из каждой пары отсчетов. Для отсчетов, превышающих 90° , берут дополнение до 180° .

Таблица 4

Рабочая запись координат Do с Ng , Nm , Np

Индивиды	Двойниковая ось			Двойниковая ось	Закон	Номер плаггиоклаза
	Ng	Nm	Np			
I	29	116(64)	106(74)	⊥ 010	Альбитовый	57
II	149(31)	66	76			
Среднее	30	65	75			

5. По полученным координатам Do Ng , Nm и Np по диаграмме Никитина получают точку (или треугольник погрешностей*), падающую на одну из кривых или вблизи одной или нескольких кривых. Для определения номера плаггиоклаза и закона двойникового надо знать, как отличить законы граней от сложных и осевых и как различаются отдельные законы в пределах каждой из этих трех групп.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОТЛИЧИЕ ЗАКОНОВ ГРАНЕЙ ОТ ОСЕВЫХ И СЛОЖНЫХ

В законах граней, как уже указывалось выше, плоскость срастания совпадает с двойниковой плоскостью и перпендикулярна к Do . В сложных и осевых законах Do лежит в плоскости срастания; плоскости срастания и двойникового взаимно перпендикулярны. Для выяснения типа закона совмещают по

* Искомой точкой будет являться «центр тяжести» треугольника погрешности.

полученным координатам двойниковую плоскость с плоскостью симметрии микроскопа. Если при этом совмещении двойниковый шов станет параллельно вертикальной нити микроскопа, то исследуемый плагноклаз сдвойникован по закону грани, в котором плоскость срастания совпадает с двойниковой плоскостью.

Если же после совмещения двойниковой плоскости с плоскостью симметрии микроскопа двойниковый шов не будет параллелен вертикальной нити, а будет расположен к ней под углом 90° или близким к нему, то исследуемый плагноклаз сдвойникован по осевому или сложному закону.

Еще проще и быстрее можно установить тип закона, совместив с плоскостью симметрии микроскопа плоскость срастания двойника. Если при совмещении плоскости срастания с плоскостью симметрии микроскопа двойниковая структура исчезает и не появляется при повороте вокруг оси I (с которой в этом случае совмещена Do), то это закон грани, в котором двойниковая плоскость совпадает с плоскостью срастания.

Если после указанных операций двойниковая структура сохраняется, то это либо осевой, либо сложный закон.

Во многих случаях вследствие больших углов наклона вокруг оси H не удастся совместить двойниковую плоскость с плоскостью симметрии микроскопа; тогда совмещают Do с осью A (см. рис. 41); при вращении вокруг оси A , во всех типах двойников двойниковая структура не будет появляться. В законах граней двойниковый шов при этом не будет виден, так как плоскость срастания, совпадающая с двойниковой плоскостью, будет перпендикулярна к оси A (рис. 42); в сложных и осевых законах двойниковый шов будет виден в виде четкой линии, так как плоскость срастания будет перпендикулярна к плоскости шлифа (рис. 43).

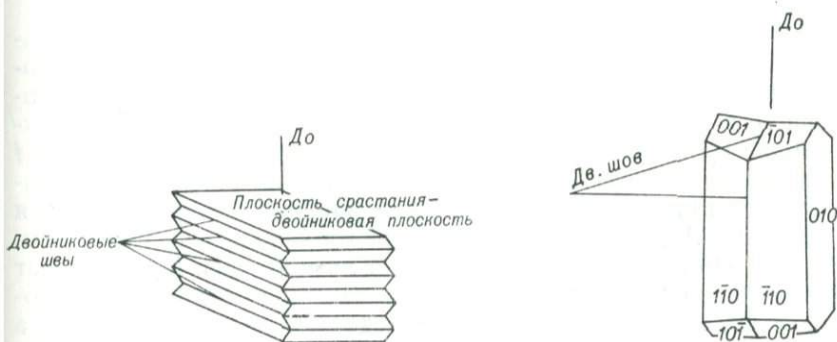


Рис. 42. Расположение двойниковых швов в альбитовом законе при совмещении Do с осью A .

Рис. 43. Расположение двойникового шва в осевом (карлсбадском) законе при совмещении Do с осью A .

Положение *Do* можно установить непосредственно на универсальном столике (см. о практических проверках положения *Do*) и по ее координатам определить состав плагиоклаза и закон его двойникования. Для этого прежде всего следует установить главные сечения оптической индикатрисы обоих индивидов и нанести их на стереографическую проекцию, затем определить, по какому типу закона сдвойникован плагиноклаз.

Двойниковая плоскость может быть совмещена или с плоскостью симметрии микроскопа (если углы наклона вокруг оси *H* для ее совмещения не превышают 45—50°) или при больших углах наклона с плоскостью, перпендикулярной к оси микроскопа *A*. В первом случае *Do* будет совмещена с осью *I*, во втором — с осью *A* (см. выше).

1. Плагиноклаз сдвойникован по закону грани. Поворотом вокруг оси *N* ставят двойниковый шов параллельно вертикальной нити микроскопа, наклоном вокруг оси *H* добиваются максимальной четкости двойникового шва, т. е. совмещают плоскость срастания с плоскостью симметрии микроскопа, вращают вокруг оси *I* и смотрят, исчезла ли двойниковая структура; если исчезла, то двойниковая плоскость, совпадающая здесь с плоскостью срастания, совмещена с плоскостью симметрии микроскопа. Если двойниковая структура при повороте вокруг оси *I* появляется, то небольшими поворотами вокруг осей *N* и *H* добиваются ее полного исчезновения. Установив таким образом двойниковую плоскость, наносят ее на стереографическую проекцию; полюс этой плоскости и будет *Do*. Вычисляют координаты *Do* с осями оптической индикатрисы обоих двойников, и, взяв среднее арифметическое из них, по диаграмме Никитина определяют номер плагиноклаза и закон его двойникования.

В том случае, если двойниковую плоскость (вследствие больших углов наклона вокруг оси *H*) нельзя совместить с плоскостью симметрии микроскопа, то ее совмещают с осью микроскопа *A*, а двойниковую плоскость — с плоскостью столика микроскопа. Для этого ставят двойниковый шов параллельно оси *I* и наклоняют вокруг оси *I* до такого положения, когда двойниковая структура исчезнет и не будет появляться при вращении вокруг оси *A*. Двойниковые швы при этом видны не будут (см. рис. 42). По полученным отсчетам на лимбах осей *N* и *I* (отсчет по лимбу оси *H* обычно 0°) наносят на стереографическую проекцию *Do*. По координатам *Do* определяют состав плагиноклаза и закон двойникования.

2. Плагиноклаз сдвойникован по осевому или сложному закону. В этом случае, так же как и в предыдущем, двойниковая плоскость может быть совмещена или с плоскостью симметрии

микроскопа, а *До* — с осью *I*, или с плоскостью, перпендикулярной к оси микроскопа *A*, а *До* — с осью *A*.

При совмещении двойниковой плоскости с плоскостью симметрии микроскопа поворотом вокруг оси *N* ставят двойниковый шов параллельно горизонтальной нити (параллельно оси *I*), так как в указанных законах *До* лежит в плоскости срастания и ее надо совместить с осью *I*, а перпендикулярную к ней двойниковую плоскость — с плоскостью симметрии микроскопа. Совмещение двойниковой плоскости с плоскостью симметрии микроскопа достигается поочередным вращением вокруг осей *H* и *N* и контрольным наклоном вокруг оси *I*. Если при вращении вокруг оси *I* сдвойникованное зерно ведет себя как монокристалл, то, следовательно, двойниковая плоскость совмещена с плоскостью симметрии микроскопа, а *До* — с осью *I*. По полученным отсчетам наносят на стереографическую проекцию двойниковую плоскость и ее полюс, т. е. двойниковую ось; вычислив ее координаты, определяют по диаграмме Никитина состав плагиоклаза и закон его двойникового, учитывая данные, изложенные в § 22.

Для совмещения двойниковой плоскости с плоскостью, перпендикулярной к оси *A* (т. е. с плоскостью столика микроскопа), двойниковый шов ставят параллельно вертикальной нити и наклоном вокруг оси *I* совмещают *До* с осью *A*; при вращении вокруг оси *A* двойниковая структура не должна появляться. В отличие от законов граней двойниковые швы видны четко (см. рис. 43). Определение состава плагиоклаза и закона двойникового производится аналогично случаям, разобранным в § 22.

Определение состава плагиоклаза по координатам плоскости срастания

По координатам плоскости срастания можно определять состав плагиоклаза, а также производить контроль над правильностью установления закона двойникового. Определение наименования плоскости срастания необходимо производить для осевых и сложных законов.

Последовательность работы при определении плагиоклазов по координатам плоскости срастания

1. В выбранном разрезе плагиоклаза определяют и наносят на стереографическую проекцию оптическую индикатрису обоих индивидов двойника*.
2. Совмещают плоскость срастания с плоскостью симметрии микроскопа; для этого ставят двойниковый шов параллельно

* В случае полисинтетических двойников под индивидом понимают одну систему двойников.

вертикальной нити и наклоном вокруг оси H устанавливают его на максимальную четкость, которая не должна нарушаться при наклонах вокруг оси I .

3. По полученным координатам наносят плоскость срастания и ее полюс на стереографическую проекцию. Вычисляют по сетке Вульфа координаты полюса плоскости срастания относительно осей Ng , Nm и Np обоих индивидов и берут среднее арифметическое из каждой пары отсчетов.

4. По полученным координатам получают на диаграмме Никитина точку (или треугольник погрешности), которая должна попасть на одну из кривых $\perp 010$, $\perp 001$, $\perp RS$, $\perp 021$ (или вблизи них), так как указанные плоскости являются обычно плоскостями срастания. Индекс кривой определит наименование плоскости срастания, а положение точки (или «центра тяжести» треугольника погрешности) на кривой — номер плагиоклаза.

§ 21. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛЫХ ПЛАГИОКЛАЗОВ

При определении кислых плагиоклазов на федоровском столике часто встречаются затруднения, связанные с особенностями их оптической ориентировки. В указанных плагиоклазах плоскость оптических осей расположена почти параллельно 001, а оси оптической индикатрисы Np , Ng и Nm почти параллельны соответственно [100], [010] и [001]. Вследствие этой особенности кислых плагиоклазов при двойниковании две одноименные оси оптической индикатрисы неделимого двойника на стереографической проекции располагаются очень близко друг от друга или даже в некоторых плагиоклазах совпадают. В связи с этим определение двойниковой оси графическим путем становится невозможным. При соединении одноименных осей индикатрисы на сетке Вульфа получается вытянутый треугольник погрешности, «центр тяжести» которого, соответствующий положению двойниковой оси, определять бессмысленно. Двойниковую ось в этих случаях надо определять практически.

Кислые плагиоклазы в большинстве случаев образуют двойники по альбитовому и периклиновому (аклиновому) законам, реже по другим. В этих законах, а также в законе манебах-эстерель двойниковая ось располагается между Ng^1 и Ng^2 . При практической проверке положения двойниковой оси следует совместить с осью I (по координатам, полученным на стереографической проекции) точку, делящую пополам дугу Ng^1Ng^2 . Если полученное направление ведет себя как двойниковая ось, то точка, соответствующая кислому плагиоклазу, попадает в правый нижний угол диаграммы Никитина (координаты находятся в пределах значений $DoNg$ 0—20°, Nm 85—88°, Np 75—90°).

В этой части диаграммы проходят кривые альбитового $\perp 010$, манебах-эстерель $\frac{\perp [100]}{001}$ и периклинового $[010]$ законов. Для кислых плагиоклазов отличить альбитовый закон от осевого и сложного обычным способом часто невозможно, так как двойниковая структура исчезает при положении двойникового шва и параллельно и перпендикулярно к вертикальной нити окуляра. Для отличия друг от друга указанных законов двойникования необходимо определить место нахождения полюса плоскости срастания. Плоскостью срастания в альбитовом законе является 010 , в манебах-эстерель — 001 , в периклиновом (аклиновом) — RS или 001 . Плоскость срастания в кислых плагиоклазах устанавливается плохо вследствие близости их показателей преломления к показателю преломления канадского бальзама. Для отличия плоскостей 010 и 001 особая точность и не требуется, так как кривые $\perp 010$ и $\perp 001$ для кислых плагиоклазов находятся в разных частях диаграммы Никитина и не могут быть спутаны. Кроме того, на стереографической проекции двойника кислого плагиоклаза $\perp 010$ будет располагаться между Ng^1 и Ng^2 , а $\perp 001$ — между Nm^1 и Nm^2 .

Второй сложностью, с которой приходится сталкиваться при определении кислых плагиоклазов, является то обстоятельство, что кривая $\perp 010$ для альбитового закона (а также кривые $[010]$ и $\frac{\perp [100]}{001}$) дает на диаграмме Никитина сдвоенные ветви.

Это связано с тем, что для кислых плагиоклазов (от 0 до № 40) координаты Ng , Nm , Np с $\perp 010$, $[010]$ и $\frac{\perp [100]}{001}$ близки и часто даже совпадают. При определении плагиоклаза по этим кривым получается двойное решение. Так, например, при координатах двойниковой оси с $Ng12^\circ$, $Nm77^\circ$ и $Np87^\circ$ плагиоклаз может быть определен как № 10 и № 32. Для решения вопроса о составе плагиоклаза необходимо дополнительно определить показатель преломления плагиоклаза (см. § 22).

На рис. 44 приведена стереографическая проекция для альбита № 3, сдвойникового по альбитовому закону. Данные следующие. Первый индивид: $N - 278^\circ$, $H \rightarrow 16^\circ$, Ng^1 ; $N - 12^\circ$, $H \rightarrow 15^\circ$, Nm^1 ; $A_1 = 329^\circ$; $2v = +86^\circ (\times)$; второй индивид: $N - 310^\circ$, $H \rightarrow 20^\circ$, Ng^2 ; $N - 222^\circ$, $H \leftarrow 6^\circ$, Nm^2 ; $A_1 = 26^\circ$; $2v =$

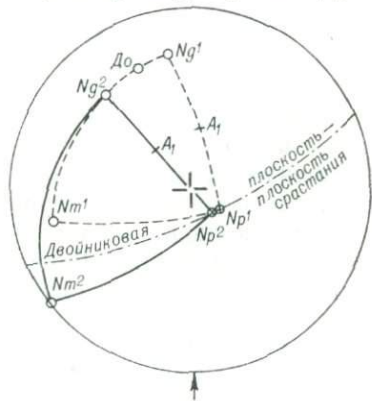


Рис. 44. Стереографическая проекция двойника альбита.

До $Ng 17^\circ$, $Nm 73^\circ$, $Np 88^\circ$. Закон альбитовый.

$\approx +86^\circ (\times)$; двойниковая ось *Do* определена практически; двойниковая плоскость (она же плоскость срастания): $N - 292^\circ$, $H \rightarrow 18^\circ$; координаты двойниковой оси (среднее значение) $DoNg17^\circ$, $Nm73^\circ$, $Np88^\circ$, Ng плагиоклаза $< 1,54$; плагиоклаз № 3—4.

Как видно из приведенной диаграммы, оси Np^1 и Np^2 почти совпадают друг с другом. Ось *Do* располагается между осями индикатрисы Ng^1 и Ng^2 , что является типичным для альбитового закона. Двойниковая плоскость совпадает с плоскостью срастания.

Более подробный разбор конкретных случаев, встречающихся при определении кислых плагиоклазов, дан в § 22. Рекомендуется при определении кислых плагиоклазов пользоваться иммерсионным методом.

§ 22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ДИАГРАММЕ НИКИТИНА ЗАКОНОВ ДВОЙНИКОВАНИЯ ПЛАГИОКЛАЗОВ

Часто при определении плагиоклазов точка, полученная на диаграмме Никитина по координатам двойниковой оси, располагается вблизи нескольких кривых. В этом случае необходимо установить, по какой из них следует определять номер и закон двойникования плагиоклаза. Следует указать, что даже в том случае, если точка точно попадает на какую-либо кривую, то отнюдь не всегда эта кривая соответствует изучаемому плагиоклазу, и определять его надо по другой (близлежащей) кривой.

При выяснении вопроса о том, какая кривая диаграммы соответствует изучаемому плагиоклазу, следует установить, по какому типу закона двойникован плагиоклаз (см. § 20). Для выяснения закона двойникования и состава плагиоклаза надо производить дополнительные исследования. Чтобы отличить осевые законы от сложных необходимо определять координаты полюса плоскости двойникового срастания и ее наименование. В случае законов грани этого делать не нужно, так как координаты полюсов плоскости срастания совпадают с координатами двойниковой оси. Далее следует определять координаты спайности, расположенной перпендикулярно к двойниковому шву, и взаимоотношение ее с двойниковой осью или с плоскостью двойникового срастания. В некоторых случаях для различения плагиоклазов достаточно дополнительно измерить показатели преломления относительно канадского балъзама или иммерсионным способом.

Отличия друг от друга различных законов граней

1. Отличие альбитового закона от манебахского. При координатах $DoNg48^\circ$, $Nm62^\circ$ и $Np55^\circ$ (или близких к ним) точка на диаграмме Никитина падает вблизи пересечения кривых

$\perp 010$ и $\perp 001$; в первом случае плагиоклаз будет соответствовать № 95, во втором — № 78.

Для выяснения состава плагиоклаза и закона двойникования устанавливают и наносят на стереографическую проекцию спайность, идущую перпендикулярно к двойниковому шву (желательно в обоих индивидах) и наносят ее на стереографическую проекцию; измеряют по сетке Вульфа координаты полюса этой спайности с Ng , Nm и Np в обоих индивидах и, взяв среднее арифметическое, по полученным координатам определяют плагиоклаз обычным способом по диаграмме Никитина.

Первый случай. Взятый плагиоклаз соответствовал № 95 и был сдвойникован по альбитовому закону. Спайность, перпендикулярная к двойниковому шву, соответствовала спайности по 001. Координаты полюса спайности будут в этом случае примерно следующими: $\perp 001Ng41^\circ$, $Nm73^\circ$, $Np54^\circ$. Точка упадет на кривую $\perp 001$ (или вблизи нее) около плагиоклаза № 95.

Второй случай. Изучаемый плагиоклаз соответствовал № 78 и был сдвойникован по манебахскому закону. В этом случае координаты полюса спайности, перпендикулярной к плоскости срастания, будут соответствовать примерно следующим данным: $P_{010}Ng39^\circ$, $Nm63^\circ$, $Np64^\circ$, т. е. точка упадет на кривую $\perp 010$ около плагиоклаза № 78.

Спайность по 010 в большинстве плагиоклазов легко отличается от спайности по 001 по знаку зоны. В зоне, перпендикулярной к 010, для плагиоклазов до № 70—72 меньшая ось разреза Np' располагается ближе к спайности по 010; следовательно, относительно 010 знак зоны будет отрицательным. При массовой петрографической работе это отличие может быть использовано, так как в большинстве горных пород встречаются плагиоклазы менее основные, чем битовнит, однако этот метод не является универсальным.

2. Отличие кислых плагиоклазов, сдвойникованных по альбитовому закону. При координатах $DoNg12^\circ$, $Nm78^\circ$, $Np88^\circ$ плагиоклаз, сдвойникованный по альбитовому закону, может быть определен как альбит № 9—10 или олигоклаз-андезин № 32—33; в этой части диаграммы кривая альбитового закона делает перегиб и образует петлю (см. § 23). Для решения задачи следует определить показатели преломления Ng и Np изучаемого плагиоклаза по отношению к канадскому бальзаму. В олигоклазе № 32—33 и Ng и $Np > 1,54$; в альбите № 10 $Ng \approx 1,54$, $Np < 1,54$.

3. Отличие манебахского закона (кривая $\perp 001$) от бавенского (кривая $\perp 021$). Для манебахского закона спайность в плагиоклазе идет либо параллельно двойниковому шву (спайность

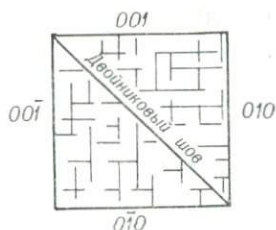


Рис. 45. Бавенский двойник в разрезе $\perp [100]$.

по 001), или перпендикулярно к нему (спайность по 010). Для бавенского закона спайность идет под углом 45° к двойниковому шву (рис. 45). Так же отличается альбитовый закон от бавенского.

Отличия друг от друга законов граней, осевых и сложных

Ниже рассмотрены конкретные случаи, часто встречающиеся при определении плагиоклазов.

Первый случай. Координаты $DoNg48^\circ$, $Nm61^\circ$, $Np56^\circ$. Точка, полученная по этим координатам, располагается вблизи пересечения пяти перечисленных ниже кривых:

- | | |
|---|-------------------|
| а) кривая $\perp 001$, плагиоклаз № 77 | } законы граней; |
| б) кривая $\perp 010$, плагиоклаз № 95 | |
| в) кривая $[010]$, плагиоклаз № 91, закон оси; | |
| г) кривая $\frac{\perp [100]}{010}$, плагиоклаз № 79 | } сложные законы. |
| д) кривая $\frac{\perp [100]}{001}$, плагиоклаз № 90 | |

Для определения закона двойникования и номера плагиоклаза надо установить, по какому закону сдвойникован кристалл — по закону грани или по закону второго типа (осевому или сложному). Если он сдвойникован по закону грани, то надо отличить альбитовый закон от манебахского (см. выше).

Для отличия друг от друга законов $[010]$, $\frac{\perp [100]}{010}$ и $\frac{\perp [100]^*}{001}$

следует определить координаты плоскости срастания по отношению к осям оптической индикатрисы и по диаграмме Никитина установить, какая это плоскость. Для закона $\frac{\perp [100]}{010}$ точка попадает на кривую $\perp 010$ и определяет плагиоклаз как № 79; для закона $\frac{\perp [100]}{001}$ она попадает на кривую $\perp 001$ и определяет плагиоклаз как № 90; для закона $[010]$ точка попадает на кривую $\perp RS$ и определяет плагиоклаз как битовнит № 91. Закон $[010]$ обычно можно отличить от сложных законов по тому, что спайность в нем идет косо по отношению к плоскости срастания.

Если видна спайность, перпендикулярная к плоскости срастания, то названные сложные законы можно отличить и другим способом. Наносят спайность, перпендикулярную к плоскости срастания, на стереографическую проекцию и вычисляют координаты полюса спайности с Ng , Nm и Np . Для закона $\frac{\perp [100]}{010}$ спайность, перпендикулярная к плоскости срастания, является спайностью по 001, и, следовательно, точка, полученная по координатам

* Здесь и далее для краткости вместо «закон с двойниковой осью, например, $\frac{\perp [001]}{010}$ » пишется «закон $\frac{\perp [001]}{010}$ ».

полноса этой спайности с осями индикатрисы, упадет на кривую $\perp 001$. Для закона $\frac{\perp [100]}{001}$ точка должна попасть на кривую $\perp 010$, так как в этом случае спайность, перпендикулярная к плоскости срастания, соответствует 010.

Второй случай. Координаты *До Ng75°*, *Nm30—32°*, *Np62—64°*. Точка на диаграмме Никитина располагается вблизи пересечения пяти следующих кривых:

- | | |
|--|-------------------|
| а) кривая $\perp 001$, плагиоклаз № 0—1 | } закон граней; |
| б) кривая $\perp 110^*$, плагиоклаз № 52—53 | |
| в) кривая [001], плагиоклаз № 36—37, закон оси; | } сложные законы. |
| г) кривая $\frac{\perp [001]}{010}$, плагиоклаз № 63—65 | |
| д) кривая $\frac{\perp [100]}{010}$, плагиоклаз № 2—5 | |

Прежде всего следует выяснить, sdвойникован ли плагиоклаз по закону грани или закону второго типа. В первом случае можно пользоваться при определении только кривой $\perp 001$.

Далее следует определить, sdвойникован ли плагиоклаз по закону [001] или по одному из сложных законов.

Плагиоклаз, sdвойникованный по закону $\frac{\perp [100]}{010}$, проще всего отличить по показателям преломления, которые меньше 1,54, так как он представлен альбитом № 2—5.

Остается отличить законы [001] и $\frac{\perp [001]}{010}$, что можно сделать по координатам плоскости срастания. В сложном законе точка, полученная по координатам плоскости срастания на диаграмме Никитина, попадает на кривую $\perp 010$ и определяет плагиоклаз как лабрадор № 63—65. Для карлсбадского закона плоскостью срастания также обычно является 010, но точка попадает на кривую $\perp 010$ на значительном расстоянии от участка, соответствующего плагиоклазу № 63—65, и определяет плагиоклаз как андезин № 36—37. В редком случае, когда в карлсбадском законе плоскостью срастания является другая грань вертикального пояса, различить указанные два закона еще проще, так как в случае закона [001] точка попадает не на кривую $\perp 010$, а на другую кривую, соответствующую плоскости двойникового срастания, например, на кривую $\perp 100$.

Третий случай. Точка попадает на пересечение кривых сложных законов $\frac{\perp [001]}{010}$ и $\frac{\perp [100]}{010}$. На первой кривой это плагиоклаз № 95, на второй — № 45 (координаты *До Ng65°*, *Nm30°*, *Np75°*).

Эти законы легко отличить друг от друга по координатам плоскости двойникового срастания; точки, полученные по этим

* Если плагиоклаз определялся по ориентировке двойниковой оси, то кривая $\perp 110$ отпадает, так как нет закона с такой двойниковой осью; грань 110 может являться только плоскостью ограничения.

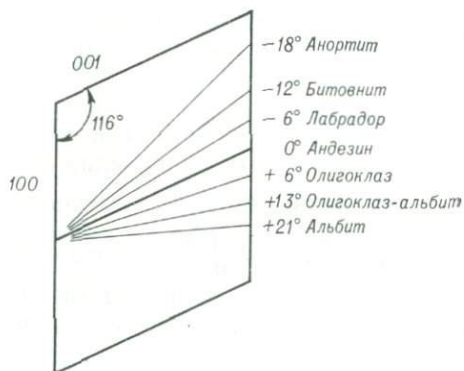
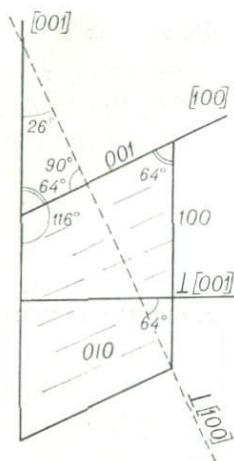


Рис. 46. Положение направлений $\perp [100]$ и $\perp [001]$ в плоскости 010.

Рис. 47. Проекция плоскости ромбического сечения в периклиновых двойниках плагиоклазов.

координатам, попадут на кривую $\perp 010$ на большом расстоянии друг от друга, что даст возможность легко определить номер плагиоклаза.

Можно указанные законы определить по отношению плоскости срастания со спайностью, идущей по 001, т. е. перпендикулярной к плоскости срастания. Как видно на рис. 46, для закона $\frac{\perp [100]}{010}$ До является перпендикуляром к [100]; угол между 010 и 001 равен в плагиоклазах примерно 94° , поэтому До с перпендикуляром к 001 делает угол около 4° , т. е. До и полюс спайности 001 почти совпадают. Кривые $\perp 001$ и $\frac{\perp [100]}{010}$ расположены на очень близком расстоянии друг от друга. В законе $\frac{\perp [001]}{010}$ До образует угол с полюсом спайности 001, близкий к 64° , так как $\frac{\perp [001]}{010}$ делает угол $\frac{\perp [100]}{010}$, равный 64° , поэтому на диаграмме Никитина точка, соответствующая плагиоклазу № 95 на кривой $\perp 001$, отстоит от точки на кривой $\frac{\perp [001]}{010}$ на большом расстоянии.

Четвертый случай. При координатах До Ng 5° , Nm 85° , Np $88-89^\circ$ точка попадает на пересечение следующих кривых:

- кривая $\perp 010$, плагиоклаз № 35 и 15
- кривая $\perp 021$, плагиоклаз № 95
- кривая [010], плагиоклаз № 15 или 24, закон оси;
- кривая $\frac{\perp [100]}{001}$, плагиоклаз № 15 или 24, сложный закон.

Следует выяснить, по закону грани или осевому сдвойникован плагиоклаз (об различии законов $\perp 010$ и $\perp 021$ см. выше). В данном случае эти плагиоклазы будут отличимы друг от друга по показателям преломления.

Отличить периклиновый закон $[010]$ от сложного $\frac{\perp [100]}{010}$

по координатам плоскости срастания трудно, так как для олигоклаза кривые $\perp 001$ и $\perp RS$ располагаются очень близко друг к другу; небольшие ошибки, возможные при установлении плоскости срастания могут привести к неверным результатам.

Если видна спайность, то указанные законы различаются по тому, что в сложном законе спайность по 001 идет параллельно плоскости срастания, а в периклиновом образует с ней угол от 5 до 8° для плагиоклаза № 15, до 12° для № 25 (рис. 47).

В плагиоклазах № 15—30 спайность обычно видна плохо вследствие близости показателей преломления к канадскому бальзаму, и закон двойникования выяснить не удается.

Номер плагиоклаза в приведенном частном случае лучше всего определить по показателям преломления: у плагиоклаза № 15 $N_g \geq 1,54$, $N_p < 1,54$, у № 25 $N_g > 1,54$, $N_p = 1,54$.

§ 23. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПЛАГИОКЛАЗОВ И ЗАПИСЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

До работы на федоровском столике следует изучить шлиф на плоском столике; необходимо определить показатели преломления N_g и N_p по отношению к канадскому бальзаму; это особенно важно для определения кислых плагиоклазов. Предварительный просмотр шлифа поможет ориентироваться в составе минералов, выбрать разрезы для определения тех или иных констант. При исследовании плагиоклаза на федоровском столике выполняют следующее.

1. Выбирают разрез для измерения двойников плагиоклаза. Следует брать разрезы с четкой границей между двойниками и с хорошо выраженной спайностью. Желательно, чтобы в зерне имелась спайность, расположенная перпендикулярно к двойниковому шву.

2. Предварительно определяют, сдвойникован ли плагиоклаз по закону грани или по законам осевым и сложным.

3. Устанавливают и наносят на стереографическую проекцию индикатрисы обоих индивидов (систем двойников в случае полисинтетического двойникования).

В случае совмещения плоскости $N_g N_p$ с плоскостью симметрии микроскопа попутно с основным определением следует отмечать на стереографической проекции выход оптической оси (или двух осей), определять 2ψ и оптический знак плагиоклаза.

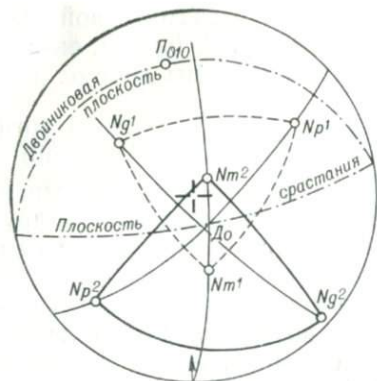


Рис. 48. Стереографическая проекция плагиоклаза № 80, сдвойникового по альбит-карлсбадскому закону.

Если Do совпадает с полюсом плоскости срастания и, следовательно, двойниковая плоскость совпадает с плоскостью срастания, плагиоклаз сдвойникован по закону грани. Если двойниковая ось лежит в плоскости срастания, то плагиоклаз сдвойникован по осевому или сложному закону.

6. После определения и нанесения на стереографическую проекцию двойниковой оси и полюса плоскости срастания измеряют углы, образуемые Do с Ng , Nm и Np обоих индивидов двойника, и берут их средние значения. По полученным координатам $DoNg$, Nm и Np определяют номер плагиоклаза и закон двойникования.

7. Если плагиоклаз сдвойникован по осевому или сложному закону, для проверки обязательно измеряют координаты полюса плоскости срастания относительно Ng , Nm и Np обоих индивидов и определяют по диаграмме Никитина наименование плоскости срастания и номер плагиоклаза. Точка (или «центр тяжести» треугольника погрешности), полученная по координатам плоскости срастания, должна попасть на одну из черных кривых, обычно на кривые $\perp 010$, $\perp 001$, $\perp RS$, редко на другие, например на $\perp 100$ в законе $[001]$. По найденной кривой определяют номер плагиоклаза и проверяют, какая грань соответствует плоскости срастания. Определение плагиоклаза по полюсу плоскости срастания для осевых и сложных законов является необходимым контролем правильности его опознания; для законов граней координаты Do совпадают с координатами полюса плоскости срастания и определение последних можно не производить.

8. В неясных случаях, когда Do попадает вблизи нескольких кривых и номер плагиоклаза и закон его двойникования однозначно не определяются, следует произвести дополнительные

4. Определяют положение Do графическим путем. Обязательно проверяют Do непосредственно на столике и полученные поправки наносят на стереографическую проекцию.

5. Для проверки закона устанавливают и наносят на стереографическую проекцию плоскость срастания (при совмещении плоскости срастания с плоскостью симметрии микроскопа она видна в виде тонкой четкой линии). Наносят на стереографическую проекцию полюс плоскости срастания и проверяют, по закону грани или по осевому (сложному) закону сдвойникован плагиоклаз.

наблюдения и попытаться определить плагиоклаз по координатам полюса плоскости срастания в осевых и сложных законах, по координатам полюса спайности, по показателю преломления и т. п. (см. § 22).

В качестве дополнительной проверки можно рекомендовать пользоваться определением угла угасания Np'^* : 010 в разрезах $\perp [100]$ или определением максимального угла погасания Np' : 010 в зоне $\perp 010$ (см. § 25).

9. В табл. 5 приведен пример определения плагиоклаза, sdвойникового по альбит-карлсбадскому закону и пример рабочей записи. Соответствующая ему стереографическая проекция показана на рис. 48. Указанные записи, а также стереографическую проекцию, вычерченную на кальке, необходимо сохранять в качестве документирующего материала.

10. Окончательные результаты определения плагиоклаза можно записывать в виде табл. 6, которую удобно приводить в отчете, дипломной работе и т. д.

§ 24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАГИОКЛАЗОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ (ДИАГРАММА ЗАВАРИЦКОГО, СОБОЛЕВА И ДРУГИХ). ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И СТЕПЕНИ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ПЛАГИОКЛАЗОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ (ДИАГРАММЫ МАРФУНИНА И ВАНДЕ-КИРКОВА)

У плагиоклазов вулканических (лавы, пирокласты) и гипабиссальных пород точки координат двойниковых осей или полюсов спайности часто находятся на значительном расстоянии от соответствующих кривых на диаграмме Никитина. Расхождения между низкотемпературными и высокотемпературными плагиоклазами различного химического состава неодинаковы; максимальное расхождение в 15 номеров отмечается для кривой альбитового закона в ряду лабрадор № 60—битовнит № 80. Для более кислых плагиоклазов поправка соответствует 2—5 номерам. В обоих случаях состав, определенный по диаграмме Никитина, оказывается более основным, чем это имеет место в действительности.

Для более основных членов ряда (основной битовнит—анортит) поправка имеет обратный знак и данные, полученные по диаграмме Никитина, указывают меньший номер плагиоклаза по сравнению с истинным. Наиболее полная сводка по высокотемпературным плагиоклазам была впервые дана в работах А. Н. Заварицкого [16], В. И. Лебединского [23]. На рис. 49 приведена диаграмма для определения на федоровском столике высокотемпературных плагиоклазов от № 35 до № 100. Высокотемпературные плагиоклазы более кислого состава встречаются

* Np' — меньшая ось данного разреза.

Таблица 5
Запись измерения координат двойниковой оси и плоскости срастания плагиоклаза из габбро
(шлиф 15)

Индивиды	Оси столика		Наименование сечения	Координаты До			Координаты полюса плоскости срастания			Наименование плоскости срастания	Закон	Номер плагио-оклаза	Примечание
	<i>N</i>	<i>H</i>		<i>Ng</i>	<i>Nm</i>	<i>Np</i>	<i>Ng</i>	<i>Nm</i>	<i>Np</i>				
I	332° 36	→37° ←22	<i>Ng</i> ¹ <i>Np</i> ¹	9°	28°	70°	44°	2°	61°	010	Альбит-карлс-бадский	80	До получена графически и проверена совмещением с осью А
II	44 135	→14 →3	<i>Np</i> ² <i>Ng</i> ²	70	28	72	40	63	61				
Среднее				9,5	28	71	42	62,5	61				

Таблица 6
Результаты определения плагиоклазов

Номер шлифа	Координаты До			Закон	Координаты полюса спайности, плоскости срастания			Наименование спайности, плоскости срастания	2 <i>v</i>	Номер плагио-оклаза	Примечание
	<i>Ng</i>	<i>Nm</i>	<i>Np</i>		<i>Ng</i>	<i>Nm</i>	<i>Np</i>				
45	23°	67°	83°	Альбитовый Альбит-карлс-бадский	—	—	—	—	+84(×)	44	<i>Ng</i> и <i>Np</i> > 1,54
52	76	30	69		41°	64°	61°	010	—	80	
66	16	74	88	Альбитовый Карлсбадский Периклиновый	—	—	—	—	+82(×)	4	<i>Ng</i> < 1,54
69	64	62	40		30	65	75	010	—	55	
72	40	60	67		49	53	64	RS	—	70	

Примечание. В таблице приведены средние значения координат До, полюса плоскости срастания или спайности с одноименными осями двух индивидов двойника.

редко и еще недостаточно изучены. Для определения высокотемпературных плагиоклазов кислого состава (№ 20—35) можно пользоваться диаграммой Никитина, уменьшая полученные номера плагиоклаза на 2—5.

Результаты более поздних исследований показывают, что разделение плагиоклазов на две отдельные группы — высокотемпературных и низкотемпературных — является условным, так как между ними имеется ряд промежуточных разновидностей. Оптические свойства плагиоклазов, представляющих собой твердые растворы, зависят от состава и от степени упорядочения кристаллической решетки, обусловленной положением в ней ионов Si и Al. Процесс перехода неупорядоченного состояния в упорядоченное осуществляется не сразу, при какой-то одной определенной температуре, а в интервале температур. Степень упорядоченности в плагиоклазах, равно как в калиевых полевых шпатах (см. § 26), в большой степени зависит от скорости кристаллизации. Наименьшей степенью упорядоченности обладают плагиоклазы, кристаллизующиеся при высоких температурах и быстром остывании. Каждому плагиоклазу определенного состава и степени упорядоченности соответствуют определенные физические, и в частности кристаллооптические, свойства [21, 28, 30, 31, 73].

Эти положения о зависимости степени упорядочения кристаллической структуры подтверждаются и экспериментальным отжигом плагиоклазов при различных температуре и продолжительности охлаждения. А. С. Марфуни предложил при определении на федоровском столике кислых и средних плагиоклазов (от № 0 до № 60) пользоваться составленной им диаграммой состав — степень упорядоченности — оптическая ориентировка [26]. На этой диаграмме (рис. 50), построенной на стереографической сетке Федорова, нанесены положения двойниковых осей по отношению к Ng , Nm , Np для альбитового, карлсбадского и альбит-карлсбадского законов, являющихся наиболее распространенными для плагиоклазов. В отличие от ранее приведенных диаграмм положение двойниковой оси на этой диаграмме представлено вытянутыми полями с изолиниями состава и степени упорядоченности. Диаграмма Марфунина удобна тем, что она может употребляться для плагиоклазов любого генезиса без предварительного решения вопроса, высокотемпературными или низкотемпературными диаграммами следует пользоваться. Большим преимуществом этой диаграммы является также и то, что по ней можно судить не только о составе, но и о степени упорядоченности структуры, а соответственно этому и о генезисе породы. Правила пользования ею те же, что для диаграммы Федорова.

Изолинии составов (сплошные линии со стрелками) проведены для всех законов (кроме карлсбадского для № 10—20 и альбит-карлсбадского для № 0—20) через 2% анортита. Цифры

от 0 до 60, стоящие у изолиний составов, соответствуют номерам плагиоклазов; они проставлены через 10 номеров; промежуточные составы определяются интерполяцией. Значения 0,0 и 1,0, стоящие после косой линии у обозначений номеров плагиоклаза с обеих сторон изолиний, соответствуют степени упорядоченности кристаллической решетки: значение 1,0 отвечает наибольшей, 0,0 — наименьшей упорядоченности решетки.

Таким образом, плагиоклаз на диаграмме Марфунина характеризуется двумя значениями; так, например, 40/1,0 отвечает андезину с полностью упорядоченной структурой; эти данные показывают, что плагиоклаз кристаллизовался в условиях медленного понижения температуры, в равновесных условиях. Координаты двойниковой оси соответствуют для этого плагиоклаза: в альбитовом законе $Ng20^\circ$, $Nm72^\circ$, $Np84^\circ$; в карлсбадском $Ng72^\circ$, $Nm42^\circ$, $Np51^\circ$ и альбит-карлсбадском $Ng82^\circ$, $Nm51^\circ$, $Np38^\circ$.

При координатах *До* $Ng75^\circ$, $Nm43^\circ$, $Np50^\circ$ плагиоклаз соответствует № 54 и степени упорядоченности 0,5 (закон альбит-карлсбадский).

Ю. В. Ванде-Кирковым составлена диаграмма состав — степень упорядоченности — оптическая ориентировка средних — основных плагиоклазов (рис. 51). В основу ее построения положен большой статистический материал, полученный автором при его многолетних исследованиях эффузивных образований Камчатки [4]. Калибровка проводилась по кривым, известным по литературным данным, и увязывалась с простирием «изоплет» средних — кислых плагиоклазов по А. С. Марфунину. По принципу построения и пользования эта диаграмма аналогична диаграмме Марфунина.

Ю. В. Ванде-Кирков указывает на большой разброс как химического состава, так и структурного состояния плагиоклазов вулканических пород не только в пределах лавовых потоков, но нередко и в пределах одного образца и даже шлифа [5]. Поэтому для характеристики плагиоклазов вулканических образований необходимо пользоваться статистически достоверным материалом.

§ 25. СПОСОБЫ БЫСТРОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАГИОКЛАЗОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНАЛЬНЫХ ПЛАГИОКЛАЗОВ

Для определения плагиоклазов нередко употребляются более простые и быстрые способы, известные по работе на плоском столике. Быстрые способы определения плагиоклазов на федоровском столике применяются при массовой петрографической работе, при измерении зональных плагиоклазов, а также при исследовании микролитов экструзивных пород, для которых обычно в связи с исключительной тонкостью двойниковых полос

определение по координатам двойниковой оси относительно осей оптической индикатрисы часто бывает невозможным. Рассмотренные ниже способы определения плагиоклазов удобны для проверки полученных данных, особенно необходимой при определении кислых плагиоклазов.

