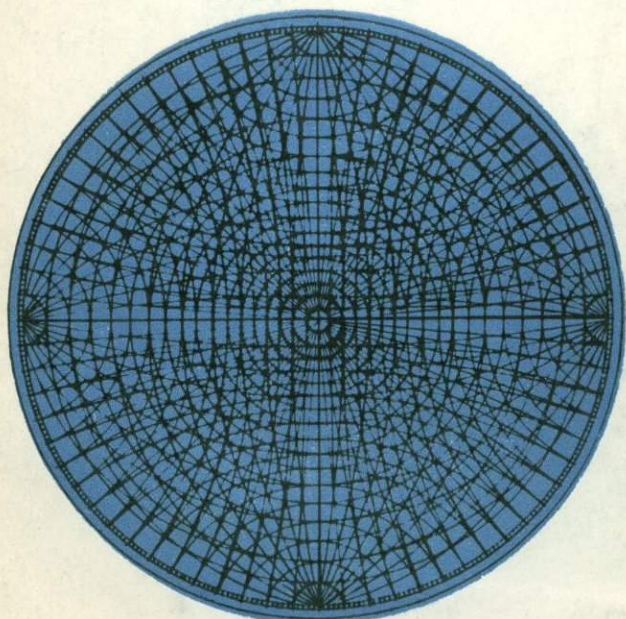


С.К. ОНИКИЕНКО

СПЕЦИАЛЬНЫЕ  
МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОРОДО-  
ОБРАЗУЮЩИХ  
МИНЕРАЛОВ  
В ПРОЗРАЧНЫХ  
ШЛИФАХ  
И ПРЕПАРАТАХ



С. К. ОНИКИЕНКО

СПЕЦИАЛЬНЫЕ  
МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ  
МИНЕРАЛОВ  
В ПРОЗРАЧНЫХ  
ШЛИФАХ  
И ПРЕПАРАТАХ

473



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»  
Москва · 1972



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Кристаллооптический метод исследования горных пород и минералов в отличие от других методов позволяет получить наиболее разнообразную, полную и точную информацию о их составе, происхождении, последующих изменениях и т. д. Это обусловило его ведущее положение в современной петрографии. Однако петрографические исследования относятся к числу наиболее трудоемких, сложных и предусматривают определенную подготовленность исполнителей для решения теоретических и практических вопросов, возникающих в ходе изучения геологических материалов. Поэтому своевременное восполнение и расширение знаний и навыков в этой области является непрямым элементом профессиональной деятельности.

Данная работа посвящена точным специальным методам исследования породообразующих минералов — иммерсионному и федоровскому. В ней в краткой форме описана основная аппаратура, требования к применяемым препаратам, теоретические и методические основы и последовательность операций. С необходимой детальностью изложена техника производства замеров и обработка данных. Кроме традиционных разделов в работу включены новые, но проверенные практикой прие-

мы исследований породообразующих минералов (метод фокального экранирования, методика исследования щелочных полевых шпатов и т. д.).

Автор выражает глубокую признательность А. М. Даминовой, Е. С. Доброхотовой, А. С. Марфунину за советы и замечания, сделанные по данной работе.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ  
МЕТОДЫ  
СРАВНИТЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

---

ГЛАВА I  
ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД

Задача определения показателей преломления минералов обычно решается путем последовательного погружения препарата, т. е. порошка мономинеральной фракции, в специально составленные жидкости, подобранные в убывающий (или возрастающий) по величине оптической плотности ряд. Сам способ такого определения носит название иммерсионного способа или метода (*immersio* — погружение).

Первые удачные попытки использования метода погружения для определения оптических констант минералов были предприняты немецким минералогом. О. Машке в 70-е годы XIX в. Им была разработана методика исследования, сходная с принятой в настоящее время. Однако работы О. Машке не вызвали интереса у современников и вскоре были забыты.