Наиболее простыми и точными методами определения плагиоклазов являются: 1) определение в разрезах $\perp [100]$ и 2) определение по максимальному симметричному угасанию альбитовых двойников в зоне $\perp 010$.

Определение плагиоклазов в разрезах $\perp [100]$, т. е. в разрезах $\perp 010$ и 001

Способ определения плагиоклазов в разрезах $\perp [100]$ заключается в измерении угла угасания между Np' и спайностью по 010 . Разрезы плагиоклазов, перпендикулярные к $[100]$, характеризуются наличием четко выраженных трещин спайности по 010 и 001 , пересекающихся под углами $87-93^\circ$. Работа на федоровском столике дает возможность наклонами вокруг осей H и N установить спайность на максимальную четкость, т. е. совместить $[100]$ с осью A . Установив на федоровском столике разрез плагиоклаза, перпендикулярный к $[100]$, следует измерить угол между Np' и 010 . Ось Np' является меньшей осью разреза и определяется при помощи гипсовой пластинки так же, как при работе на плоском столике. Ось Np' в разрезах $\perp [100]$ ближе расположена к 010 , чем к 001 (исключение составляют плагиоклазы более основные, чем № 80, в которых Np' делит примерно

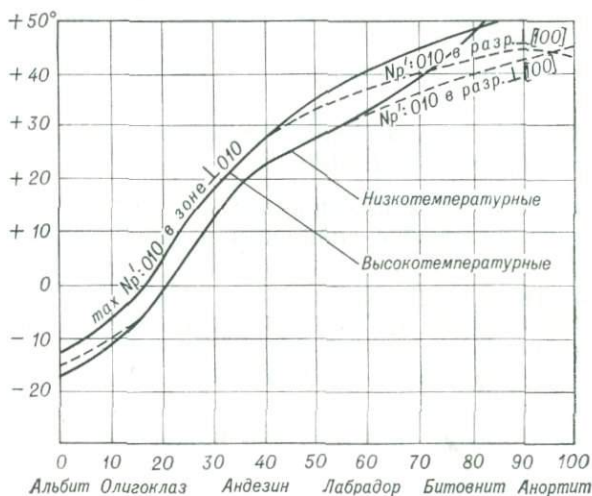


Рис. 52. Графики для определения плагиоклазов ускоренным методом.

пополам угол между трещинами спайности). Следовательно, определение сводится к измерению в установленном разрезе угла между Np' и ближайшей к ней спайностью. Пользуясь графиком (рис. 52), по полученному углу определяют номер плагиоклаза. Неудобством метода является то, что углы погасания $Np' : 010$ кислых плагиоклазов от № 0 до № 20 имеют те же значения, что и у плагиоклазов № 20—35, а именно 0—15°. Значения углов погасания берут с положительным знаком в том случае, когда Np' лежит в остром углу между плоскостями спайности. В тех же случаях, когда Np' расположена в тупом углу, значения углов погасания берут с отрицательным знаком. Отрицательные значения, как видно из графика, соответствуют № 0—20.

Вследствие того что часто бывает затруднительно отличить острый угол (87°) от тупого (93°), рекомендуется при работе с плагиоклазами альбит-олигоклаз-андезинового ряда производить сравнение их показателей преломления (Ng' и Np') с показателем преломления канадского бальзама, предварительно проверив значение последнего. Показатель преломления канадского бальзама равен примерно 1,534—1,540*. Следовательно, когда Np' плагиоклаза меньше 1,54, значение полученных углов $Np' : 010$ следует брать с отрицательным знаком. Если Np' больше светопреломления канадского бальзама, то значение углов погасания берут с положительным знаком.

Для определения кислых плагиоклазов указанный метод не всегда применим, так как в них вследствие близости значений Ng' и Np' к светопреломлению канадского бальзама обычно спайность видна плохо. Для определения средних и основных плагиоклазов этот метод имеет важное значение, так как не уступает по точности определению по двойникам и занимает несравненно меньше времени.

Последовательность работы при определении плагиоклазов в разрезах $\perp [100]$

1. Выбирают разрез плагиоклаза с хорошо видимыми трещинками пересекающейся спайности и приводят его к центру нитей.

2. Определяют в данном сечении при помощи гипсовой пластинки расположение Np' . Это производится так же, как на плоском столике.

3. Поворотом вокруг осей N и H устанавливают спайность 010 параллельно плоскости симметрии микроскопа. Спайность 010 является ближайшей к Np' ; она может дополнительно быть

* В зависимости от примесей светопреломление канадского бальзама может изменяться от 1,520 до 1,545, резко снижаясь, например, от примеси ксилола. Это обстоятельство надо учитывать при работе.

определена по тому, что параллельно ей располагаются обычно двойниковые швы полисинтетических альбитовых двойников.

4. Наклоном вокруг оси I приводят вторую систему трещин спайности по 001 в положение максимальной четкости и закрепляют винт оси I . После указанных манипуляций [100] совмещена с осью A .

3. В установленном сечении \perp [100] измеряют угол между 010 и Np' , для чего поворачивают столик микроскопа вокруг оси A и берут отсчеты по лимбу этой оси. Производят это так же, как на плоском столике. Замечают отсчет столика в том положении, когда с вертикальной нитью совмещен 010; затем с вертикальной нитью совмещают Np' и вновь берут отсчет по лимбу оси A . Разность полученных отсчетов дает искомый угол $Np':010$.

6. С помощью графика на рис. 52 по полученному значению угла $Np':010$ определяют номер плагиоклаза. Если $Np' < 1,54$, то угол погасания берут со знаком минус, если $Np' > 1,54$, то — со знаком плюс (см. § 21).

Определение плагиоклазов по максимальному симметричному угасанию альбитовых двойников $Np':010$ в зоне $\perp 010$

Данный метод при работе на плоском столике является статистическим и требует максимального числа измерений в различных сечениях плагиоклаза. Из полученных данных выбирают максимальное значение угла погасания и по графику (рис. 52) определяют номер плагиоклаза. Работа на федоровском столике дает возможность измерить угол максимального симметричного угасания альбитовых двойников в одном разрезе, приводя поочередно все сечения зоны $\perp 010^*$ в положение, перпендикулярное к оси A . Как видно на рис. 52, кривые определения плагиоклазов для обоих методов совпадают примерно до № 40—50. Для более основных плагиоклазов кривые расходятся. При определении плагиоклазов по углу угасания $Np':010$ в разрезе \perp [100] надо пользоваться штриховыми линиями, а для разбираемого метода — сплошными.

Определение знака угасания для кислых плагиоклазов (до № 34—35) устанавливается путем сравнения показателей преломления Np' и канадского бальзама.

Для плагиоклазов ряда битовнит-анортит и чистого анортита указанный метод дает малую точность и не может быть рекомендован.

* Зона называется совокупность сечений, параллельных определенному направлению; в рассматриваемом случае зона $\perp 010$ объединяет все возможные сечения, перпендикулярные к грани 010. Ребра этих сечений параллельны друг другу.

Последовательность работы при определении плагиоклазов по максимальному симметричному угасанию альбитовых двойников в зоне $\perp 010$

1. Выбирают разрез плагиоклаза с хорошо видимым двойникованием по альбитовому закону (альбитовые двойники характеризуются симметричным угасанием в зоне $\perp 010$, а также восьмикратным исчезновением двойниковой структуры при полном повороте вокруг оси A). Для проверки того, расположен ли двойниковый шов параллельно 010 , следует определить относительно него знак зоны, который в плагиоклазах до № 70—75 отрицателен.

2. Поворотом вокруг осей N и H совмещают плоскость срастания (т. е. 010) с плоскостью симметрии микроскопа; при этом $\perp 010$ будет совмещен с осью I .

3. Ставят лимб оси I в нулевое положение и вращением вокруг оси A вправо и влево измеряют углы угасания обеих систем двойниковых полосок. Измеряют углы между двойниковым швом 010 и Np' в обеих системах двойника, из которых берут среднее значение. Это значение, как и все последующие, необходимо записывать.

4. Наклоняют вокруг оси I , например, на себя на 10° и, закрепив винт на отсчете 350° , вновь вращением столика микроскопа вокруг оси A измеряют угасание двойниковых полосок.

Далее измеряют углы угасания двойников при наклонах столика вокруг оси I , соответствующие отсчетам на лимбе этой оси $340, 330, 320^\circ$, а также затем отсчетам $10, 20, 30, 40^\circ$. Если максимальное значение угла $Np' : 010$ было, например, при наклоне вокруг оси I в интервале $10—20^\circ$, то в этом пределе углов наклона вокруг оси I надо произвести несколько дополнительных измерений углов угасания двойников. Эти измерения производятся, например, при отсчетах по лимбу оси I , равных $12, 14, 16, 18^\circ$, или хотя бы (при массовой работе) при наклоне вокруг оси I , равном 15° . Из полученных значений выбирают максимальный и по графику (рис. 52) определяют номер плагиоклаза.

Для определения плагиоклазов по максимальному углу $Np' : 010$ в зоне $\perp 010$ можно пользоваться не только разрезами, сдвойникованными по альбитовому закону, но и другими сечениями. Принцип метода остается тем же, но измеряется не угол симметричного угасания, а непосредственно угол $Np' : 010$. Если плагиоклаз, например, сдвойникован по осевому или сложному законам, имеющим плоскость срастания 010 , то угасание $Np' : 010$ в обеих системах двойника не будет симметричным и нужно определять для каждого индивида двойника отдельно максимальное значение угла $Np' : 010$. При определении плагиоклаза пользуются тем же графиком.

Определение зональных плагиоклазов

Рассматриваемые методы особенно удобны при определении зональных плагиоклазов. В этих плагиоклазах затруднительно устанавливать индикатрису в каждой зоне, число которых часто

Таблица 7

Определение зонального плагиоклаза в кварцевом диорите

Номер шлифа	Угасание	Зоны						
		Ядро	1	2	3	4	5	6
12	$Np' : 010$ в разрезе $\perp [100]$	+32°	+25	+20	+17	+12	+5	0
	Номер плагиоклаза	56	50	37	28	26	23	20

очень велико, а ширина отдельных зон весьма незначительна. Наиболее рационально в этих случаях совместить $[100]$ с осью A столика и производить измерения в каждой зоне для угла погасания $Np' : 010$. Результаты измерений можно записывать в виде табл. 7.

Глава VI

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЛИЕВО-НАТРИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

§ 26. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, НОМЕНКЛАТУРА, ТАБЛИЦЫ СВОЙСТВ

Калиево-натриевые полевые шпаты широко распространены в магматических и метаморфических породах. Они являются порообразующими минералами гранитов и гранитоидов, сиенитов, монзонитов и их вулканических аналогов. Важное значение они имеют в продуктах регионального метаморфизма (пара- и ортогнейсы) и в метасоматитах.

Физические (включая кристаллооптические) свойства щелочных полевых шпатов зависят от их химического состава и условий кристаллизации (степени упорядоченности). Анализ диаграмм фазового состояния бинарной системы ортоклаза $KAlSi_3O_8$ — альбита $NaAlSi_3O_8$ показывает, что при высоких температурах эти минералы кристаллизуются по типу твердых растворов с минимумом m ; при закалке образуются гомогенные кристаллы «пестрого» состава с любыми соотношениями калия и натрия. При медленной кристаллизации они распадаются по линии сольвус на две твердые фазы: существенно калиевую, содержащую максимум 23% альбита Ab и существенно натриевую, в которую может входить не более 7—8% ортоклаза Or (рис. 53). При $p_{H_2O} > 3$ кбар идет уже раздельная кристаллиза-

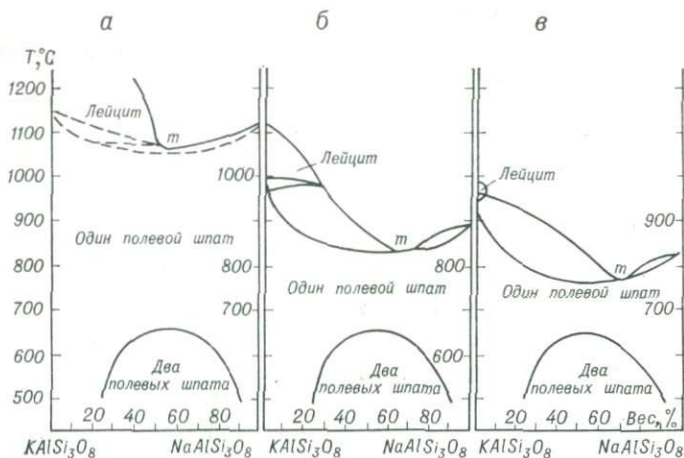


Рис. 53. Диаграмма фазовых равновесий в системе ортоклаз — альбит для сухих расплавов (а), при p_{H_2O} , равном 1 (б) и 2 кбар (в).

т — температурный минимум.

ция указанных минералов с образованием эвтектики — твердых растворов предельных концентраций (рис. 54). Приведенные диаграммы объясняют причины различия химического состава высоких и низких модификаций щелочных полевоих шпатов. Первые имеют варьирующее соотношение калиевой и натриевой составляющих; вторые являются более «чистыми» по химическому составу.

При изоморфном замещении калия натрием в высокотемпературном ряду происходит изменение структуры — сингонии — полевоих шпата и моноклинные разновидности переходят в три-

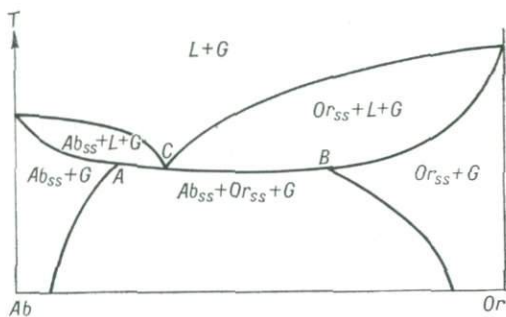


Рис. 54. Схематическая диаграмма состояния системы альбит (Ab) — ортоклаз (Or) — вода при высоком p_{H_2O} (по Э. Элерсу, 1975 г.).

Ab_{ss} и Or_{ss} — альбит и ортоклаз (твердые растворы); L — жидкость; G — газ; точки A и B — твердые растворы предельных концентраций; C — эвтектика твердых растворов предельных концентраций.

клинные. Этот тип превращений относится к так называемому типу сдвиговых незакаляющихся превращений. Химический состав, при котором осуществляется этот процесс, был впервые определен Ф. Лавесом [Laves F., 1952 г.] как $Or_{37} Ab_{63}$. Щелочные полевые шпаты с содержанием альбитовой составляющей 63—90% называются анортотлазом, а разновидности с содержанием $NaAlSi_3O_8 > 90\%$ относят к высоким альбитам.

Кристаллическая решетка полевых шпатов, образующихся при высокой температуре и быстром остывании (закалке), является наименее упорядоченной; к ним относятся высокотемпературные модификации калиевых, натриевых и калиево-натриевых полевых шпатов. В современной литературе для этих разновидностей применяют определение высокий санидин, высокий альбит и др. При медленном остывании в этих модификациях происходит структурная перестройка и осуществляется переход в более упорядоченные разновидности. Наибольшей степенью упорядоченности в существенно калиевых полевых шпатах обладает низкий или максимальный микроклин, в натриевых — низкий альбит. Между низкими и высокими модификациями выделяется ряд разновидностей, обладающих промежуточной степенью упорядоченности и промежуточной степенью триклинности.

Степень упорядоченности наиболее эффективно определяется по 2ν ; так, например, калиевые и калиево-натриевые полевые шпаты с 2ν от 0 до 50° характерны для высокотемпературных разновидностей с малой степенью упорядоченности; эти модификации имеют моноклинную сингонию. Отклонение от моноклинной сингонии (или степень триклинности) определяется по кристаллооптическим свойствам на федоровском столике, а также по данным рентгеноструктурных исследований. В моноклинных модификациях рефлексы от граней 131 и $\bar{1}\bar{3}1$ сливаются вместе с образованием одного дифракционного пика; в триклинных резко обособляются два пика. Для определения степени упорядоченности рентгеноструктурные данные являются наиболее точными.

В высокотемпературном ряду санидин — высокий альбит можно выделить разновидности, приведенные в табл. 8. К низкотемпературным вариантам относится микроклин, который, как показано выше, может содержать не более 23% альбитовой составляющей. В составе низкого альбита содержание $KAlSi_3O_8$ не превышает 7—8%.

В табл. 9 дана сводка главных кристаллооптических свойств калиево-натриевых полевых шпатов. Промежуточные триклинные разновидности в таблицу не помещены; их свойства являются промежуточными между свойствами ортоклаза и максимального микроклина. А. С. Марфуниным в 1960 г. была составлена диаграмма для определения различных модификаций

Таблица 8

Разновидности калиево-натриевых полевых шпатов в ряду санидина и ортоклаза

Ряд санидина и ортоклаза	Содержание, %		Сингония
	$KAlSi_3O_8$	$NaAlSi_3O_8$	
Санидин и ортоклаз	100—75	0—25	Моноклинная
Натриевый санидин и натриевый ортоклаз	75—37	25—63	Моноклинная
Высокий и низкий анортоклаз	37—10	63—90	Триклинная
Высокий альбит	10—0	90—100	Триклинная

Примечание. Некоторые данные противоречат приведенным сведениям. Так, В. Мак-Кензи установил экспериментально, что триклинный анортоклаз при нагревании переходит в моноклинную модификацию; при охлаждении имеет место обратный процесс [MacKenzie V., 1952 г.]. О. Ф. Таттл и Н. Боуэн экспериментально получили шесть модификаций альбита: две из них высокотемпературные моноклинные, четыре — триклинные [73].

в ряду существенно калиевых полевых шпатов по степени упорядоченности кристаллической решетки и степени триклинности [27]. Степень триклинности максимального микроклина условно принята за 1, санидина — за 0. В микроклине угол $Ng: \perp 010 = 18^\circ$, в санидине $Ng: \perp 010 = 0^\circ$. В переходных разновидностях эти углы имеют промежуточное значение. На рис. 55 по оси абсцисс отложена степень триклинности Δ от 0 до 1 и меняющийся пропорционально ей угол $Ng: \perp 010$ от 0 до 18° . Соответственно этому в левой части графика располагаются моноклинные модификации, справа — триклинные; все остальные модификации обладают промежуточной степенью триклинности. На оси ординат нанесены значения $2v$, характеризующие степень упорядоченности; соответственно этим значениям диаграмма разбита на ряд дополнительных полей, разделенных горизонтальными линиями. Самая верхняя горизонтальная линия, отделяющая поле высокого санидина от низкого, соответствует снижению значения $2v$ до 0° и изменению положения плоскости оптических осей. Диаграмма Марфунина приведена в неизменном виде. Однако установлено, что ортоклаз не может иметь триклинную сингонию и следовало бы триклинный высокий ортоклаз, триклинный промежуточный ортоклаз и триклинный низкий ортоклаз именовать соответственно высоким, промежуточным и низким микроклином.

Большую роль в изучении рассматриваемой группы минералов сыграли работы О. Ф. Таттла и Н. Боуэна [1950 г., 1958 г.], В. Мак-Кензи и И. В. Смита [1955 г., 1958 г.], Ф. Лавеса [1950 г., 1952 г.], Е. Спенсера [1938 г.], А. Вильсона [1957 г.], Дж. Мюира [1955 г.], Р. Гольдсмита [1954 г.], С. Чэо, А. Хааргривса, В. Тейлора [1940 г.] и других. Переводы этих работ имеются в двух сборниках статей «Полевые шпаты» [30, 31]. Наиболее подробные сведения по физико-химическому исследованию щелоч-

Таблица 9

Главнейшие кристаллооптические свойства калиево-натриевых полевых шпатов

Название полевого шпата	$2v$	Показатели преломления	Оптическая ориентировка			Двойники (наиболее распространенные законы)	Характерные особенности
			Расположение плоскости оптических осей	$N_g : 010$	$N_g : 001$		
Высокий санидин	0—30°	$N_p = 1,519$, $N_g = 1,526$ и выше	010	90°	0°	Простые: карлсбадский, манебахский, ба-венский	Водяно-прозрачен; в кайнотипных экстрезивных породах
Низкий санидин	0—40	$N_p = 1,519$, $N_g = 1,526$ и выше	⊥ 010	0	90	То же	То же
Высокий ортоклаз	40—60	$N_p = 1,519$, $N_g = 1,526$ и выше	⊥ 010	0	90	„	Прямое угасание в разрезах 001. Пелитизирован
Низкий ортоклаз	60—80	$N_p = 1,519$, $N_g = 1,526$	⊥ 010	0	90	„	То же
Максимальный микроклин	>80	$N_p = 1,519$, $N_g = 1,526$	$N_m : \perp 001 =$ $= 12 \div 13$	18	80—82	Полисинтетические: альбитовый, периклиновый	Микроклиновая решетка. Часто пертиты распада

Продолжение табл. 9

Название полевого шпата	2 <i>v</i>	Показатели преломления	Оптическая ориентировка			Двойники (наиболее распространенные законы)	Характерные особенности
			Расположение плоскости оптических осей	<i>N</i> _g : 010	<i>N</i> _g : 001		
Высокий аноктолаз	30—50	$N_p = 1,523 \pm$, $N_g = 1,530 \pm$	010	90	0	Простые, аналогичные санидину	Отличается от санидина более высоким показателем преломления
Низкий аноктолаз	50—80	$N_p = 1,525 \pm$, $N_g = 1,536 \pm$	$Nm: \perp 001 =$ $= 7 \div 10$	9—12	84—86	Полисинтетические, аналогичные микроклину	Отличается от микроклина более высоким показателем преломления
Высокий альбит	45—50	$N_p = 1,525$, $N_g = 1,536$	$Nm: \perp 001 =$ $= 10 \div 12^\circ$	—	—	—	Изучен в синтетических продуктах. $N_p' : 010$ в разрезах $\perp [100]$ равен $12-13^\circ$
Низкий альбит	75—80	$N_p = 1,528$, $N_g = 1,539$	$Nm: \perp 001 =$ $= 32 \div 33$	15—16	75—76	Полисинтетические: альбитовый, периклиновый	Часто серицитизирован. $N_p' : 010$ в разрезах $\perp [100]$ равен $18-19^\circ$

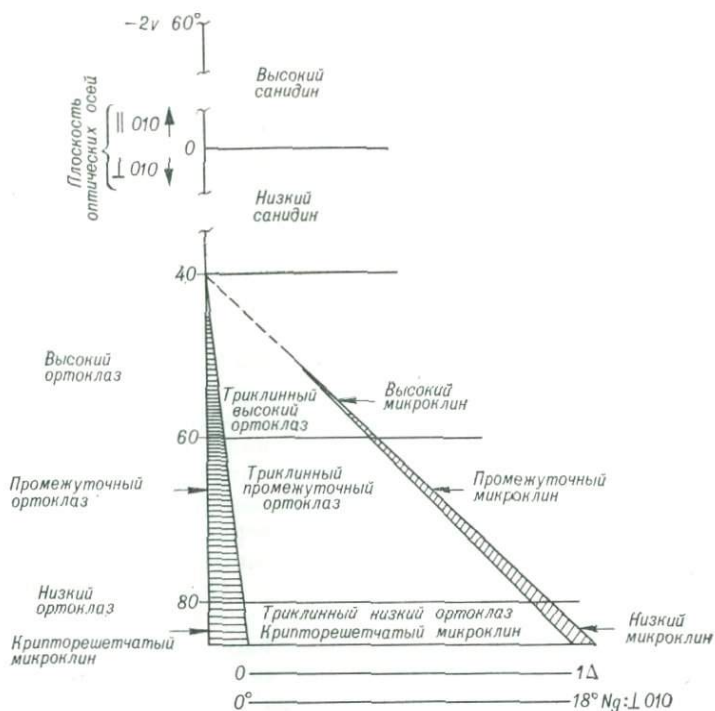


Рис. 55. Диаграмма Марфунина для определения степени упорядоченности и степени триклинности в ряду существенно калиевых полевых шпатов.

ных полевых шпатов приведены в монографии О. Ф. Таттла и Н. Л. Боуэна [73]. Из отечественных исследователей щелочные полевые шпаты изучали Д. С. Белянкин [1937 г., 1944 г.], В. П. Петров [1955 г.], Л. А. Варданянц [1959 г.], В. С. Соболев [1954 г., 1955 г.], А. С. Марфунин [28], В. К. Мочич [1952 г., 1959 г.] и другие. В книге А. С. Марфунина приведена подробная сводка предшествующих исследований, разобрана фазовая природа полевых шпатов, выделены структурно-оптические типы и дан анализ геолого-петрографического значения этих минералов на основании структурно-оптической интерпретации их фазовой природы. В расшифровке структурного состояния и понимания фазовой природы щелочных полевых шпатов большое значение в настоящее время имеют исследования Д. Б. Слимонса [68], И. В. Смита [69], И. Е. Каменцева и О. Г. Сметанниковой [17], А. Л. Косого и Н. В. Котова [20] и других.

§ 27. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СУЩЕСТВЕННО КАЛИЕВЫХ И КАЛИЕВО-НАТРИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ.

ОТЛИЧИЕ ОРТОКЛАЗА ОТ МИКРОКЛИНА МАКСИМАЛЬНОГО

При изучении на федоровском столике щелочных полевых шпатов необходимо определить ориентировку их оптической индикатрисы по отношению к кристаллографическим элементам,

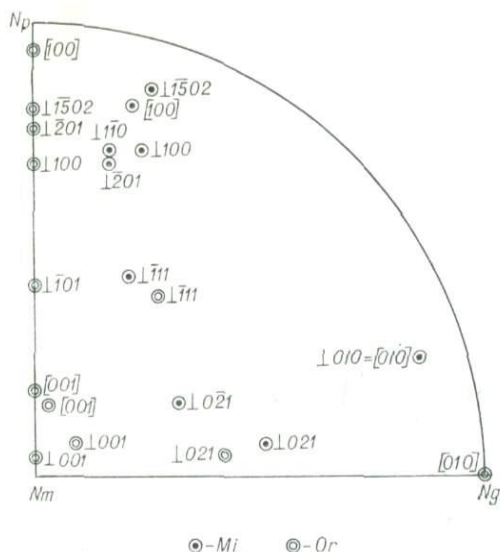


Рис. 56. Диаграмма Никитина для определения ортоклаза и микроклина (максимального).

можно определять относительно плоскостей спайности, отдельности, элементов двойникования (двойниковой оси или плоскости срастания). Методика работы аналогична той, которая применяется для плагиоклазов.

На диаграмме Никитина (рис. 37 и 56) приведены данные только для ортоклаза и микроклина, являющихся наиболее упорядоченными модификациями. Ортоклазу и микроклину отвечают черные и синие кружки. Первые показывают ориентировку Ng , Nm , Np относительно полюсов плоскостей спайности, отдельности, ограничений или двойниковых осей $\perp 010$, $\perp 001$ и других в законах граней, вторые — ориентировку осей индикатрисы относительно двойниковых осей $[100]$, $[010]$ и $[001]$, соответственно законам эстерель, периклиновому и карлсбадскому. Как видно на этих диаграммах, наиболее достоверно ортоклаз отличается от микроклина по полюсу спайности 010 , а также по полюсам $\bar{1}502$ (мурчисонитовая отдельность) и двойниковой оси $[100]$; точки, соответствующие этим элементам для ортоклаза и микроклина, отстоят на диаграмме далеко друг от друга. Однако указанные кристаллографические элементы не всегда выражены в имеющихся в распоряжении зернах и тогда ориентировку приходится определять по отношению к другим кристаллографическим элементам, например к полюсу спайности 001 и т. д. Об определении альбита см. § 21 и 22.

При работе следует иметь в виду, что весьма часто точка, полученная на диаграмме Никитина по координатам полюса

угол оптических осей $2v$ и законы двойникования. Для уточнения полученных данных часто необходимо параллельно с изучением на федоровском столике измерять показатель преломления полевого шпата иммерсионным методом, чтобы судить об относительном содержании $KAlSi_3O_8$ и $NaAlSi_3O_8$ (например, для отличия санидина от анортоклаза при близком или однозначном угле оптических осей), а также производить рентгеноструктурные исследования.

Ориентировку оптической индикатрисы щелочных полевых шпатов

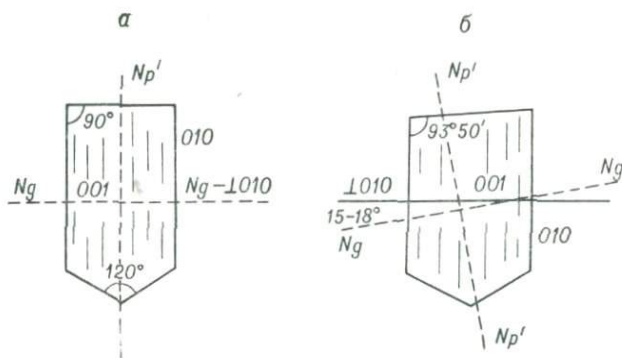


Рис. 57. Схема ориентировки осей индикатрисы ортоклаза (а) и микроклина (б) на грани 001.

спайности, двойниковой оси и другим кристаллографическим элементам относительно Ng , Nm , Np , не попадает точно в кружок ортоклаза или микроклина, а располагается между ними. Эта особенность связана с изменением степени упорядоченности и триклинности. Степень триклинности этих калиевых полевых шпатов можно определять по дополнительной диаграмме Марфунина (см. рис. 55). Тип закона двойникования, наименование плоскости спайности или плоскости срастания и другие кристаллографические элементы определяют по диаграмме Никитина. Ниже в табл. 10 приведены главные кристаллооптические свойства моноклинного ортоклаза, максимального триклинного микроклина и последовательность работы при их определении. Данные, приведенные в таблице, иллюстрируются рис. 57 и 58.

Таблица 10

Главные кристаллооптические свойства ортоклаза и микроклина

Свойства	Ортоклаз моноклинный	Микроклин (максимальный)
010 : 001	90°	93°46'
$Ng \perp 010$	0	18—20°
$Nm \perp 010$	90	84—85
$Np \perp 010$	90	84—85
$Ng \perp 001$	90	80—81
$Nm \perp 001$	5—7	12—13
$Np \perp 001$	86—87	81—82

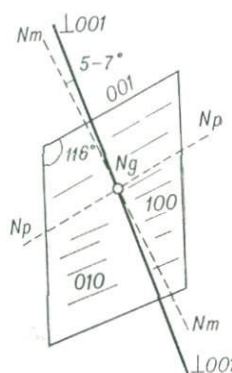


Рис. 58. Схема ориентировки осей индикатрисы ортоклаза на грани 010.

Последовательность работы при определении ортоклаза и микроклина

Определение по спайности. 1. Выбирают зерно калиевого полевого шпата с четко выраженной спайностью и приводят его к центру окулярных нитей.

2. Устанавливают оптическую индикатрису полевого шпата и наносят ее на стереографическую проекцию. Если одно из сечений индикатрисы было перпендикулярно к Nm , то определяют $2v$ (желательно по двум выходам).

3. Устанавливают плоскость спайности и наносят на стереографическую проекцию ее полюс.

4. Пользуясь сеткой Вульфа, определяют на стереографической проекции угловые координаты полюса спайности с осями индикатрисы.

5. По полученным координатам на диаграмме Никитина определяют полевой шпат и наименование плоскости спайности (отдельности). Например, были получены координаты $П.сн. Ng 18^{\circ}30'$, $Nm 83^{\circ}$, $Np 73^{\circ}$. Эти координаты, как видно на диаграмме Никитина, отвечают микроклину; спайность соответствует 010.

Определение по двойникам (и определение закона двойникования).

1. Выбирают разрез полевого шпата с хорошо образованными двойниками и приводят его к центру окулярных нитей. Проверяют, по какому типу (закон грани или осевой) сдвойничено зерно.

2. Устанавливают оптические индикатрисы обоих индивидов двойника (или систем в случае полисинтетического двойникования) и наносят их на стереографическую проекцию, если возможно, определяют $2v$ *.

3. Графическим путем, соединяя одноименные оси индикатрисы обоих двойников, находят двойниковую ось. Полученную двойниковую ось проверяют практически совмещением ее с осью I или A столика (см. § 20).

4. Определяют на диаграмме, пользуясь сеткой Вульфа, углы $До$ с осями оптической индикатрисы обоих индивидов двойника, вычисляют и записывают их средние значения.

5. По полученным средним значениям $До$ с Ng , Nm , Np определяют полевой шпат и закон двойникования.

6. Для проверки и уточнения полученных данных в случае осевых законов определяют координаты полюса плоскости срастания с Ng , Nm , Np обоих индивидов двойника. Для этого совмещают плоскость срастания с плоскостью симметрии микроскопа и наносят ее на стереографическую проекцию. Опреде-

* Если в выбранном зерне невозможно измерить $2v$, то измерение производят в другом зерне.

ляют на ней угловые координаты Ng , Nm , Np с полюсом плоскости срастания обеих систем двойников и вычисляют средние значения. По диаграмме Никитина смотрят, куда попадает точка, полученная по указанным координатам. Она должна попасть вблизи черного кружка, соответствующего ортоклазу или микроклину (или между ними в случае минерала с промежуточной степенью триклинности). Цифра, стоящая у кружка, укажет наименование плоскости срастания. Положение точки служит контролем правильности определения закона двойникования.

Пример определения полевого шпата по координатам двойниковой оси и проверка по полюсу плоскости срастания. Координаты двойниковой оси (усредненные): $Do Ng 87^\circ$, $Nm 18^\circ$, $Np 73^\circ$. Микроклин, $Do = [001]$, закон карлсбадский. Проверка по координатам полюса плоскости срастания *П. сп.* $Ng 18^\circ$, $Nm 72^\circ$, $Np 85^\circ$ — плоскость срастания 010 (микроклин).

В моноклинных модификациях — ортоклазе, санидине — образуются простые двойники обычно по карлсбадскому закону, реже по манебахскому и бавенскому. В триклинных модификациях — микроклине, аноклазе — встречаются как простые, так и полисинтетические двойники. Особенно характерны полисинтетические двойники по альбитовому и периклиновому законам. Двойникование по этим законам обуславливает образование так называемой микроклиновой решетки, особенно четко видной в разрезах, параллельных 001. Простые двойники в триклинных модификациях те же, что в моноклинных.

§ 28. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КАЛИЕВО-НАТРИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ (САНИДИНОВ, АНОРТОКЛАЗОВ)

Высокотемпературные калиево-натриевые полевые шпаты встречаются в кайнотипных экструзивных породах (лавах, туфах), гипабиссальных телах, а также в технических продуктах и материалах, полученных искусственным путем, например при отжиге природных минералов. К высокотемпературным модификациям калиево-натриевых полевых шпатов относятся: высокий и низкий санидин, аноклаз. Все высокотемпературные модификации характеризуются малым углом оптических осей ($2v < 50^\circ$) и большим, чем у микроклина, показателем преломления соответственно более высокому содержанию в них $NaAlSi_3O_8$. При этом наиболее высокотемпературные модификации могут содержать максимальное количество $NaAlSi_3O_8$.

Высокий и низкий санидин отличаются друг от друга по разной ориентировке плоскости оптических осей (см. табл. 9), $2v$ изменяется в них от 0 до 40° . Характерной особенностью является малая степень их изменения. С течением времени санидин дает антипертиты распада и переходит в ортоклаз или микроклин.

При исследовании санидинов и анортоклазов на федоровском столике необходимо определять угол оптических осей $2v$, ориентировку оптической индикатрисы, соответствующую ей сингонию и степень триклинности, закон двойникования. Параллельно с определением на федоровском столике следует применять иммерсионный способ определения показателей преломления. Определению минералов с малым $2v$ посвящен специальный § 11; данные, приведенные в нем, должны строго учитываться при работе на федоровском столике.

У санидинов и анортоклазов с малым $2v$ часто при работе бывает трудно и даже невозможно отличить друг от друга сечения, перпендикулярные к Ng и Nm ; угол $2v$ в этих минералах следует определять только в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе Np или близких к ним. В этих разрезах легко можно различить оси Ng и Nm и установить их ориентировку относительно кристаллографических элементов. В сомнительных случаях необходимо применять коноскопический метод. Если $2v$ резко уменьшается ($<20^\circ$), то обычными методами становится невозможно отличить Ng от Nm . В этих случаях для определения оптического знака, законов двойникования и ориентировки оптической индикатрисы указанные минералы можно определять как одноосные; при таком определении ориентировки оптической индикатрисы точность, конечно, не будет высокой; ее можно повысить, применяя стереоконоскопический метод Л. А. Варданянца [6].

Последовательность работы при исследовании санидинов и анортоклазов с малым $2v$

Исследование $2v$ и оптической ориентировки необходимо производить в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе или близких к ним.

1. Выбирают разрез изучаемого кристалла с наиболее низкой интерференционной окраской (темно-серой — черной), устанавливают на столике и наносят на стереографическую проекцию оптическую индикатрису кристалла (для проверки расположения осей Ng и Nm рекомендуется пользоваться коноскопией — см. § 11). В сечении, перпендикулярном к оси Nm , определяют $2v$ и оптический знак.

2. Устанавливают на столике и наносят на стереографическую проекцию имеющиеся кристаллографические направления (спайность, отдельность, элементы двойникования).

3. Пользуясь сеткой Вульфа, определяют угловые координаты Ng , Nm и Np по отношению к полюсу спайности, отдельности, элементам двойникования.

Специальных диаграмм, учитывающих современные данные по исследованию санидинов и анортоклазов, не имеется. Поэтому для характеристики того или иного вида приводят полу-

ченные данные, дополненные иммерсионными определениями. Для определения наименования спайности и закона двойничкования можно пользоваться диаграммой Никитина. На этой диаграмме моноклинные модификации должны располагаться вблизи точек ортоклаза.

Глава VII

ИССЛЕДОВАНИЕ

ПИРОКСЕНОВ И АМФИБОЛОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

§ 29. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Пироксены и афиболы — наиболее распространенные минералы фемического ряда — являются породообразующими минералами магматических и метаморфических пород. Изучение этой группы двусных минералов производится обычно на универсальном столике, так как часто лишь по точным константам бывает возможно отнести изучаемый пироксен или амфибол к тому или иному минеральному виду и судить о его химическом составе.

Главнейшими кристаллооптическими свойствами, важными для характеристики пироксенов и амфиболов, являются: ориентировка оптической индикатрисы относительно кристаллографических элементов, сингония, константа N_g : [001], угол спайности, угол оптических осей, сила двупреломления, характер плеохроизма.

Амфиболы и пироксены кристаллизуются в ромбической и моноклинной сингониях, образуя обычно призматические кристаллы, вытянутые по [001], реже изометрические зерна. В ромбических разновидностях угол между 100 и 001 равен 90° , в моноклинных — 106° . И в пироксенах, и в амфиболах хорошо развита призматическая спайность, параллельная граням 110. В пироксенах угол между плоскостями спайности равен 93 и 87° , в амфиболах — 124 и 56° .

Совершенная пересекающаяся спайность видна в разрезах \perp [001], которые в ромбических разновидностях параллельны грани 001; в моноклинных эти разрезы образуют угол с гранью 001, равный 16° .

Параллельная спайность видна на гранях вертикального пояса; она различается степенью совершенства в зависимости от наклона этих граней к граням призмы. Наряду с призматической спайностью нередко встречается отдельность по 100, 010 и 001. Часто встречаются двойники простые и полисинтетические. Показатели преломления варьируют для пироксенов в пределах $1,70$ — $1,75$, для амфиболов — $1,60$ — $1,65$. Следовательно, для

изучения этих минералов на федоровском столике надо пользоваться стеклянными сегментами с показателем преломления 1,647. При отсутствии этих сегментов необходимо вносить соответствующие поправки по круговой диаграмме Федорова (см. рис. 10).

Двупреломление в наиболее распространенных амфиболах и пироксенах среднее и сильное, оно снижается до слабого в энстатите и в группе щелочных амфиболов.

Для ориентировки оптической индикатрисы характерны следующие особенности: плоскость оптических осей обычно $\parallel 010$, т. е. Nm совпадает с $[010] = \perp 010$. В ромбических амфиболах и пироксенах Ng совпадает с $[001]$, а Np — с $[100]$. В иностранной литературе можно встретить указания на другую ориентировку в группе ромбических пироксенов: $Nm[100]$, $Np[010]$ [Hess, Phillips, 1949 г.]. В. Н. Лодочников указывает, что при срастании ромбических пироксенов с моноклинными пироксенами или амфиболами оптическая ориентировка первых меняется и Np соответствует $[001]$, а Ng — $[100]$ [24, § 217]. В моноклиновых амфиболах и пироксенах только одна ось оптической индикатрисы (Nm) совпадает с кристаллографической осью $[010]$, две другие оси оптической индикатрисы образуют углы с кристаллографическими осями; угол между Ng и $[001]$ является важным диагностическим признаком при определении пироксенов и амфиболов (константа $Ng:[001]$ часто обозначается как CNg).

Ниже на рис. 59—63 схематически приведена ориентировка оптической индикатрисы в ромбических и моноклиновых амфиболах и пироксенах. Расположение оси Nm в ромбических и моноклиновых разновидностях изучаемой группы минералов аналогично. В разрезах $\perp [001]Nm$ является биссектрисой острого угла между плоскостями призматической спайности; угасание в этих разрезах симметричное. Определение оптической ориентировки амфиболов и пироксенов в сочетании с рентгеноструктурными исследованиями используются в настоящее время для характеристики их кристаллооптических свойств [9, 35, 36].

§ 30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТИРОВКИ АМФИБОЛОВ И ПИРОКСЕНОВ (ИЗМЕРЕНИЕ КОНСТАНТЫ $Ng:[001]$)

Особенности ориентировки

При определении пироксенов и амфиболов константа $Ng:[001]$ является одним из важнейших диагностических признаков. В ромбических разновидностях Ng совпадает с $[001]$, т. е. $Ng:[001] = 0^\circ$. В ромбических пироксенах $Ng:[001]$ может доходить до 10° [24, § 218]. В моноклиновых пироксенах и амфиболах Ng образует различные углы с $[001]$ — от сравнительно небольших (в амфиболах, клиноэнстатите, кли-

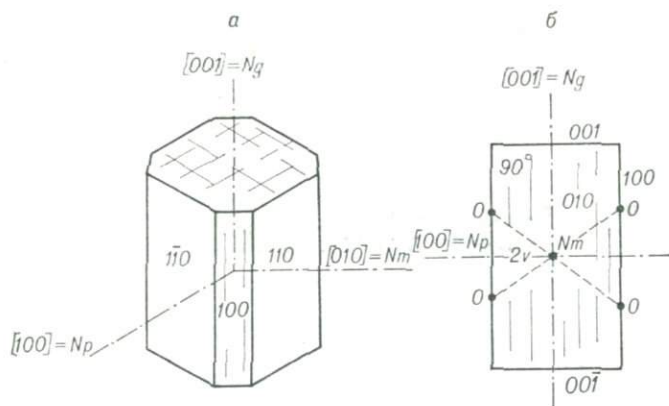


Рис. 59. Схема оптической ориентировки ромбического амфибола (а) и ориентировки в разрезе $\parallel 010$ (б).

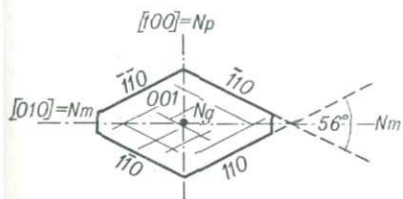


Рис. 60. Схема оптической ориентировки ромбического амфибола в разрезе $\parallel 001 = \perp 001$.

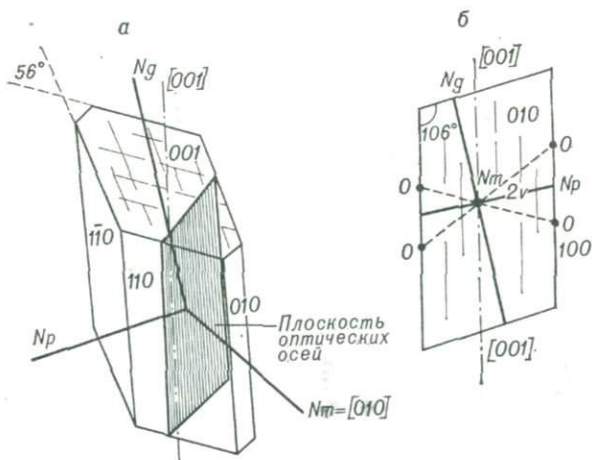


Рис. 61. Схема оптической ориентировки моноклиновых амфиболов (а) и оптической ориентировки в разрезе $\parallel 010$ (б).

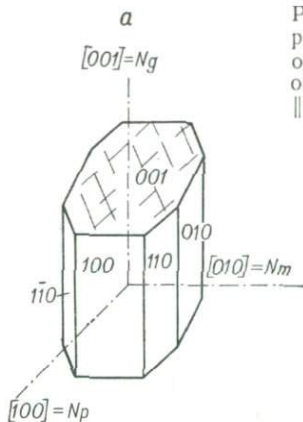


Рис. 62. Схема оптической ориентировки ромбического пироксена (а), ориентировки в разрезе $\parallel 010$ (б) и оптической ориентировки в разрезе $\parallel 001$ (в).

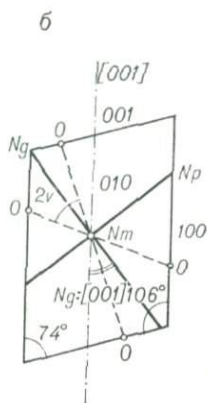
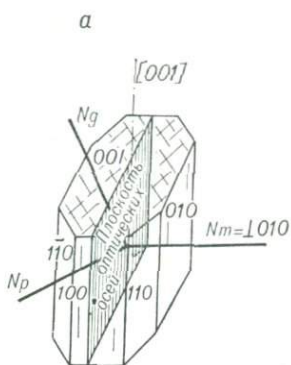
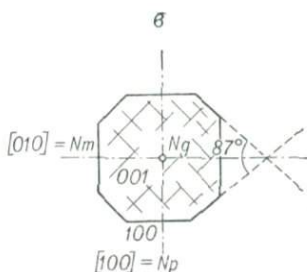
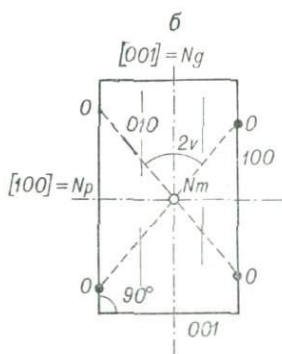


Рис. 63. Схема оптической ориентировки моноклинного пироксена (а) и оптической ориентировки в разрезе $\parallel 010$ (б).

ногиперстене), средних (в преобладающем количестве пироксенов), до больших (в эгирине, эгирин-авгите).

На плоском столике угол $Ng:[001]$ может быть измерен только в разрезах $\parallel 010 (\perp Nm)$, и при их отсутствии эта константа точно определена быть не может. На универсальном столике константа $Ng:[001]$ может быть измерена во многих разрезах графическим путем.

Уточнение определения кристаллооптических свойств щелочных амфиболов, эгирина и других минералов, обладающих дисперсией осей индикатрисы, следует производить в монохроматическом свете.

Определение константы $Ng:[001]$ и угла спайности в разрезах с пересекающейся спайностью

Линия пересечения плоскостей призматической спайности представляет собой ребро призмы; ребро призмы 110 параллельно $[001]$ (см. рис. 59—63). На стереографической проекции ребро призмы (т. е. линия пересечения плоскостей спайности) изобразится в виде точки, которая проектирует $[001]$. Эта точка должна лежать в плоскости 010 ; последняя является для рассматриваемой группы минералов плоскостью оптических осей. Следовательно, нанеся на стереографическую проекцию оптическую индикатрису и обе системы спайности, легко получить константу $Ng:[001]$; для этого надо измерить градусное расстояние от точки пересечения плоскостей призматической спайности, которая проектирует $[001]$, до оси Ng оптической индикатрисы. Точка, проектирующая $[001]$, должна лежать в плоскости $NgNp$; эта особенность стереографической проекции является критерием правильности работы.

Последовательность работы при определении константы $Ng:[001]$

1. Выбирают разрез исследуемого минерала с хорошо выраженной пересекающейся спайностью и приводят его к центру нитей.

2. Устанавливают оптическую индикатрису и наносят ее на стереографическую проекцию; попутно определяют $2v$.

3. Поочередно устанавливают обе системы спайности и наносят их на стереографическую проекцию. Точка пересечения обеих систем спайности, проектирующая $[001]$, должна попасть на плоскость $NgNp$; если этого не наблюдается, надо проверить правильность установки плоскостей индикатрисы и спайности.

4. Измеряют расстояние (в градусах) от Ng до точки пересечения обеих систем спайности. Оно и будет соответствовать константе $Ng:[001]$.

5. Измеряют угол спайности — угол между полюсами спайности. Для этого надо совместить их на одну дугу большого круга. Ось Nm должна являться биссектрисой острого угла меж-

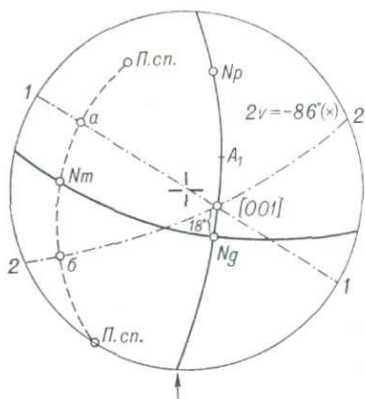


Рис. 64. Стереографическая проекция оптической индикатрисы и спайности амфибола.

ности: 1—1— $N=60^\circ$, $H \rightarrow 2^\circ$; 2—2— $N=116^\circ$, $H \leftarrow 16^\circ$; угол спайности $56-124^\circ$.

На стереографической проекции определяют $Ng : [001] = 18^\circ$ (в разрезе с пересекающейся спайностью). Следовательно, это моноклинный амфибол, отрицательный, с $2v = -86^\circ (\times)$.

Упрощенный метод определения константы $Ng : [001]$ в разрезах с пересекающейся спайностью

Для определения константы $Ng : [001]$ в разрезах с пересекающейся спайностью можно пользоваться упрощенным методом, который занимает несравненно меньше времени и не снижает точности. Основной идеей его является то, что при совмещении сечения $NgNp$, совпадающего с 010, с плоскостью симметрии микроскопа, а оси Nm , совпадающей с $\perp 010$ — с осью I , при наклонах столика вокруг оси I будут наблюдаться различные сечения зоны 010. В этой зоне лежит и $[001]$, которая при определенных наклонах вокруг оси I будет приведена в совмещение с осью A ; при этом обе системы спайности будут представлены наиболее четкими и тонкими штрихами. По соответствующим координатам (читаемым на лимбе оси I) $[001]$ может быть нанесена на стереографическую проекцию. Точка, проектирующая $[001]$, будет располагаться на дуге $NgNp$. Для получения константы $Ng : [001]$ следует измерить по сетке Вульфа градусное расстояние между Ng и $[001]$.

Последовательность работы при определении $Ng : [001]$ упрощенным методом

1. Выбирают зерно исследуемого минерала с хорошо выраженной пересекающейся спайностью и приводят его к центру нитей.

ду плоскостями призматической спайности; дуга ab (рис. 64) равна здесь 56° , а в пироксене 87° . При пересекающейся спайности угол между плоскостями может быть измерен так же, как на плоском столике. Угол между плоскостями спайности можно измерять и иначе (см. § 6).

Ниже приведены результаты измерений $Ng : [001]$ и $2v$ в разрезе с пересекающейся спайностью (см. рис. 64).

Координаты главных сечений оптической индикатрисы: I сечение $N=357^\circ$, $H \rightarrow 20^\circ$, Nm , $A_1 = 338^\circ$; II сечение $N=79^\circ$, $H \leftarrow 25^\circ$, Np . Координаты плоскостей спайности

2. Устанавливают главные сечения оптической индикатрисы, одним из которых в выбранных срезах будет сечение $NgNp$ и наносят их на стереографическую проекцию.

3. Совмещают сечение $NgNp$ с плоскостью симметрии микроскопа, а ось Nm — с осью I (Nm является биссектрисой острого угла между плоскостями спайности). Выдвигают анализатор и в указанном положении поворачивают столик вокруг оси I до совмещения $[001]$ с осью A , при этом трещинки обеих систем спайности будут наиболее четкими и тонкими. Совместив $[001]$ с осью A , замечают отсчет по лимбу оси I и по этой координате наносят на дугу выход $[001]$.

4. По дуге $NgNp$ отсчитывают на сетке Вульфа число градусов от $[001]$ до Ng , т. е. получают константу $Ng:[001]$.

Определение $Ng:[001]$ и угла между плоскостями спайности в разрезах с параллельной спайностью

Линия пересечения граней 110 и 010 будет параллельна $[001]$. Следовательно, на стереографической проекции точка пересечения плоскости второго пинакоида (т. е. сечение $NgNp$, которое параллельно 010) и плоскости призматической спайности будет проектировать $[001]$.

Градусное расстояние между осью Ng оптической индикатрисы и указанной точкой пересечения, проектирующей $[001]$, и будет являться константой $Ng:[001]$. Измерение константы $Ng:[001]$ в разрезах с параллельной спайностью менее точно, чем в разрезах $\perp [001]$, так как здесь неприменим тот критерий правильности работы, о котором говорилось выше (см. рис. 64).

Последовательность работы при определении $Ng:[001]$ и угла спайности в разрезах с параллельной спайностью

1. Выбирают разрез с хорошо выраженной параллельной спайностью и приводят его к центру нитей.

2. Устанавливают главные сечения оптической индикатрисы и наносят их на стереографическую проекцию (попутно, если это возможно, определяют $2v$).

3. Устанавливают плоскость призматической спайности и наносят ее на стереографическую проекцию.

Ниже приводятся результаты измерений кристаллооптических констант пироксена в разрезе с параллельной спайностью (рис. 65).

Координаты главных сечений оптической индикатрисы: I сечение $N-100^\circ$, $H\leftarrow 15^\circ$, Nm , $A_1=346^\circ$, $A_2=44^\circ$, $2v=+58^\circ$ (\times); II сечение $N-13^\circ$, $H\rightarrow 16^\circ$, Np . Координаты плоскости спайности: $N-323^\circ$, $H\leftarrow 6^\circ$, $Ng:[001]=40^\circ$; угол спайности $87-93^\circ$.

4. Определяют расстояние (в градусах) от Ng до точки пересечения плоскости спайности с сечением $NgNp$, т. е. с сечением $\parallel 010$. Оно и будет искомой константой $Ng:[001]$ (см. рис. 65).

5. Графически определяют угол между плоскостями спайности. Для этого проводят дугу большого круга, полюсом которого является 001. Измеряют градусное расстояние от точки a до Nm (a является точкой пересечения этой дуги большого круга с плоскостью призматической спайности). Удвоенное значение полученного угла даст угол между плоскостями спайности.

Константу $Ng:[001]$ можно определить и в разрезах, сдвоенных по 100 [32, с. 120—122].

Определение ориентировки отдельности

В пироксенах и амфиболах часто бывает развита отдельность, параллельная 100, 010 и 001. В ромбических амфиболах и пироксенах отдельность на стереографической проекции проектируется параллельно плоскости оптической индикатрисы. В моноклинные пироксены и амфиболы только отдельность, параллельная 010, проектируется на стереографической проекции параллельно плоскости оптической индикатрисы $NgNp$.

Отдельность 100 видна в разрезах, перпендикулярных к грани 100 или достаточно круто наклоненных к ней. Она проходит на стереографической проекции через Nm и $[001]$. Пересечение отдельности 100 с плоскостью $NgNp$ на стереографической проекции проектирует $[001]$ и дает возможность вычислить константу $Ng:[001]$.

Отдельность, параллельную 001, наносят на стереографическую проекцию следующим образом: от $[001]$ откладывают 16°

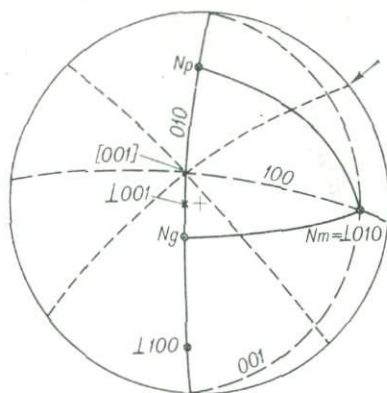
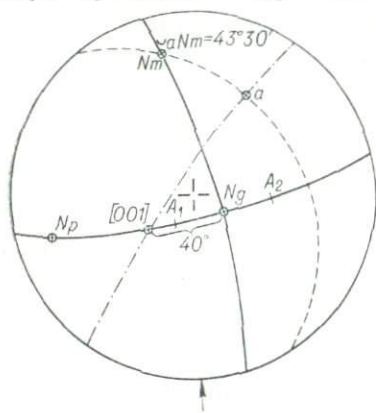


Рис. 65. Стереографическая проекция оптической индикатрисы и спайности моноклинового пироксена.

Рис. 66. Стереографическая проекция моноклинового пироксена и пинакоидальной отдельности.

в сторону Ng — это будет $\perp 001$. По полюсу 001 строят плоскость 001. Указанные данные надо иметь в виду, чтобы не спутать отдельность с призматической спайностью.

На рис. 66 дана стереографическая проекция моноклинного пироксена, на которой нанесены плоскости пинакоидальной отдельности параллельно 100 и 001.

§ 31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДРУГИХ ВАЖНЕЙШИХ КОНСТАНТ АМФИБОЛОВ И ПИРОКСЕНОВ

Определение силы двупреломления

Двупреломление является важным кристаллооптическим свойством для группы пироксенов и амфиболов. Часто только при определении констант $Ng : [001]$, $Ng - Np$, $2v$ можно отличить друг от друга такие распространенные пироксены, как диопсид-геденбергит и авгит (см. работы Т. Томито [71], А. И. Цветкова [43], В. В. Веселовской [1950 г.] и др.). Определение силы двупреломления $Ng - Np$ производится в разрезах $\perp Nm$, т. е. в изучаемой группе минералов в разрезах $\parallel 010$. При определении этой константы следует выбирать такие разрезы, где Nm образует малые углы с осью A , чтобы избежать больших углов наклона вокруг осей I и H , в которые следует вносить поправку. Подробное описание порядка работы при определении силы двупреломления дано в гл. IV.

Определение угла оптических осей

Наряду с определением констант $Ng : [001]$ и $Ng - Np$ точное измерение угла оптических осей является важным для характеристики пироксенов и амфиболов. Так, например, для ромбических модификаций этих минералов корреляция химического состава с оптическими свойствами производится по углу оптических осей и силе двупреломления. Для некоторых моноклинных пироксенов (например, для пижонита) угол $2v$ также является наиболее характерным диагностическим свойством. Для определения угла оптических осей важное значение имеет выбор нужного разреза; следует подыскивать разрезы, перпендикулярные к острой биссектрисе, в которых можно произвести измерение $2v$ по двум выходам оптических осей. Для этого рекомендуется подыскивать заранее эти разрезы на плоском столике, применяя коноскопический метод (см. § 17). Выбрав нужные разрезы на плоском столике, надо запомнить или отметить их расположение в шлифе. Предварительный подбор разрезов облегчит работу на федоровском столике, сэкономит время и, что главное, даст возможность измерить $2v$ с предельной точностью.

Если показатель преломления исследуемого минерала отличается от такового стеклянных сегментов, то в углы наклона вокруг оси I следует вводить поправки по диаграмме Федорова (см. рис. 10). Значение показателя преломления исследуемого пироксена или амфибола (Nm) берут из справочника. Работу с пироксенами и амфиболами следует производить с сегментами, имеющими показатель преломления 1,647, при котором поправками можно пренебречь вследствие их незначительности.

Угол оптических осей, измеренный по двум выходам, обязательно следует отмечать значками (\times) или (:), которые ставятся после цифры, обозначающей $2v$ (об определении угла оптических осей см. § 10).

Определение плеохроизма и абсорбции

Описание порядка определения плеохроизма и абсорбции двусосных минералов на универсальном столике дано в гл. III. Плеохроизм по осям Ng и Np в амфиболах и пироксенах определяется в разрезах с наивысшей интерференционной окраской; цвет по Nm удобно определять в разрезах с пересекающейся спайностью, в которых Nm является биссектрисой острого угла между плоскостями призматической спайности.

Как уже упоминалось в гл. III, в кристаллах моноклинной и триклинной сингоний оси эллипсоида поглощения света не совпадают с осями оптической индикатрисы. В некоторых минералах это несовпадение названных эллипсоидов выражено резко и заметно на глаз; в этих случаях его следует отмечать при исследовании.

Большие затруднения встречаются при исследовании щелочных амфиболов, в которых вследствие густоты окраски, дисперсии осей индикатрисы и низкой силы двупреломления установление главных сечений оптической индикатрисы на универсальном столике является невозможным. В этих случаях определение плеохроизма производится на плоском столике, а в случае специального изучения амфибола следует пользоваться монохроматическим светом.

Плеохроизм и абсорбция определяются обычно попутно с другими константами.

Определение химического состава по кристаллооптическим константам

Определение химического состава пироксенов и амфиболов по их кристаллооптическим свойствам часто бывает весьма затруднительным; это объясняется крайне сложным химическим составом этой группы породообразующих минералов, особенно амфиболов, и недостаточной их изученностью. Так, для многих разновидностей отсутствуют полные химико-минералого-оптиче-

ские анализы, например для большинства щелочных амфиболов. Кроме того, как указывала еще в 1950 г. М. М. Веселовская, кристаллооптические свойства пироксенов (равно как и других минералов) зависят от условий кристаллизации. Четверть века спустя В. П. Тарасовым, Л. П. Никитиной и другими была установлена также зависимость угла оптических осей ромбических пироксенов от расположения Fe^{2+} и Mg по неэквивалентным кристаллохимическим позициям [35].

Однако конечной целью изучения рассматриваемых минералов является все же определение по кристаллооптическим свойствам их химизма и принадлежности к тому или иному типу пироксенов (или амфиболов). При определении кристаллооптических констант следует указывать, в каких разрезах определялась константа $Ng : [001]$, как измерялась сила двупреломления, по одному или двум выходам вычислялся угол оптических осей. Пример записи полученных констант приведен в табл. 11.

Таблица 11

Кристаллооптические свойства пироксенов из габброидов интрузивного комплекса

Цвет и плеохроизм	$Ng : [001]$	2σ	$Ng - Nr$	Химический состав, %	Название минералов
Бесцветный	41°	+54°(×)	0,028	CaSiO ₃ —41, MgSiO ₃ —45, FeSiO ₃ —14, (см. рис. 67, а)	Диопсид-геденбергит
Ng — зеленоватый, Nm — желтоватый, Nr — розовый	0	-60 (×)	0,012	MgSiO ₃ —65, FeSiO ₃ —35, (см. рис. 67, б)	Гиперстен

Примечания. 1. Константа $Ng : [001]$ измерялась в разрезе $\perp [001]$. 2. Сила двупреломления измерялась компенсатором КПК. Толщина шлифа определена методом пылинок. 3. Химический состав ромбического пироксена определен с учетом, что $Ng = 1,710$.

При корреляции кристаллооптических свойств с химическим составом надо указывать автора составленных таблиц, которые для этого использовались. Таблицы для определения моноклинных пироксенов составлялись Т. Томито [71], М. М. Веселовской [1950 г.], А. Н. Винчеллом [7], Х. Хессом [Hess H., 1947 г.], Дж. Мюиром [Muir J. 1951 г.] и другими.

Таблицы для определения состава моноклинных пироксенов даются обычно в виде соотношения угла оптических осей с константой $Ng : [001]$ или с показателями преломления Ng, Nm, Nr . На рис. 67, а приведены графики, составленные Т. Томито для

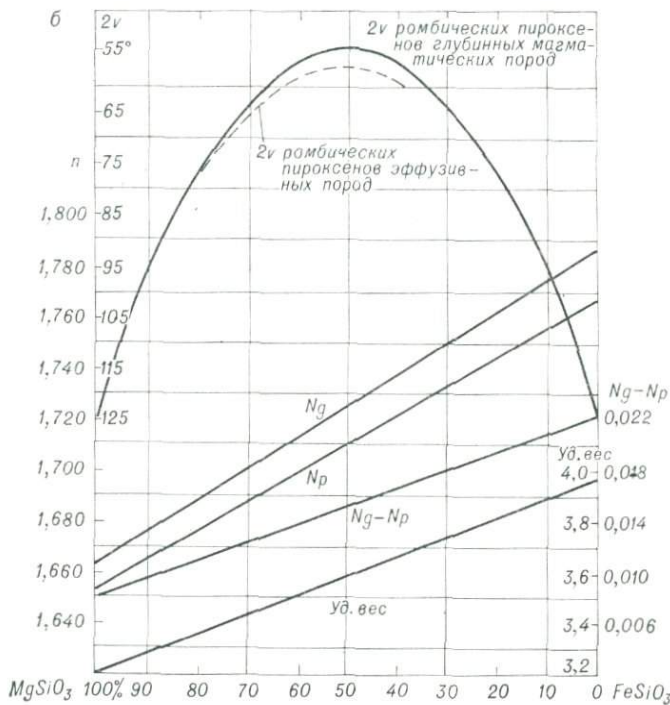
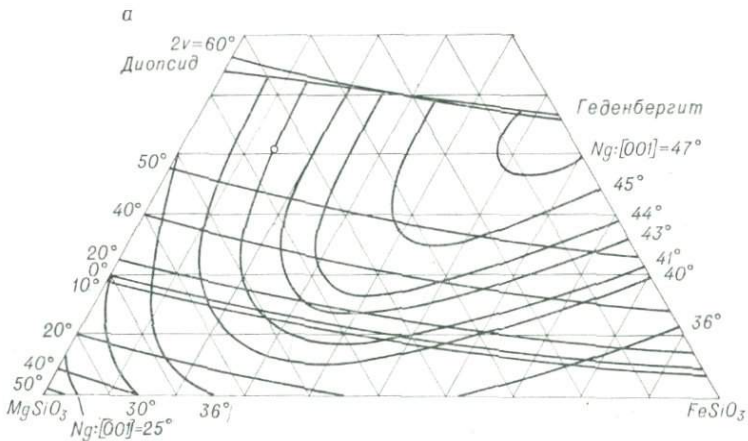


Рис. 67. Зависимость оптических свойств моноклинных пироксенов в ряду диопсид—геденбергит от их химического состава [Tomita T., 1951 г.] (а) и зависимость оптических и физических свойств ромбических пироксенов от их химического состава [Hess H., 1952 г.] (б).

определения моноклинного пироксена ряда диопсид—геденбергит. В основу взят срезанный равнобедренный треугольник, в вершинах которого помещены $MgSiO_3$, $FeSiO_3$ и $CaSiO_3$ — составные части диопсид-геденбергита. Прямые линии отвечают значениям $2v$, а гиперболы — значениям $Ng : [001]$. Полученные на федоровском столике константы моноклинного пироксена — $2v = 54^\circ$, $Ng : [001] = 41^\circ$ (см. табл. 11) — позволяют определить следующий состав пироксена, %: $MgSiO_3$ 45, $CaSiO_3$ 41, $FeSiO_3$ 14. Состав пироксена на рис. 67, а отмечен кружком.

Ромбические пироксены, имеющие обычно более простой состав по сравнению с моноклинными, можно определять по бинарной диаграмме $MgSiO_3$ — $FeSiO_3$ (рис. 67, б). Наряду с константами $2v$ и Ng — Np следует, однако, определять и показателю преломления, так как значение угла оптических осей может в этом случае иметь двойное решение. В состав гиперстенов чарнокитов и метаморфических пород фаций высоких давлений может входить до 10—12% Al_2O_3 , что должно сказываться на их кристаллооптических свойствах.

Глава VIII

ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ НА ПЯТИОСНОМ ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

§ 32. ПРИНЦИП РАБОТЫ НА ПЯТИОСНОМ СТОЛИКЕ

Усовершенствованием четырехосного федоровского столика является новая конструкция его, характеризующаяся наличием пяти осей вращения. Пятая ось K столика была введена американским исследователем Р. Эммонсом в 1929 г. [53, 54]. Эта ось, расположенная горизонтально, в положении, перпендикулярном к оси H , дает возможность производить дополнительные наклоны шлифа. Введение пятой оси позволяет применить для исследования минералов так называемый двойной теодолитный метод, который был наиболее подробно разработан А. Н. Заварицким в применении к изучению плагиоклазов.

Основным положением двойного теодолитного метода является то, что вращением вокруг трех взаимно перпендикулярных осей N , H и K оптической индикатрисе придается совершенно определенное положение в пространстве, а две оставшиеся свободными оси M и I расположенные взаимно перпендикулярно, используются для определения ориентировки каких-либо кристаллографических элементов в кристалле.

Вращением вокруг осей N , H и K оптической индикатрисе исследуемого кристалла придается такое положение, при ко-

тором одна из ее осей совмещается с осью микроскопа A , а две другие — с взаимно перпендикулярными осями пятиосного столика K и I . После совмещения осей индикатрисы с названными осями последние продолжают находиться во взаимно перпендикулярном положении и индекс лимба оси I имеет нулевое значение.

Следовательно, первый раз теодолитный метод применяется для установки оптической индикатрисы (при этом используются оси пятиосного столика N , H и K). Вторично теодолитный метод может быть применен благодаря наличию осей M и I , оставшихся свободными и расположенными взаимно перпендикулярно. При помощи этих двух осей плоскости в кристалле (плоскости спайности и др.) могут быть совмещены с определенной так называемой установочной плоскостью пятиосного столика, а линейные направления (например, двойниковые оси и т. д.) — с одной из неподвижных осей: или с осью микроскопа A , или с осью столика I .

Установочной плоскостью пятиосного столика является плоскость, проходящая через оси A и I (в дальнейшем она называется AI)*. В отличие от четырехосного столика (см. § 5) здесь непосредственно по соответствующим лимбам находят угловые координаты кристаллографических элементов по отношению к тем осям оптической индикатрисы, которые совмещены с осями K и I .

«Таким образом, — как указывает А. Н. Заварицкий, — мы непосредственно находим измерением, без каких-либо вспомогательных графических построений, координаты направления в кристалле по отношению к осям индикатрисы» [15]. Указанная особенность работы на пятиосном столике значительно способствует быстроте определений.

Приступать к работе на пятиосном столике можно лишь после полного освоения метода работы на четырехосном столике, так как основная идея метода и приемы исследований здесь остаются теми же и на них в дальнейшем постоянно будем ссылаться [32, 67].

§ 33. УСТРОЙСТВО ПЯТИОСНОГО СТОЛИКА И УСТАНОВКА ЕГО В ОСНОВНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

На рис. 68 изображен пятиосный федоровский столик. В этом столике (в отличие от четырехосного) имеется дополнительная ось K , расположенная горизонтально и несущая кольцо k . Для измерения углов наклона по оси K имеются специальные дужки k , устройство которых аналогично дужкам оси H . Конст-

* В четырехосном столике установочной плоскостью является плоскость симметрии микроскопа, перпендикулярная к оси I .

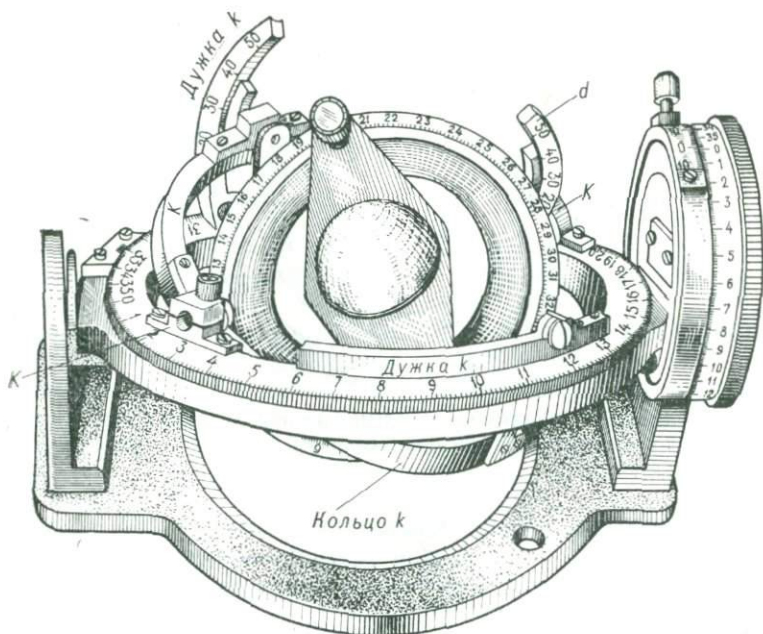


Рис. 68. Пятиосный федоровский столик.

рукция столика предусматривает взаимно перпендикулярное расположение осей K и H .

Наименование и расположение осей пятиосного столика M , N , H и I такое же, как в четырехосном; ось микроскопа A также при основном положении столика параллельна осям M и N .

Дополнительная ось K расположена горизонтально, она всегда перпендикулярна к оси H и при основном положении столика параллельна оси I . После установки оптической индикатрисы на пятиосном столике ось K поворотом вокруг оси M приводится в положение, перпендикулярное к плоскости AI .

В различных статьях, касающихся работ на пятиосном столике, нет единообразия в названии его осей; так, например, А. Н. Заварицкий пятую ось называл первоначально осью M , а ось M четырехосного столика — осью K . В дальнейшем дается наиболее рациональное наименование осей, т. е. название осей четырехосного столика остается без изменений, а для пятой оси вводится название K .

Основным положением пятиосного столика называется такое, при котором:

- 1) оси M , N и A параллельны друг другу;
- 2) ось I перпендикулярна к плоскости симметрии микроскопа;
- 3) ось K параллельна оси I ;
- 4) ось H перпендикулярна к оси I .

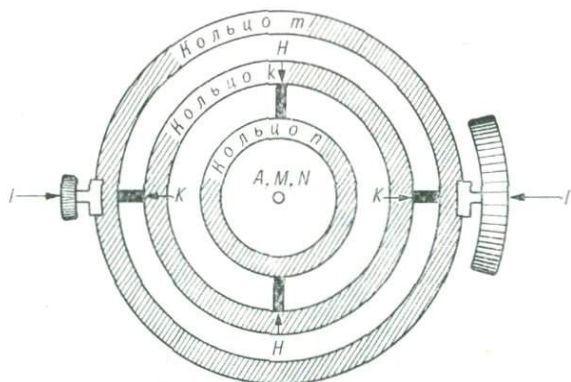


Рис. 69. Схематическое расположение осей и колец пятиосного столика при основном положении (вид сверху).

Следовательно, при основном положении оси K и H взаимно перпендикулярны, а оси I , H и K должны располагаться горизонтально и лежать в одной плоскости, в той же, в которой расположен и шлиф (рис. 69).

Таким образом, основное положение пятиосного столика полностью аналогично таковому четырехосного столика. Закрепив ось K в положение, параллельное оси I , пятиосный столик можно употреблять как четырехосный.

Установка столика в основное положение производится так же, как и четырехосного, подробно описанного в гл. I.

Взаимная перпендикулярность осей H и K обусловлена конструкцией столика. Приведение осей K , H и I в плоскость, перпендикулярную к осям N , M и A , осуществляется приведением оси I в нулевое положение*, установлением осей K и H по соответствующим дужкам на 0° . После приведения столика в основное положение все винты, закрепляющие оси столика, должны быть зажаты.

Перед началом работы пятиосный столик должен быть приведен в основное положение. Монтровка препарата, выбор сегментов для исследования производится так же, как и на четырехосном столике.

§ 34. УСТАНОВКА ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ ДВУСОСНОГО КРИСТАЛЛА НА ПЯТИОСНОМ СТОЛИКЕ

Благодаря применению двойного теодолитного метода при работе на пятиосном столике становится возможным вращением вокруг осей N , H и K придать оптической индикатрисе исследуемого двуосного кристалла совершенно определенное

* О нахождении места нуля барабана оси I см. § 3.

положение в пространстве, а оставшимися свободными осями M и I пользоваться для установления кристаллографических элементов.

Последовательность работы при установке оптической индикатрисы двуосного кристалла на пятиосном столике

1. До начала работы столик должен быть приведен в основное положение и исследуемый кристалл поставлен на пересечение окулярных нитей.

2. Смещают первую ось оптической индикатрисы Nx с осью K ; для этого производят следующие операции:

а) поворотом вокруг осей N и H совмещают одно из главных сечений с плоскостью симметрии микроскопа (надо стремиться установить то из главных сечений, для которого нужен меньший наклон вокруг оси H); установка первого главного сечения производится совершенно аналогично тому, как это выполняется на четырехосном столике; при указанном положении, т. е. когда одно из главных сечений оптической индикатрисы (назовем его $NzNy$) совмещено с плоскостью симметрии микроскопа, ось Nx , перпендикулярная к данному сечению, совмещена с осями K и I (рис. 70); ось Nx при этом расположена горизонтально;

б) определяют наименование установленного сечения, т. е. ось Nx , перпендикулярную к данному сечению; эта операция производится так же, как на четырехосном столике, для чего поворачивают столик вокруг оси A на 45° и, наклоняя его вокруг оси I , смотрят, нет ли выходов оптических осей, т. е. не

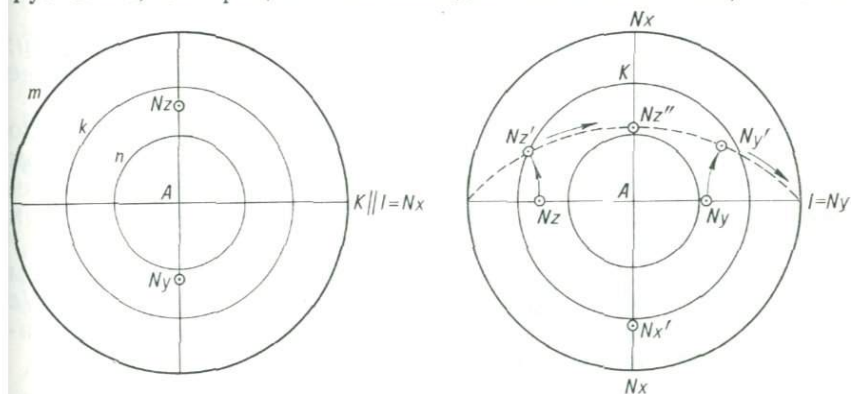


Рис. 70. Положение первого главного сечения $NzNy$ при совмещении его с плоскостью симметрии микроскопа, а оси Nx с осью K ($\parallel I$).

Рис. 71. Изменение положения осей оптической индикатрисы при совмещении второго главного сечения $NxNz$ с плоскостью симметрии микроскопа, а оси Ny с осью I (стрелками показано направление движений).

является ли Nx осью Nm ; оси Ng и Np различают при помощи гипсовой пластинки;

в) определив наименование оси Nx , поворачивают столик вокруг оси A на 90° , приводят ось K в положение, перпендикулярное к оси I , и закрепляют винт m .

На рис. 71 изображено положение оси Nx и сечения $NzNy$ после поворота столика вокруг оси M на 90° . При этом ось индикатрисы Nx расположена горизонтально, а сечение $NzNy$ — вертикально (при нулевом положении лимба оси I), так как оно было совмещено до этого с плоскостью симметрии микроскопа, которая всегда строго вертикальна (сам же шлиф наклонен вокруг оси H). В указанном положении (при нулевом положении лимба оси I) зерно будет темным, а при повороте вокруг оси I оно будет просветляться, так как нарушится вертикальное положение главного сечения.

3. Совмещают две другие оси оптической индикатрисы с осями столика A и I . Для этого производят следующие операции:

а) от положения сечения $NzNy$, изображенного на рис. 71, поворачивают столик вокруг оси I до максимального просветления зерна; при этом сечение $NzNy$ примет положение, указанное на рис. 71 штриховой линией и обозначенное $Nz'Ny'$, а ось Nx примет наклонное положение Nx' ;

б) наклоняют столик вокруг оси K до полного затемнения зерна; это положение темноты будет достигнуто в том случае, когда ось оптической индикатрисы Nz' примет положение Nz'' , т. е. с плоскостью симметрии микроскопа будет совмещено второе главное сечение $Nx'Nz'$; положения осей оптической индикатрисы будут соответственно Nx' и Nz'' ; перпендикулярно к главному сечению будет расположена ось Ny , которая будет совмещена с осью I ;

в) обычным способом* определяют наименование оси Ny ; после определения оси Ny становится известным наименование всех трех осей оптической индикатрисы;

г) совмещают ось Nz (имеющую положение Nz'') с осью A , для этого ставят лимб оси I в нулевое положение; при этом Nz совместится с осью A , а Nx' примет горизонтальное положение (на рис. 72 стрелками показано передвижение названных осей).

Таким образом, определенные оси оптической индикатрисы совмещены с осями пятиосного столика: Nx с K , Ny с I и Nz с A (рис. 73). При этом могут быть разнообразные случаи ориентировки осей индикатрисы, например:

1) с осью A совмещена Ng , с I — Np , с K — Nm ;

2) с осью A совмещена Nm , с I — Ng , с K — Np ;

3) с осью A совмещена Np , с I — Nm , с K — Ng и т. д.

В зависимости от цели исследования можно, выбрав соот-

* Так же, как на четырехосном столике.

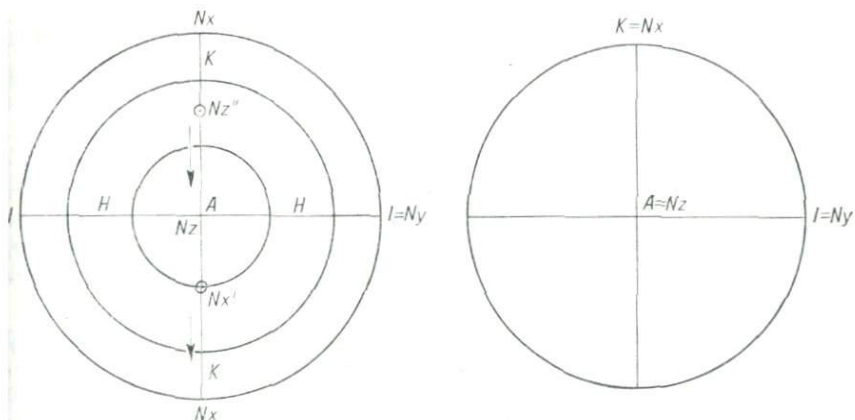


Рис. 72. Изменение положения осей оптической индикатрисы при совмещении оси Nz с осью A (стрелками показано направление движений).

Рис. 73. Расположение осей оптической индикатрисы двуосного кристалла на пятиосном столике.

ветствующие разрезы, совмещать ось оптической индикатрисы, нужную для определения того или иного кристаллооптического свойства, с любой осью столика (конечно, в пределах возможных углов наклона вокруг осей H , K и I). Например, при определении $2v$ с осью A следует совместить острую биссектрису; при измерении силы двупреломления — ось Nt и т. п. Ниже приводится описание основных приемов исследования на пятиосном столике.

Методы графического изображения результатов измерений поясняются в работах А. Н. Заварицкого [15] и А. Н. Волженкова [38, с. 159—164].

§ 35. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ НА ПЯТИОСНОМ СТОЛИКЕ

Определение угла оптических осей

Эта операция на пятиосном столике занимает гораздо меньше времени, чем на четырехосном, так как измерение производится по двум выходам оптических осей и не требует графических построений.

Последовательность работы при определении $2v$ на пятиосном столике

1. Учитывая двупреломление минерала, выбирают соответствующий разрез и приводят его на центр нитей; например, для плагиоклазов следует брать разрезы с темно-серой интерференционной окраской, для роговой обманки — с белой (см. § 17).

2. Совмещают острую биссектрису*, т. е. Ng или Np (в зависимости от оптического знака минерала) с осью A , а Nm с осью I . Для этого при совмещении первого главного сечения проверяют, чтобы оно не было перпендикулярно к Nm . Желательно, чтобы первое главное сечение было установлено перпендикулярно к тупой биссектрисе; для этого рекомендуется предварительно определить оптический знак минерала на плоском столике с помощью коноскопии. Пусть минерал будет оптически положительным, т. е. тупой биссектрисой будет являться Np , тогда совмещают Np с осью K , поворачивают на 90° от основного положения и закрепляют винт кольца m .

Устанавливают второе главное сечение, перпендикулярное к Nm , т. е. совмещают ось Nm с осью I ; это возможно сделать, так как в выбранных разрезах всегда лежит Nm или близкое к ней направление. Ставят ось I в нулевое положение, т. е. совмещают Ng с осью A .

Таким образом, ось Ng совмещена с осью A , Nm с I и Np с K .

3. Поворачивают столик микроскопа на 45° точно так же, как на четырехосном столике, и, закрепив предметный столик микроскопа, наклоняют вокруг оси I в обе стороны до поочередного совмещения оптических осей с осью A (до положения затемнения зерна). Эти углы должны быть равны друг другу. Значение угла оптических осей определяем непосредственно по отсчетам на лимбе оси I .

При определении $2v$, $Ng:[001]$ и других констант показатели преломления стеклянных сегментов и исследуемого минерала должны быть равными или близкими, в противном случае следует определять истинные углы по диаграмме Федорова (см. рис. 10).