Но двадцатью годами позже, по мере того как в геологии росла потребность в точных измерениях вещественного состава горных пород, творческая мысль исследователей снова вошла в русло сравнительных определений оптической плотности минералов. Одно за другим были обнаружены явления, по частям воспроизводившие открытия О. Машке. В 1892 г. его соотечественник Ф. Бекке описал световую полосу, возникающую вблизи границы раздела двух сред, и использовал ее для сравнения показателей преломления минералов. Предложенный им способ на этот раз очень быстро вошел в практику и получил настолько широкое распространение, что сама световая полоска часто стала называться «полоской Бекке». В 1896 г. литолог И. Туле предложил способ приближенного количественного определения показателей преломления минералов по степени изменения их рельефа и шагреновой поверхности при погружении в некоторые жидкости (им было предложено всего шесть жидкостей). В 1899 г. И. Л. С. Шредер ван дер Кольк опубликовал краткое руководство для определения веществ по величинам их показателей преломления. В 1900 г. были опубликованы составленные им таблицы показателей преломления минералов и перечень применяемых для их определения

жидкостей, около 60 названий. С этого времени иммерсионный метод прочно вошел в практику кристаллооптических исследований минералов.

Иммерсионный метод применяется чаще всего в тех случаях, когда возникает необходимость определения точных (до третьего знака после запятой и выше) значений величин показателей преломления минералов.

Однако было бы неправильно рассматривать его как частный метод, позволяющий решать лишь узкие вопросы минералогических исследований. Величины показателей преломления минералов являются главными критериями их оптической анизотропии. Располагая точными значениями этих величин, можно рассчитать остальные оптические константы (табл. 1).

Оптические константы минералов

Таблица 1

Константы	Одноосные минералы		Двуосные минералы	
	положительные	отрицательные	положительные	отрицательные
Оптический знак	$n_e > n_o$	$n_e < n_o$	$(n_g - n_m) > (n_m - n_p)$	$(n_g - n_m) < (n_m - n_p)$
Сила двупреломления	$(n_e - n_o)$	$(n_o - n_e)$	$(n_g - n_p)$	$(n_g - n_p)$
Величина угла $2V$	—	—	$\operatorname{tg} V = \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}$	$\operatorname{tg} V = -\sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}$

Другие константы, такие, как углы угасания, характер главной зоны, адсорбция и плеохроизм, могут быть получены при исследовании иммерсионных препаратов точно так же, как и при изучении прозрачных шлифов.

Таким образом, иммерсионный метод можно рассматривать как самостоятельный метод изучения вещественного состава горных пород. Методика иммерсионных исследований хотя и не сложна, но трудоемка, требует отработки навыков, тщательности в работе, строгого учета условий, в которых производятся исследования, и в частности температурного режима.

Все это, по-видимому, до сих пор несколько сдерживает распространение метода в обычной практике петрографических исследований.

### ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

При переходе света из одной прозрачной среды в другую происходит преломление лучей. Количественная сторона этого явления, как известно, описывается формулой Снелия-Декарта:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

где  $i$  и  $r$  — углы падения и преломления луча соответственно,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления сред.

Если луч падает на границу раздела со средой оптически менее плотной, чем та, в которой свет распространялся до сих пор ( $n_1 > n_2$ ), то при некотором значении  $i$  он не проникает через границу раздела, а распространяется вдоль нее. При дальнейшем увеличении  $i$  луч отражается от ее поверхности, т. е. происходит явление полного внутреннего отражения. Определенный интерес представляет критический момент этого явления, т. е. то неравновесное состояние, при котором свет еще не отражается от плоскости раздела граничащих сред, но уже не проникает из одной среды в другую\*. Величина  $\sin i$  в этом случае определяется из приведенной формулы (1) после ее преобразования. Так, при  $r = 90^\circ$   $\sin r = 1$ , тогда

$$\sin i_{\text{кр}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

т. е. синус критического угла падения луча определяется соотношением величин показателей преломления соприкасающихся (граничащих) сред.