Определение силы двупреломления (выбор и установка разрезов для определения двупреломления)

На пятиосном столике, как мы уже видели, можно придавать оптической индикатрисе нужное для той или иной цели положение. Для измерения двупреломления с осью A следует совместить Nm ; тогда в плоскости шлифа будут лежать оси Ng и Np .

Последовательность работы при определении силы двупреломления на пятиосном столике

1. Выбирают разрез изучаемого минерала с наивысшей интерференционной окраской и приводят его к центру нитей (в

* При большом угле оптических осей с осью A может быть совмещена и тупая биссектриса, так как при наклонах вокруг оси I на $50-55^\circ$ (на пятиосных столиках отечественного производства) сохраняется ясная видимость шлифа.

таких разрезах будут лежать направления, близкие к осям Ng и Np , а перпендикулярно будет располагаться направление, близкое к Nm .

2. Совмещают Ng и Np с осями столика K и I (порядок совмещения безразличен, так как важно, чтобы в плоскости шлифа располагалось сечение $NgNp$), Nm совмещают с осью A .

3. Поворачивают столик микроскопа на 45° и, вставив в прорезь тубуса микроскопа компенсатор КПК, определяют двууплощение (см. гл. IV).

Определение плеохроизма

При определении плеохроизма и схемы абсорбции минералов должны быть приняты все соображения, изложенные в § 10. При этом важно выбрать и установить в нужное положение на столике соответствующие разрезы изучаемого минерала. При определении плеохроизма по Ng и Np выбирают разрезы с высшей интерференционной окраской. Ось Nm совмещают с осью A , Ng — с I , Np — с K (или наоборот, что не имеет никакого значения).

Оси Ng и Np поочередно совмещают с направлениями колебаний, пропускаемых поляризатором, и замечают цвет (интенсивность, оттенки и пр.).

Для определения цвета по Nm выбирают разрезы с низкой (средней) интерференционной окраской (для данного минерала), т. е. разрезы, в которых лежит Nm или близкое к ней направление (в пироксенах и амфиболах для этого удобны разрезы с пересекающейся спайностью). Совмещают Nm с одной из осей столика — K или I , безразлично с какой (оси Ng и Np совмещают с осью A или K , I). После установления оптической индикатрисы на столике ось Nm совмещают с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором и замечают в таком положении цвет минерала.

Определение константы $Ng : [001]$ в амфиболах и пироксенах

Эта операция на пятиосном столике занимает несравненно меньше времени и дает более точные результаты, чем на четырехосном.

Принцип измерения указанной константы основан на том, что с осью A (наклоняя вокруг оси I) можно совместить пересечение двух плоскостей спайности; при этом обе системы трещин спайности будут представлены наиболее четкими и тонкими штрихами. Плоскости призматической спайности в пироксенах и амфиболах пересекаются по $[001]$.

Последовательность работы при определении $Ng : [001]$ в амфиболах и пироксенах

1. Находят разрез с пересекающейся спайностью и приводят его на центр пересечения нитей.

2. Совмещают оси оптической индикатрисы с осями столика; при этом Ng совмещают с осью A , Nm с I , Np с K (исключение составляет эгирин и некоторые щелочные амфиболы, в которых разрезы с пересекающейся спайностью почти перпендикулярны к оси Np ; ее и приходится совмещать с осью A).

3. Выдвинув анализатор, наклоняют столик вокруг оси I до совмещения $[001]$ с осью A ; при этом, как указывалось, трещинки спайности будут наиболее четкими и тонкими. Совместив $[001]$ с осью A , закрепляют винт оси I и снимают отсчет по лимбу оси I ; угол наклона вокруг оси I и будет отвечать константе $Ng : [001]$ (при совмещении Ng с осью A лимб оси I находится в нулевом положении — см. § 35).

При неравенстве показателей преломления минерала и стеклянных сфер надо определять по диаграмме Федорова истинные углы наклона вокруг оси I (см. рис. 10).

Определение ориентировки спайности

При помощи поворотов вокруг осей M и I на пятиосном столике легко установить в определенное положение плоскость спайности (или какое-нибудь другое кристаллографическое направление) и определить ее ориентировку относительно осей оптической индикатрисы. Определение ориентировки спайности представляет интерес для кристаллооптической характеристики любых минералов; однако наиболее существенное значение оно имеет в настоящее время для изучения полевых шпатов, для которых А. Н. Заварицким разработан специальный метод их определения по ориентировке полюса спайности и двойниковой оси.

Последовательность работы при определении ориентировки спайности

1. Выбирают разрез исследуемого минерала с хорошо видимой спайностью и приводят его к центру пересечения нитей.

2. Устанавливают оптическую индикатрису кристалла, совместив ось Nx с осью K , Ny с I и Nz с A .

3. Поворотом вокруг оси M ставят спайность параллельно горизонтальной нити микроскопа (параллельно оси I). Поворотом вокруг оси I устанавливают спайность на максимальную четкость, т. е. совмещают ее с плоскостью AI (немного подправляя по оси M , чтобы спайность оставалась параллельной оси I). Достигнув указанного положения, т. е. совместив полюс

спайности с направлением, перпендикулярным к AI , закрепляют оси I и M и снимают отсчеты по лимбам этих осей, которые и будут определять ориентировку полюса спайности относительно осей индикатрисы.

Совмещение полюса спайности с перпендикуляром к установочной плоскости AI указано на рис. 74 стрелками; штриховыми линиями показано положение зерна после совмещения осей индикатрисы с осями A , I и K . Как видно на рис. 74, для того чтобы полюс спайности принял положение, перпендикулярное к плоскости AI , надо повернуть столик вокруг оси M (т. е. Nz) на угол λ и по оси I (т. е. Ny) — на угол φ . Сплошными линиями показано положение зерна после совмещения полюса спайности с перпендикуляром к установочной плоскости AI .

Угол λ называют долготой; он определяется по лимбу кольца m и показывает, на сколько градусов надо повернуть столик вокруг оси M для совмещения $П. сп.$ с перпендикуляром к установочной плоскости AI . Угол φ называют широтой; он отсчитывается по лимбу оси I и соответствует углу наклона вокруг I .

Запись можно производить следующим образом: $A—Ng$; $I—Nm$; $K—Nr$; положение полюса спайности $\lambda Nr = 60^\circ$; $\varphi Ng = 30^\circ$.

Иногда бывает необходимо совмещать некоторые направления (например, двойниковую ось и т. п.) не с направлением, перпендикулярным к плоскости AI , а с осью A ; для этого поворачивают столик вокруг оси I на угол ρ (см. рис. 74); угол ρ называют полярным расстоянием; он определяется как $\rho = 90^\circ - \varphi$.

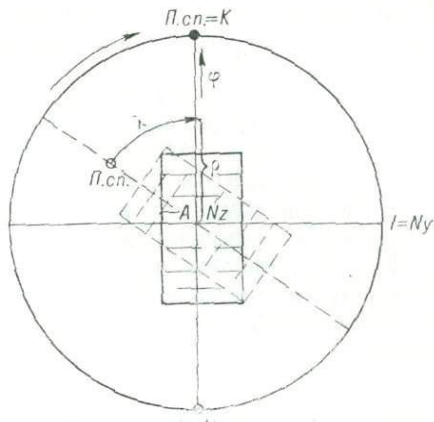


Рис. 74. Определение ориентировки спайности (стрелками показана схема движений при совмещении $П. сп.$ с направлением, перпендикулярным к установочной плоскости AI).

λ — координата долготы; φ — координата широты; ρ — полярное расстояние.

§ 36. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАГИОКЛАЗОВ НА ПЯТИОСНОМ СТОЛИКЕ

А. Н. Заварицким разработан метод исследования плагиоклазов на пятиосном столике и составлена специальная диаграмма для их диагностики [38, с. 763—775]. Определение плагиоклазов на пятиосном столике основано на измерении ориенти-

ровки полюса спайности или координат двойниковой оси относительно осей оптической индикатрисы кристалла. Для этого совмещают плоскость спайности, плоскость срастания с установочной плоскостью AI , а следовательно, двойниковую ось (в законах граней), перпендикуляр к спайности или к плоскости срастания — с $\perp AI$. Далее определяют по отсчетам столика координаты долготы λ и широты φ (см. § 35). В некоторых случаях двойниковую ось приходится совмещать с осью A^* , тогда измеряют координаты долготы λ и полярное расстояние ρ .

Ниже приведено описание последовательности работы при определении плагиоклазов по ориентировке полюса спайности и двойниковой оси, а также дано объяснение диаграммы Заварицкого.

Определение плагиоклазов по координатам полюса спайности

Эта операция сводится к определению ориентировки перпендикуляра к плоскости спайности по отношению к осям оптической индикатрисы. О том, как это делается, подробно указано в § 35, и здесь лишь кратко приведен порядок работы.

Последовательность работы при определении плагиоклазов по координатам полюса спайности

1. Выбирают разрез плагиоклаза с хорошо выраженной спайностью и приводят его к центру пересечения нитей.

2. Совмещают оси оптической индикатрисы с осями столика K , I и M (записывают, с какими осями столика совмещены Ng , Nm , Np).

3. Совмещают полюс спайности с направлением, перпендикулярным к AI , и определяют его координаты λ и φ .

4. По диаграмме Заварицкого по полученным координатам λ и φ определяют номер плагиоклаза; точка должна упасть на кривые $\perp 010$ или $\perp 001$ (или вблизи них); λ , как уже указывалось, отчитывается по лимбу M от той оси индикатрисы, которая была первоначально совмещена с осью K ; φ непосредственно читается по лимбу оси I . В зависимости от того, какая ось была совмещена с A , выбирается одна из трех диаграмм Заварицкого. Объяснение пользования этой диаграммой дано ниже.

Определение плагиоклазов по координатам двойниковой оси

Перед тем как приступить к исследованию плагиоклазов на пятиосном столике, необходимо вспомнить все основные положения о законах двойникования плагиоклазов, которые изло-

* Именно в тех случаях, когда данное направление образует большой угол с плоскостью шлифа.

жены в гл. V. При дальнейшем объяснении мы будем пользоваться терминами плоскость срастания, двойниковая плоскость, сложные и осевые законы и другими как полностью знакомыми читателю.

Все исследования плагиоклазов на пятиосном столике начинают с установки оптической индикатрисы в ориентированное положение, что производят вращением столика вокруг осей N , H и K . При ориентированном положении индикатрисы ее оси совмещены с оптической осью микроскопа A и осями столика K и I . Далее выясняют, сдвойникован плагиоклаз по закону

гранн или по закону второго типа (осевому, сложному); для разрешения этого вопроса поворотом вокруг осей M и I совмещают плоскость срастания с вертикальной плоскостью AI (т. е. двойниковый шов совмещают с горизонтальной нитью и поворотом вокруг оси I устанавливают его на максимальную четкость). В том случае, если плагиоклаз сдвойникован по закону гранн, при совмещении плоскости срастания, которая является и двойниковой плоскостью, с вертикальной плоскостью, проходящей через оси A и I , двойниковая ось Do совместится с направлением, перпендикулярным к плоскости AI (рис. 75), и двойниковая структура исчезнет. При вращении вокруг оси A двойниковая структура появится (и будет исчезать 8 раз при повороте столика вокруг оси A на 360°).

Двойниковая структура может исчезнуть и в некоторых случаях для осевых и сложных законов (см. ниже разбор частных случаев).

Ориентировка двойниковой оси в этом случае определяется, так же как и ориентировка полюса спайности, координатами λ и φ . Если после совмещения плоскости срастания с установочной плоскостью AI двойниковая структура не исчезнет, то плагиоклаз сдвойникован по закону оси или по сложному закону. Двойниковая ось для этих законов лежит в плоскости срастания и при установке последней параллельно плоскости AI не совмещается с осями столика. Для определения плагиоклазов, сдвойникованных по осевым или сложным законам, необходимо двойниковую ось совместить с перпендикуляром к плоскости

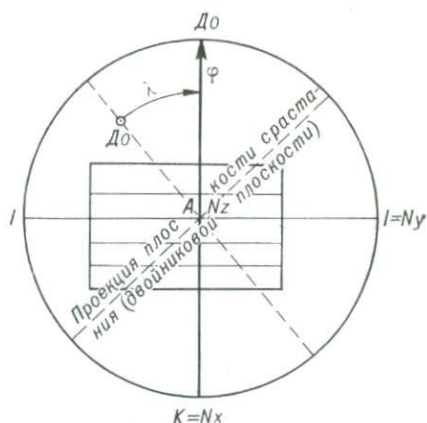


Рис. 75. Совмещение Do с направлением, перпендикулярным к установочной плоскости AI .

Штриховой линией показано положение проекции плоскости срастания (двойниковой плоскости) и Do после совмещения осей оптической индикатрисы с осями A , K и I . Плагиоклаз сдвойникован по закону гранн.

AI или с осью A столика и получить соответственно координаты λ и φ или λ и ρ . В частных случаях для осевых или сложных законов двойниковая структура может исчезнуть при совмещении плоскости срастания с плоскостью AI именно в тех случаях, когда двойниковая ось совместится с осью A или I (в этих случаях двойниковая ось лежит в плоскости срастания). Частные случаи осевых и сложных законов при этом легко отличить от законов граней; так, например, если двойниковая ось (для осевого или сложного закона) совместилась с осью A , то при вращении вокруг последней двойниковая структура не будет появляться (в граневых законах при повороте вокруг оси A двойниковая структура будет видна и будет исчезать при повороте столика 8 раз). При совмещении двойниковой оси с осью I двойниковая структура не будет появляться при вращении препарата вокруг этой оси.

*Последовательность работы при определении
плаггиоклазов по координатам двойниковой оси
(см. рис. 75*)*

1. Выбирают зерно плаггиоклаза с хорошо выраженными и желательного достаточно широкими двойниковыми полосками и приводят его к центру пересечения нитей (начинающим не следует производить измерения зональных или катаклазированных кристаллов).

2. Совмещают оси оптической индикатрисы (любой системы индивидов двойника) с осями K , A и I столика и записывают их наименования (пусть с K совмещена ось Nx , с I — Ny , с A — Nz).

3. Вращением столика вокруг осей M и I совмещают плоскость срастания с установочной плоскостью AI ; при этом возможны два случая: 1) двойниковая структура исчезла; следовательно, плаггиоклаз sdвойникован по закону грани (или это частный случай для осевого или сложного закона); 2) двойниковая структура видна; следовательно, плаггиоклаз sdвойникован по закону оси или сложному. Рассмотрим эти случаи.

Первый случай. Двойниковая структура исчезла.

Вращают столик микроскопа вокруг оси A ; двойниковая структура появляется и исчезает 8 раз при повороте столика микроскопа вокруг оси A на 360^{**} , следовательно, двойниковая ось совмещена с перпендикуляром к плоскости AI (см. рис. 75).

* На рис. 75, а также на рис. 76 и 77 для наглядности положение плоскости срастания показано в ортогональной проекции.

** Двойниковая структура исчезает тогда, когда двойниковая плоскость (она же здесь плоскость срастания) располагается параллельно или симметрично по отношению к сечениям николей.

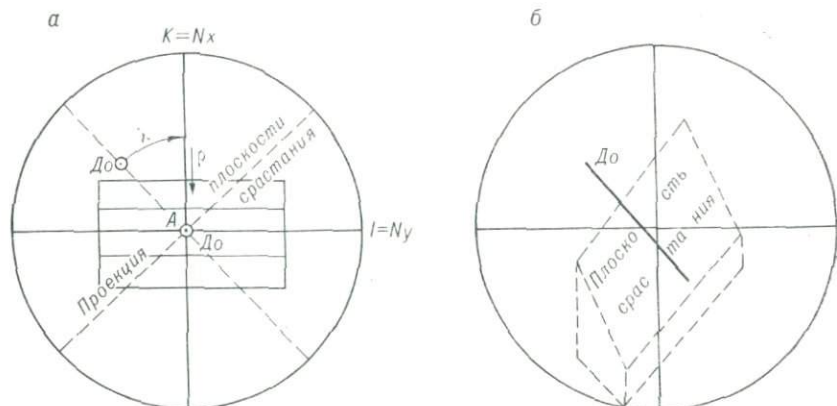


Рис. 76. Частный случай осевого или сложного закона — Do совпадает с осью A (а) и пространственное расположение плоскости срастания и Do (б).

Штриховой линией показано положение проекции плоскости срастания и Do , лежащей в этой плоскости, после совмещения осей оптической индикатрисы с осями A , K и I . Стрелками указано направление движений при совмещении Do с осью A .

Определяют координаты двойниковой оси. Координата λ определяется по кругу m от той оси, которая была совмещена с K , т. е. от Nx (пусть, например, при совмещении Nx с K отсчет по кругу m равен 270° , а при совмещении Do с перпендикуляром к плоскости стал равен 290° , следовательно, $\lambda = 20^\circ$). Координату φ непосредственно считают по лимбу оси I .

Определяют по диаграмме Заварицкого по λ и φ номер плагиоклаза. Точка должна попасть на одну из кривых законов граней.

При совмещении плоскости срастания с плоскостью AI двойниковая структура может исчезнуть и в частных случаях осевых и сложных законов. Это произойдет в том случае, если двойниковая ось совместится при этом с осью A или I . При определении плагиоклаза необходимо выяснить, с какой именно из осей столика совмещена Do . Для этого производят следующие операции:

а) если при вращении вокруг оси A двойниковая структура не появляется, то, следовательно, двойниковая ось совмещена с осью A ; т. е. двойниковая плоскость расположена перпендикулярно к оси A (рис. 76); убедившись в том, что Do совмещена с осью A , определяют ее координаты λ и ρ , угол λ отсчитывают по кругу m от Nx (т. е. от той оси, которая была совмещена с осью K); ρ определяется по формуле $\rho = 90^\circ - \varphi$, где φ — угол наклона по оси I ; по полученным координатам λ и ρ , пользуясь диаграммой Заварицкого, определяют номер плагиоклаза; при этом точка должна попасть на кривую осевого или сложного закона;

б) если при вращении вокруг оси A двойниковая структура проявляется и 8 раз исчезает, но при вращении вокруг оси I она не появляется, то, следовательно, двойниковая ось совмещена с осью I , а двойниковая плоскость — с плоскостью симметрии микроскопа; тогда определяют координаты двойниковой оси λ и φ (рис. 77); λ определяется по лимбу круга m и отсчитывается от той оси, которая была совмещена с I , т. е. от Ny ; φ — угол наклона по оси I , считывается по лимбу оси I ; по полученным координатам определяют номер плагиоклаза.

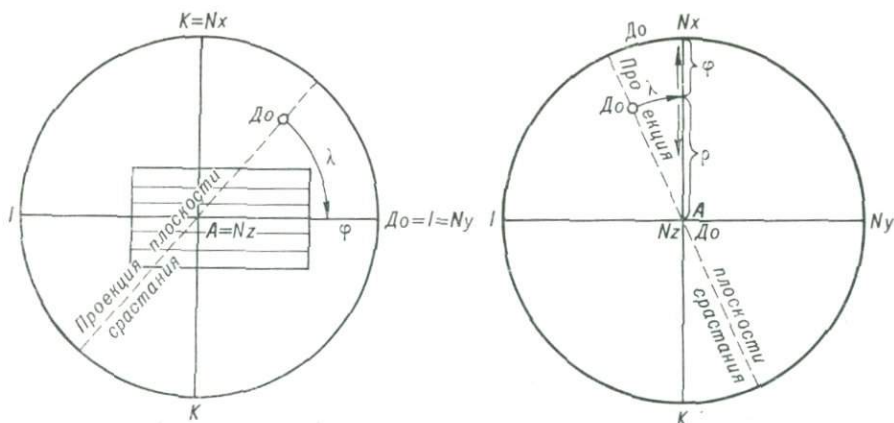


Рис. 77. Частный случай осевого или сложного закона — Do совпадает с осью I .

Штриховой линией показано положение проекции плоскости срastания и Do после совмещения осей оптической индикатрисы с осями A , K и I . Стрелками указано направление движений при совмещении Do с осью I .

Рис. 78. Осевой (или сложный) закон.

Штриховой линией показано положение проекции плоскости срastания и Do после совмещения осей оптической индикатрисы с осями A , K и I . Стрелками указано направление движений при совмещении Do с перпендикуляром к плоскости AI или с осью A .

Второй случай. Двойниковая структура видна.

После совмещения плоскости срastания с плоскостью AI двойниковая структура сохраняется; следовательно, двойниковая ось лежит в плоскости срastания и не совместилась ни с одной из осей столика.

Совмещают двойниковую ось с перпендикуляром к плоскости AI или с осью A . Для этого поворотом вокруг оси M ставят проекцию плоскости срastания примерно параллельно вертикальной нити микроскопа* и далее одновременным вращением вокруг осей M и I добиваются исчезновения двойниковой структуры. При этом двойниковая ось может совместиться:

а) с осью A ; в этом случае при повороте столика вокруг оси A двойниковая структура появляться не будет; координаты двойниковой оси (Do на рис. 78) определяются следующим образом: λ — отсчет по кругу m от той оси, которая была совмещена с K (т. е. Nx); ρ — полярное расстояние Do от Nx , равное $90^\circ - \varphi$ (где φ — наклон вокруг оси I);

б) с перпендикуляром к плоскости AI ; в этом случае при повороте столика вокруг оси A двойниковая структура будет

* Если вначале (для проверки закона двойникования) плоскость срastания была установлена параллельно горизонтальной нити, то от этого положения ее следует повернуть вокруг оси M на 90° .

исчезать 8 раз; координаты двойниковой оси (см. рис. 78) в этом случае определяются так: λ — отсчет по кругу m от той оси, которая была совмещена с осью K , т. е. от Nx ; φ — угол наклона вокруг I (отсчет по лимбу оси I).

Следует указать, что при совмещении двойниковой оси с перпендикуляром к плоскости AI след плоскости срастания может быть непараллельным вертикальной нити окуляра, так как двойниковая ось может располагаться в плоскости срастания под различными углами к двойниковому шву. При совмещении двойниковой оси с указанным направлением (перпендикуляром к AI) плоскость срастания не будет расположена вертикально.

Как указывал еще в 1893 г. Е. С. Федоров и позднее развил В. В. Доливо-Добровольский, в двойниках есть особое направление, называемое «главным направлением двойника» и обозначаемое H [38, с. 24—61]. Это направление в оптическом отношении может быть сходным с двойниковой осью, так как в сечении, перпендикулярном к нему, эллипсы сечений обоих индивидов двойника «совпадают по форме, размерам и положению одноименных осей». При совмещении H с осью I и вращении вокруг последней двойниковая структура будет появляться; это объясняется тем, что сечения зоны H в отличие от сечения зоны двойниковой оси не имеют симметричного погасания. Практически главное направление можно ошибочно принять за двойниковую ось в осевых и сложных законах, когда оно совмещено с осью микроскопа A . Здесь для различия этих двух направлений следует выяснить расположение найденного направления (координаты которого нужно записать) по отношению к плоскости срастания двойника; если найденное направление явно не лежит в плоскости срастания, то это главное направление H , а не двойниковая ось. Если же указанное направление лежит в плоскости срастания, рекомендуется произвести проверку, сводящуюся к совмещению перпендикуляра к указанному направлению (лежащему в плоскости срастания) с осью I . Если при вращении столика вокруг оси I после указанного совмещения двойниковая структура не появляется, то с осью I совмещена двойниковая ось, а найденное ранее направление, совмещенное с осью A , является главным направлением двойника H . Если при наклонах вокруг оси I двойниковая структура видна, то с осью I совмещено главное направление двойника H и взятые ранее координаты соответствовали положению двойниковой оси [12, с. 92—93].

Диаграмма Заварицкого для определения плагиоклазов *

А. Н. Заварицкий пишет, что «применение пятиосного универсального столика... требует построения диаграмм, представляющих ориентировку кристаллографических направлений по отношению к осям индикатрисы в иных координатах, чем при обычных исследованиях на четырехосном федоровском столике. При работе с четырехосным столиком мы пользуемся обыкновенными диаграммами, в которых положение рассматриваемого

* В. В. Доливо-Добровольским предложена новая диаграмма для определения полевых шлатов при работе на пятиосном столике; эта диаграмма удобна тем, что она в равной мере пригодна для работы на четырехосном федоровском столике [13, с. 122—124].

направления в кристалле определяется угловыми расстояниями его от осей оптической индикатрисы.

Применяя указанный способ, мы пользуемся полярными координатами: долготой λ и широтой φ , причем за полюс этой системы координат берем ось индикатрисы, совмещенную с осью тубуса микроскопа, а за меридиан, от которого измеряем долготу, — меридиан, проходящий через эту ось и через одну из двух осей индикатрисы» [15]. Между угловыми расстояниями, которые образуют оси оптической индикатрисы с кристаллографическими направлениями, и полярными координатами существует простая математическая зависимость. Им вычислена эта зависимость для полярных координат двойниковых осей плагноклазов*; на основании полученных данных построена диаграмма для определения плагноклазов по принципу прямоугольной системы координат. Цена деления каждой клетки диаграммы равна 5° . Диаграмма состоит из трех частей: первая часть (рис. 79, а), соответствует тому случаю, когда с осью A совмещена Ng , вторая (рис. 79, б) — Nm , третья (рис. 79, в) — Np (обозначения те же, что на диаграмме Никитина (см. рис. 37)).

Координата долготы λ откладывается по оси абсцисс от той координатной оси (Nm или Np), которая была совмещена с осью K . Так, например, если с осью A совмещена ось Ng , а с K — Np , то пользуются первой диаграммой (рис. 79, а) и откладывают λ от оси Np влево. В частном случае, когда двойниковая ось совмещена с осью I , λ следует откладывать от той оси оптической индикатрисы, которая совмещена с осью I . Координаты широты φ откладываются на диаграмме параллельно оси ординат, снизу вверх (от той же координатной оси, что и λ).

Полярное расстояние ρ (которое измеряется в тех случаях, когда двойниковую ось совмещают с осью A) откладывается сверху вниз параллельно оси ординат от той же координатной оси, от которой откладывалась координата λ . Кривые, изображенные на диаграмме, показывают изменение в положении двойниковой оси или полюса спайности по отношению к осям индикатрисы.

Точка, полученная на диаграмме на пересечении координат λ и φ или λ и ρ , должна лежать вблизи одной из кривых, по которой определяется номер плагноклаза и закон его двойникования. Обычно точка попадает вблизи нескольких кривых; при выборе нужной для определения плагноклаза кривой надо принимать во внимание все те соображения, которые подробно приведены в § 22. При изучении плагноклазов на пятиосном столике не следует ограничиваться определением их только по координатам двойниковой оси, но следует проверять наблюдения по определению ориентировки спайности и т. д.

* Эти полярные координаты вычислены по данным В. В. Никитина [38, с. 567—651].

Пример определения плагиоклаза по λ и φ по диаграмме Заварицкого. $A - Np$, $K - Ng$, $I - Nm$, $\lambda = 25^\circ$, $\varphi = 10^\circ$ (плагиоклаз sdвойникован по закону грани). На диаграмме (см. рис. 79, а) λ откладывают от оси Ng вправо, φ — вверх, параллельно оси ординат. Получают точку, попадающую вблизи кривой альбитового закона (у точки 5). Следовательно, мы имеем плагиоклаз № 50, sdвойникованный по альбитовому закону.

Вблизи кривой альбитового закона идут две кривые — периклинового и эстерель-манебахского законов; по этим кривым плагиоклаз не может определяться, так как он sdвойникован по закону грани. Проверяем результаты исследования. Устанавливаем спайность, перпендикулярную к плоскости срастания (т. е. спайность по 001), параллельно плоскости AI ; полюс спайности при этом совместится с перпендикуляром к плоскости AI (ориентировка осей индикатрисы остается прежней: $Np - A$, $Ng - K$, $Nm - I$). Полярные координаты полюса спайности 001 следующие: $\lambda = 58^\circ$, $\varphi = 17^\circ$; точка пересечения падает на кривую манебахского закона ($\perp 001$) и определяет плагиоклаз как лабрадор № 50. Из этой дополнительной проверки видно, что первое измерение было произведено правильно.

Микроструктурный анализ — это метод изучения структур горных пород с помощью федоровского столика, основанный на статистическом определении предпочтительных ориентировок минералов* с целью их последующей генетической интерпретации. Микроструктурный анализ претерпевал и претерпевает в настоящее время эволюцию, отражающую общий ход познания природных объектов и процессов.

Основы микроструктурного анализа впервые в систематизированном виде были изложены Б. Зандером в 1932 г. [66]. Несмотря на то, что ряд вопросов (генезис сланцеватости, механизм складкообразования и др.) получил обоснованное объяснение, генетическая интерпретация диаграмм была затруднена или неоднозначна. Сами диаграммы во многих случаях носили чисто описательный иллюстративный характер.

По мере изучения горных пород, несущих признаки внутренних движений, были установлены связи между ориентировкой минералов и планом движений, что позволило провести кинематическую интерпретацию наблюдаемых ориентировок [14]. В экспериментах по деформации карбонатов при меняющихся температурном и динамическом режимах были установлены кинематически активные плоскости и линии в кристаллах — трансляционные и двойниковые плоскости, линии скольжения и вращения, двойниковые оси. Закономерность их ориентировки относительно системы внешних сил, заданной в эксперименте, позволила выделить в кристаллах динамические направления — оси сжатия и растяжения. Появилась возможность восстанавливать по наблюдаемым ориентировкам минералов

* В дальнейшем изложении будет фигурировать как «ориентировка» — такое распределение вектора (кристаллографической или кристаллооптической оси) на полусфере, для которого статистическими методами может быть доказано наличие концентрации.

систему внешних сил, обусловивших эти ориентировки, т. е. проводить динамический анализ результатов изучения микроструктур пород [18]. Была разработана теория трансляционного и двойникового механизмов, контролирующих ориентировки.

До конца 60-х годов появился ряд иностранных и отечественных работ, посвященных теоретическим основам микроструктурного анализа [14, 39, 66, 72]. В сжатом виде основы микроструктурного анализа изложены в пособиях по структурной геологии [1, 33, 42]. Наиболее полно теоретические, методические и прикладные вопросы динамического анализа карбонатов изложены в работе А. Н. Казакова [18].

К этому же времени советскими геологами был накоплен большой опыт по изучению структур рудных месторождений и рудных полей с привлечением микроструктурного анализа. В 1965 г. было издано руководство Л. И. Лукина, В. Ф. Чернышева и И. П. Кушнарера, в котором микроструктурный анализ изложен применительно к изучению рудных объектов [25].

Изучение ориентировок минералов высокометаморфизованных пород и результаты экспериментов, моделирующих условия метаморфизма в глубоких сечениях литосферы [10, 55, 62], показали, что трансляционные механизмы не способны объяснить многие черты наблюдаемых ориентировок. Правомочность использования теории Мора, на которой базировались эти механизмы, для объяснения деформации анизотропных, анизометричных, расслоенных и резко гетерогенных сред (слоистые и ленточные кристаллы, расслоенные горные породы) подверглась серьезным сомнениям [19, 40].

С разработкой теории синтетектонической, или синдеформационной кристаллизации решетки, термодинамически равновесной с внешней системой сил (со стресс-полем), как механизма, контролирующего ориентировки, появилась возможность обоснованно показать синхронность метаморфогенного минералообразования и формирования разномасштабных структур [21].

Разработка теории тектоники плит явилась стимулом для создания новых и совершенствования традиционных методов исследования пород. Микроструктурный анализ был привлечен для изучения структур ксенолитов мантийного вещества, выведенного на дневную поверхность, и микроструктур, возникших в образцах в ходе экспериментов, моделирующих глубинные условия и процессы. В результате были сформулированы совершенно новые представления о возможных механизмах движения вещества литосферы и мантии.

В ходе этого изучения были использованы нетрадиционные методы обработки и графического представления микроструктурных диаграмм с использованием анизотропии скорости продольной волны в монокристаллах минералов. Была установлена зависимость между ориентировкой минералов и ориентировкой осей стресс-поля, позволившая проводить динамическую интер-

претацию микроструктур, сформированных в условиях высокой пластичности пород [47, 51]. Изучение микроструктур и скоростных характеристик минералов позволило обоснованно объяснить сейсмическую анизотропность верхней мантии, установленную геофизическими методами в разных частях земного шара.

Глава IX

ТЕХНИКА МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

В этой главе рассматривается последовательность операций, начиная с отбора ориентированных образцов в поле и кончая анализом построенных диаграмм.

§ 37. ОТБОР ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Образец для микроструктурного анализа должен быть представительным и содержать максимальную информацию о той породе или процессе, которые подлежат дальнейшему изучению. Порода для микроструктурного анализа, во-первых, должна быть мелко- или среднезернистой, что обеспечивает в шлифе достаточное количество измеряемых зерен. В случае очень крупной зернистости необходим отбор серии образцов или приготовление серии параллельных шлифов из одного образца. Во-вторых, образец должен быть ориентирован, что связано со структурным характером таких исследований, т. е. с изучением ориентировки минеральных решеток в пространстве.

Соответственно при отборе образца производится его маркировка. Для этого на ровной площадке (лучше слоистость или сланцеватость) фломастером наносятся линии падения и прости-

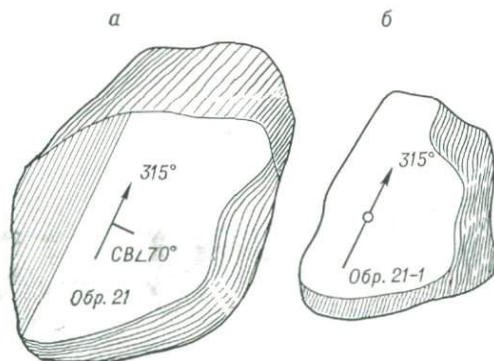


Рис. 80. Маркировка ориентированного образца, наклоненного к горизонту (а) и горизонтального (б).

рання и записываются их координаты, например 315° СВ $\angle 70^\circ$ (рис. 80, а). Для этой цели можно использовать и лейкопластырь. Если такая площадка горизонтальна, достаточно привести одну координату (азимут) какой-то одной линии на этой площадке (рис. 80, б).

В месте отбора образца необходимо, кроме того, произвести измерения всех макроскопически выраженных линейных и плоскостных структурных элементов: слоистости, полосчатости, всех генераций гнейсовидности или сланцеватости, линейности l , шарниров складок и т. д. При наличии складок отбор образца лучше произвести в замковой части, где угол между ранней деформируемой поверхностью и осевой плоскостью максимален. Это позволит наиболее легко определить ранние и наложенные минеральные ассоциации. Из отобранных ориентированных образцов вырезаются ориентированные шлифы.

§ 38. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ШЛИФОВ

Для приготовления ориентированных шлифов необходимо точно задать географические координаты плоскости шлифа. Его лучше всего вырезать параллельно замаркированной площадке и на предметное стекло вынести координаты этой площадки (рис. 81). При изготовлении ориентированных шлифов необходимо следить, чтобы шлиф не был перевернут вокруг горизонтальной или вертикальной оси.

При наличии в породе линейных или плоскостных структурных элементов появляется собственная внутренняя ортогональная система структурных координат a_c , b_c и c_c (рис. 82). Плоскостные элементы обычно обозначаются как S . Нормаль или полюс πS к плоскости S — это ось c_c . В плоскости S расположены оси a_c и b_c . Линейность может совпадать с одной из этих осей. При совпадении линейности с осями складок она является осью b_c . Если же она нормальна к шарниру складки, то это ось a_c . Таким образом, при выделении осей a_c и b_c необходимо на основании микроструктурного анализа установить отношение

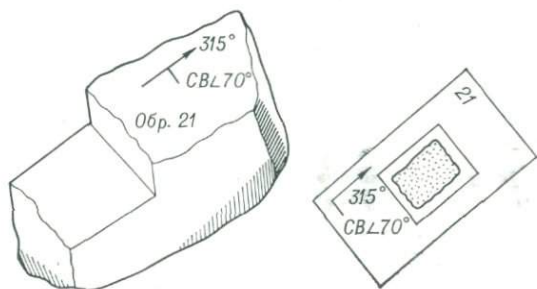


Рис. 81. Маркировка ориентированного шлифа в географических координатах.

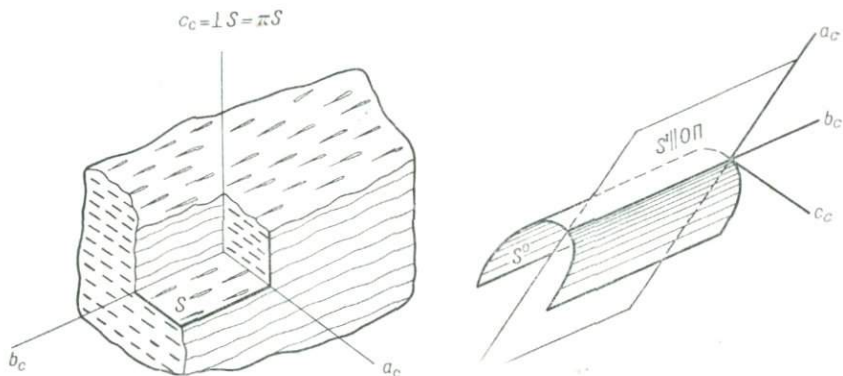


Рис. 82. Структурная система координат в макроscopicки гетерогенной породе.

Рис. 83. Структурная система координат в цилиндрической складке.

S^0 — слоистость; $S^1 \parallel \text{ОП}$ — сланцеватость осевой плоскости; a_c , b_c и c_c — оси структурной системы координат.

линейности к шарниру (осям) складки (рис. 83). В метаморфизованных комплексах в условиях высокой пластичности пород линейность обычно параллельна шарнирам складок. При наличии в породе микроскладок, соизмеримых с размерами шлифа, отнесение линейности к типу a_c или b_c может быть сделано непосредственно при микроструктурном анализе.

В условиях неоднократных деформаций может возникнуть несколько систем структурных координат, что вызвано наличием в таких породах нескольких генераций сланцеватости и линейности. Обычно ранние и наложенные системы структурных координат имеют общие оси, например c_c . В этом случае в одной плоскости S может быть две и более линейностей. Деформации и структуры такого типа называются компланарными. Когда общей является ось b_c (одна линейность, но две плоскости S), структуры и деформации — коллинеарны.

В макроscopicки гомогенной породе шлиф может быть вырезан в произвольном сечении образца. В макроscopicки анизотропных породах шлифы необходимо вырезать перпендикулярно к осям внутренней (структурной) системы координат. Если есть несколько генераций структурных элементов, то шлифы лучше вырезать нормально к осям системы, морфологически выраженной наиболее четко.

Наиболее информативны шлифы, вырезанные перпендикулярно к линейности. В этом случае в плоскость шлифа попадает максимальное количество зерен минералов. Зерна многих минералов в такой ориентировке обычно характеризуются спайностью, что очень важно для микроструктурного анализа. Часто необходимо изучить ориентировку минералов и в шлифе, выре-

занном перпендикулярно к линейности и к сланцеватости (\perp оси a_c). Особенно это относится к породам с двумя линейностями, чаще ориентированными в плоскости S взаимно перпендикулярно. Изучив ориентировку в двух взаимно перпендикулярных шлифах и совместив диаграммы ориентировок, удастся более полно отразить микростроение породы. Кроме того, при наличии второго шлифа удастся измерить ориентировку тех зерен, измеряемые элементы которых наклонены относительно оси микроскопа более чем на 45° . Если порода крупнозернистая, для того чтобы обеспечить представительность выборок, необходимо вырезать серию параллельных шлифов.

Поскольку шлифы, вырезанные перпендикулярно к структурной системе координат, оказываются «привязанными» именно к этой системе, чтобы привести их к географической системе координат, необходимо совершить операцию поворота и совместить обе системы координат (см. § 43).

§ 39. МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧАЕМЫХ МИНЕРАЛОВ. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Перед проведением микроструктурного анализа необходимо изучить шлиф на плоском столике и описать минералы, ориентировка которых будет определяться. Для иллюстрации строения породы следует сделать фотографию шлифа или его фрагмента. Желательно разделить совокупность зерен одного минерала на группы по следующим признакам, наиболее важными из которых являются: 1) размер, форма, степень идиоморфизма, характер нахождения в породе (основная ткань — вкрапленники и т. д.); 2) наличие включений; зерна могут быть чистые прозрачные и замутненные за счет диспергированного вещества; естественно, очень важное значение приобретают зерна с включенными метастабильными «бронированными» фазами; 3) признаки деформаций — наличие очень информативных зерен, которые изогнуты, сдвойникованы, с кинк-зонами, с волнистым, обламочным, блоковым угасанием, изломанные, растащенные, «залеченные» и т. д.

Определив набор минералов для изучения и дискриминирующие признаки зерен одного минерала, можно приступить к их микроструктурному изучению. Для этого федоровский столик приводится в рабочее положение; для того чтобы шлиф мог передвигаться только параллельно, используются специальные салазки или рамки, входящие в комплект всех современных моделей микроскопов с федоровскими столиками.

В полиминеральных породах рекомендуется начать изучение с минералов, несущих информацию об ориентировке как линейных, так и плоскостных структурных элементов. К ним относятся амфиболы, пироксены, эпидоты, силлиманит, андалузит, кианит, ставролит и другие минералы, имеющие уплощенно-вы-

тянутый габитус. В таких минералах необходимо определять ориентировку как минимум двух взаимно перпендикулярных направлений кристаллов: по удлинению и по уплощению. Такие элементы для ряда минералов приведены в табл. 12.

Таблица 12

Взаимно перпендикулярные направления в кристаллах минералов, измеряемые при микроструктурном анализе

Минерал	Удлинение	Уплощение
Оливин	[001], [100]	[010]
Ортопироксены	[001]	[010]
Клинопироксены	[001]	[010]
Амфиболы	[001]	⊥ 100
Эпидоты	[010]	[001], [100]
Слюды, хлориты	—	⊥ 001
Кварц	[0001]	—
Кордиерит	[001]	[010]
Силлиманит	[001]	[010]
Андалузит	[001]	[010]
Ставролит	[001]	[010]
Кианит	[001]	~ ⊥ 100
Полевые шпаты	Разнообразные	

В некоторых минералах можно измерять ориентировку лишь одного элемента. К ним относятся слюды, хлориты, кварц и все минералы гексагональной, тригональной и тетрагональной сингоний. Эти минералы дают информацию либо о плоскостных (слюды, хлориты), либо о линейных структурных элементах.

Необходимо отметить два важных чисто технических момента. Во-первых, должна определяться ориентировка всех зерен, а не только тех, которые ориентированы наиболее благоприятно для измерения. Лишь в этом случае могут быть получены диаграммы, отражающие реальное поведение решеток минерала в пространстве. Именно поэтому появляется необходимость в изучении ориентировок в двух взаимно перпендикулярных шлифах. Во-вторых, необходимо зарезервировать часть шлифа для проведения дополнительных измерений на тот случай, если выделяется несколько генераций ориентировок минерала и надо повысить представительность выборок по каждой из таких генераций.

§ 40. ОФОРМЛЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Для проведения микроструктурного анализа необходима сетка Вульфа и круглое матовое стекло или калька, несколько большего диаметра. В специальном журнале записываются основные сведения об исследуемом образце: номер, название по-

Таблица 13

Пример оформления первичной документации в журнале для микроструктурного анализа

Образец № 495. Полевошпатовый амфиболит. Водлозерский блок. Детальный участок 1. $S^0=S^1-30^\circ$ СЗ $\angle 45^\circ$, $S^2=0^\circ \perp$, $l=0^\circ \angle 30^\circ$.

Анализируется роговая обманка: А — идиоморфные чистые зерна; Б — резорбированные, нередко сдвойникованные с выделением тонкого магнетита по спайности 110.

№ п/п	$\perp 100$	1001]	CNg	2v	Примечания
1	270 7	168 67	16	+84(×)	А, включен в зерно плаггиоклаза в жилке
13	54 17	228 69	20	+78(×)	Б

роды, место отбора и данные измерений структурных элементов в обнажении, схематическая зарисовка шлифа с его маркировкой, название исследуемого минерала, признаки типизации зерен минерала. Измерения координат осей, значения углов CNg (CNp) и 2v и определенные на плоском столике дискриминирующие признаки записываются в разграфленные в журнале столбцы. Дополнительные признаки и сведения о зерне минерала записываются в графе «Примечания» (табл. 13). Зенитные координаты осей (отсчеты по оси l) удобнее записывать в верхнем интервале ($0-90^\circ$), так как это значительно облегчает последующее вынесение точек на диаграмму.

Учитывая статистический характер микроструктурного анализа и его высокую трудоемкость, следует признать наиболее правильными обработку и построение диаграмм по минимальному числу измерений, обеспечивающему устойчивый узор на диаграмме.

С этой целью были построены диаграммы ориентировок минерала по сериям выборок разного объема. Один из таких примеров зависимости узора диаграмм осей от объема выборки для оливина из базальтового ксенолита с порфиорокластической структурой приведен в книге А. Николя и Дж. П. Пуарье [63] (рис. 84). Ими были рассчитаны коэффициенты степени предпочтительной ориентировки R'_N для выборок от 20 до 200 зерен с интервалом 10 зерен. График зависимости этих коэффициентов от количества зерен приведен на рис. 85. В этом графике выделяются четыре интервала, отвечающие четырем отрезкам на оси абсцисс N (число измерений): 20—50, 50—110, 110—170, 170—200 зерен. В первом интервале коэффициенты R'_N всех трех осей неустойчивы, во втором и третьем они были выдержанны, а начиная со 170 зерен графики представляют собой слабо из-

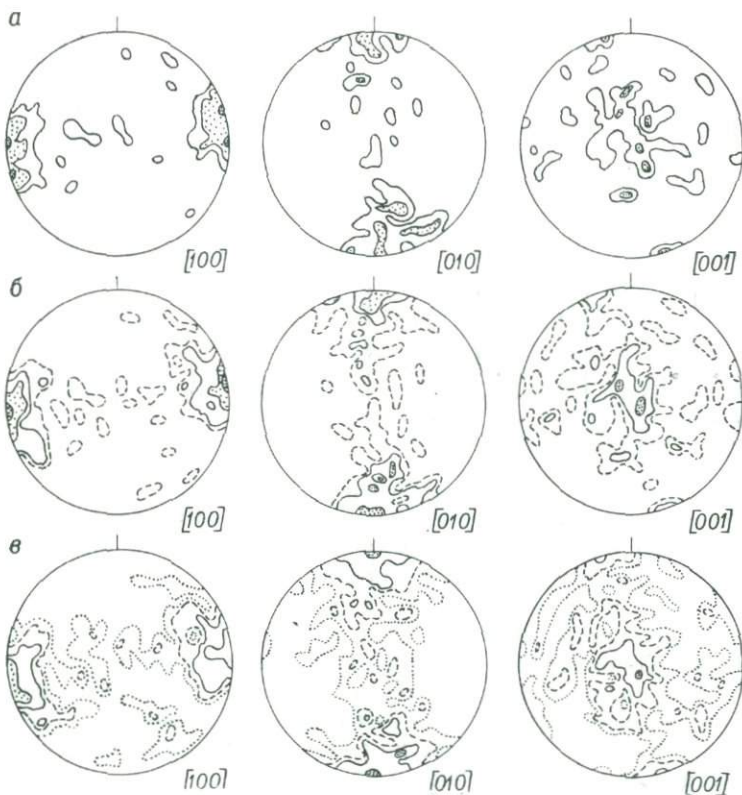


Рис. 84. Зависимость узора диаграмм ориентировки оливина от количества измеренных зерен [63].

a — $N = 50$, изолинии 2, 4, 8%; *б* — $N = 100$, изолинии 1, 2, 4, 8%; *в* — $N = 200$, изолинии 0,5, 1, 2, 4%.

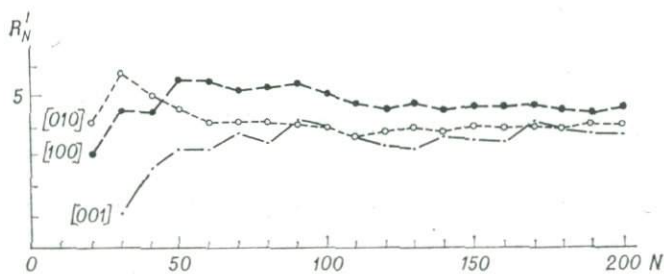


Рис. 85. Зависимость коэффициента степени ориентировки R'_N от числа измерений N . Построена по ориентировкам оливина [63].

ломанные линии, параллельные оси абсцисс. Таким образом, 170 измерений являются оптимальным минимумом, обеспечивающим устойчивость узора микроструктурных диаграмм. Опыт микроструктурного изучения пород показывает, что наиболее характерные черты узора начинают появляться на диаграммах начиная с 50—70 измерений. Наиболее целесообразными следует признать следующие количества измерений для разных минералов: 170—200 зерен (слюды, хлориты, кварц и другие минералы, у которых измеряется одно направление); 110—120 зерен (амфиболы, пироксены, глиноземистые минералы, полевые шпаты, т. е. все минералы, у которых измеряется ориентировка двух направлений). Именно такие объемы выборки обеспечивают устойчивый узор при минимальной затрате времени.

Последнее обстоятельство является очень важным при проведении микроструктурного анализа, поскольку оно связано с производительностью метода. Опыт показывает, что при достаточном навыке в работе с федоровским столиком в течение 1 ч в среднезернистой породе можно измерить: 30—40 оптических осей кварца, 50—60 \perp 001 для слюд и хлоритов, т. е. минералов с единственным измеряемым направлением. Такова скорость измерений, сопровождаемых записями в журнале первичной документации. Если же запись не ведется, а измерения выносятся прямо на стереопроекцию, то производительность возрастает до 50—60 измерений оптических осей кварца и 80—100 измерений \perp 001 слоистых силикатов в 1 ч.

В тех случаях, когда измеряются два направления и оптические константы в кристаллах, что требует графических построений на стереосетке, скорость снижается до 10—15 измерений/ч (амфиболы, пироксены, эпидоты и др.). При изучении ориентировки, оптических констант, законов двойникования и состава плагиоклазов скорость измерения не превышает 3—4 зерен/ч.

§ 41. ВЫНЕСЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТЕРЕОПРОЕКЦИЮ. ПЛАНИСФЕРА А. В. ПРОНИНА. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ

После того как измерено необходимое количество зерен минерала (110—170), значения выносятся на стереопроекцию. В том случае, если были определены дискриминирующие признаки, разбивающие совокупность на две-три выборки, лучше выносить такие выборки на разные диаграммы. Когда имеется незначительное количество (10—30) зерен с отличительными признаками, не позволяющее строить диаграмму в изолиниях, измерения по таким зернам надо выносить на диаграмму отдельным знаком или цветом. Вынеся таким образом все измерения на кальки, можно сразу качественно оценить сходства или различия ориентировки. Для этого кальки накладываются

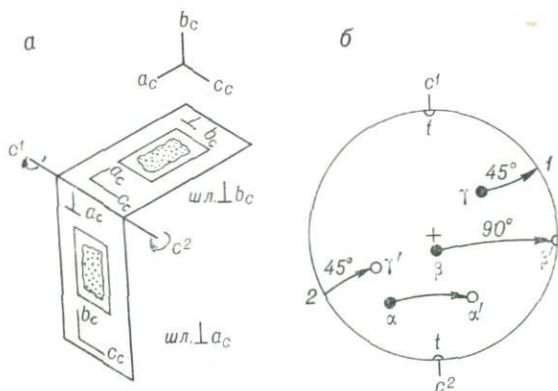


Рис. 86. Ориентировка взаимно перпендикулярных шлифов (а) и поворот проекции точек шлифа $\perp a_c$ на 90° вокруг оси c_c (б).

одна на другую и чисто визуально оценивается, насколько области концентрации точек на обеих диаграммах близки друг к другу. Если области локализации точек на диаграммах совпадают, то точки сводятся на одну кальку и диаграмма строится для всей совокупности измерений. Когда возникает подозрение на различие в ориентировке осей обеих совокупностей, лучше построить отдельные диаграммы для каждой из них. Когда такие различия явные, необходимо произвести дополнительные измерения по неисследованной части шлифа.

При изучении ориентировок минералов, в которых измеряются два направления, целесообразнее сначала выносить на стереопроекцию измерения осей, связанных с линейностью, а затем осей, связанных с нормалью к плоскостному элементу, т. е. с осью c_c .

Часто возникает необходимость в изучении двух взаимно перпендикулярных шлифов. В этом случае необходимо все измерения свести на одну стереопроекцию, нормальную к оси b_c . Для этого надо повернуть проекцию всех точек на диаграмме, нормальной к оси a_c , на 90° , т. е. совместить оси a_c и c_c обоих шлифов. Ось поворота в этом случае служит ось c_c , которая и совмещается с полюсами сетки Вульфа (рис. 86, а). Затем по часовой стрелке, но не против, так как в этом случае точка будет проектироваться на нижнюю полусферу, все точки по дугам малых кругов (по параллелям сетки Вульфа) переносятся на 90° (рис. 86, б). При этом, например, точки α и β переходят в точки α' и β' . Точка γ движется по траектории до края диаграммы на угол 45° (точка 1), затем конец траектории через центр проекции проектируется на противоположный край проекции в точку 2 и из нее по параллели через 45° достигает точки γ' . Таким образом, для всех точек, траектории движения кото-

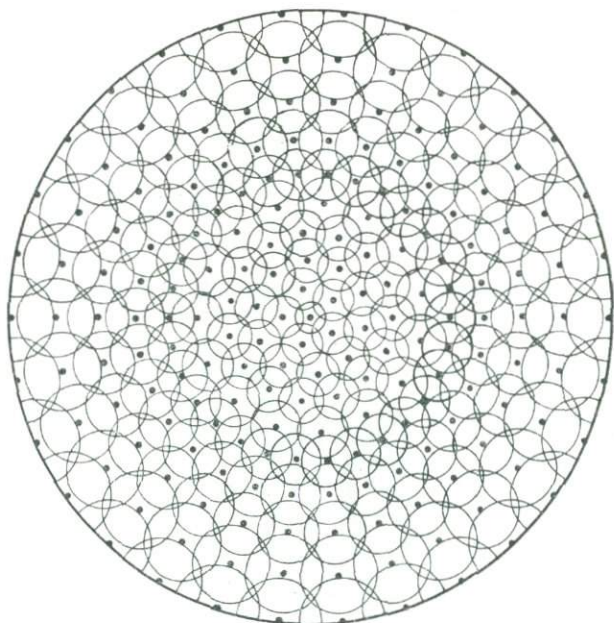


Рис. 87. Планисфера А. В. Пронина.

рых прерываются краем проекции, суммарный угол поворота должен составлять 90° . Единственной точкой, не испытывающей движения по дугам малых кругов, является точка t — ось вращения.

После того как проекции всех точек шлифа, нормального к оси a_c , повернуты на 90° , необходимо совместить оси c_c обеих проекций и перенести точки с кальки шлифа, нормального к оси a_c , на кальку шлифа, нормального к оси b_c .

После нанесения на стереопроекцию совокупности точек необходимо провести их статистическую обработку. Для этого используется планисфера А. В. Пронина (рис. 87) того же диаметра, что и сетка Вульфа. Планисфера предназначена для того, чтобы перевести площади концентрации точек из равноугольной проекции в равноплощадную. Принципы построения планисферы А. В. Пронина изложены в пособии Л. И. Лукина и др. [25], поэтому ниже даны лишь технические приемы работы с ней.

Обычно используется планисфера, выполненная на контрастной фотобумаге, или вычерченная на ватмане. Калька с вынесенными на нее измерениями накладывается на планисферу. Затем подсчитывается и записывается около центра каждого кружка количество попавших в него точек. Центры кружков отмечают знаком, отличающимся от знака, которым обозначены

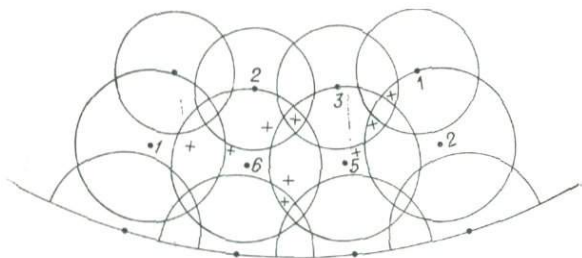


Рис. 88. Подсчет плотности измерений с помощью планисферы А. В. Пронина.

измерения. Если измерения осей вынесены, например, точками, то центры кружков необходимо маркировать крестиком и т. д. Если точка попадает в области перекрытия двух, трех, четырех кружков, то она учитывается в общем количестве точек, относящихся к центрам каждого из перекрывающихся кружков. Если имеется обширная область, в которую не попадают измерения, то нет необходимости ставить нули около всех центров кружков, попадающих в эту область. Достаточно проставить нулевые значения лишь в пограничной области, разделяющей значимую и нулевую площади. Особое внимание необходимо обратить на подсчеты точек, попадающих на край диаграммы. Поскольку по краю диаграммы расположено 30 центров полу-кругов, то около диаметрально расположенных центров записывается значение суммарного количества точек, попадающих в диаметрально расположенные полукруги. Пример подсчета плотности измерений с помощью планисферы А. В. Пронина приведен на рис. 88.

Обработав таким образом измерения всей площади, приступают к построению изолиний, используя метод интерполяции между смежными измерениями. Изолинии строятся в абсолютных значениях. Особое значение приобретают две изолинии — минимальная и максимальная. Это связано с тем, что первая оконтуривает все поле, в которое попадают проекции измеряемых осей, а вторая — область максимальной их локализации. Поэтому именно с них целесообразнее начать обработку измерений в виде изолиний, т. е. построение диаграммы плотностей распределения осей.

Минимальная изолиния должна соответствовать 0,5—1% количества точек, причем таким образом, чтобы это значение не отвечало целому числу точек. Это необходимо для того, чтобы исключить неопределенность в рисовке изолиний при одинаковых смежных значениях (рис. 89, а). Все изолинии лучше проводить по нецелому числу точек. Как видно из этого рисунка, некоторой неопределенности в рисовке изолиний избежать не удастся. В приведенном примере это касается максимальной

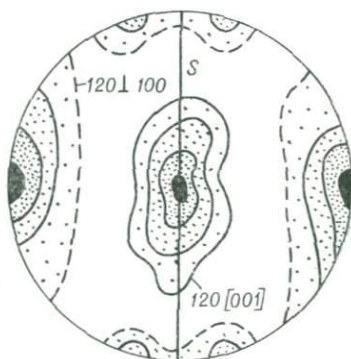
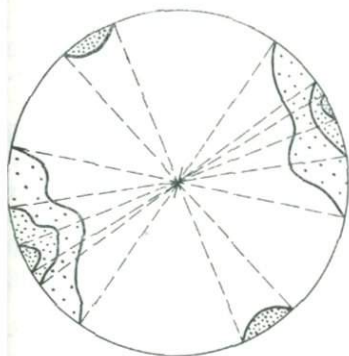


Рис. 89. Способы проведения изолиний.

$N = 150$, изолинии 0,33; 1,66; 3,00; 4,33 (до 4,66)%.

изолинии 6,5 точек (9,75%). Такая ситуация, когда в четырех смежных точках диагональные значения попарно равны, часто встречается при построении микроструктурных диаграмм. В таких случаях возможны два способа рисовки изолиний (рис. 89, б и в). Оба способа в принципе равнозначны, и право выбора остается за исследователем. Можно лишь рекомендовать объединять одной изолинией большие значения, с тем, чтобы не создавать на диаграмме дополнительные изолированные максимумы. Часто способ проведения таких изолиний подсказывается самим узором на диаграмме.

Особо внимательно надо проводить изолинии, пересекаемые краем стереопроекции. Точки пересечения одноименных изолиний с краем стереопроекции должны быть диаметрально противоположными, т. е. все отрезки, соединяющие такие точки, должны проходить через центр диаграммы (рис. 90).



1-6-14-22 (до 24)% - 100

1-9-15-21 (до 23)% - $[001]$

Рис. 90. Проведение изолиний, пересекаемых краем проекции.

Рис. 91. Пример оформления диаграммы (роговая обманка).

После того как проведены минимальная и максимальная изолинии, необходимо провести 2—3 изолинии с промежуточными значениями. Опыт показывает, что 3—5 изолиний вполне достаточно для того, чтобы отразить в полной мере все черты пространственного поведения измеряемого элемента. Микроструктурная диаграмма должна быть наглядной, легко читаемой и нести максимум информации при минимуме изобразительных средств.

После того как построены изолинии в абсолютных значениях n необходимо рассчитать их относительные значения K (в процентах от общего числа точек N) по формуле $K = 100 n/N$. Изолинии разделяют диаграмму на ряд полей. Для наглядности поля, ограниченные максимальной изолинией, необходимо закрасить в черный цвет, а поля, ограниченные последующими изолиниями, — крапом в понижающейся тональности. Нулевое поле, ограниченное минимальной изолинией оставляется чистым.

Когда измеряются две ортогональные оси, диаграммы, построенные по ним, лучше свести в одну, подписав наименование осей и количество измерений. Относительные значения изолинии (в процентах) подписываются под рисунком, либо на изолиниях. Пример оформления диаграммы приведен на рис. 91.

§ 42. ТИПЫ УЗОРОВ ЧАСТНЫХ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ДИАГРАММ. МАКСИМУМЫ, ПОЯСА, КОНИЧЕСКИЕ ТРАЕКТОРИИ. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Построенные в виде изолиний диаграммы плотностей распределения точек (проекций осей) обычно характеризуются определенным узором, отражающим строение (fabric) минерала, т. е. закономерность его ориентировки в породе. Изотропное строение породы характеризуется очень широкой областью рассеивания осей без заметной их концентрации.

Тектониты характеризуются закономерной локализацией осей, геометрически связанной с элементами макроструктур. Наиболее распространенными типами узоров на диаграммах являются: единичный максимум, два симметричных относительно структурных осей максимума, максимум, рассеянный в пояс, концентрация осей вблизи конической поверхности и, наконец, их комбинации.

Единичный максимум концентрации — частый тип узора, отвечающий наиболее жесткой ориентировке осей. Поэтому он характеризуется высокой концентрацией, максимум которой достигает 30—40% и более. Центр тяжести такого максимума может совпадать с c_c (рис. 92, а) или b_c (рис. 92, е). В первом случае по узору устанавливается плоскость S , но не устанавливается ось b_c , во втором — устанавливается ось b_c , но плоскость

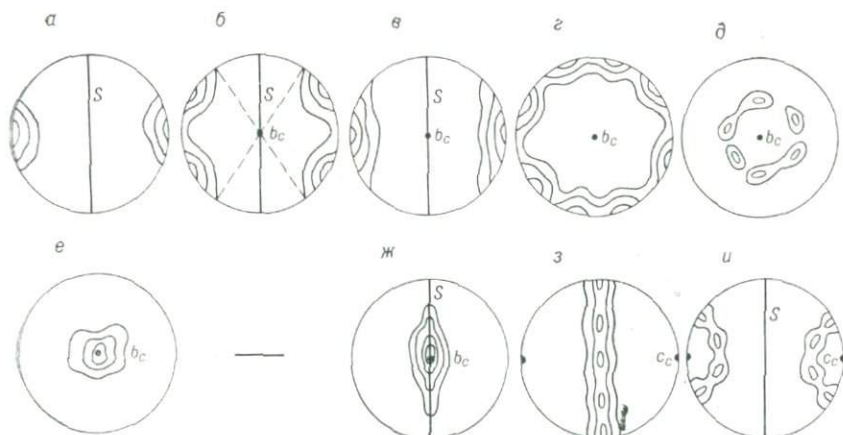


Рис. 92. Типы узоров микроструктурных диаграмм.

S не определяется. При наличии двух таких максимумов, один из которых совпадает с макроскопически выраженным структурным элементом, обычно другой максимум отвечает положению оси второй системы (более ранней или наложенной) структурных элементов. Она может быть выражена макроскопически, но может быть и замаскирована.

Нередки случаи, когда два максимума располагаются симметрично относительно макроструктурной оси c_c , которая является диагональю между ними (рис. 92, б). Обычно углы между такими парными максимумами являются рациональными, равными 30, 45, 60 и 90°. По такому узору восстанавливается как плоскость S , так и ось b_c . Последняя является линией пересечения плоскостей, нормальных к обоим максимумам. Узоры такого типа весьма характерны для ромбических и моноклинных минералов с двумя системами спайности или отдельности из зон осей [001], [010] и [100], например, амфиболов, эпидотов и др. Концентрация осей при таком типе узора обычно ниже, чем в первом случае.

Распространенным типом узора является комбинация максимума с частично поясовым рассеиванием осей. Центр тяжести такого максимума обычно совпадает с осью b_c или c_c . Когда он совпадает с осью c_c , то восстанавливается положение плоскости S и оси b_c как оси частичного вращения (рис. 92, в). Если же центр тяжести такого узора совпадает с осью b_c , то плоскостью частичного рассеивания является плоскость S (рис. 92, ж). Концентрация осей в таком типе узора ниже, чем в первом.

В том случае, когда наблюдается равномерное рассеивание осей по дуге большого круга иногда с серией слабоинтенсивных

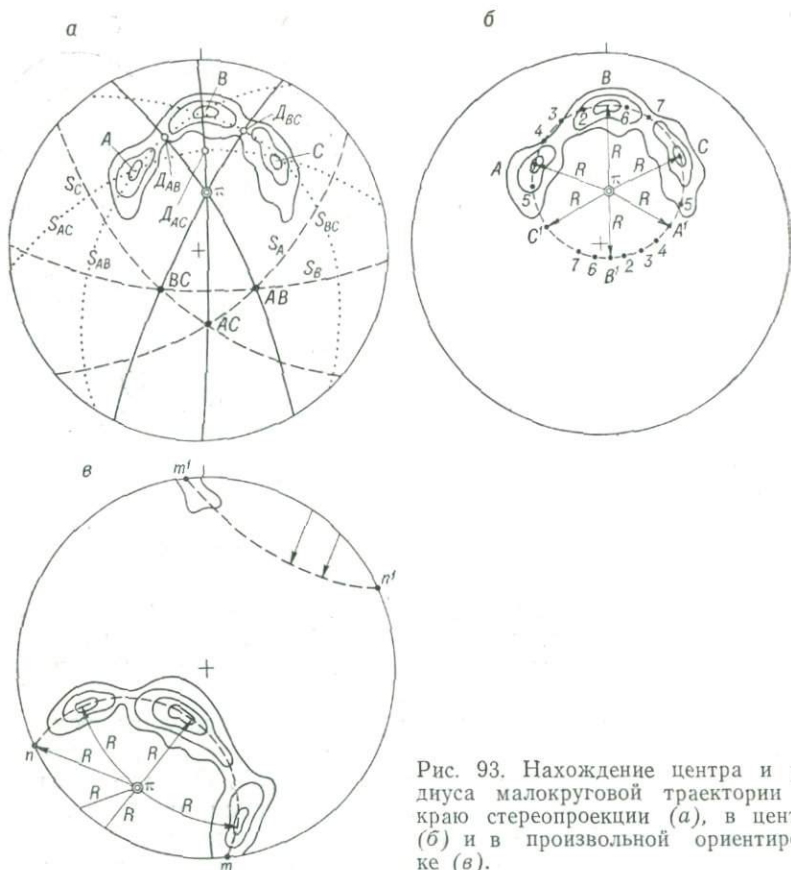


Рис. 93. Нахождение центра и радиуса малокруговой траектории на краю стереопроекции (а), в центре (б) и в произвольной ориентировке (в).

максимумов вдоль нее, узор является поясовым. При таком узоре в случае совпадения полюса с осью b_c положение поверхности S не восстанавливается (рис. 92, г). Если же пояс нормален к оси c_c , то он совпадает с поверхностью S , установить локализацию в ней оси b_c также невозможно (рис. 92, з).

Наконец, последним типом узора является малокруговая или коническая концентрация осей. В целом этот тип узора распространен значительно реже, чем предыдущие. Однако для кварца он является достаточно типичным. Центр таких конических траекторий совпадает с осью b_c (рис. 92, д) или c_c (рис. 92, и). Для того чтобы определить ориентировку центра конической траектории относительно структурных осей, необходимо знать ориентировку последних. Поэтому структурные координаты должны быть известны из макроструктурных данных или из анализа ориентировок сосуществующих минералов, по которым эти оси могут быть установлены.

При анализе конического узора необходимо найти его центр и радиус (апикальный угол конуса). Для этого надо произвести серию дополнительных построений на стереосетке. На рис. 93, а изображен узор с локализацией осей вдоль дуги малого круга. Имеются три максимума с центрами A , B и C . Сначала на диаграммы наносят плоскости S_A , S_B и S_C , нормальные к A , B и C . Они пересекаются в трех точках AB , AC и BC . Затем проводят три плоскости S_{AB} , S_{AC} , S_{BC} , нормальные к этим точкам. В этих плоскостях лежат пары максимумов: A и B , A и C , B и C . После этого, совместив плоскости S_{AB} , S_{AC} и S_{BC} с меридианами и определив углы между максимумами, находят диагональные точки, делящие эти узоры пополам: D_{AB} , D_{AC} и D_{BC} . Далее проводят диагональные плоскости через диагональные точки и точки пересечения одноименных плоскостей, т. е. через $D_{AB} - AB$, $D_{AC} - AC$ и $D_{BC} - BC$. Точка пересечения всех трех плоскостей является центром конической поверхности π , вдоль которой концентрируются оси. При пересечении диагональных плоскостей может возникнуть небольшой треугольник погрешностей, и в этом случае центром конической траектории является «центр тяжести» этого треугольника.

Определив центр конического узора и радиус конуса, т. е. его апикальный угол, для наглядности необходимо нарисовать проекцию конической поверхности или ее части. В тех случаях, когда центр π совпадает с центром диаграммы, можно воспользоваться циркулем. Если центр совпадает с краем диаграммы, то его надо совместить с полюсами и провести малокруговую траекторию, используя параллели стереопроекции.

Когда центр π занимает произвольное положение на стереопроекции, построение малокруговой траектории отличается от способов, описанных выше. При небольшом апикальном угле конуса, когда коническая поверхность не пересекает край стереопроекции, ее строят следующим образом. От центра π по меридиану, проходящему через него, под углом, равным апикальному углу конуса (πA , πB , πC), фиксируют пару точек в северном и южном направлениях (рис. 93, б). Для точек A , B и C противоположными точками являются соответственно A^1 , B^1 и C^1 . Поворачивая кальку вокруг центра и фиксируя противоположные точки, трассируют коническую траекторию. Соединив между собой точки на диаграмме, проводят проекцию конической поверхности.

В случае, когда центр π значительно отклоняется от вертикали, а радиус R велик, коническая поверхность пересекается краем проекций (рис. 93, в). В таком варианте, определив радиус конической траектории, сначала необходимо зафиксировать точки пересечения края диаграммы с последней. Для этого кальку вращают до тех пор, пока угол между центром π и одним из полюсов не станет равным радиусу R . Оба полюса фиксируют на кальке точками (точки m и m^1). Вращая кальку в про-

тивоположном направлении, находят второе положение, когда угол между π и полюсом равен R (точки n и n^1). Зафиксировав на кальке оба полюса в этом положении, на краю диаграммы получают 4 точки, отвечающие ее пересечению с конической поверхностью. Фиксацию промежуточных пар противоположных точек проводят так же, как и в предыдущем варианте. Откладывая точки на короткой дуге траектории, устанавливают центр π на меридиане и откладывают угол от π до ближнего полюса. Затем по меридиану, симметричному относительно меридиана, на котором находится π , откладывают дополнительный до R угол, и точку фиксируют. Таким образом фиксируют все промежуточные между n^1 и m^1 точки, трассирующие короткую дугу конической траектории.

Изложенные способы построения конических проекций необходимо знать не только для анализа микроструктурных диаграмм. Такие узоры очень часто встречаются при геометрическом анализе макроструктур: деформированной ранней линейности; шарниров складок, облегающих купола и будины; шарниров и линейностей, параллельных осям нецилиндрических складок и т. д.

Еще одним из приемов геометрического анализа микроструктурных диаграмм, требующих дополнительных построений и используемых при анализе макроструктур, является построение диаграмм β -пересечений, анализ которых позволяет повысить информативность диаграмм $\perp 001$ слоистых силикатов.

Для построения диаграмм β -пересечений необходимо вынести на проекцию 25—30 плоскостей 001, отвечающих измерениям $\perp 001$, записанным в журнал. Ограниченное число плоскостей связано с тем, что при большем их числе определение точек пересечения плоскостей и их последующая обработка с помощью планисферы А. В. Пронина будет затруднена. Количество точек (линий) пересечения n при пересечении N плоскостей определяется по формуле $n = N(N-1)/2$, т. е. к примеру, 30 плоскостей пересекаются в 435 точках. Чтобы не пропустить точки пересечения и иметь возможность контролировать их количество, необходимо действовать следующим образом.

Плоскости выносятся тонко заостренным карандашом, а линии их пересечения фиксируются тушью точками. Вынося 3—4 плоскости и зафиксировав точки, в дальнейшем точки фиксируют после проведения каждой последующей плоскости. Плоскости и точки выносятся до тех пор, пока это технически осуществимо, т. е. точки пересечения будут различимы и можно произвести их подсчет. После этого рассчитывается общее количество точек, плоскости стираются, с помощью планисферы А. В. Пронина рассчитываются плотности точек и строится диаграмма β -пересечений в виде изолиний. Центр тяжести главного максимума β -осей отвечает оси b_e . Найденная таким способом

ось b_c по слонстым минералам в дальнейшем сопоставляется с осями b_c по другим минералам или с макроскопической осью b_c .

§ 43. АНАЛИЗ ДИАГРАММ.

ПРИВЕДЕНИЕ К ГЕОГРАФИЧЕСКИМ КООРДИНАТАМ

Выше описаны типы узоров микроструктурных диаграмм, отражающие пространственное поведение какой-то одной оси при однократной деформации. В условиях неоднократных деформаций обычны сложные узоры, представляющие собой комбинации элементарных узоров, называемых компонентами узора. В качестве компонентов узора обычно выступают единичный максимум, пара симметричных относительно макроэлементов максимумов, пояс или коническая концентрация.

При измерении ориентировок двух направлений в зерне необходимо провести анализ двух диаграмм сопряженных элементов. Он позволяет представить объемную картину ориентировок зерен. Для этого сначала необходимо выделить компоненты узора обеих диаграмм. В том случае, если обе диаграммы однокомпонентны, т. е. центры тяжести максимумов на обеих диаграммах совпадают со структурными осями, все зерна ориентированы статистически одинаково. В этом случае строение или ориентировка называется квазикристалльной (рис. 94, а). Такой тип ориентировки характерен для однократно деформированных пород. При однократной деформации нередко образуется и так называемый квазидвойникованный тип ориентировки. При этом длинные оси ([001] амфиболов, [010] эпидотов и т. д.) ориентированы строго вдоль оси b_c , а короткие оси ($\perp 100$ амфиболов, [001] эпидотов и т. д.) образуют пару максимумов, симметричных относительно оси c_c в нормальной к оси b_c плоскости (рис. 94, б).

Когда в узоре длинной оси наблюдаются два максимума, лежащие в одной поверхности S (рис. 94, в), считается, что существуют две генерации линейности, особенно если интенсивность обоих максимумов различна. Обычно для такой компланарной деформации удается показать ее двуактность.

При коллинеарной деформации, когда длинные оси минералов, образуя единый максимум, совпадают с одной макроскопической осью b_c (одна линейность), в узоре короткой оси выделяются два максимума (рис. 94, г). Они отвечают двум положениям разновозрастных поверхностей S , совпадая с их полюсами (осями c_c).

И, наконец, когда в обеих диаграммах присутствуют двухкомпонентные узоры (рис. 94, д), разбив их на две, например, квазикристалльные ориентировки, устанавливают две генерации разноориентированных и разновозрастных систем структурных координат.

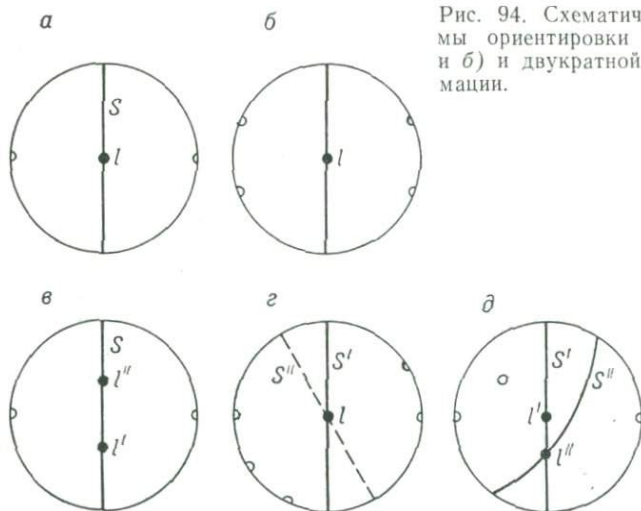


Рис. 94. Схематические диаграммы ориентировки при одно- (*a* и *б*) и двукратной (*в*—*д*) деформации.

Нередко узор на одной диаграмме явно многокомпонентный, а на сопряженной нечеткий, как бы размазанный. В этом случае необходимо выделить те индивидуальные зерна, которые попадают в разные компоненты узора на первой диаграмме. Необходимо в общем случае определить зенитные и азимутальные координаты границ области локализации осей в каждом компоненте. Для этого, вращая кальку вокруг центра, определяют азимутальный интервал краев области локализации осей. Оба края должны совмещаться с северным концом вертикального меридиана, по которому откладывались измерения осей (рис. 95). Затем определяют интервал зенитных координат области локализации осей. Для приведенного примера интервалы координат: 150—210, 15—40°.

После этого в журнале измерений каким-либо знаком выделяют все те зерна, оси которых попадают в этот интервал. Затем измерения сопряженный осей выносят на отдельную диаграмму и определяют область их локализации. Аналогичные операции производят и с остальными компонентами сводного узора. При этом всегда имеется часть зерен из общей совокупности, которые не связаны ориентировкой с выделенными компонентами узоров, т. е. статистически не ориентированы. Они образуют изотропный компонент. Проведя геометрический анализ диаграмм, разбив всю совокупность зерен на группы с определенной ориентировкой и выделив изотропный компонент, необходимо провести статистический анализ их оптических характеристик.

Для этого по каждой из групп зерен рассчитывают средние значения этих характеристик (CNg или $CNp, 2v$). Если изучалась ориентировка плагноклазов, то рассчитывают средние по

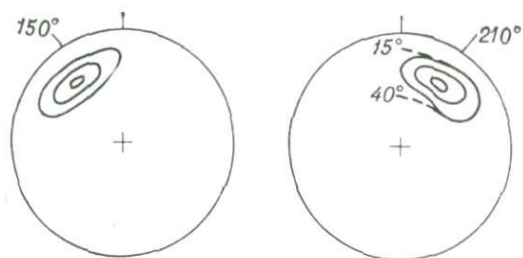


Рис. 95. Определение координат, ограничивающих область локализации осей.

группам номера и степень упорядоченности, а также определяют преобладающие в той или иной группе законы двойникования. Кроме того, по группам анализируют те отличительные признаки, которые отмечались при измерениях индивидуальных зерен в графе «Примечания». При достаточной представительности групп числовые значения (CNg , $2v$) обрабатывают и представляют в виде гистограмм или вариационных кривых. В этом случае определяют модальное значение числовых характеристик.

Средние числовые и качественные характеристики зерен разных групп сравнивают между собой и определяют сходство или различие выделенных совокупностей. Если эти различия явные, то следует считать, что совокупности принадлежат к разным генерациям структурных элементов.

Дальнейшая задача состоит в том, чтобы определить географические координаты тех линейных и плоскостных элементов, которые отвечают каждой из выделенных совокупностей зерен минерала.

Такой последовательный анализ должен быть проведен по всем минералам, ориентировка которых изучалась в данном шлифе. Далее ориентировки разных минералов сопоставляют между собой. При этом одни генерации структурных элементов для разных минералов могут быть общими, и тогда эта часть минералов объединяется в структурно-метаморфический парагенезис (см. гл. X). Для части минералов может быть установлена, кроме того, собственная дополнительная система структурных координат. Когда есть прямые признаки, маркирующие возрастные соотношения зерен в разной ориентировке, последовательность формирования систем структурных элементов устанавливается легко. Когда такие признаки отсутствуют, то для восстановления возрастной последовательности ориентировок необходимо использовать уже весь комплекс линейных и плоскостных структурных элементов, которые измерены в месте отбора образца или выведены геометрически (например, шарнир складки, линии пересечения плоскостей S разных генераций, биссекторная поверхность складки и т. д.). В этом случае минеральные ассоциации и их ориентировки хронологически ока-

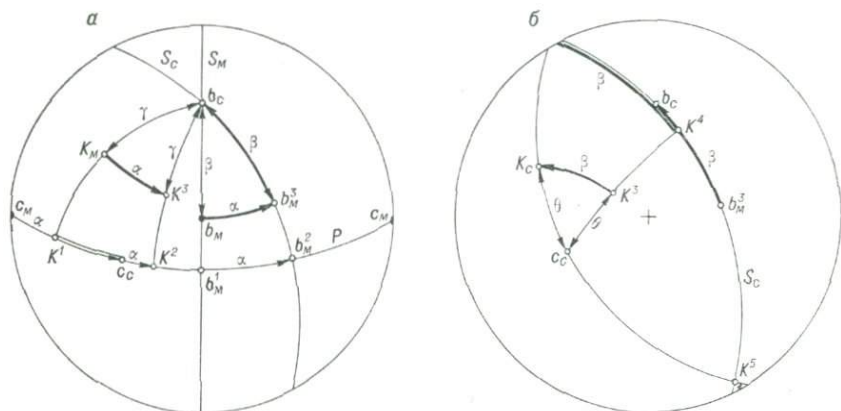


Рис. 96. Приведение микроструктурной системы координат (S_M, b_M, c_M) к географическим (макροструктурным) координатам (S_C, b_C, c_C).

a — поворот вокруг оси b_C ; *b* — поворот вокруг оси c_C .

зываются «привязанными» к разновозрастным и разноориентированным системам структурных элементов. Дальнейшая задача состоит в том, чтобы сравнить ориентировку систем структурных элементов, установленных на основании микроструктурного анализа, с системами макроструктурных элементов, установленных непосредственно на обнажениях. Это требует приведения обеих систем к одной (географической) системе координат.

Так как макроструктурная система координат, относительно которой вырезан шлиф, задана в географических координатах, то она является жесткой и вращение микроструктурной системы координат производят вокруг ее осей.

На стереопроекции в географических координатах наносят макроструктурную систему координат: S_C , ось b_C и ось c_C как нормаль к S_C (рис. 96, *a*). Затем на эту же диаграмму наносят систему координат, полученную при микроструктурном анализе. В данном примере это S_M и b_M , перпендикулярно к которым был вырезан шлиф, а также ось c_M как нормаль к плоскости S_M и произвольная точка K_M . Общей для обеих плоскостей S_M и S_C является линия b_C . Чтобы совместить обе плоскости, необходимо плоскость S_M повернуть против часовой стрелки вокруг оси b_C на угол α . Угол поворота определяют следующим способом. Перпендикулярно к оси b_C проводят плоскость P , проходящую через c_M и c_C . Угол α между ними и определяет угол поворота вокруг b_C . На угол α должны быть повернуты и все другие точки на диаграмме, например K_M и b_M . Естественно эти точки будут вращаться по дугам малых кругов с радиусами γ и β соответственно. Для определения положения этих точек после поворота необходимо точки K_M и b_M поставить последовательно на один

меридиан с b_c и зафиксировать точки K^1 и b^1_m как линии пересечения этих меридианов в плоскости P . Затем в этой плоскости против часовой стрелки от точек K^1 и b^1_m откладывают углы, равные α (точки K^2 и b^2_m). Далее K^2 и b^2_m последовательно ставят на один с b_c меридиан. От b_c по каждому из меридианов откладывают углы γ и β . Точки K^3 и b^3_m фиксируют и определяют положение точек K_m и b_m после поворота вокруг b_c . Таким способом совмещают оси c_c и c_m , т. е. плоскости S_m и S_c .

Далее необходимо совместить b^3_m с b_c , т. е. повернуть точки вокруг оси c_c против часовой стрелки на угол β (рис. 96, б). Для всех точек, лежащих в плоскости S_c , например β^3_m , поворот осуществляется фиксацией точек, лежащих под углом β против часовой стрелки в этой плоскости. Для произвольных точек (точка K^3) необходимо сделать построения, аналогичные вышеописанным. Точки c_c и K^3 ставят на один меридиан и определяют угол θ . Линию пересечения этого меридиана с плоскостью S_c фиксируют (точка K^4). От точки K^4 в плоскости S_c против часовой стрелки откладывают угол β . Точку K^5 фиксируют и ставят на один с c_c меридиан, на котором под углом θ фиксируют точку K_c .