Решение формулы (2) относительно одного из неизвестных членов ( $n_1$  или  $n_2$ ), строго говоря, допускает бесконечное множество вариантов численных соотношений двух других известных членов ( $r$  и  $i$ ).

Положение существенно изменяется, если одному из известных членов придано значение постоянной величины, а другому независимой переменной. При этом условия становятся возможными только два варианта: в первом за постоянную величину принимается  $i_{\text{кр}}$ , тогда неизвестный показатель преломления ( $n_2$ ) становится функцией известного ( $n_1$ ), во втором варианте за постоянную величину принимается один из показателей преломления ( $n_1$ ), тогда второй неизвестный становится функцией  $i$ . Оба варианта находят применение в практике иммерсионных исследований. Так, при определении показателей преломления минерала положению луча по отношению к плоскости раздела минерал — жидкость в микроскопе придано постоянное направление, параллельное оптической оси прибора, т. е.  $i = \text{const}$  (первый вариант). Последовательно подбирая величины показателей преломления жидкостей, постепенно добиваются выравнивания оптических плотностей жидкости и минерала. Момент, когда преломление света на границе раздела переходит в полное внутреннее отражение (или наоборот), принято считать моментом максимального сближения величин показателей преломления, т. е.  $n_1 \approx n_2$ .

При проверочных определениях показателей преломления иммерсионных жидкостей на жидкостном рефрактометре за по-

\* Свет проникает в отражающую среду, но углубляется в нее не более чем на длину волны.

стоянную величину принимается показатель преломления стекла оптических призм рефрактометра, т. е.  $n_1 = \text{const}$  (второй вариант). Последовательно меняя величину  $i$ , постепенно устанавливают ее значение, равное  $i_{\text{кр}}$ . Показатель преломления жидкости определяется как функция  $i$ .

Индикатором для сравнения оптической плотности двух сред под микроскопом является поведение световой полоски. При определенном состоянии оптической системы микроскопа она появляется в непосредственной близости от границы раздела. При поднятии тубуса световая полоска перемещается в сторону среды с большим показателем преломления.

Задача иммерсионных определений сводится к тому, чтобы, используя эффект световой полоски, найти точное место положения показателей преломления изучаемого минерала относительно иммерсионного ряда.

*Область применения.* При петрографических исследованиях магматических и метаморфических пород иммерсионный метод применяется главным образом в том случае, когда перед исследователями поставлена специальная тематическая задача детального изучения той или другой группы породообразующих минералов.

Значительно шире метод используется при изучении пирокластических и осадочных пород, особенно рыхлых, неконсолидированных образований — пеплов, туфов, песков, алевритов. В этом случае предметом исследований могут быть не только породообразующие минералы, но и их крипстокристаллические агрегаты и вулканические стекла.

*Точность метода.* В основе сравнительной оценки величин показателей преломления лежит использование такого чуткого индикатора, как световая полоска. В обычных условиях исследования — в естественном полихроматическом свете и без специальных приспособлений — световая полоска уверенно фиксирует различие в показателях преломления двух граничащих сред, если эти различия измеряются хотя бы в 0,001.

В иммерсионном наборе интервал между соседними номерами жидкостей измеряется обычно от 0,003 до 0,006.

Точность метода принимают за полуразность показателей ближайших жидкостей к определяемому показателю минералов (полуинтервал)  $\pm 0,001$ , т. е. она колеблется от 0,002 до 0,004.

Некоторые исследователи (Татарский В. Б. и др.), используя дополнительные признаки — скорость перемещения световой полоски в одной и в другой жидкости, явление дисперсии света и т. д., — склонны поднимать точность метода до 0,001.

## ИММЕРСИОННЫЕ ЖИДКОСТИ

В практике иммерсионных исследований используют специально приготовленные наборы жидкостей, которые составляют ряд по мере возрастания показателя преломления. Крайними

членами такой ряд должен охватывать достаточно широкий диапазон показателей и в то же время соседние члены ряда в наборе должны иметь достаточно узкий интервал величин.