Таким способом производят совмещение обеих систем координат и определяют положение произвольной точки на диаграмме после поворота. Если эта точка представляет собой полюс к какой-то плоскости, то плоскость выносят на диаграмму. После того как осуществлен поворот всех линейных и плоскостных структурных элементов, установленных при микроструктурном анализе, их необходимо перенести на отдельную диаграмму, на которой подписывают элементы залегания. Таковую же диаграмму необходимо построить и для всех макроструктурных элементов, измеренных в обнажении и выведенных графически. Эти элементы должны быть спроектированы на верхнюю полусферу. Часто измерения структурных элементов выносят на нижнюю полусферу. Чтобы в этом случае получить узор в проекции на верхнюю полусферу, необходимо повернуть диаграмму «вверх ногами», т. е. на 180° вокруг центра.

После описания технических приемов микроструктурного анализа, способов графической обработки измерений и анализа диаграмм рассматриваются теоретические основы микроструктурного анализа (гл. X—XII).

Глава X

ЭЛЕМЕНТЫ ДИНАМИКИ И КИНЕМАТИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Прежде чем перейти к обсуждению механизмов деформации, контролирующих ориентировки минералов, необходимо рассмотреть основные понятия, которые будут использованы.

§ 44. АМОРФНЫЕ ВЕЩЕСТВА, КРИСТАЛЛЫ, КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ АГРЕГАТЫ

Твердые вещества могут быть аморфными, монокристаллическими и поликристаллическими. В аморфных веществах все физические свойства, например твердость, сжимаемость, теплопроводность и т. д., не зависят от направления, в котором они определяются. Такие вещества изотропны, и в них все физические характеристики геометрически выражаются сферой.

В монокристаллах же эти характеристики зависят от направления, поэтому кристаллы анизотропны, и обычно анизотропия их тем выше, чем ниже симметрия кристалла. Физические характеристики в кристаллах описываются более сложными поверхностями.

Поликристаллические агрегаты, например горные породы, в зависимости от взаимного расположения слагающих их кристаллов и зерен минералов могут быть как изотропными, так и анизотропными. При неориентированном расположении минералов порода изотропна; чем более упорядоченной является их ориентировка, тем выше анизотропия породы. Такая статистическая упорядоченность анизотропных пород сближает их с кристаллами, позволяя применять к таким породам многие операции симметричных преобразований, используемых в кристаллографии.

Причины, приводящие к ориентировке минералов в породе, очень разнообразны. Это и осаждение в средах различной вязкости (воздух, вода, лед, магматический расплав), и градиенты температур (направление теплопереноса) или концентраций (направление массопереноса). При образовании упорядоченных структур метаморфических тектонитов решающая роль принадлежит градиентам давлений. Однако все эти факторы отражают одну общую закономерность в формировании ориентировок, а именно движение вещества, которое может происходить на разных уровнях его организации: на атомарно-молекулярном, на уровне кристаллических решеток и их частей и т. д.

Все твердые тела имеют определенную форму, что обусловлено взаимной компенсированностью внутренних сил отталкива-

ния и притяжения. Такое состояние тела является динамически равновесным, и вся система кинематически стабильна. Обычными внешними факторами динамического равновесия считается температура около 20°C и атмосферное давление.

§ 45. ДЕФОРМАЦИЯ, НАПРЯЖЕНИЕ, ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ. КРИВЫЕ СТРЕСС — ДЕФОРМАЦИЯ

При изменении температуры тела происходит изменение его объема, а у кристаллов с резкой анизотропией коэффициентов линейного термического расширения изменяется и форма. Изменение формы тела вследствие изменения взаимного расположения слагающих его частиц называется деформацией. Единицей измерения деформации ϵ является отношение линейного приращения к первоначальной длине тела, выраженное в процентах. Тепловая деформация кристаллов мала, и решающую роль в деформации тел играют внешние силы (давление), вызывающие в теле возрастание внутренних сил упругости.

Внешняя сила, приходящаяся на единицу поверхности тела, называется внешним напряжением — стрессом σ , сила упругости — внутренним напряжением. В условиях гидростатического давления, когда оно одинаково на все стороны тела, происходит изменение объема тела без изменения формы. Когда давление в разных направлениях различно, говорят о направленном, негидростатическом давлении.

Так как модули векторов негидростатического давления в разных направлениях различны, в общем случае выделяются три главных вектора или оси, отвечающие максимальному σ_1 , минимальному σ_3 и среднему σ_2 значениям. Замечательной особенностью трех главных осей стресса ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) является их ортогональность. Обычно под стрессом подразумевают именно разность между максимальной и минимальной его осями, т. е. $\sigma_1 - \sigma_3$, которая и обуславливает деформацию тела. Стресс, внутреннее напряжение, прочность представляют собой силу, приходящуюся на единицу площади, поэтому они измеряются в тех же единицах, что и давление.

Таким образом, деформация — это реакция тела, его внутренних сил на внешнюю систему сил, вследствие чего тело приводится в состояние динамического равновесия с изменившимися внешними условиями. Так, при сжатии оно достигается увеличением внутренних сил отталкивания, а при растяжении, наоборот, — сил притяжения.

В зависимости от соотношения главных осей характеристические поверхности стресса изображаются в виде сферы ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), сплюснутого ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) или вытянутого ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) сфероидов, сплюснутого ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \gg \sigma_3$) или вытянутого ($\sigma_1 \gg \sigma_2 \geq \sigma_3$) трехосных эллипсоидов (рис. 97).

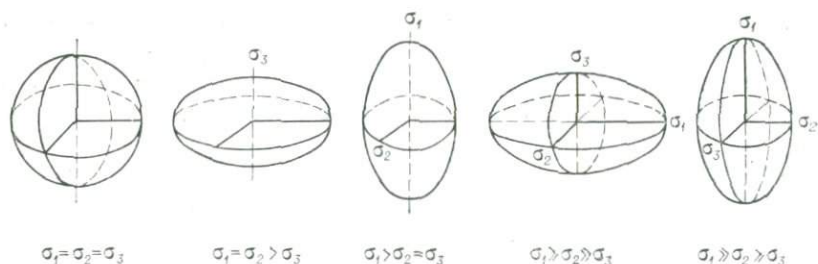


Рис. 97. Типы характеристических поверхностей стресса.

Соотношения между стрессом и деформацией наглядно иллюстрируются диаграммами, построенными в этих координатах. При малых значениях деформация пропорциональна стрессу (закон Гука) и график представляет собой отрезок прямой, наклон которой определяется внутренним напряжением в теле (рис. 98, а). При снятии стресса такая обратимая деформация, называемая упругой, исчезает. В любой точке графика тело находится в состоянии динамического равновесия. После снятия стресса все частицы тела занимают прежние позиции, и вся система, таким образом, является кинематически пассивной или стабильной. В интервале упругого поведения тела изменение объема называется дилатацией, а изменение формы — дисторсией.

Упругая деформация, являясь функцией стресса, графически выражается такими же характеристическими поверхностями, что и стресс, поскольку бесконечно малому приращению стресса отвечает бесконечно малое приращение деформации. При этом в направлении σ_1 происходит максимальное укорочение, а в направлении σ_3 максимальное удлинение (растяжение) материала. Таким образом, эллипсоиды стресса и упругой деформации являются обратными.

Обратимость упругой деформации не позволяет давать ее оценку в природных объектах, так как она в них не документируется. Ее исследуют в механике горных пород, в сейсмологии и при изучении упругих свойств кристаллов и пород. Эти свойства лежат в основе всех теоретических моделей ориентировки кристаллической решетки в стресс-поле.

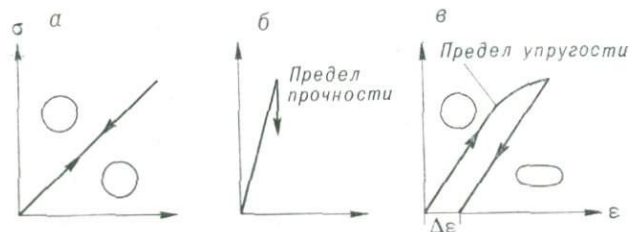


Рис. 98. Графики стресс σ — деформация ϵ .

При резком возрастании приращения напряжения по сравнению с приращением деформации (удар) материал, достигнув предела упругости, разрушается (рис. 98, б).

Если стресс продолжает расти достаточно равномерно, наступает момент, когда пропорциональность его и деформации нарушается, и траектория становится криволинейной. После снятия стресса (выше предела упругости) обратимость процесса нарушается, и на оси ϵ появляется отрезок $\Delta\epsilon$, отвечающий остаточной пластической деформации (рис. 98, в). Новое динамическое равновесие системы достигается ее кинематической активностью (мобильностью), когда слагающие ее элементы занимают новые позиции, отвечающие деформированному состоянию. Именно эта необратимая деформация изучается геологами, поскольку она зафиксирована в природных и в экспериментально деформированных горных породах и материалах.

Пластическая деформация является функцией стресса, времени, температуры, общего давления, механических свойств деформируемого вещества, количества флюидов и других параметров. Такое большое количество переменных, определяющих пластическую деформацию, порождает трудности ее изучения как в природных объектах, так и в эксперименте.

При экспериментальном моделировании деформации исследователи сталкиваются с двумя проблемами. Первая заключается в том, что при использовании пяти параметров — температура, стресс, общее давление, время и деформация — два из них являются обязательно постоянными. Поэтому наиболее полные диаграммы деформации обычно выглядят в виде семейства кривых в ортогональной системе координат, позволяющих изобразить три переменные с двумя постоянными.

Вторая проблема, стоящая перед геологией вообще, — это фактор времени. Длительность приложения стресса оказывает огромное влияние на ход деформации. Скорость деформации $\dot{\epsilon}$ определяется приращением деформации в единицу времени. К настоящему времени в экспериментах добиться скорости деформации ниже 10^{-8} с^{-1} не удалось (обычно 10^{-3} — 10^{-7} с^{-1}). Расчеты скорости деформации по измеренной скорости движения литосферных плит дают значения порядка 10^{-13} — 10^{-15} с^{-1} и ниже. Поэтому для объяснения механизмов деформации при низких скоростях приходится прибегать к экстраполяции.

§ 46. ВНЕШНИЕ ФАКТОРЫ, СТИМУЛИРУЮЩИЕ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ. ТЕМПЕРАТУРА, ВРЕМЯ, ЛЕТАЧИЕ КОМПОНЕНТЫ, НОРМАЛЬНОЕ И СКАЛЫВАЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Эксперименты Н. Л. Картера и Х. Дж. Аве Лаллемана [50] по деформации лерцолита и дунита показали, какое влияние на характер кривых стресс — деформация оказывают температура, скорость деформации (время) и присутствие воды.

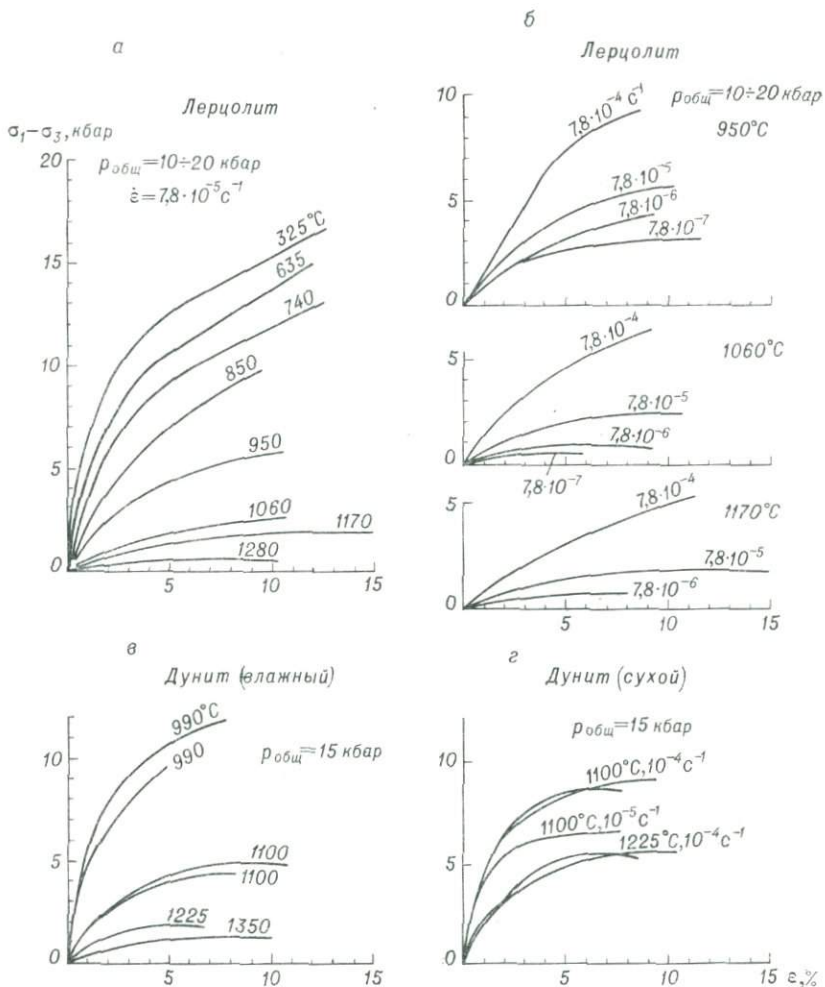


Рис. 99. Кривые стресс—деформация в зависимости от температуры (а), скорости деформации (б) и присутствия воды (в и г) [50].

На рис. 99, а видно, что при постоянном давлении $p=10\div 20$ кбар и $\dot{\epsilon}=7,8 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ с повышением температуры деформация начинается и протекает при более низких напряжениях. Такое же влияние на зависимость стресс—деформация оказывает и снижение скорости деформации, т. е. длительность эксперимента (рис. 99, б).

Сравнивая диаграммы на рис. 99, в и г, легко убедиться в том, что присутствие воды оказывает влияние, аналогичное и температурному, и временному факторам.

Таким образом, повышение температуры, количества летучих компонентов и длительности напряженного состояния породы благоприятствует началу и протеканию пластической деформации при более низких напряжениях, т. е. снижает предел упругости и стимулирует мобильность горных пород.

К внешним факторам пластической деформации следует отнести и угол, под которым сила приложена к телу. Он определяет скальвающее и нормальное напряжения. Именно эти напряжения и играют роль в ориентировке минералов независимо от того, какие механизмы ее контролируют.

Распределение напряжений в изотропном материале хорошо иллюстрируется задачей со стержнем, имеющим поперечное сечение S_0 , к которому приложено растягивающее* усилие P (рис. 100).

Перпендикулярно к S_0 под действием силы P возникает нормальное напряжение

$$\sigma_0 = P/S_0. \quad (1)$$

Вместе с тем на площадке S_α^{**} , расположенной под углом α к S_0 , действует напряжение

$$p_\alpha = P/S_\alpha, \quad (2)$$

где

$$S_\alpha = S_0 / \cos \alpha. \quad (3)$$

Напряжение p_α по правилу параллелограмма раскладывается на две составляющие: нормальное σ_α и скальвающее τ_α напряжения.

Подставив в формулу (2) выражение (3), получаем

$$p_\alpha = P \cos \alpha / S_0. \quad (4)$$

Используя в равенстве (4) выражение (1), записываем

$$p_\alpha = \sigma_0 \cos \alpha. \quad (5)$$

Но $\tau_\alpha = p_\alpha \sin \alpha$ и, подставляя сюда выражение (5), получаем $\tau_\alpha = \sigma_0 \cos \alpha \sin \alpha = \sigma_0 (\sin 2\alpha)/2$. Значит τ_α максимально при $\alpha = 45^\circ$.

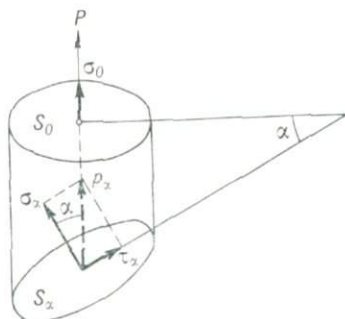


Рис. 100. Распределение напряжений в сечении изотропного цилиндра.

* Сменив направление всех стрелок на противоположное, можно рассматривать задачу на сжатие.

** Строго говоря, не на плоскости S_α , а на конической поверхности с центром P и апикальным углом $90^\circ - \alpha$, описываемой вектором τ_α . Однако для простоты изложения распределение напряжений рассматривается на площадке, как это принято в курсах сопротивления материалов.

Значение скалывающего напряжения τ_{α} в изотропном материале оказывается, таким образом, максимальным на площадке, расположенной под углом 45° к приложенной силе. Отсюда следует, что в изотропных материалах скалывание, появление трещин, скольжение, т. е. кинематическая активность, наиболее легко осуществляется по поверхности, расположенной под углом 45° к действующей силе. В первом приближении к таким материалам могут быть отнесены макроскопически изотропные, однородные массивные горные породы, чаще интрузивные, например габбро, граниты и др. К ним также близки минералы кубической сингонии: рудные минералы, гранаты, галит и т. д.

В описанных выше расчетах есть два очень важных момента, которые должны учитываться при анализе деформации кристаллов:

1) построения сделаны для изотропного вещества, в котором отсутствует направленность внутренних сил, т. е. факторами внутренней динамики можно пренебречь;

2) поверхность максимальных скалывающих напряжений, т. е. поверхность, по которой в первую очередь произойдет нарушение сплошности материала, в данном случае генерируется; в кристаллах же эти поверхности уже заданы.

Ниже рассмотрены некоторые свойства кристаллов, которые необходимо учитывать при последующем анализе их напряженного состояния.

§ 47. ВНУТРЕННИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

Кристаллы характеризуются периодичностью расположения в пространстве атомов или ионов, образующих кристаллическую решетку. В реальных кристаллах обязательно существует нарушение такой периодичности, обусловленное дефектами кристаллической решетки. Дефекты бывают точечные, линейные и двумерные.

Точечные дефекты, называемые вакансиями, обуславливают нарушение периодичности решетки в ее узлах. При этом атом может занимать позицию вне узла решетки (рис. 101, *a*), оставляя последний свободным. Узлы решетки могут быть заняты

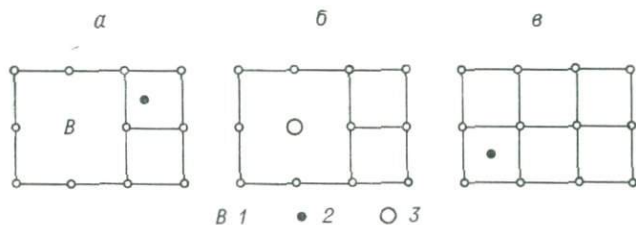


Рис. 101. Точечные дефекты в кристаллической решетке.

1 — вакансия; 2 — атом элемента-примеси в интерстициальных узлах; 3 — атом элемента-примеси в узле решетки.

элементами-примесями (рис. 101, б) и, наконец, атомы элементов-примесей могут находиться в интерстициях узлов решетки (рис. 101, в).

Линейные дефекты, обуславливающие нарушение периодичности решетки в цепочках атомов, называются дислокациями. В кристаллах они проявлены в виде дислокационных линий DI (рис. 102).

Движение дислокационной линии вдоль плоскости кристаллической решетки и обуславливает трансляционное скольжение в кристаллах, роль которого в ориентировке минералов рассматривается в гл. XI. Дислокационная линия, таким образом, является границей на плоскости кристаллической решетки между ненарушенной решеткой и той ее частью, по которой произошло смещение решетки, обусловленное движением дислокационной линии. Дислокации могут иметь винтовой характер. Когда линейный дефект не сквозной, а прерывается где-то внутри кристаллической решетки, движение внешнего конца дислокационной линии совершается вращательно-поступательно.

Нарушения периодичности решетки на каких-либо поверхностях кристаллов являются двумерными дефектами. К таким поверхностям относятся поверхности кристаллов, границы их зерен, т. е. внешние поверхности, ограничивающие решетки; такие же поверхности существуют внутри кристаллов и, наконец, это плоскости, разграничивающие слои, пакеты, ленты и т. д., т. е. границы, обуславливающие в кристаллах спайность и отдельность. Они обычно разграничивают плоскости кристаллических решеток с высокой ретикулярной плотностью.

Наличие в кристаллах дефектов создает в местах их локализации дополнительные внутренние напряжения, повышает внутреннюю энергию кристалла. Все это способствует снижению предела упругости кристаллических веществ и их пластической деформации.

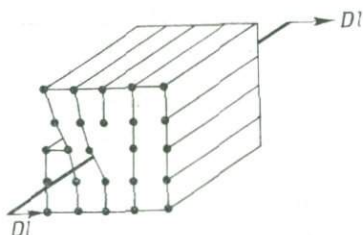


Рис. 102. Дислокация решетки.
 DI — дислокационная линия.

Глава XI

МЕХАНИЗМЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ОРИЕНТИРОВКИ МИНЕРАЛОВ

В этой главе рассматриваются два главных способа формирования упорядоченных структур метаморфических тектонитов. Первый — пластическая деформация — связан с пластичными свойствами кристаллов, с их кинематической активностью и обусловлен динамической неравновесностью

кристаллической решетки со стресс-полем. Второй — синтетоническая кристаллизация — связан с упругими свойствами кристаллов, когда кристаллическое вещество кинематически пассивно и ориентировка обусловлена термодинамически равновесной со стресс-полем кристаллизацией.

§ 48. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ. ТРАНСЛЯЦИОННОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ, ДВОЙНИКОВАНИЕ, ИЗЛОМ

В § 46 отмечалось, что к факторам пластической деформации относятся температура, скорость деформации и стресс. Общее (гидростатическое) давление на нее влияет относительно мало. Фактор времени в некоторых чертах близок к температурному. Поскольку в определении температурного фактора существует большая определенность, ниже рассмотрена деформация в низко- и высокотемпературном режимах. Д. Флинн [41] разделил виды пластической деформации на неактивируемые и активируемые тепловой энергией. Первые протекают при температурах ниже половины абсолютной температуры плавления вещества, вторые — выше.

Кривая стресс—деформация при низкой температуре изображена на рис. 103. Выше предела упругости деформация протекает без существенного приращения стресса. Этот прямой параллельный оси деформации отрезок графика (область текучести) отвечает наиболее высокой мобильности вещества, когда осуществляется его интенсивная перестройка. Слагающие породу минералы стремятся занять энергетически наиболее выгодное, динамически равновесное положение относительно осей стресса. Мобильность системы свидетельствует о том, что ниже предела текучести она была неравновесна со стресс-полем.

Выше области перегиба кривой, называемой пределом текучести, резкое повышение стресса сопровождается незначительным возрастанием деформации. Зависимость между стрессом и деформацией становится линейной. В теле возникают упругие силы и наблюдается упрочение материала. При достижении предела прочности сплошность тела нарушается, происходит разрыв, или хрупкая деформация.

При хрупких деформациях, протекающих обычно с большими скоростями, породы претерпевают дробление, милонитизацию и являются продуктами катакластического метаморфизма.

В низкотемпературном режиме преобладают три механизма пластической деформации: трансляционное скольжение, двойникование и пластический излом (kinking).

Скольжение на плоскостях кристаллической решетки, обусловленное перемещением дислокаций через зерна при достижении или превышении скалывающими напряжениями предела упругости в плоскости скольжения, называется трансляционным скольжением. Оно обычно осуществляется вдоль рядов плотнейшей упаковки атомов, и каждая плоскость P и линия скольже-

ния L образуют систему скольжения (рис. 104). Некоторые системы скольжения ряда минералов при определенных p - T -условиях приведены в табл. 14.

В результате скольжения происходит поворот решетки в пределах границ зерен и изменение формы последних.

Линия скольжения во время деформации поворачивается и располагается нормально к оси стресса. В результате вращения плоскости скольжения движение по ней прекращается из-за уменьшения скальвающих напряжений. Если в кристалле имеется другая система скольжения, то движение осуществляется по ней до тех пор, пока скольжение и вращение в обеих системах не станут равными и противоположными по знаку.

К факторам, благоприятствующим трансляционному скольжению кроме перечисленных при описании пластической деформации (T , ϵ , $\sigma_1 - \sigma_3$) относятся структура решетки и характер связей в ней, а также угол приложения стресса к системе скольжения.

Влияние решетки определяется наличием и количеством активных систем скольжения; чем их больше, тем более мобильной является решетка. Влияние сил связи определяется увеличением их прочности на сдвиг в ряду молекулярные — металлические — ионные — ковалентные, установленному М. И. Синнотом [41]. Это объясняет высокую пластичность металлов и карбонатов — веществ, обладающих большим числом систем скольжения и низкой прочностью сил связи в решетке.

Экспериментальные модели трансляционного скольжения

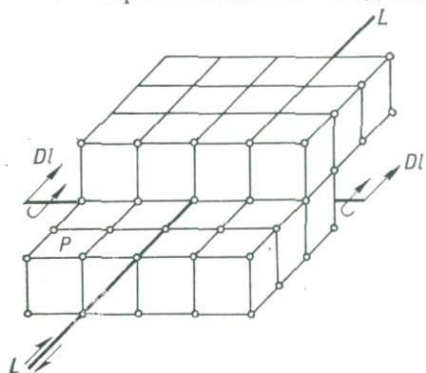


Рис. 104. Система скольжения в кристалле.

P — плоскость скольжения; L — линия скольжения; DI — дислокационная линия.



Рис. 103. Кривая стресс—деформация с пределом текучести.

в металлах и карбонатах разработаны достаточно хорошо в широком диапазоне p - T -условий при различных соотношениях осей стресс-поля. В силикатах же, имеющих ограниченное число систем скольжения (нередко одной) и преобладающую ковалентную связь в кристаллических решетках, трансляционное скольжение осуществляется с трудом и смоделировано в экспериментах при высоких, нередко экстремальных, выходя-

Таблица 14

Системы скольжения в кристаллах минералов при различных p - T -условиях по данным разных авторов

Минерал	T, °C	p, кбар	Система скольжения		Литературный источник
			Плоскость	Линия	
Оливин	> 1200—	5—20	010	[100]	[50]
	1300				
	800—	5—20	0k1	[100]	
	1200				
	300—	5—20	{110}	[001]	
Энстатит	950				[64]
	< 350	5—15	100	[001]	
Диопсид	700—	5—7	100	[001]	[65]
	850				
Роговая обманка	500	5	100	[001]	[63]
	20	50	100	[001]	
Слюды	800	10	100	[001]	[48]
	500	5	001	[100]	
Плагиоклазы	500		001	[100], [110]	[55]
	25—	5—10	010	Иррациональное направление, ассоциирующее с двойниками альбитовыми	
Кварц	800				
	600—	8—20	0001	[1120] — базальное скольжение	
	650		1010	[0001] — призматическое скольжение	
	600—	5—15	1010	[1210] — призматическое скольжение	
850					

щих далеко за рамки условий регионального метаморфизма p - T -условиях (см. кварц, роговую обманку в табл. 14).

Несколько подробнее остановимся на ориентировке оси стресса относительно системы скольжения в кристалле как фактора, обеспечивающего трансляционное скольжение, поскольку именно это представление положено в основу динамического анализа ориентировок минералов, т. е. реконструкции синхронного с деформацией стресс-поля по наблюдаемым ориентировкам минералов.

Трансляционное скольжение может начаться лишь в том случае, когда кристалл находится в состоянии статического равновесия, т. е. в равновесии сил и моментов. Когда такое равновесие достигнуто, дальнейшее возрастание внешней силы и соответственно напряжений приводит к тому, что в кристалле

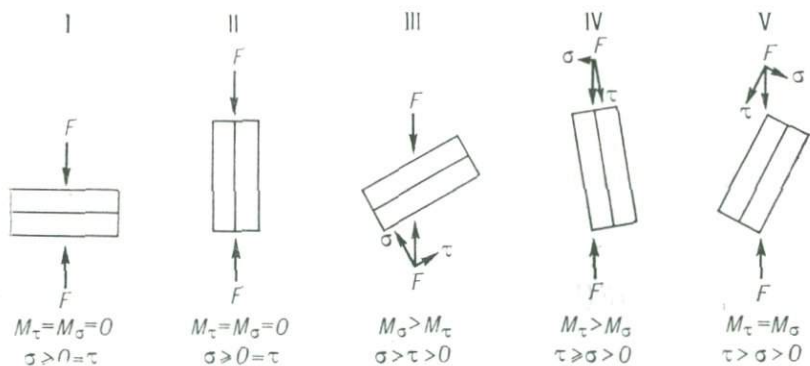


Рис. 105. Разные положения плоскости скольжения относительно силы F .

начинается скольжение. Другим фактором является общая напряженность кристалла, обусловленная нормальным напряжением.

Вопрос о том, как должна быть ориентирована система скольжения относительно действующей силы, чтобы скальвающее напряжение было максимальным, может быть сформулирован иначе, а именно: какое положение решетки является динамически наименее устойчивым.

Рассмотрим простой пример. Имеются две пластины с какой-то силой связи между ними, которые занимают пять позиций относительно опоры и вектора силы тягести (рис. 105). Положения *I* и *II* отвечают стабильному равновесию, так как моменты M_τ и M_σ и скальвающее напряжение τ равны нулю, а нормальное напряжение и потенциальная энергия системы минимальны (*I*) или максимальны (*II*). Положения *III* и *IV* неравновесны, так как существует неравенство моментов, которое при достаточно большой силе связи между пластинами обеспечит вращение системы до положения, соответствующего равновесию. И наконец, в положении *V* система находится в квазиравновесном состоянии, когда наблюдается равенство моментов, высокое скальвающее напряжение и максимальная потенциальная энергия. Именно при таком положении системы возможно возрастание скальвающей компоненты до критической за счет возрастания напряжения F . Как следует из рисунка, сила должна быть приложена в направлении макси-

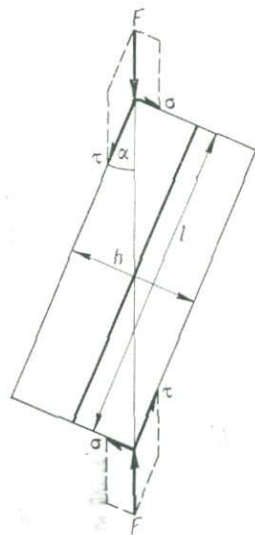


Рис. 106. Разложение напряжения F , приложенного к двумерной решетке, на скальвающую и нормальную компоненты.

мальной анизотричности системы, т. е. к диагонали. Рассмотрим несколько подробнее этот случай (рис. 106).

Напряжение F раскладывается на τ и σ . Угол α задается отношением длинной l и короткой h сторон:

$$\operatorname{tg} \alpha = h/l, \quad (6)$$

половины которых являются плечами моментов

$$M_{l\sigma} = \sigma l/2; \quad M_{h\tau} = \tau h/2. \quad (7)$$

Так как $\sigma = F \sin \alpha$, а $\tau = F \cos \alpha$, то запишем выражения (7) как $M_{l\sigma} = F(l/2) \sin \alpha$, а $M_{h\tau} = F(h/2) \cos \alpha$. Приравняв правые части этих равенств и сократив, получим $h \cos \alpha = l \sin \alpha$, т. е. $h/l = \sin \alpha / \cos \alpha = \operatorname{tg} \alpha$. Таким образом, равенство моментов доказано.

Если сила приложена под углом меньшим или большим, чем угол α , то $M_{h\tau} \neq M_{l\sigma}$, и вся система испытывает вращение без скольжения по l .

Так как $\tau = F \cos \alpha$, то при $\alpha \rightarrow 0$, $\cos \rightarrow 1$, а $\tau \rightarrow F$. Но $\operatorname{tg} \alpha = h/l$, т. е. при $\alpha \rightarrow 0$ $\operatorname{tg} \alpha \rightarrow 0$, $h/l \rightarrow \frac{1}{\infty}$. Таким образом, $\tau \rightarrow F$ при $h/l \rightarrow \infty$. Значит, чем более анизотрична такая система, тем меньше угол скалывания. Легко показать, что при $h=l$ угол $\alpha = 45^\circ$, т. е. соблюдается условие деформации изотропного материала.

В трехмерной кристаллической решетке с ортогональными осями и с одной системой скольжения условие равенства моментов нулю возможно в трех ее положениях относительно вектора напряжения F (рис. 107, а). Из этих трех положений наиболее благоприятно для скольжения такое, когда вектор F совпадает с диагональю грани hk (рис. 107, б). Если же в плоскости скольжения есть вторая линия скольжения L' , то скольжение легче осуществляется, когда F совпадает с диагональю грани hl (рис. 107, в).

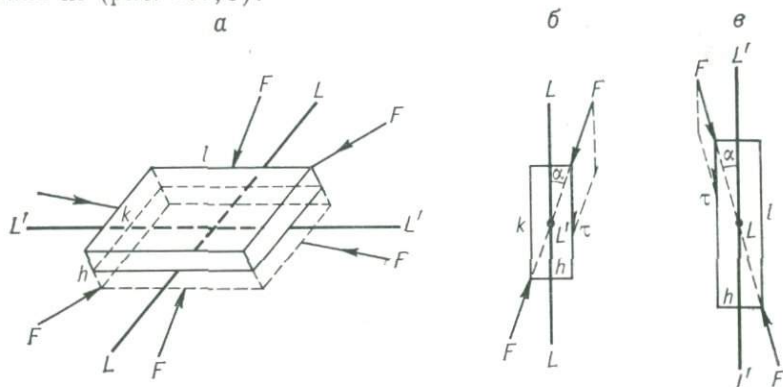


Рис.107. Способы приложения напряжения F к ортогональной решетке при условии, что моменты равны нулю.

В триклинных и моноклинных минералах (роговая обманка, клинопироксен, эпидот, кианит, слюды и др.) наблюдается полярность линии скольжения, когда скольжение в противоположных направлениях осуществляется под действием резко различных усилий. На рис. 108 изображено сечение такой решетки. Рассмотрим вращательные моменты, возникающие под действием напряжения, приложенного к короткой и длинной диагоналям решетки. Моменты соответственно равны $M_2 = Fh \cos \beta$ и $M_1 = Fh \cos \alpha$. Поскольку $\alpha < \beta$ и $\cos \alpha > \cos \beta$, то $M_2 < M_1$. Напряжение в обоих случаях приложено к одной и той же площадке, поэтому M_1 обеспечивает более высокие сколовые напряжения, чем M_2 .

Легко показать, что при наличии, например, трех систем скольжения в решетке, максимальная мобильность, т. е. одновременное скольжение по всем трем системам будет достигнута, когда напряжение приложено к самой длинной диагонали решетки. Описанные условия отвечают условиям максимальных скальвающих напряжений в кристаллах, т. е. их максимальной кинематической активности и максимальной динамической неравновесности. Наблюдаемые же ориентировки минералов отражают состояние динамического равновесия со стресс-полем, поэтому способы динамической интерпретации ориентировок, т. е. их динамический анализ, будет изложен ниже (§ 50), при описании синдеформационной кристаллизации.

Механическое двойникование как вид неактивируемой тепловой энергией деформации кристаллов обусловлен смещением слоев решетки в результате скольжения на какую-то долю межатомного расстояния. В деформированной пластине атомы занимают симметричное относительно атомов в решетке кристаллохозяина положение (рис. 109). Плоскость скольжения в этом случае называется *двойниковой плоскостью*, а направление смещения в ней — *двойниковым направлением*. Перпендикулярно к последнему в двойниковой плоскости располагается ось вращения.

Двойникование часто наблюдается в карбонатах, диопсиде, полевых шпатах, грюнерите и других минералах.

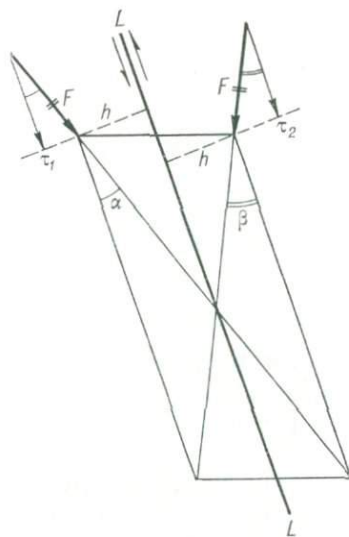


Рис. 108. Скальвающие компоненты в зависимости от точек приложения напряжения F в двумерной неортогональной решетке.

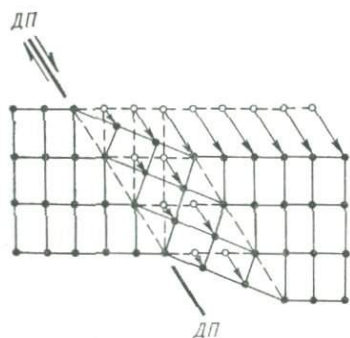


Рис. 109. Механическое двойникование.

ДП — двойниковая плоскость.

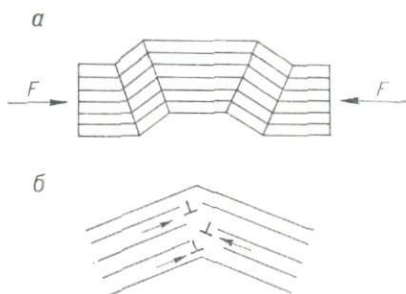


Рис. 110. Пластичный излом (а) и направление движения дислокаций (б).

Пластичный излом обычно обнаруживается в кристаллах с единственной системой скольжения, когда геометрически скольжение невозможно, так как напряжение действует перпендикулярно к линии скольжения (рис. 110, а). Оси внутреннего вращения лежат в плоскости, называемой границей излома слоя. Ее появление обусловлено возрастанием напряженности в решетке, связанным со встречным перемещением дислокаций (рис. 110, б). Стадией деформации, предшествующей пластичному излому, является изгиб. Изгиб и пластичный излом часто проявлены в слюдах, хлоритах, моноклинных амфиболах и пироксенах.

Пластичный излом и изгиб кристаллов имеют очень важное значение при анализе деформаций, так как они выражают ее визуально в отличие от всех других механизмов; они позволяют непосредственно определять кинематические оси, например ось внутреннего вращения кристалла.

В метаморфических породах глубоких слоев литосферы и в породах мантии деформационные процессы и явления протекают в условиях повышенных температур и давлений.

§ 49. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ. ПЛАСТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ. ТИПЫ КРИПА

Повышенные температуры резко снижает предел упругости и соответственно порог текучести. Пластическая деформация, протекающая без разрыва и не имеющая ограничений, носит название пластического течения — крип (рис. 111). Если напряжение приложено в течение длительного времени, то деформация растет с временем при постоянном напряжении. Если же деформация протекает при постоянной скорости, то напряжение обычно изменяется со временем. Следует отметить, что крип может протекать и при низких температурах, но в породах, сло-

женных минералами с большим количеством плоскостей скольжения, например карбонатами.

Для силикатов, обладающих ограниченным числом плоскостей скольжения, характерны механизмы деформации, активируемые тепловой энергией. Активация решетки тепловой энергией способствует как деформации скольжения вдоль плоскостей трансляции, так и протека-

нию процессов деформации на атомном уровне. К ним относятся различные диффузионные механизмы, которые начинают активно проявляться выше температуры, равной половине абсолютной температуры плавления вещества. В зависимости от температуры, напряжения и скорости деформации преобладают механизмы определенного типа. Ниже они рассмотрены на примере карты установившейся деформации, составленной Р. Л. Стокером и М. Ф. Эшби [70] для поликристаллического агрегата оливина (рис. 112). Эта карта представляет собой график, построенный в координатах напряжение — температура, на котором приведено семейство кривых, отвечающих разным скоростям деформации ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} \div 10^{-20} \text{ с}^{-1}$), и выделены поля, где проявляются разные механизмы пластической деформации.

Скольжение дислокаций как механизм пластической деформации действует при малых и умеренных температурах, больших скоростях деформации и больших напряжениях. Такой механизм обусловлен движением дислокаций в плоскости скольжения и в целом аналогичен трансляционному скольжению. При этом механизме происходит вращение границ зерен.

Крип дислокаций (крип Виртмана) протекает при более низких напряжениях, охватывает большой диапазон скоростей деформации и отличается от предыдущего тем, что вакансии движется в направлении, перпендикулярном к плоскости скольжения. В крипе дислокаций важную роль начинают играть диффузионные процессы, поскольку укорочение или удлинение дислоцированных рядов атомов происходит за счет заполнения вакансий на их концах (рис. 113).

Эти два механизма, связанные с миграцией дислокаций через решетку, лежат в области высоких напряжений и низких и умеренных температур на карте деформации. Более высокие температуры стимулируют протекание в решетках диффузионных процессов, связанных с движением вакансий.

Крип Набарро—Херринга действует при максимальных температурах, средних скоростях и низких напряжениях. Он связан с диффузией вакансий и атомов через внутренние части кристалла. Вакансии движутся в направлении тех границ кристалла, по отношению к которым нормальные напряжения мак-

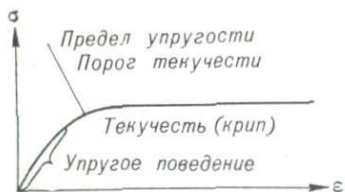


Рис. 111. График стресс—деформация при пластическом течении.

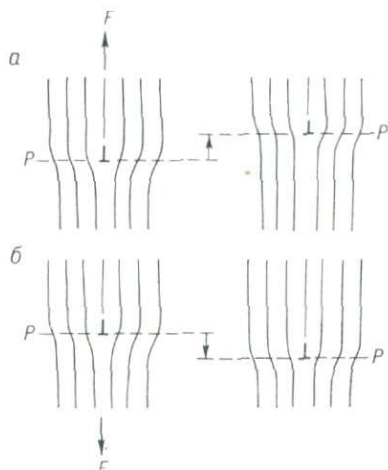


Рис. 112. Карта установившейся деформации агрегата оливина [70].

Н—Х — крип Набарро—Херринга.

Рис. 113. Переползание дислокаций с исчезновением дислоцированного ряда (а) и с его ростом (б).

Р — плоскость скольжения.



симальны. В противоположном направлении движутся атомы (рис. 114). В результате такой встречной диффузии кристалл вытягивается параллельно минимальному и укорачивается в направлении максимального нормального напряжения. При крипе Набарро—Херринга вакансия и атом в процессе их транспортировки в равновесное положение прodelывает очень длинный путь, занимая последовательные позиции внутри кристалла, что требует высокой энергетической обеспеченности процесса. Именно это и объясняет тот факт, что данный механизм протекает при максимально высоких температурах, в чем и состоит принципиальное отличие его от следующего.