Основой для составления набора являются несколько жидкостей:

- а) керосин и легкие возгоны нефти —  $n_D = 1,400$  до  $1,460$ ;
- б)  $\alpha$ -моноклорнафталин ( $C_{10}H_7Cl$ ) —  $n_D = 1,633$ ;
- в) йодистый метилен ( $CH_2I_2$ ) —  $n_D = 1,740$ ;
- г) насыщенный раствор серы в йодистом метиле до  $n_D = 1,780$ .

Эти жидкости хорошо растворяются друг в друге и отличаются удовлетворительной стабильностью растворов, устойчивых при воздействии температурных колебаний и не меняющих начальной концентрации при испарении. Для того чтобы получить жидкость с заданным показателем преломления, смешивают в определенной пропорции ближайшую пару исходных жидкостей.

При длительном хранении наборов иммерсионных жидкостей некоторые из них, особенно те, в состав которых вошел метилен, становятся менее устойчивыми, поэтому время от времени необходимо проверять их свойства.

Все жидкости имеют неприятный запах, поэтому работать с ними надо при хорошей вентиляции помещения.

В стандартном наборе содержится до 96 жидкостей с показателями преломления от  $1,408$  до  $1,780$  и интервалом между соседними членами ряда от  $0,003$  до  $0,006$ .

Набор хранится в специальном ящике. Жидкости содержатся в стеклянных флаконах с притертыми пробками. На каждом флаконе указан порядковый номер жидкости, а на крышке ящика в таблице — соответствующий номеру показатель преломления, установленный для следующих условий: температура  $+20^\circ C$ , свет монохроматический, желтый с длиной волны  $\lambda = 589$  (свет раскаленных паров натрия). При отклонении температуры на один градус показатель преломления жидкости изменяется в среднем на  $0,0005$ . Изменение показателя происходит пропорционально изменению плотности жидкости — при повышении температуры и понижении плотности жидкости показатель преломления понижается, при понижении температуры — повышается. Так, при температуре воздуха в лаборатории  $+24^\circ C$  все показатели преломления стандартного набора следует считать ниже в среднем на  $0,002$  указанных в таблице. Не следует во время работы поддвигать осветитель слишком близко к микроскопу, а также держать пальцы рук у самого препарата.

## ПРЕПАРАТ

При иммерсионных исследованиях объектом изучения является порошок мономинеральной фракции (в магматических и метаморфических породах) или порошок тяжелой фракции (в песках и кластических породах).

Иммерсионный препарат готовится следующим образом. На чистое предметное стекло острием препарироваальной иглы переносится небольшое количество порошка. Для облегчения операции переноса поверхность иглы можно сделать влажной, подышав на нее. Перенесенный порошок покрывают небольшим обломком покровного стекла. Препарат готов. Недостатком такого препарата будет то, что при введении в него жидкости мелкие частицы порошка будут плавать в ней, перемещаясь в поле зрения. Это затрудняет выбор нужного зерна и часто приводит к необходимости изготовления препарата с новой порцией порошка. Поэтому, если материала очень мало и ограничены возможности приготовления новых препаратов, прибегают к закреплению частиц порошка на предметном стекле. Для этого поступают следующим образом: на порошок, перенесенный на предметное стекло, осторожно опускают каплю чистой (водопроводной) воды. (Стекло не должно быть жирным, иначе весь порошок будет сдвинут на края капли). Над электроплиткой порошок просушивают. В высушенном препарате частицы его устойчиво закреплены на месте.

### ВВЕДЕНИЕ И УДАЛЕНИЕ ИММЕРСИОННОЙ ЖИДКОСТИ

Прежде чем приступить к работе, необходимо освоить навыки введения жидкости в препарат, научиться удалять следы иммерсионной жидкости путем промывки препарата растворителями

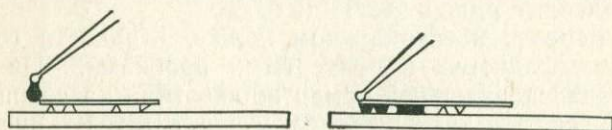


Рис. 1. Ввод иммерсионной жидкости в препарат

и т. д. Для того чтобы ввести жидкость в препарат, поступают так: из флакона с жидкостью на конце стеклянной палочки, оттянутой из нижней части притертой пробки, берется капля жидкости и подносится к щели между предметным и покровным стеклами. Капиллярными силами жидкость втягивается в щель, расплывается под покровным стеклом и затопляет порошок (рис. 1). Обычно нужно 1—2 капли жидкости.

Препарат исследуется под микроскопом. После того как проделана необходимая работа и возникла необходимость смены жидкости, ее удаляют. Для этого к той же щели подносится ребром лист ровно обрезанной фильтровальной бумаги, на которую и собирается жидкость. Для удаления ее следов из препарата под покровное стекло вводится нейтральный растворитель, обычно спирт. Он удаляется также фильтровальной бумагой. Операция промывания спиртом повторяется дважды. После этого можно приступить к работе с новой жидкостью.

## ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор объектов исследования является одной из методических трудностей иммерсионного метода. Трудность заключается и в том, что отдельные частицы исследуемой фракции имеют разную толщину, что существенно меняет величину разности хода в них, и в том, что зерна минерала или его обломки в приготовленном препарате ориентированы произвольно.

Приступая к замерам, необходимо найти зерна с ориентированным положением осей индикатрисы, т. е. найти ориентированные разрезы. Только в этом случае возможно решение поставленной задачи. Из всех возможных ориентированных разрезов предпочтительны два — разрез, параллельный плоскости оптических осей в двуосном кристалле или параллельный оптической оси в одноосном, и разрез, перпендикулярный оптической оси.

В одноосном кристалле для определения величин  $n_o$  и  $n_e$  достаточно замеров на первом разрезе. Второй разрез будет контрольным, замеры на нем должны продублировать значение  $n_o$ .

В двуосном кристалле замеры на первом разрезе дадут значение  $n_g$  и  $n_p$ , замеры на втором — значение  $n_m$ . Разрезы, перпендикулярные острой и тупой биссектрисам, лучше использовать как контрольные.

Ориентировка разрезов проверяется в сходящемся свете.

## ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Выбранное зерно минерала ориентируется на столике микроскопа и совмещается с перекрестием нитей окуляра. В скрещенных николях определяется направление и наименование осей индикатрисы, в сходящемся свете — точность ориентировки разреза.

На разрезе  $NgNp$  одна из осей индикатрисы, например  $Np$ , совмещается с главным сечением поляризатора. Точность совмещения определяется по наступлению погасания. Анализатор выключается, и, постепенно подбирая жидкости, определяют значение  $n_p$ . Затем, повернув столик микроскопа на  $90^\circ$ , совмещают с главным сечением поляризатора ось индикатрисы  $Ng$ . Совмещение проверяется в скрещенных николях. Определение  $n_g$  ведется при одном николе. Таким образом, каждый показатель преломления минерала определяется индивидуально.

В том случае, когда название минерала ранее было определено и пределы колебаний  $n_g$  и  $n_p$  известны из справочника, исследование можно начинать с жидкости, имеющей промежуточное значение показателя преломления.

При достаточной величине силы двупреломления можно наблюдать, как при поднятии тубуса световая полоска идет на минерал в направлении оси  $Ng$  и в то же время на жидкость в направлении оси  $Np$ . Однако можно заранее утверждать, что такой случай будет редким.

Чаще (на первых порах это очень часто) начально взятая жидкость (назовем ее  $n_D$ ) будет иметь показатель преломления на много выше или ниже и  $n_g$  и  $n_p$ . Очень важно установить, насколько велика эта разница.