Крип Кобла обусловлен встречной миграцией атомов и вакансий, но происходящей по поверхности границы зерна (рис. 115). Процесс протекает при средних и умеренно высоких температурах и при самых низких скоростях, что выводит его за рамки экспериментального моделирования. Однако именно это свидетельствует о том, что такой механизм наиболее вероятен при формировании ориентировок минералов в горных породах в реальной геологической обстановке. Этот механизм весьма схож с принципом Рикке, который объясняет образование ориентировки градиентом концентраций, связанным с растворением вещества на гранях с высокими нормальными напряжениями и его переносом и отложением на гранях, испытывающих низкие нормальные напряжения.

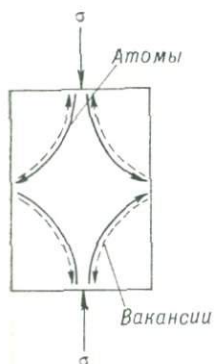


Рис. 114. Крип Набарро—Херринга.

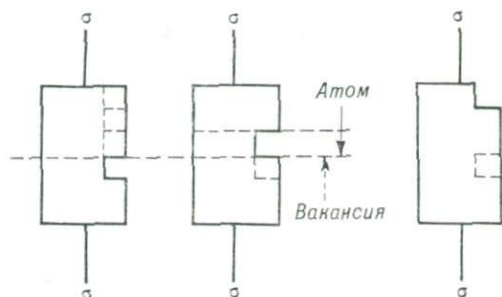


Рис. 115. Крип Кобла.

К другим диффузионным механизмам ориентировки, не нашедшим отражения на карте деформации агрегата оливина Р. Л. Стокера и М. Ф. Эшби [70], относится диффузия, или миграция границ зерен. При этом механизме происходит диффузия атомов через границу между двумя разноориентированными зернами, практически представляющую двумерный дефект решеток обоих зерен. Атомы с поверхности напряженного зерна переходят на поверхность ненапряженного (рис. 116). Процесс завершается тем, что напряженный кристалл исчезает и возникает больший по размеру ненапряженный. Энергетически такой процесс обеспечивается поверхностной энергией напряженного кристалла. В этом случае, если энергетические ресурсы напряженного кристалла исчерпываются за счет того, что его поверхность и соответственно поверхностная энергия достигают минимума, процесс может прекратиться. При этом границы зерен будут прямыми, сходящимися в тройных точках (рис. 117), что характерно обычно для мономинеральных пород, например кварцитов. Это же наблюдается в полиминеральных породах гранулитовой фации метаморфизма.

Описанные механизмы пластической деформации, контролирующей ориентировки минералов, обусловлены динамической

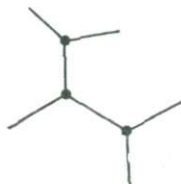
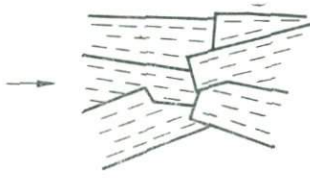
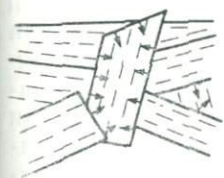


Рис. 116. Диффузия границ зерен.

Рис. 117. Тройные точки в мономинеральных породах.

неравновесностью кристаллической решетки в анизотропном поле напряжений.

С развитием экспериментальной физики высоких давлений удалось смоделировать пластическое течение в некоторых силикатах — оливине, плагиоклазе, пироксенах, кварце. Однако условия этих экспериментов настолько экстремальны, что они несопоставимы с условиями метаморфизма самых высоких степеней. Один из наиболее распространенных минералов метаморфических пород, в которых он часто ориентирован даже в условиях зеленосланцевой фации, — роговая обманка (актинолит) является одним из наиболее жестких минералов [63].

Силикаты в тектонитах обладают жесткой ориентировкой, и их зерна даже при интенсивной деформации, документируемой изоклинальной складчатостью, лишены признаков напряженного состояния, не деформированы, в них отсутствуют двойники, волнистое угасание, линии скольжения и т. д. Когда же эти признаки проявлены, то это обычно связано с наложенным катакластическим метаморфизмом [41]. Кроме того, в тектонитах, несущих в себе признаки двух и более генераций структурных элементов, почти постоянно отмечается отсутствие признаков механической деформации более ранних минералов (деформация узоров кристаллографических осей и направлений, их поясовое и малокруговое рассеивание и т. д.). Один узор оказывается как бы «напечатанным» на другой в новой ориентировке.

Нередки случаи, когда в явно слоистых породах при метаморфизме и деформации в макроскопически меланократовых слоях, обогащенных биотитом, под микроскопом обнаруживается, что пластинки биотита ориентированы поперек слоистости. Никакими трансляционными, а тем более седиментогенными процессами это явление объяснить нельзя.

§ 50. СИНДЕФОРМАЦИОННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Отсутствие признаков напряженного состояния в кристаллах силикатов при высокой степени их ориентировки и признаков деформаций узоров более ранних строений побудили многих исследователей привлечь для объяснения ориентировки механизм синдеформационной, или синтетонической кристаллизации, контролируемой термодинамическим равновесием решетки в стресс-поле [10, 22, 47]. Действие этого механизма объясняется следующим образом: «Если направленное давление обуславливает упругую деформацию породы во время перекристаллизации (независимо от того, имеет место необратимая деформация или нет), то возникает предпочтительная ориентировка кристаллической решетки, определяющаяся термодинамическим контролем образования центров кристаллизации и последующего роста» [41].

Таблица 15

Эксперименты по синдеформационной кристаллизации минералов при различных значениях и скоростях деформации и переменных p — T -условиях

Минерал	$T, ^\circ\text{C}$	p , кбар	$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	ϵ , %	Направление, параллельное σ_1	Направление, параллельное $\sigma_2 = \sigma_3$	Интер-турный источник
Оливин	1000	13,4	$7,8 \times 10^{-7}$	—	[010]	[100], [001]	[47]
Энстатит	1000	15,0	$7,8 \times 10^{-7}$	—	[010]	[100], [001]	[47]
Диопсид	1000	15,0	$7,8 \times 10^{-7}$	—	[010]	[001], ⊥ (100)	[51]
Флогопит	500— 600	3,0	10^{-4}	20	⊥ 001	001	[62]
Мусковит	700	15,0	—	—			
Флогопит	1300	13,0	10^{-5}	45	⊥ 001	001	[93]
Биотит	850	14,0	10^{-6}	—			
Кварц	800	15,0	10^{-6}	29	Коническая траектория [0001] с центром σ_1 и углом 45°		[56]
	850	16,0	10^{-6}	28	[0001] по пересекающимся под 90° большим кругам, σ_1 — диагональ [0001]		
	1100	15,0	10^{-6}	16			
Эксперимент на растяжение $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$							
	950	15,0	10^{-6}	10	[0001] — пояс, параллельный $\sigma_1 = \sigma_2$		

К настоящему времени предложен ряд теорий термодинамической устойчивости кристаллической решетки в стресс-поле, в каждой из которых используются те или иные анизотропные упругие характеристики кристаллов. Так, в теории Мак-Дональда [61] это линейная сжимаемость в условиях необратимого пластического течения вещества, в теории Камба [57] — линейная упругость в условиях упругой деформации. В теории Кумазавы «...устойчивые ориентировки контролируются линейной сжимаемостью и/или коэффициентами линейного термического расширения минералов» [58].

Корректная теория ориентировки кристаллической решетки в стресс-поле для общего случая (триклинная решетка или

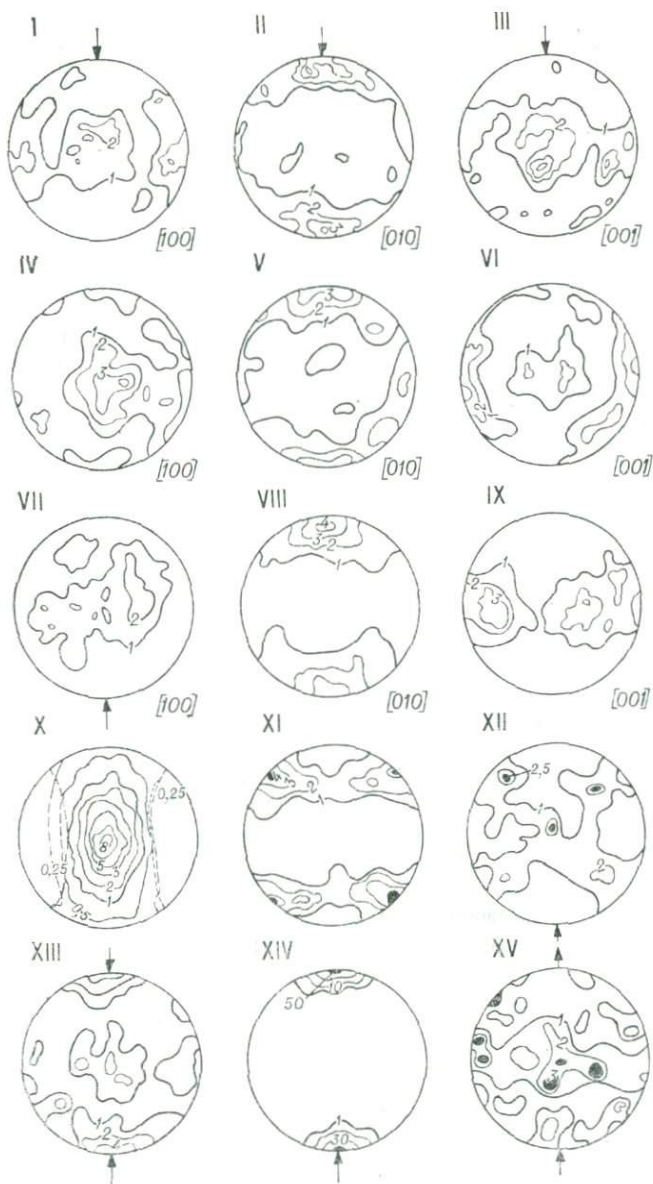


Рис. 118. Микроструктурные диаграммы экспериментально деформированных оливина (I—III) и энстатита (IV—VI) [47], диопсида (VII—IX) [51], флогопита (X) [62], кварца (XI—XV) [56].

Условия экспериментов см. в табл. 15. На диаграммах I—IX, XI—XIV ось сжатия σ_2 ориентирована север—юг, на диаграмме X находится в центре, на диаграмме XV ось растяжения σ_2 ориентирована север—юг (эксперимент на растяжение).

триклинная симметрия строения породы) может быть построена лишь с использованием тензорного анализа. Тогда полное описание упругих свойств породы, необходимое для создания такой теоретической модели, потребует определения 21 упругой постоянной, что, естественно, представляет практически неразрешимую задачу. В связи с этим решающее значение для генетической интерпретации микроструктурных диаграмм приобретают результаты экспериментального моделирования ориентировок минералов в стресс-поле.

В табл. 15 представлены условия и результаты таких экспериментов, а на рис. 118 — микроструктурные диаграммы образцов — продуктов экспериментов. Особого внимания заслуживают эксперименты В. Д. Минса и М. С. Патерсона [62], в которых флогопит кристаллизовался из смеси окислов в пропорциях, отвечающих его стехиометрической формуле. Исследователи показали, что ориентировка зарождающихся центров кристаллизации контролируется направленным давлением. В этих экспериментах однозначно устанавливаются геометрические соотношения между главными осями стресс-поля и ортогональными осями внутренней системы координат кристаллов, что позволяет решать два главных вопроса, стоящих перед микроструктурным анализом: 1) реконструкция ориентировки главных осей нормальных напряжений динамического поля, имевшего место во время минералообразования, т. е. динамический анализ ориентировок; 2) выделение минеральных ассоциаций, динамических равновесных с единым стресс-полем, т. е. выделение минеральных парагенезисов, а в рамках одного минерала — генераций, используя структурные элементы и синхронные с ними стресс-поля в качестве возрастных реперов.

Глава XII

ДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫЕ ОРИЕНТИРОВКИ МИНЕРАЛОВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ТЕКТОНИТОВ

В полиминеральных породах минералы, обладая разными физико-механическими свойствами, приобретают ориентировки, отражающие изменение негидростатического поля напряжений и факторов метаморфизма: температуры, гидростатического давления и соотношения этих параметров. Вследствие этого в один и тот же интервал времени, т. е. при одних и тех же температуре, гидростатическом давлении и стресс-поле, одни минералы испытывают синдеформационную кристаллизацию и приобретают термодинамически устойчивую ориентировку, другие деформируются с помощью пластического течения,

трансляционного скольжения или двойникования, а третьи не деформируются вообще или подвергаются катаклазу. По этим признакам устанавливается последовательность минералообразования. Динамическая равновесность ориентировки минерала с анизотропным полем напряжений и является критерием синхронности синдеформационного минералообразования и стресс-поля. Минералы, динамически равновесные с одним стресс-полем, должны находиться в динамическом равновесии между собой.

§ 51. СТРУКТУРНО-ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Основным вопросом, от которого зависит разработка принципов динамического равновесия, является вопрос о структурно-эквивалентных направлениях кристаллов минералов, решение которого частично достигается изучением полных ориентировок нескольких минералов в одном образце с последующей их корреляцией между собой и с наблюдаемыми линейно-плоскостными элементами макростроения пород. Однако такой эмпирический подход допускает неоднозначность трактовки ориентировок сосуществующих минералов, поскольку чисто геометрическая параллельность кристаллографических осей и направлений может не означать полной динамической равновесности ассоциирующихся минералов. Это связано с тем, что в зависимости от параметров среды при пластическом течении кинематически активными являются разные системы скольжения (см. оливин, табл. 14). Такая же зависимость устанавливается и для синтетической кристаллизации кварца (см. рис. 118, XI—XV). Кроме того, линейность в зависимости от типа деформации может занимать двойное относительно структурной системы координат положение (А- и В-типы линейности).

Необходимым условием динамического равновесия является параллельность таких направлений в решетках минералов, ориентировка которых контролируется анизотропным полем напряжений. При деформации, контролирующей термодинамически равновесные ориентировки, структурно-эквивалентными направлениями являются главные оси анизотропных физических характеристик кристаллов, связанных с их упругими свойствами. В высокотемпературной области, выходящей за пределы условий регионального метаморфизма, к ним относится линейное термическое расширение [58].

В табл. 15 приведены структурно-эквивалентные направления кристаллов ряда минералов. Для того чтобы распространить результаты этих экспериментов на другие минералы, например роговые обманки, полевые шпаты, необходимо знать, какие из упругих характеристик кристаллов однозначно связаны с осями стресс-поля.

§ 52. СКОРОСТЬ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ МИНЕРАЛОВ

Среди физических характеристик, связанных с упругими свойствами кристаллов, в настоящее время в структурной петрологии, и в частности в том разделе, который посвящен изучению микроструктур пород, наиболее изученной и широко используемой характеристикой является скорость продольной волны, которая отражает упругость твердого тела — кристалла, породы и т. д. Определение скорости продольной волны в различных направлениях кристаллов и горных пород — процедура сравнительно простая, и в настоящее время оно сделано для многих минералов и пород, причем в широком диапазоне p - T -условий.

В табл. 16 представлены значения скорости продольной волны, измеренные в трех ортогональных направлениях кристаллов ряда ромбических, моноклинных и триклинных силикатов [2]. Сравнивая эти значения с результатами экспериментального моделирования ориентировок, возникших при синдеформационной кристаллизации (оливина, пироксенов и слюды), представленными в табл. 15, легко убедиться, что с максимальной осью стресса (σ_1) совпадают оси кристаллов, вдоль которых скорость продольной волны минимальна. Таким образом, значения нормальных напряжений главных осей стресс-поля являются обратными по отношению к значениям скоростей продольных волн в кристаллах.

Таблица 16

Скорость продольной волны в монокристаллах минералов [2]

Минерал	Скорость волны, км/с		
	максимальная	минимальная	средняя
Оливин	[100] — 9,83	[010] — 7,66	[001] — 8,25
Энстатит	[100] — 8,21	[010] — 6,80	[001] — 7,84
Диопсид	[001] — 9,13	[010] — 7,35	$\perp 100$ — 8,00
Авгит	[001] — 8,36	[010] — 7,20	$\perp 100$ — 7,30
Роговая обманка	[001] — 7,85	$\perp 100$ — 6,11	[010] — 7,16
Эпидот	[010] — 8,36	[001] — 7,75	$\perp 100$ — 7,89
Биотит	001 — 7,80	$\perp 001$ — 4,20	—
Мусковит	001 — 8,00	$\perp 001$ — 4,40	—
Хлорит	001 — 8,30	$\perp 001$ — 5,90	—
Плагноклаз № 29	$\perp 010$ — 7,55	$\frac{[010]}{RS}$ — 5,70	$\perp RS$ — 7,16
Микроклин	$\perp 010$ — 7,81	$\frac{[010]}{RS}$ — 5,06	$\perp RS$ — 6,86
Кванит	[001] — 9,88	$\sim \perp 100$ — 9,05	$\frac{\perp [001]}{100}$ — 9,42

В табл. 16 приведены структурно-эквивалентные направления кристаллов и ориентировок минералов при условиях, когда ориентировка динамически равновесна с анизотропным полем напряжений; и все кристаллы ориентированы одинаково, т. е. строение является супериндивидным или квазикристалльным.

Поскольку элементы макростроения анизотропных пород связаны с ориентировкой минералов, то полюс сланцеватости является осью максимальных нормальных напряжений (т. е. осью сжатия материала), а линейность — осью минимальных напряжений (т. е. осью растяжения материала).

Микроструктурный анализ позволяет синхронизировать метаморфогенное минералообразование с этапами, стадиями и другими временными интервалами, запечатленными в горной породе в виде последовательных генераций структур и структурных элементов, устанавливаемых непосредственно при полевых исследованиях в обнажениях.

Нарушение представленных в табл. 16 соотношений между ориентировками разных минералов, с одной стороны, и между взаимной ориентировкой минералов и плоскостных и линейных макроструктурных элементов, с другой — свидетельствует о следующих возможных их временных соотношениях:

а) асинхронности ориентировок, возникающих под влиянием одновременных и разноориентированных полей напряжений (различие в ориентировке структурно-эквивалентных направлений). Обычны две генерации плоскостных макроэлементов и более;

б) асинхронности ориентировок, отражающих разные стадии деформации. Эти стадии характеризуются разными соотношениями главных осей нормальных напряжений стресс-поля, контролирующего ориентировки. При этом пространственное положение этих осей остается стабильным. Максимальная ось нормальных напряжений (ось сжатия материала) обычно ориентирована жестко, а линейность (нередко по одному минералу, например амфиболу) имеет две, чаще взаимно ортогональные ориентировки. Обычны две системы поперечных складок;

в) синхронности ориентировок, но разных механизмах, контролирующих эти ориентировки. В этом случае пространственно совпадают противоположные по упругим свойствам оси кристаллов разных минералов (например, $[001]$ роговой обманки и $\frac{\perp [010]}{RS}$ плагиоклаза). Такое явление обычно наблюдается в породах, сложенных минералами с резко различающимися физико-механическими свойствами и, как следствие, контролирующими их ориентировки механизмами. Так, в основных кристаллических сланцах гранулитовой фации метаморфизма характерна ассоциация ромбический и моноклинный пироксены + + роговая обманка + плагиоклаз. В условиях наложенных деформаций ортопироксен может ориентироваться с помощью од-

ного из механизмов пластического течения, клинопироксен и роговая обманка — способом синдеформационной кристаллизации, а плагиоклаз — способом двойникования по одной или двум системам двойников. Синхронное проявление разных механизмов ориентировки для разных минералов требует особо тщательного анализа микроструктур таких пород.

Приведенные в табл. 15 сведения относятся к экспериментам по осевому сжатию пород, когда $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (исключение составляет последний эксперимент по осевому растяжению агрегата кварца). Такие условия теоретически исключают появление предпочтительной ориентировки осей кристаллов с максимальным значением скорости продольной волны в плоскости растяжения, т. е. нормальной к σ_1 . Немногочисленные эксперименты по трехосной деформации проведены к настоящему времени с карбонатами. Эксперименты же по трехосной деформации силикатов не проводились.

Между тем весь опыт исследования сложнодислоцированных метаморфических комплексов свидетельствует о том, что именно трехосная деформация, протекающая в трехосном стресс-поле, является главным, если не доминирующим типом деформации кристаллических пород в условиях их высокой пластичности. Ниже рассмотрены типы ориентировок главных пороодообразующих силикатов в природных условиях.

§ 53. ТИПЫ ОРИЕНТИРОВОК ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ТЕКТОНИТОВ

К настоящему времени накоплены обширные данные по микроструктурному анализу пород из разновозрастных, нередко претерпевших длительную структурно-метаморфическую эволюцию комплексов в различных регионах земного шара. Анализ этих данных позволил провести типизацию узоров микростроений для главных пороодообразующих минералов. При этом оказалось, что все природные ориентировки по характеру узоров разбиваются на три главных типа, отвечающих трем типам индикатрис стресс-поля и трем типам макроструктур, проявленных в образцах.

Типами индикатрис и макроструктур являются: 1) трехосный эллипсоид ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) — проявлены линейные и плоскостные элементы; 2) вытянутый сфероид ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) — проявлены линейные, отсутствуют плоскостные элементы; 3) сплюснутый сфероид ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) — отсутствуют линейные, проявлены плоскостные элементы.

Наиболее изученным в микроструктурном отношении силикатом является роговая обманка, для которой в природных объектах установлены пять типов ориентировки (рис. 119).

Квазикристалльная ориентировка (рис. 119, I) характеризуется максимумами концентрации всех трех осей в ортогональной по-

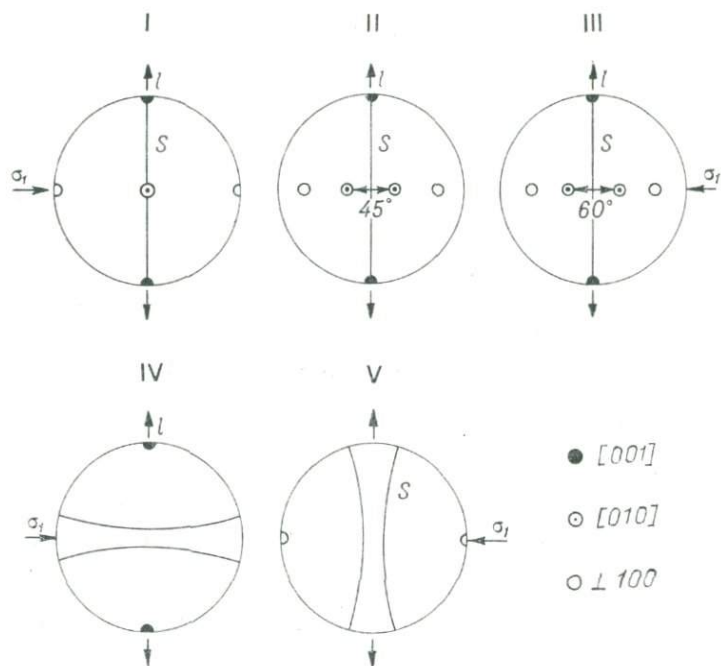


Рис. 119. Пять типов ориентировок роговой обманки.

зиции, при этом $\perp 100 \parallel c_c$, $[001] \parallel b_c \parallel l$, а $[010] \parallel a_c$. Для пород с таким узором роговой обманки характерно развитие сланцеватости и линейности. Такой узор типичен для роговой обманки.

Квазидвойниковые ориентировки возникают, когда имеется единый максимум концентрации $[001] \parallel b_c \parallel l$, а $\perp 100$ и $[010]$ концентрируется в двух максимумах, симметричных относительно осей c_c и a_c соответственно. Углы между осью b_c и максимумами $\perp 100$ равны 22° (рис. 119, II) и 30° (рис. 119, III). В последнем случае со сланцеватостью совпадают обе грани призмы 110 роговой обманки. Такой узор встречается в высокометаморфизованных основных породах, нередко в ассоциации с пироксенами [22]. Этот тип очень распространен.

Первый тип квазидвойниковой ориентировки роговой обманки связан со сколовыми напряжениями. Он был обнаружен в ассоциации с двумя системами одновозрастных сколовых метаморфических прожилков без развития сланцеватости [21] и в тектонитовых строениях ультрабластомилонитов из зоны сочленения карелид и беломорид в восточной части Балтийского щита.

Для квазикристалльных ориентировок характерна хорошо выраженная линейность и слабо выраженная сланцеватость. В це-

лом и квазикристалльные и квазидвойниковые ориентировки отвечают условиям трехосной деформации в условиях трехосного стресс-поля.

Два следующих типа связаны с условиями простого (одноосного) сжатия и растяжения. Компактный максимум $[001] \parallel b_c \parallel l$ и поясовое рассеивание двух других осей в плоскости $b_c c_c$ (рис. 119, IV) характеризуют осевое растяжение, обычно реализующееся в замках складок. Сланцеватость отсутствует, и тектонитовое строение характеризуется резкой линейностью («карандашные» структуры, интенсивная плейчатость с невыдержанным падением осевых поверхностей и т. д.). Этот тип довольно часто встречается.

Наконец, компактный максимум $\perp 100 \parallel c_c$ и поясовое рассеивание $[001]$ и $[010]$ (рис. 119, V) отвечают условиям осевого сжатия, когда происходит интенсивное растяжение материала в плоскости сланцеватости, которая выражена очень ярко, в то время как макроскопическая линейность отсутствует. Этот тип достаточно редок. Подобный узор возникает на поздней или даже посттектонической стадии структурной эволюции породы, когда происходит кристаллизация амфибола за счет циркуляции растворов по сформированным плоскостям в условиях спада давления. При таком механизме кристаллизации обычно образуются низкотемпературные актинолиты, обладающие очень своеобразным габитусом кристаллов. Они сильно вытянутые, до игольчатых, с хорошо развитыми гранями 100 и «угнетенными» гранями призмы, отчего имеют резко уплощенную форму.

Разные типы узоров ряда минералов, возникающие в зависимости от разной динамической обстановки приведены на рис. 120. Отчетливо видно, что по характеру узора легко восстанавливаются характер синкристаллизационного поля напряжений, а также динамически равновесные ориентировки.

Квазикристалльные ориентировки характерны для всех без исключения минералов. Квазидвойниковые ориентировки обнаружены у силикатов низкой симметрии (триклинной и моноклинной) и отсутствуют у минералов ромбической сингонии. Ориентировки, отвечающие осевому растяжению и осевому сжатию (описываемые предельной группой симметрии — I_∞), типичны для всех минералов, и отсутствие их у кианита обусловлено очень слабой изученностью его ориентировок.

В силу резкой анизотропности слюд именно ориентировки, отвечающие осевому сжатию, у них доминируют. Поскольку в рис. 120 вошли ориентировки из литературных источников, два типа ориентировок биотита, установленные автором в породах гранулитового комплекса, но еще неопубликованные, даны на рис. 120 штриховой линией. Узоры характеризуются: а) поясовым рассеиванием $\perp 001$; б) рассеиванием $\perp 001$ по дуге малого круга с радиусом около 75° . Полоск поясу в пер-

Минералы	Неазикристалльный	Пределный		Неазидвойниковый	
		$l_{\infty} \parallel b_c$	$l_{\infty} \parallel c_c$		
Оливин					
Ортопироксен					
Клинопироксен					
Роговая обманка					
Эпидот					
Слюда, хлориты					
Плагиоклаз					
Киванит					

Рис. 120. Типы ориентировок некоторых силикатов.

вом случае и центр малокруговой траектории во втором совпадают с макроскопической линейностью, при этом сланцеватость практически не выражена.

Малокруговая траектория рассеивания $\perp 001$ объясняется тем, что в породе отмечаются эллипсоидальные лейкократовые кварц-плагиоклазовые агрегаты, которые как бы обволакиваются пластинками биотита. При этом узор биотита оказывается

синхронным с перекристаллизацией в условиях негидростатического стресс-поля, обусловившего формирование агрегатной (кварц + плагиоклаз) линейности, параллельной оси растяжения материала.

Следует отметить, что для водных силикатов (слюд, хлоритов, амфиболов) ориентировка может носить унаследованный (миметический) характер, когда при изменении условий метаморфизма происходит гомоосевое или гомоплоскостное замещение неравновесных минералов поздними равновесными. Критерием такого механизма служит наличие реликтовых минералов и их ассоциаций.

Также несколько обособлены на рис. 120 ориентировки плагиоклазов. Микроструктурное изучение этой группы минералов, особенно в метаморфических породах, — чрезвычайно трудоемкий процесс, поэтому оно должно проводиться только в случае предельно четко сформулированной задачи.

При микроструктурном изучении плагиоклазов наиболее часто устанавливаются совпадение с макроскопической линейностью направления $\frac{\perp [010]}{RS}$ и поясовое рассеивание $\perp 010$ и $\perp RS$ в плоскости $a_c c_c$ или с локализацией $\perp 010$ вблизи оси c_c [22, 59]. Объяснить подобные ориентировки синдеформационной кристаллизацией трудно, так как в этом случае с линейностью совпадает ось с минимальной скоростью продольной волны, а с осью c_c — ось с максимальной скоростью продольной волны (см. табл. 14).

Зерна плагиоклаза в такой ориентировке чаще всего обладают двумя взаимно перпендикулярными альбитовой и периклиновой системами двойников. Как показали эксперименты по моделированию механического двойникования в плагиоклазах, оно осуществляется по этим системам, причем таким образом, что результирующей линией скольжения является линия пересечения 010 и RS , т. е. направление, близкое к $\frac{\perp [010]}{RS}$ [49]. Привлечение механизма двойникования дает единственно удовлетворительное объяснение таких ориентировок плагиоклазов, геометрические соотношения которых с ориентировками сосуществующих с ним минералов свидетельствуют об их формировании под влиянием единого стресс-поля, но о разных контролирующих механизмах.

В рис. 120 не вошли типы ориентировок кварца, что связано, с одной стороны, с обилием этих типов, а с другой — с многообразием возможных механизмов ориентировки и способов интерпретации. Кварц очень широко используется для анализа микроструктур пород. Это связано с тем, что он один из наиболее распространенных породообразующих минералов, причем встречается в породах самого разнообразного генезиса и состава. Он очень легкий объект для микроструктурного анализа,

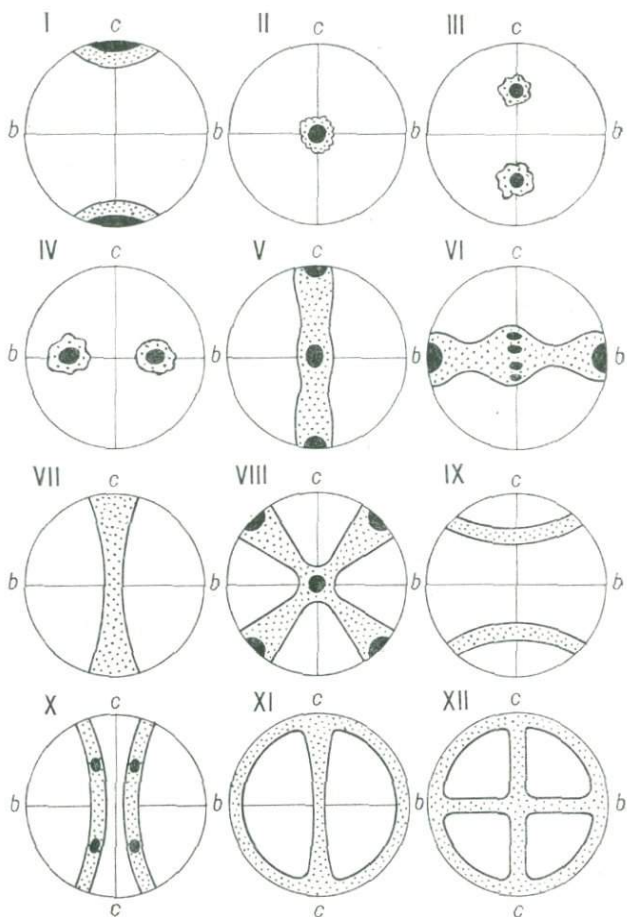


Рис. 121. Типы узоров кварца [14].

обеспечивающий его высокую производительность. Все это делает кварц очень привлекательным для изучения и объясняет огромное количество публикаций диаграмм его ориентировки.

Между тем интерпретация таких диаграмм представляет очень трудную задачу. Это связано с тем, что существует две—высокотемпературная и низкотемпературная—модификации кварца, по-разному реагирующие на стресс-поле. Кроме того, ориентировки кварца чутко реагируют на довольно незначительные изменения внешних параметров (температура, давление, наличие и состав летучих компонентов и др.).

В книге Н. А. Елисева [14] приведены 12 типов узоров кварца (рис. 121). Все эти узоры объясняются трансляционным

механизмом, действующим параллельно одному из трех направлений: оси призмы $[0001]$, ребру призмы $[2\bar{1}10]$ и ребру ромбоэдра $\{\bar{2}1\bar{1}3\}$.

Между тем результаты моделирования ориентировки кварца способами пластической деформации и перекристаллизации и изучение природно деформированных кварцитов привели И. С. Делицина к выводу о том, что «полученные результаты не могут быть объяснены исходя из традиционного представления о геометрии скольжения в кристалле. Приведенные данные позволяют считать, что развитие ориентированного строения пластически деформируемой породы в поле внешних сил контролируется упругими свойствами слагающих ее индивидов» [10].

Результаты моделирования пластического течения и синдеформационной кристаллизации в кварцевых агрегатах показали, что в низкотемпературной области кварц ориентируется осью $[0001]$ вдоль оси сжатия. С повышением температуры (более 500°) оси $[0001]$ начинают рассеиваться по малокруговым траекториям вокруг оси сжатия, причем с повышением температуры радиус конического рассеивания повышается от 21 до 50° .

В экспериментах с кварцем Х. В. Грина и его коллег [56] (см. табл. 15, рис. 118, XI—XV) воспроизведены коническое рассеивание $[0001]$, взаимно перпендикулярные пояса рассеивания под 45° к оси сжатия и точечный максимум; последний, однако, при температуре 1100°C . При осевом растяжении оси $[0001]$ кварца рассеивались в пояс, нормальный к оси растяжения. Таким образом, результаты Дж. А. Туллиса [63] и Х. В. Грина с соавторами [56], касающиеся влияния температуры на ориентировку кварца, когда $[0001]$ ориентируется вдоль оси сжатия, противоречивы. Тем не менее 4 типа ориентировок кварца (I, VII—IX) приведенные Н. А. Елисеевым [14], воспроизведены экспериментально.

Очень частым типом узора кварца, не вошедшим в таблицу Н. А. Елисеева [14] и не установленным в эксперименте, является коническое рассеивание $[0001]$ вокруг оси растяжения с радиусом $20\text{—}60^\circ$. Кварц в целом малоинформативный минерал, интерпретации ориентировок которого обычно неоднозначны. Поэтому при изучении каких-то геологических процессов с использованием микроструктурного анализа кварца необходимо параллельное изучение ориентировок тех минералов, для которых возможна уверенная кинематическая или динамическая интерпретация.

Глава XIII

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ПРИ РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ СТРУКТУРНО-МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ПЕТРОЛОГИИ

В ряде работ, посвященных микроструктурному анализу [14, 18, 25], приводятся многочисленные примеры использования этого метода для изучения самых разных геологических объектов и процессов. Н. А. Елисеевым [14] описаны примеры использования микроструктурного анализа при решении вопросов стратиграфии, литологии (механизмы ориентировки галек, отличие волноприбойных знаков от псевдоволноприбойных и др.), магматизма (структура и строение плутонов), тектоники и структурной петрологии (структуры милонитов, зеркал скольжения, гранулитов, карандашных гнейсов, генезис сланцеватости, типы и механизмы складчатости) и рудогенеза (микроструктуры железистых кварцитов и рудной брекчии).

В методическом пособии Л. И. Лукина, В. Ф. Чернышева и И. П. Кушнарева [25] показаны возможности микроструктурного анализа как метода изучения магматизма, тектоники и рудогенеза и их пространственно-временных соотношений.

Примеры использования микроструктурного анализа при решении вопросов структурной петрологии (определение шарнира складки, генетического типа складки, отличие подводно-оползневых смятий от тектонической складчатости), стратиграфии (определение нормального и опрокинутого залегания пласта) описаны в методическом руководстве А. Н. Казакова [18].

Ниже приведены примеры, которые как-то дополняют и расширяют круг геологических вопросов, для решения которых необходимо привлечение микроструктурного анализа.

§ 54. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЛЕГАНИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКИ НЕ ВЫРАЖЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

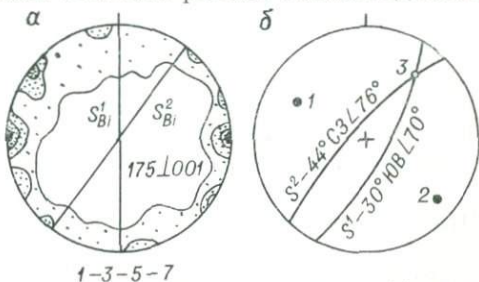
Горные породы с различающимися внутренним строением и физико-механическими свойствами по-разному реагируют на одни и те же тектонические напряжения и движения. В связи с этим при полевом изучении сложнорасчлененных метаморфических комплексов, в которых обычно присутствуют первоначально осадочные, вулканогенные и интрузивные разности горных пород, постоянно встает вопрос о возрастных соотношениях метаморфизма, магматизма и структурообразования. Для его решения необходимо восстановить последовательность формирования структур и структурных элементов (линейность,

сланцеватость, гнейсовидность, полосчатость и т. д.) во всех типах пород, присутствующих в данном районе. В расслоенных осадочных и вулканогенных породах эти структурные элементы обычно выражены достаточно четко. В массивных же интрузивных породах, например гранитах, наложенные структурные элементы нередко макроскопически не выражены и могут быть установлены лишь при микроструктурном изучении породы.

В качестве примера приводится один из районов восточной части Балтийского щита, где верхнеархейские супракрустальные вулканогенно-осадочные комплексы залегают среди широкого поля гранитоидов, образующих блок-купольные структуры. В супракрустальных породах отчетливо выражены ранняя сланцеватость, залегающая 30° ЮВ $\angle 70^\circ$, и минеральная линейность $38^\circ \angle 20^\circ$. Аналогичное залегание имеют гнейсовидность и агрегатная линейность в непосредственно примыкающих к вулканогенно-осадочным породам гранитоидах. В последних, однако, отсутствует хорошо проявленная в супракрустальных породах наложенная северо-восточная сланцеватость. В связи с этим неясно, как реагировали гранитоиды, слагающие блок-купольные структуры района, на тектонические напряжения и движения того этапа деформации, с которым связана северо-восточная сланцеватость супракрустального комплекса. Были ли гранитоиды жестким консолидированным блоком, облекаемым более пластичными вулканогенно-осадочными породами, или же пластические деформации в них проявились, но не нашли отражения в масштабе макроструктур?

Для решения этих вопросов был проведен микроструктурный анализ в шлифе среднезернистого плагиомикроклинового гранита, вырезанном перпендикулярно к агрегатной линейности, залегающей в месте отбора образца — $38^\circ \angle 20^\circ$.

При анализе узора $\perp 001$ биотита (рис. 122, а) устанавливается пояс, перпендикулярный к линейности, в котором выделяются два максимума. Главный отвечает ранней гнейсовидности, залегание которой установлено непосредственно в обнажении — 30° ЮВ $\angle 70^\circ$. Дополнительный максимум осей $\perp 001$ биотита отвечает наложенной гнейсовидности. Линия пересечения обеих генераций гнейсовидностей совпадает с макроскопической агрегатной линейностью. Установленные структурные элементы после операции поворота приведены к географиче-



1-3-5-7
 Рис. 122. Ориентировка биотита (а) и географические координаты структурных элементов (б) в плагиомикроклиновом граните.

1 — πS^1 — $300^\circ \angle 20^\circ$; 2 — πS^2 — $134^\circ \angle 13^\circ$; 3 — $l Bi, Qu$ — $38^\circ \angle 19^\circ$.

ским координатам (рис. 122, б). Наложенная гнейсовидность, отвечающая дополнительному максимуму в узоре осей $\perp 001$ биотита, имеет залегание $44^\circ \text{СЗ} \angle 76^\circ$. Она совпадает с наложенной сланцеватостью, проявленной в окружающих гранитоиды супракрустальных породах верхнеархейского комплекса. Таким образом, пластические деформации, связанные с наложенным этапом, носили сквозной характер. Решение этого вопроса имеет крайне важное значение как для понимания механизма и условий деформаций, так и для расшифровки общей последовательности геологических событий в данном районе докембрийского региона.

§ 55. ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ

В сложнодислоцированных метаморфических комплексах обычно устанавливается несколько последовательно развивающихся накладывающихся друг на друга генераций макроструктурных элементов. Когда такие наложенные генерации дискретны (зоны, системы параллельных жил и т. д.), а связанные с ними породы крупнозернистые, диагностика минеральных ассоциаций достаточно точно может быть сделана непосредственно на обнажении. В том случае, когда структурные элементы имеют сквозной характер (сланцеватость, минеральная линейность и т. д.), а породы являются мелкозернистыми, связать разные минеральные ассоциации с разновозрастными и разнонаправленными системами структурных элементов непосредственно в поле практически невозможно. Для решения этого вопроса обычно привлекается микроструктурный анализ пород, отобранных из участков, где предварительно проведен макроструктурный анализ.

Как пример приводится район Костомукшского железорудного месторождения, в котором установлена длительная и многоэтапная история развития деформаций в супракрустальных толщах верхнего архея [19, 21]. Для корреляции метаморфических и тектонических процессов был проведен микроструктурный анализ разнообразных пород из различных частей крупных структур района. Сжатое описание одного из образцов приводится ниже.

Структурно-геологическая ситуация

Обнажение, из которого отобран образец, расположено на западном крыле антиформы в непосредственном контакте подстилающих железорудные горизонты основных кристаллических сланцев и нижележащих кислых гнейсов. Контакт обеих пород и согласная жила плагиигранитов конформны со слоистостью $S^{0-1} - 36^\circ \text{СЗ} \angle 40^\circ$. Они сминаются в изоклинальные склад-

ки F^1 , оси которых и параллельная им минеральная линейность погружаются на запад под углом 35° . Наложная сланцеватость S^1 осевой плоскости складок F^1 сечет $S^{0.1}$ под острым углом. Слоистость и сланцеватость сминаются в изоклинальные складки F^2 , шарниры которых и совпадающая с ними поздняя линейность погружаются — $350^\circ \angle 30^\circ$. Осевые поверхности складок F^2 практически совпадают со слоистостью $S^{0.1}$. Наиболее поздним структурным элементом является сланцеватость S^3 — $90^\circ \text{С} \angle 30^\circ$, подчеркиваемая биотитом, хлоритом, прожилками кварц-полевошпатового материала и серого кварца.