Если световая полоска во всех направлениях идет на минерал или с минерала и движется примерно с равной скоростью, подбор жидкостей можно производить через интервал. Как только обозначилась разница в скоростях движения полоски, жидкости меняются последовательно, каждый номер.

Определяя значение одного из показателей преломления, например  $n_p$ , надо, постепенно повышая показателя жидкости, достигнуть такого положения, когда одна из последовательно взятых жидкостей (предпоследняя) имеет  $n_D$  все еще ниже  $n_p$ , а следующая за ней ( $n_{D+1}$ ) уже выше  $n_p$ , т. е.  $n_p$  «взято в вилку». Далее значение  $n_p$  определяется как среднеарифметическое по формуле

$$n_p = \frac{n_D + n_{D+1}}{2} \pm 0,001.$$

В той же последовательности определяется  $n_g$ .

**Пример.** Надо определить значение показателей преломления обыкновенной роговой обманки. Выбран разрез  $NgNp$ . Показатель начально взятой жидкости  $n_D = 1,608$  намного ниже показателей минерала — световая полоска при подъеме тубуса во всех направлениях идет на минерал. С главным сечением поляризатора совмещается ось  $Np$ . Через 2—3 интервала в направлении повышения показателя производится несколько смен жидкости. После жидкости с  $n_D = 1,628$  ниже  $n_p$ , следующая жидкость с  $n_{D+1} = 1,632$  выше  $n_p$ . Тогда

$$n_p = \frac{1,628 + 1,632}{2} \pm 0,0001 = 1,630 \pm 0,001.$$

Определяется значение  $n_g$ . Столик микроскопа повернут на  $90^\circ$  (в любую сторону). Совмещение  $Ng$  с плоскостью поляризатора проверено в скрещенных николях.

По справочнику (можно использовать любой справочник по кристаллооптике минералов) установлено, что величина силы двупреломления обыкновенной роговой обманки ( $n_g - n_p$ ) может колебаться от 0,014 до 0,026.

Ближайшее возможное значение  $n_g$  следует ожидать, начиная с величины 1,642. Пропускаются первые три интервала (жидкости с  $n_D = 1,633, 1,637, 1,640$ ) и с  $n_D = 1,643$  последовательно подряд проверяются все жидкости. После жидкости с  $n_D = 1,649$  ниже  $n_g$  взята жидкость с  $n_{D+1} = 1,654$  выше  $n_g$ .

$$n_g = \frac{1,649 + 1,654}{2} \pm 0,001 = 1,6515 \pm 0,0010.$$

Для определения  $n_m$  выбирается зерно, ориентированное перпендикулярно оптической оси (изотропное сечение). Роговая обманка — оптически отрицательный минерал —  $(n_g - n_m) < (n_m - n_p)$ , поэтому значение  $n_m$  ближе к  $n_g$ , чем к  $n_p$ . Исходя из этого, подбор жидкостей можно начинать с  $n_D$ , близком  $n_g$ , но не выше его. В нашем примере — с  $n_D = 1,649$ .

Далее операции по замеру  $n_m$  идут в обычном порядке.

## ДИСПЕРСИОННЫЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКОСТЯХ

В процессе работы с иммерсионными препаратами часто приходится сталкиваться с явлением, уже известным по дисперсионному эффекту Лодочникова, — при поднятии тубуса по обе стороны от границы раздела возникают цветные световые полосы — золотисто-розовая и голубовато-зеленая. По мере поднятия тубуса они раздвигаются в стороны — золотисто-розовая перемещается на среду с более низким показателем преломления, голубовато-зеленая — на среду с более высоким. При опускании тубуса полосы меняются местами.