Микроскопическое описание образца

Порода представляет собой тонкополосчатый основной кристаллический сланец. Количественный минералогический состав, %: плагиоклаз 38,8, роговая обманка 38,8, кварц 19,3, биотит 4,8, хлорит 1,9, серицит 0,5; апатит и магнетит присутствует в виде единичных зерен.

Зерна плагиоклаза образуют три морфологические группы. Ранние, более крупные (0,5 мм), сильно серицитизированные, нередко зональные и несдвойникованные зерна (№ 38—41) имеют неправильную форму. Для более поздних зерен (№ 25—28) характерны меньший размер, более высокий идиоморфизм, отсутствие серицитизации и четко выраженное перекрестное двойникование по альбитовому и периклиновому законам. И наконец, наиболее поздними являются мелкие чистые резко идиоморфные сдвойникованные по альбитовому закону зерна (№ 10—12). Анализировалась ориентировка сдвойникованных зерен плагиоклаза.

Роговая обманка представлена двумя морфологическими типами. К первому относятся ксеноморфные интенсивно окрашенные зерна, несущие признаки деформации (двойникование по 100, излом). Эта группа зерен ориентирована под большим углом к оси b^2_c (шлиф вырезан перпендикулярно к ней). Для второй, более многочисленной группы зерен характерны резко идиоморфная форма с развитием граней призмы, пересечение ими зерен первой группы, ориентировка [001] вдоль оси b^2_c и отсутствие признаков механической деформации.

Зерна кварца чистые, изометричные, небольшого размера (около 0,2 мм) с ровным, редко слабооблачным угасанием. Биотит представлен двумя морфологическими типами. Мелкие изогнутые черно-коричневые пластинки (0,05—0,2 мм по удлинению) относятся к первому типу. Они насыщены тонкодисперсным магнетитом и часто им оконтуриваются. Второй тип представлен светлыми крупными недеформированными пластинками, ориентированными по сланцеватости S^3 .

Эпидот, тесно ассоциирующий с амфиболом и нередко с ним сросшийся, представлен мелкими (0,05—0,1 мм) кристалликами

с характерной синеватой аномальной окраской. Уже при просмотре шлифа на плоском столике видно, что основная масса зерен эпидота ориентирована нормально к плоскости шлифа.

Хлорит нередко развивается по пластинкам биотита и по амфиболу. В последнем случае он образует звездчатые агрегаты. Кроме того, имеются самостоятельные пластинки, не ассоциирующие с другими силикатами.

Ориентировка минералов

Роговая обманка. Первоначально было измерено 120 зерен, по которым были построены диаграммы. При этом на диаграмме [001] выделились три четких максимума, отвечающие трем поколениям линейности по роговой обманке. С тем чтобы увеличить представительность каждой выборки, количество измерений было увеличено вдвое, и ориентировка и оптические свойства зерен, образующих все три совокупности, изучались отдельно.

Генерация зерен, [001] которых совпадает с осями ранних складок (рис. 123, I), характеризуется наличием признаков наложенных деформаций (излом, двойникование) и квазикристалльной ориентировкой — $\perp 100$ совпадает с полюсом сланцеватости S^1 . Средний по 29 измерениям угол $CNg = 16,8^\circ$. Зерна, у которых [001] не совпадает с осями первых и вторых складок (рис. 123, II) выделены в самостоятельную наиболее раннюю генерацию роговой обманки. Это связано с тем, что линейности в такой ориентировке по другим минералам не установлено, а средний угол CNg по 43 измерениям равен $19,5^\circ$, т. е. выше, чем у двух других генераций. Все поле концентрации [001] растянуто в частичный пояс поперек слоистости $S^{0.1}$. В узоре $\perp 100$ выделяются два симметричных относительно $S^{0.1}$ максимума, обуславливающих квазидвойниковый тип ориентировки.

Наконец, третья группа идиоморфных с хорошо развитыми гранями призмы зерен (CNg по 65 измерениям равен $14,4^\circ$) без признаков деформации имеет жесткую ориентировку [001], совпадающую с осями наложенных складок — b^2_c (рис. 123, III). Плоскость 100 совпадает со сланцеватостью S^2 , параллельной слоистости $S^{0.1}$.

Таким образом, ориентировки роговой обманки динамически равновесны с тремя линейными и двумя плоскостными структурными элементами, а уменьшение угла CNg от ранней генерации к поздним свидетельствует о систематическом снижении магnezиальности [11].

Биотит. В узоре $\perp 001$ раннего биотита (рис. 123, IV) выделяется единый максимум, совпадающий с максимумом $\perp 100$ роговой обманки третьей генерации. При этом наблюдается тенденция к поясовому расеванию вокруг оси b^2_c . Для позднего биотита характерен максимум $\perp 001$ (рис. 123, V),

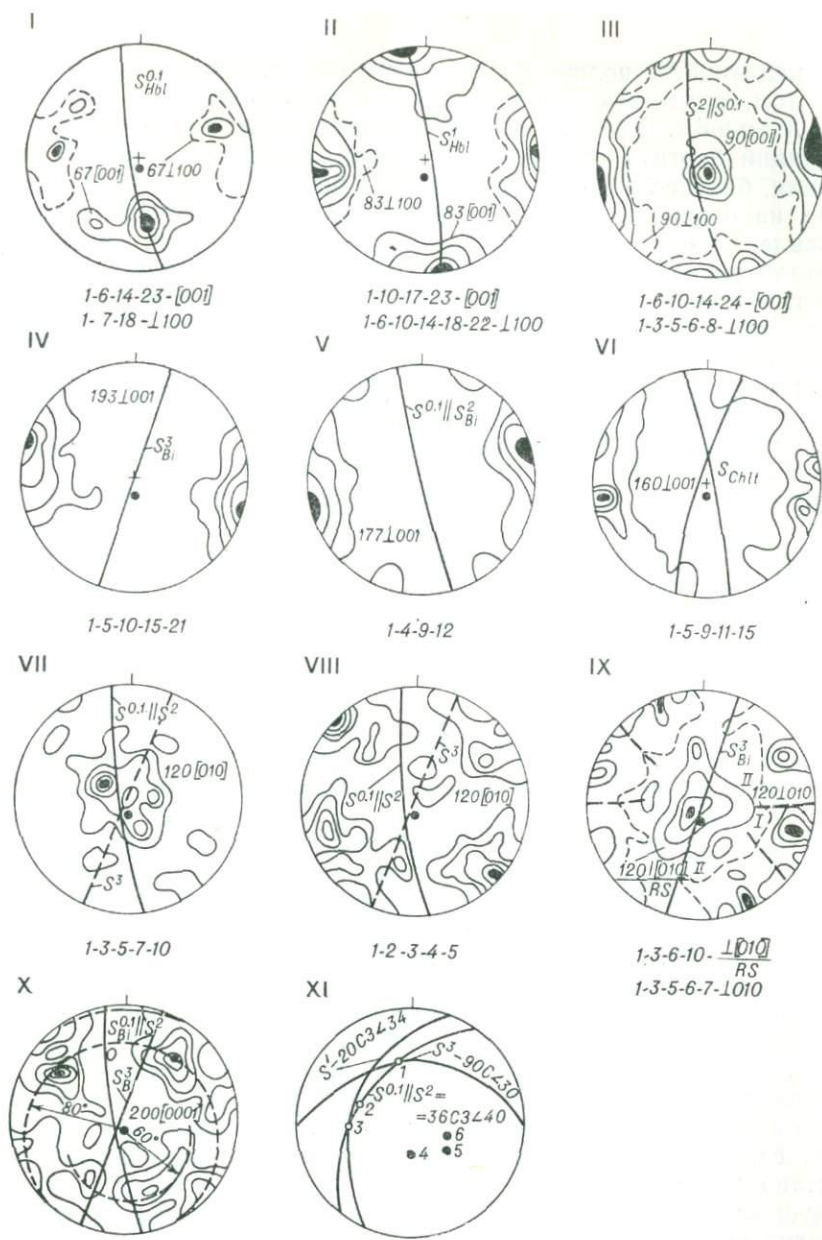


Рис. 123. Ориентировки роговой обманки (I—III), биотита (IV—V), хлорита (VI), эпидота (VII—VIII), плагиоклаза (IX), кварца (X) и географические координаты структурных и динамических осей и плоскостей (XI) в основном кристаллическом сланце.

1 - l_{Bi}^3 , $Chlt$, Pl $l_{Hbl, Bi, Ep, Pl, Qu}^2$ $-350^\circ \angle 30^\circ$; 2 - $l^{0.1} - 287^\circ \angle 38^\circ$; 3 - $l_{Hbl}^1 - 264^\circ \angle 31^\circ$; 4 - $\pi S^3 - 180^\circ \angle 58^\circ$; 5 - $\pi S^2 \parallel \pi S^{0.1} - 128^\circ \angle 50^\circ$; 6 - $\pi S^1 - 110^\circ \angle 54^\circ$.

совпадающий с полюсом к наложенной сланцеватости S^3 — элементом, отсутствующим в узорах роговой обманки.

Хлорит. Узор $\perp 001$ несет в себе черты узоров обеих генераций биотита (рис. 123, VI). Два максимума занимают позиции, близкие к максимумам $\perp 001$ биотита, и отвечают полюсам наложенных сланцеватостей. Такая его ориентировка обусловлена как гомоплоскостным замещением биотита, так и кристаллизацией хлорита, синхронной с формированием сланцеватости S^3 , поскольку ассоциирующие с последней пластинки хлорита не несут признаков замещения ранних силикатов и не деформированы. Ориентировка хлорита, образующего сферондальные агрегаты, не изучалась, однако морфология этих агрегатов и характер распределения в породе свидетельствуют об их постдеформационной кристаллизации.

Эпидот. В узоре $[010]$ выделяется поле концентрации (рис. 123, VII), центр тяжести которого близок к оси наложенных складок b^2_c и совпадает с $[001]$ третьей генерации роговой обманки. Узор $[001]$ (рис. 123, VIII) симметричен относительно сланцеватости S^3 . Ориентировка эпидота менее жесткая, чем других темноцветных, и близка по времени к ориентировке поздней роговой обманки. Частично она отвечает постдеформационной кристаллизации этого минерала.

Плагиоклаз. Узор $\frac{\perp [010]}{RS}$ (рис. 123, IX) характеризуется единым максимумом, совпадающим с шарниром наложенных складок ($[001]$ третьей генерации роговой обманки и $[010]$ эпидота). В узоре $\perp 010$ выделяется точечный максимум (компонент I), близкий к полюсу сланцеватости S^3 , и два максимума (компонент II), расположенные симметрично под 45° к S^3 . Анализ компонентов показал, что компонент I образован зернами с альбит-периклиновыми перекрестными двойниками, в компоненте же II увеличено число зерен с альбитовой системой двойников, а сами зерна идиоморфные и наиболее поздние. Ориентировка крупных несдвойникованных зерен не изучалась.

Кварц. Узор $[0001]$ довольно сложный (рис. 123, X) и основной его особенностью является симметричность как всего узора, так и двух главных максимумов относительно сланцеватости S^2 и, возможно, сланцеватости S^1 . В то же время с поздней сланцеватостью S^3 четких геометрических соотношений не устанавливается. Намечаются две конические траектории с радиусами 60 и 80° вокруг центра, совпадающего с осью b^2_c . Ориентировка кварца, таким образом, четко синхронизируется со структурным парагенезисом $S^2 + b^2_c$.

Географические координаты структурных и динамических осей и плоскостей после поворота диаграммы приведены на рис. 123, XI.

Суммируя результаты микроструктурного анализа шести минералов в образце основного кристаллического сланца, можно

Этап деформации	Структурные элементы и механизмы синхронных с ними ориентировок минералов	Ориентировка субстроений минералов					
		Роговая обманка	Биотит	Хлорит	Плагиоклаз	Эпидот	Кварц
D^3	Сланцеватость S^3 и линейность l^3 , параллельная линии пересечения $S^{0.1}$ и S^3 . Синтектонический рост биотита, хлорита, двойниковая ориентировка плагиоклаза, неориентированный рост эпидота					Не ориентирован	
D^2	Изогинальные складки F^2 , линейность l^2 , параллельная осям складок, лежащим в $S^{0.1}$, обусловленная синтектонической кристаллизацией роговой обманки, биотита, эпидота. Двойниковый механизм ориентировки мелкого плагиоклаза, трансляционный механизм ориентировки кварца и миметическая кристаллизация хлорита по биотиту						
D^1	Изогинальные складки F^1 . Сланцеватость осевой плоскости S^1 и линейность l^1 , параллельная осям складок. Синтектоническая кристаллизация роговой обманки и, возможно, крупного плагиоклаза и кварца				Крупный, зональный, не двойникованный, серицитизированный плагиоклаз N° 39-41		
Древнейший	Кристаллизационная сланцеватость $S^{0.1}$ и ранняя линейность $l^{0.1}$, обусловленные синтектонической кристаллизацией роговой обманки и, возможно, крупного зонального плагиоклаза						

Рис. 124. Динамически равновесные ориентировки минералов, контролирующие их механизмы и этапы деформации в образце основного кристаллического сланца (см. рис. 123).

констатировать, что устанавливается определенная смена парагенезисов минералов, каждый из которых связан с собственным парагенезисом плоскостных и линейных структурных элементов, обусловленных несколькими этапами деформации (рис. 124).

Последовательность парагенезисов описывается рядом: роговая обманка ($CNg=19,5^\circ$) + плагиоклаз (№ 39—41) → роговая обманка ($CNg=16,8^\circ$) + плагиоклаз (№ 39—41) ± кварц → роговая обманка ($CNg=14,4^\circ$) + биотит + плагиоклаз (№ 26—28) + эпидот + кварц → биотит + хлорит + плагиоклаз (№ 10—12) + эпидот. Смена парагенезисов свидетельствует о снижении степени метаморфизма от условий амфиболитовой фации, в которых протекали деформации ранних этапов, до условий зеленосланцевой фации, синхронных с поздними этапами. Структурно-метаморфическая эволюция, установленная в этом образце основного кристаллического сланца, сопоставима с эволюцией, установленной в супракрустальных верхнеархейских породах района в макромасштабе.

§ 56. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА УЛЬТРАМЕТАМОРФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В глубокометаморфизованных комплексах широко проявлен ультраметаморфический процесс — мигматизация пород. Мигматиты представляют собой породы, в которых выделяются меланократовая часть — меланосома (палеосома, субстрат) и жильный лейкократовый материал — лейкосома (неосома, метатект).

В Западной Карелии в области развития гранулитового комплекса установлено, что при мигматизации, протекающей в условиях гранулитовой фации метаморфизма, метатект представлен эндербитом — породой, состоящей из плагиоклаза

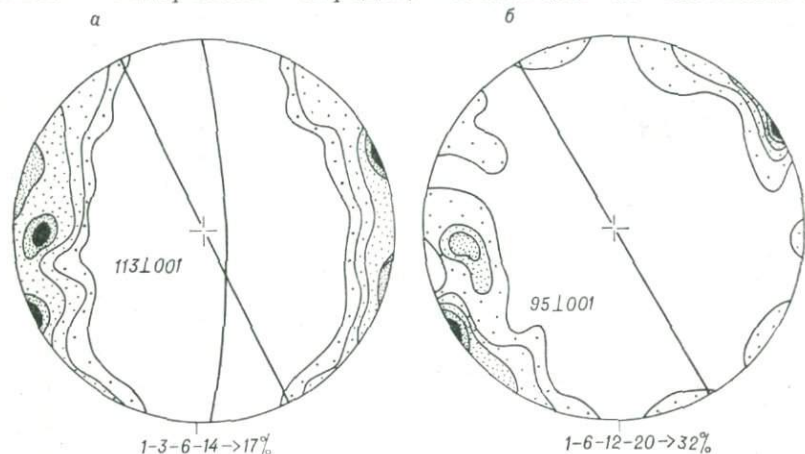


Рис. 125. Ориентировка биотита в полевошпатовом амфиболите субстрате (а) и в жильном эндербите-метатекте (б).

(№ 40), кварца (или без него) и темноцветных — красновато-коричневого биотита, моноклинного и ромбического пироксенов. Субстрат представлен полевошпатовым амфиболитом с биотитом. Непосредственно в обнажении видно, что после формирования кристаллизационной сланцеватости в субстрате произошло дробление и образование агматитов — обломков, сцементированных жильным эндербитом. При этом в цементирующем эндербите как бы «просвечивает» ранняя кристаллизационная сланцеватость, подчеркиваемая новообразованными более крупными темноцветными минералами. Для того чтобы определить механизм образования эндербитовых прожилков в одном из образцов был проведен микроструктурный анализ биотита — «сквозного» для жильной и меланократовой части минерала.

Шлиф был вырезан так, что в него попал субстрат и жильный эндербит. В шлифе видно, что в жилке биотит более крупный (до 0,5 мм), чем в субстрате. По всем остальным признакам оба биотита идентичны. На рис. 125 представлены диаграммы ориентировки биотита обеих групп. Сравнив их, легко убедиться в идентичности узоров обеих диаграмм. Если бы жильный материал внедрялся в виде расплава, то кристаллизующийся биотит должен был бы иметь изотропный узор. Совпадение ориентировок биотитов из субстрата и из метатекта свидетельствует о том, что перекристаллизация происходила в твердом состоянии. При этом биотит из жильной части представляет собой доросшие (поэтому крупные) кристаллы биотита из субстрата, сохранившие ориентировку последних.

Таким образом, в данном примере микроструктурный анализ позволил подтвердить выводы, сделанные непосредственно на обнажениях, о том, что эндербитизация пород в гранулитовом комплексе протекает в твердом состоянии (диффузионные механизмы) без участия расплава соответствующего состава.

1. *Ажгирей Г. Д.* Структурная геология. М., Изд-во Моск. ун-та, 1966. 364 с.
2. *Александров К. И., Рыжова Т. В.* Упругие свойства породообразующих минералов, пироксены и амфиболы. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1961, № 9, с. 871—875.
3. *Аншелес О. М., Шафрановский И. И.* Евграф Степанович Федоров. Учен. зап. Ленингр. ун-та, 1940, № 45. Сер. геол.-почв. наук, вып. 8, с. 5—15.
4. *Ванде-Кирков Ю. В.* Новый вариант диаграмм для определения средних — основных плагиоклазов на Федоровском столике. — Бюл. вулканолог. станций, 1974, № 50, с. 130—132.
5. *Ванде-Кирков Ю. В.* Вариации модалного состава и степени упорядоченности плагиоклазов в эффузивах среднего и основного состава. — Бюл. вулканолог. станций, 1975, № 51, с. 89—94.
6. *Варданянц Л. А.* К теории и практике федоровского метода. — Вестн. Ленингр. ун-та, 1956, № 18. Геология и география, вып. 3, с. 29—39.
7. *Винчелл А. Н.* Оптическая минералогия. М., Изд-во иностр. лит., 1949. 657 с.
8. *Григорьев Д. П., Шафрановский И. И.* Выдающиеся русские минералоги. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1949. 272 с.
9. *Григорьева Л. Ф., Макарова Т. А., Короткова Э. Н., Чигарёва О. Г.* Синтетические амфиболовые асбесты. Л., Наука, 1975. 249 с.
10. *Делицин И. С.* О реальной и расчетной термодинамически устойчивой ориентировке кварца кварцита. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1976, № 1, с. 109—124.
11. *Дир У. А., Хауи Р. А., Зусман Ю. Ж.* Породообразующие минералы. Т. 4. М., Мир, 1966. 482 с.
12. *Доливо-Добровольский В. В.* О некоторых свойствах главного направления в двойниках. — Зап. ВМО, ч. 81, вып. 2, 1952, с. 89—95.
13. *Доливо-Добровольский В. В.* Новая диаграмма для определения полевых шпатов. — Зап. ВМО, ч. 82, вып. 2, 1953, с. 122—124.
14. *Елисеев Н. А.* Структурная петрология. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1953. 306 с.
15. *Заварицкий А. Н.* Развитие универсального метода Федорова и применение его к изучению полевых шпатов. — В кн.: Универсальный столик Федорова. М., Изд-во АН СССР, 1953, с. 5—15.
16. *Заварицкий А. Н., Соболев В. С., Кваша Л. Г.* и др. Новые диаграммы для определения состава высокотемпературных плагиоклазов. — Зап. ВМО, ч. 87, вып. 5, 1958, с. 529—542.
17. *Каменцев И. Е., Сметанникова О. Г.* Сопоставление рентгеновских методов определения Al—Si упорядоченности в K—Na полевых шпатах. — Зап. ВМО, ч. 110, вып. 6, 1981, с. 721—730.
18. *Казаков А. Н.* Методическое руководство по динамическому анализу микроструктурных ориентировок карбонатов. Л., Наука, 1967. 109 с.
19. *Кожевников В. Н.* Условия формирования структурно-метаморфических парагенезисов в докембрийских комплексах. Л., Наука, 1982. 184 с.
20. *Косой А. Л., Котов Н. В.* О структурном состоянии калиевых полевых шпатов в некоторых порфириновых и порфириовидных изверженных горных породах. — Вестн. Ленингр. ун-та, 1965, № 12. Геология и география, вып. 2, с. 28—33.

21. Лазарев Ю. И. Структурная и метаморфическая петрология железистых кварцитов Костомукшского меторождения. Л., Наука, 1971. 191 с.
22. Лазарев Ю. И., Кожевников Б. Н. Структурно-петрологическое изучение гранитизации. Л., Наука, 1973. 124 с.
23. Лебединский В. И. О высокотемпературных плагиоклазах излившихся пород Закарпатья. — Зап. ВМО, ч. 84, вып. 1, 1955, с. 69—74.
24. Лодочников В. Н. Основы кристаллооптики. М.—Л., 1947. 268 с.
25. Лукин Л. И., Чернышев В. Ф., Кушнарев И. П. Микроструктурный анализ. М., Наука, 1965. 123 с.
26. Марфунин А. С. Вывод диаграмм оптической ориентировки кислых и средних плагиоклазов. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1960, № 5, с. 88—102.
27. Марфунин А. С. Новые диаграммы оптической ориентировки калинатровых полевых шпатов. — Докл. АН СССР, т. 133, № 4, 1960, с. 939—942.
28. Марфунин А. С. Полевые шпаты — фазовые взаимоотношения, оптические свойства, геологическое распределение. М., Изд-во АН СССР, 1962. 275 с.
29. Подногин А. К. Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова. Л.—М., 1937. 108 с.
30. Полевые шпаты. Т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1952. 402 с.
31. Полевые шпаты. Т. 2. М., Изд-во иностр. лит., 1956. 366 с.
32. Саранчина Г. М. Федоровский метод. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1963. 112 с.
33. Соболев В. С. Федоровский метод. М., Госгеолтехиздат, 1954. 159 с.
34. Соболев В. С., Костюк В. Н., Бобривич А. Н. и др. Петрография неогеновых вулканических и типабиссальных пород Советских Карпат. Киев, Изд-во АН УССР, 1955. 248 с.
35. Тарасов В. П., Никитина Л. П. О возможности использования угла оптических осей и параметров элементарной ячейки в качестве критериев упорядоченности Fe²⁺ и Mg в структуре ромбических пироксенов. — Зап. ВМО, 1974, ч. 103, вып. 2, с. 268—271.
36. Тарасов В. П., Никитина Л. П., Екимов С. Н. Кристаллооптический и рентгенометрический методы определения упорядоченности катионов в структуре ромбических пироксенов. — Зап. ВМО, 1975, ч. 104, вып. 6, с. 748—750.
37. Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод определения вещества. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1965. 305 с.
38. Универсальный столик Е. С. Федорова. М., Изд-во АН СССР, 1953. 837 с.
39. Ферберн Х. В. Структурная петрология деформированных горных пород. М., Изд-во иностр. лит., 1949. 268 с.
40. Ферхуген Дж., Гернер Ф., Вайс Л. и др. Земля. Введение в общую геологию. М., Мир, 1974. 844 с.
41. Флинн Д. Деформации при метаморфизме. — В кн.: Природа метаморфизма. М., 1967, с. 49—78.
42. Хиллс Е. Ш. Элементы структурной геологии. М., Изд-во иностр. лит., 1967. 478 с.
43. Цветков А. И. Изоморфные замещения в группе бесщелочных пироксенов. М., Изд-во АН СССР. 107 с.
44. Шафрановский И. И. Е. С. Федоров. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1951. 282 с.
45. Шинкарев Н. Ф., Иваников В. В. Физико-химическая петрология изверженных пород. Л., Недра, 1983. 270 с.
46. Элрс Э. Интерпретация фазовых диаграмм в геологии. М., Мир, 1975. 299 с.
47. Avé Lallemant H. G., Carter N. L. Syntectonic recrystallization of olivine and modes of flow in the upper mantle. — Geol. Soc. Amer. Bull., 1970, v. 81, № 8, p. 2203—2220.
48. Borg J. J., Handin J. W. Experimental deformation of crystalline rocks. — Tectonophysics, 1966, v. 3, p. 251—367.

49. *Borg J. J., Heard H. C.* Mechanical twinning and slip in experimentally deformed plagioclases.—*Contr. Miner. Petrol.*, 1969, v. 23, № 2, p. 129—135.
50. *Carter N. L., Avé Lallemant H. G.* High temperature flow of dunite and peridotite.—*Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1970, v. 81, № 8, p. 2181—2202.
51. *Carter N. L., Baker D. W., George R. P.* Seismic anisotropy, flow and constitution of upper mantle.—In: *Flow and fracture of rocks*. Washington, 1972, p. 167—190.
52. *Deer N. A., Howie B. A., Zussman J.* *Rock-forming Minerals*. V. 2a. 1978. 490 p.
53. *Emmons R. C.* A modified universal stage.—*Amer. Miner.*, 1929, v. 14, № 12, p. 441—461.
54. *Emmons R. C., Gates R. M.* New method for the determination of feldspars twins.—*Amer. Miner.*, 1939, v. 24, № 9, p. 577—589.
55. *Etheridge M. A., Hobbs B. E., Paterson M. S.* Experimental deformation of single crystals of biotite.—*Contr. Miner. Petrol.*, 1973, v. 38, № 2, p. 21—36.
56. *Green H. W., Griggs D. T., Christie J. M.* Syntectonic and annealing recrystallization of fine grained quartz aggregates.—In: *Experimental and Natural Rock Deformation*, Paulitsch Ed., Springer Verlag, 1970, p. 272—335.
57. *Kamb W. B.* The thermodynamic theory of non-hydrostatically stressed solids.—*J. Geophys. Res.*, 1961, v. 66, № 1, p. 259—271.
58. *Kumazawa M., Helmstaedt H., Masaki K.* Elastic properties of eclogite xenoliths from diatremes of the East Colorado plateau and their implication to the upper mantle structure.—*J. Geophys. Res.*, 1971, v. 76, № 5, p. 1231—1247.
59. *Lawrence R. D.* Stress analysis based on albite twinning of plagioclase feldspars.—*Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1970, v. 81, № 8, p. 2507—2512.
60. *Leake B. E.* Nomenclature of amphiboles.—*Min. Mag.*, 1978, v. 42, № 324, p. 533—561.
61. *Mac Donald G. J. F.* Thermodynamics of solids under nonhydrostatic stress with geological application.—*Amer. J. Sci.*, 1957, v. 255, № 2, p. 266—282.
62. *Means W. D., Paterson M. S.* Experiments on preferred orientation of platy minerals.—*Contr. Miner. Petrol.*, 1966, v. 13, № 1, p. 108—133.
63. *Nikolas A., Poirier J. P.* Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. Bristol, 1976. 444 p.
64. *Raleigh C. B.* Glide mechanisms in experimentally deformed minerals.—*Science*, 1965, v. 150, p. 739—741.
65. *Raleigh C. B., Talbot J. L.* Mechanical twinning in naturally and experimentally deformed diopside.—*Amer. J. Sci.*, 1967, v. 256, № 2, p. 151—165.
66. *Sander B.* *Gefügekunde und ihre Anwendungen*. Leipzig, 1932. 409 S.
67. *Sarantschina G. M.* Die Fedorow-Methode, VEB. Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1963. 135 S.
68. *Slemmons D. B.* Observation on order-disorder relations on natural plagioclases.—*Norsk. Geol. Tidsskr.*, 1962, v. 42 (2), p. 533—585.
69. *Smith I. V.* Feldspar minerals. Crystal structure and physical properties. Heidelberg, Springer Verlag, 1974. 627 p.
70. *Stocker R. L., Ashby M. F.* On the rheology of the upper mantle.—*Rev. Geophys. and Space Phys.*, 1973, v. 11, p. 391—426.
71. *Tomita T.* Variations in optical properties according to chemical composition in the pyroxenes of the clinoenstatite—clinohypersthene—diopside—hedenbergite system.—*J. Shanghai Sci. Inst. Sec. II*, 1934, v. 1, p. 41—58.
72. *Turner F. J., Weiss L. K.* Structural analysis of metamorphic tectonites. N. J., 1963. 545 p.
73. *Tuttle O. F., Bowen N. Z.* Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 — H_2O .—*Geol. Soc. Amer. Mem.*, 1958, v. 74. 153 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Часть первая ОСНОВЫ ФЕДОРОВСКОГО МЕТОДА	
<i>Глава I.</i> Четырехосный федоровский (универсальный) столик. Федоровский метод	5
§ 1. Краткий обзор истории развития федоровского метода и его значение в геологических науках	—
§ 2. Устройство четырехосного федоровского столика	8
Описание устройства столика	—
Монтировка шлифа	11
Объективы. Юстировка микроскопа	—
§ 3. Установка федоровского столика в основное положение	12
§ 4. Стеклообразные сегменты. Определение истинного угла наклона	16
Назначение стеклянных сегментов	—
Вычисление истинного угла наклона	17
Диаграмма Федорова для определения истинного угла наклона	19
<i>Глава II.</i> Основы исследования кристаллов федоровским методом	20
§ 5. Принципы работы на четырехосном федоровском столике	—
§ 6. Построение стереографических проекций. Сетка Вульфа	21
Часть вторая ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ НА ЧЕТЫРЕХОСНОМ И ПЯТИОСНОМ СТОЛИКАХ	
<i>Глава III.</i> Исследование оптической индикатрисы одноосных и двуосных кристаллов	26
§ 7. Установка плоскостей симметрии оптической индикатрисы и построение их стереографических проекций	—
§ 8. Исследование анизотропии кристаллов	27
§ 9. Исследование одноосных кристаллов	28
Особенности исследования оптической индикатрисы на федоровском столике	—
Установка сечений оптической индикатрисы и их определение. Построение стереографических проекций и определение оптического знака	29
§ 10. Исследование двуосных кристаллов	33
Особенности исследования двуосных кристаллов на федоровском столике	—
Установка главных сечений оптической индикатрисы двуосных кристаллов и их определение	34

	Определение оптического знака и угла оптических осей	37
	Определение ориентировки оптической индикатрисы по отношению к спайности	40
	Определение плеохроизма (и абсорбции)	—
§ 11.	Особенности исследования двуосных кристаллов с малым $2v$	43
	Методика исследования на федоровском столике двуосных кристаллов с малым $2v$	—
	Применение коноскопического метода при исследовании двуосных кристаллов с малым $2v$ на федоровском столике	45
§ 12.	Приемы отличия одноосных кристаллов от двуосных на федоровском столике	46
Глава IV.	Определение силы двупреломления кристаллов $Ng - Np$	50
§ 13.	Установка сечения $NgNp$ в положение, перпендикулярное к оси A (совмещение оси Nm с осью A)	—
§ 14.	Определение разности хода при помощи компенсатора КПК	52
§ 15.	Определение толщины шлифа	55
	Определение толщины шлифа по пылинкам	—
	Определение толщины шлифа по кварцу	59
§ 16.	Вычисление силы двупреломления $Ng - Np$	60
§ 17.	Определение силы двупреломления $Ng - Nm$ и $Nm - Np$ в двуосных кристаллах	—
Глава V.	Исследование плагиоклазов на федоровском столике	62
§ 18.	Общие сведения. Диаграмма Никитина	—
§ 19.	Определение плагиоклазов по координатам плоскостей спайности 010 и 001	65
§ 20.	Определение плагиоклазов по ориентировке осей оптической индикатрисы к элементам двойникования	66
	Основные элементы двойников и законы двойникования	—
	Определение состава плагиоклаза по координатам двойниковой оси	70
	Определение состава плагиоклаза по координатам плоскости срастания	75
§ 21.	Особенности определения кислых плагиоклазов	76
§ 22.	Определение по диаграмме Никитина законов двойникования плагиоклазов	78
	Отличия друг от друга различных законов граней	—
	Отличия друг от друга законов граней, осевых и сложных	80
§ 23.	Последовательность работы при исследовании плагиоклазов и запись полученных результатов	83
§ 24.	Определение высокотемпературных плагиоклазов на федоровском столике (диаграмма Заварицкого, Соболева и других). Определение состава и степени упорядоченности плагиоклазов на федоровском столике (диаграммы Марфунина и Ванде-Киркова)	85
§ 25.	Способы быстрого определения плагиоклазов на федоровском столике. Определение зональных плагиоклазов	88
	Определение плагиоклазов в разрезах $\perp [100]$, т. е. в разрезах $\perp 010$ и 001	89

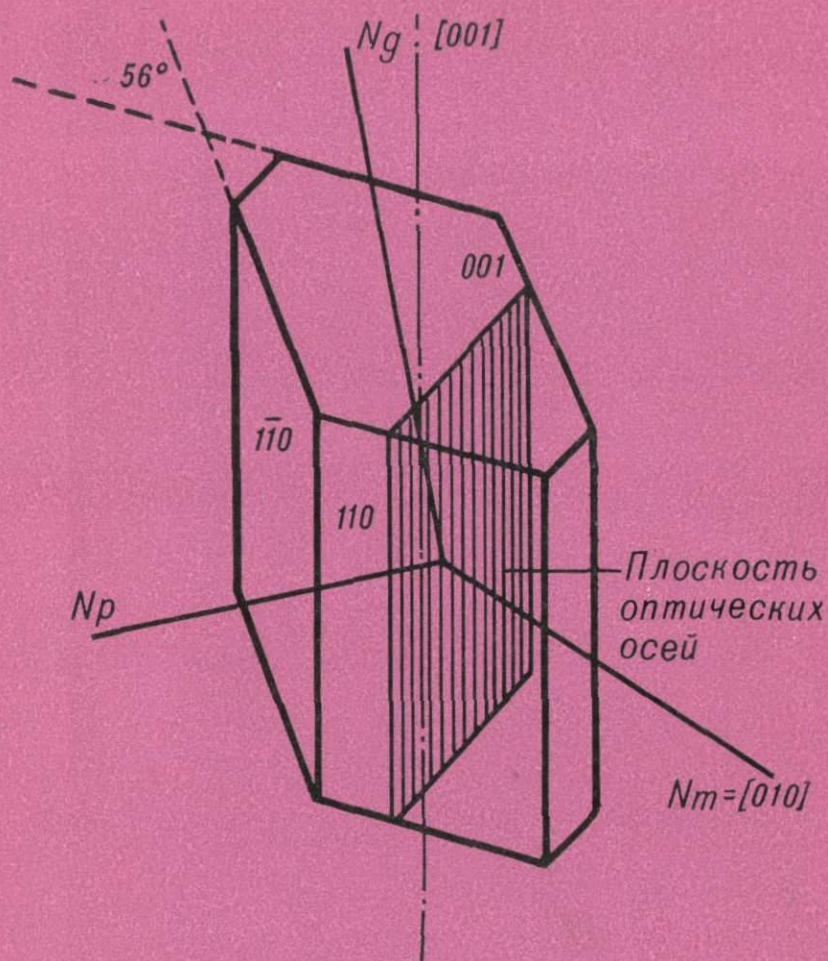
	Определение плагиоклазов по максимальному симметричному угасанию альбитовых двойников $Np' : 010$ в зоне $\perp 010$	91
	Определение зональных плагиоклазов	92
<i>Глава VI.</i>	Исследование калиево-натриевых полевых шпатов на федоровском столике	93
	§ 26. Общие сведения, номенклатура, таблицы свойств	—
	§ 27. Методика исследования существенно калиевых и калиево-натриевых полевых шпатов на федоровском столике. Отличие ортоклаза от микроклина максимального	99
	§ 28. Особенности определения высокотемпературных калиево-натриевых полевых шпатов (сандинов, анортоклазов)	103
<i>Глава VII.</i>	Исследование пироксенов и амфиболов на федоровском столике	105
	§ 29. Общие сведения	—
	§ 30. Определение оптической ориентировки амфиболов и пироксенов (измерение константы $Ng : [001]$)	106
	Особенности ориентировки	—
	Определение константы $Ng : [001]$ и угла спайности в разрезах с пересекающейся спайностью	109
	Упрощенный метод определения константы $Ng : [001]$ в разрезах с пересекающейся спайностью	110
	Определение $Ng : [001]$ и угла между плоскостями спайности в разрезах с параллельной спайностью	111
	Определение ориентировки отдельности	112
	§ 31. Определение других важнейших констант амфиболов и пироксенов	113
	Определение силы двупреломления	—
	Определение угла оптических осей	—
	Определение плеохроизма и абсорбции	114
	Определение химического состава по кристаллооптическим константам	—
<i>Глава VIII.</i>	Исследование минералов на пятиосном федоровском столике	117
	§ 32. Принцип работы на пятиосном столике	—
	§ 33. Устройство пятиосного столика и установка его в основное положение	118
	§ 34. Установка оптической индикатрисы двуосного кристалла на пятиосном столике	120
	§ 35. Определение кристаллооптических констант на пятиосном столике	123
	Определение угла оптических осей	—
	Определение силы двупреломления (выбор и установка разрезов для определения двупреломления)	124
	Определение плеохроизма	125
	Определение константы $Ng : [001]$ в амфиболах и пироксенах	—
	Определение ориентировки спайности	126
	§ 36. Исследование плагиоклазов на пятиосном столике	127
	Определение плагиоклазов по координатам полюса спайности	128

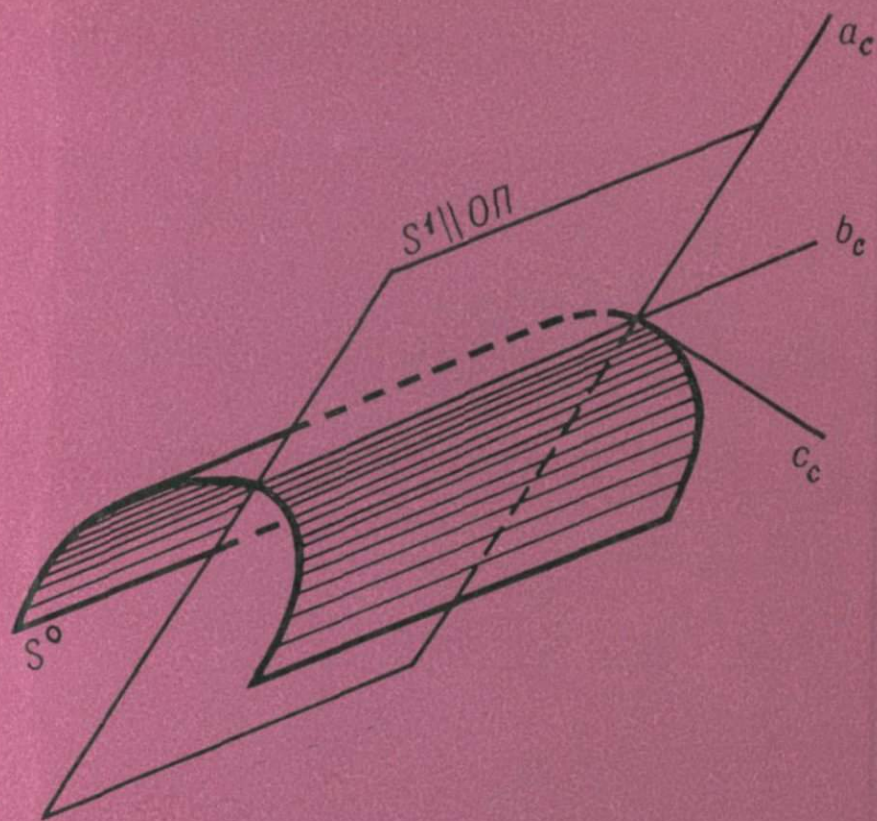
Определение плагиоклазов по координатам двойниковой оси	128
Диаграмма Заварицкого для определения плагиоклазов	133

Часть третья

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

<i>Глава IX.</i> Техника микроструктурного анализа	138
§ 37. Отбор ориентированных образцов	—
§ 38. Приготовление ориентированных шлифов	139
§ 39. Микроскопическая характеристика изучаемых минералов. Измеряемые элементы	141
§ 40. Оформление первичной документации	142
§ 41. Вынесение измерений на стереопроекцию. Планифера А. В. Пронина. Построение диаграмм	145
§ 42. Типы узоров частных микроструктурных диаграмм. Максимумы, пояса, конические траектории. Геометрический анализ	150
§ 43. Анализ диаграмм. Приведение к географическим координатам	155
<i>Глава X.</i> Элементы динамики и кинематики твердого тела	160
§ 44. Аморфные вещества, кристаллы, кристаллические агрегаты	—
§ 45. Деформация. Напряжение, его геометрическое выражение. Кривые стресс—деформация	161
§ 46. Внешние факторы, стимулирующие пластическую деформацию. Температура, время, летучие компоненты, нормальное и скальвающее напряжения	163
§ 47. Внутренние свойства кристаллов	166
<i>Глава XI.</i> Механизмы, контролирующие ориентировки минералов	167
§ 48. Пластическая деформация при низкой температуре. Трансляционное скольжение, двойникование, излом	168
§ 49. Пластическая деформация при высокой температуре. Пластическое течение. Типы крига	174
§ 50. Синдеформационная кристаллизация	178
<i>Глава XII.</i> Динамически равновесные ориентировки минералов метаморфических тектонитов	181
§ 51. Структурно-эквивалентные направления кристаллов	182
§ 52. Скорость продольной волны в монокристаллах минералов	183
§ 53. Типы ориентировок породообразующих минералов метаморфических тектонитов	185
<i>Глава XIII.</i> Примеры использования микроструктурного анализа при решении вопросов структурно-метаморфической петрологии	192
§ 54. Определение залегания макроскопически не выраженных структурных элементов	—
§ 55. Эволюция структурно-метаморфических парагенезисов	194
Структурно-геологическая ситуация	—
Микроскопическое описание образца	195
Ориентировка минералов	196
§ 56. Определение механизма ультраметаморфического процесса	200
Список литературы	202





5542