Причина возникновения цветных световых полосок заключается в следующем. Световые волны различной длины, входящие в спектр естественного света, распространяются с равными скоростями только в пустоте. В любой другой среде — газовой, жидкой или твердой — скорости волн не равны. И хотя величина относительного неравенства может быть различной, у коротковолновой части спектра (сине-фиолетовые цвета) скорости всегда меньше, а показатели преломления — больше, чем у длинноволновой части (оранжево-красные цвета).

Подходя к границе раздела двух сред, световые волны разных частей спектра образуют разные по величине углы преломления и углы полного внутреннего отражения. Из формулы

$$\sin i = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления граничащих сред, при этом  $n_2 < n_1$ ,  $i$  — угол полного внутреннего отражения, следует, что у сине-фиолетовой части, показатели преломления которой больше, полное внутреннее отражение произойдет при более пологих углах падения, т. е. тогда, когда волны оранжево-красного света еще проходят через границу раздела. Иначе говоря, в условиях дисперсии света, т. е. разложения световых волн по скорости их распространения, граница раздела двух сред является своеобразным фильтром: начиная с определенной величины угла, под которым пучок лучей обыкновенного света подходит к границе раздела, через нее в низкопреломленную среду проходят волны оранжево-красной части спектра, а сине-фиолетовой — отражаются.

При поднятии тубуса это явление обнаруживает себя по появлению цветных световых полосок. Наблюдая за темпом перемещения световых цветных полосок, можно заметить следующие варианты: а) цветные полосы расходятся равномерно в обе стороны от границы раздела; б) цветные полосы расходятся неравномерно: одна быстрее, другая медленнее.

Объясняется это характером дисперсии: в органических жидкостях, в частности, в иммерсионных, дисперсия света выражена резче, чем в кристаллических телах. Для наглядности это можно

проиллюстрировать на графиках изменения показателей преломления твердых и жидких тел в видимой части спектра (рис. 2).

Дисперсия в жидкостях на графике, где по вертикали отложены величины показателей преломления, а по горизонтали — длины световых волн или цвета спектра, будет иметь вид кривой, относительно круто падающей от длинноволновой к коротковолновой

части спектра. Кривая дисперсии в твердых телах в том же диапазоне показателей преломления имеет более пологую форму и совпадает с первой кривой, пересекает ее в одной какой-то точке в пределах видимого спектра. Совпадение может произойти в коротковолновой (синефиолетовой), средней (желтой) или длинноволновой (оранжевокрасной) частях спектра.

Как поведут себя цветные полосы при подъеме тубуса? Из анализа кривых устанавливается следующее:

а) во всех случаях в коротковолновой части спектра показатель жидкости выше, чем у минералов, а в длинноволновой, наоборот, ниже. Таким образом, голубовато-зеленая полоска всегда перемещается на жидкость, а золотисто-розовая — на минерал;

б) темп перемещения цветных полосок зависит от того, в какой части спектра происходит совпадение показателей преломления жидкости и минерала. На место совпадения указывает наименее подвижная полоска. Так, медленное перемещение голубовато-зеленой полоски говорит о том, что совпадение показателей происходит в коротковолновой части спектра (см. рис. 2, а).

Цветные полоски могут появиться при значительных различиях показателей жидкости и минерала (до 0,010—0,015) и тем в значительной мере усложняют дальнейшую работу с препара-



Рис. 2. Кривые дисперсии преломления в жидкостях (сплошные линии) и в кристаллах (штриховые) для случаев равенства показателей преломления в различных частях спектра: в синей (а), желтой (б) и красной (в). Векторами на схеме над графиками показаны относительные скорости и направления перемещения полосок при поднятии тубуса

том. В этом случае рекомендуется переходить на монохроматический желтый (натровый) свет. Следует только помнить, что бесцветный минерал при совпадении показателей преломления становится невидимым в жидкости, а световая полоска исчезает.

Можно продолжать работу и с цветными полосками, как это рекомендует В. Б. Татарский (1965), но ориентироваться надо на одну из них, наиболее подвижную.

### ПРОВЕРКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ. РЕФРАКТОМЕТРЫ

Необходимость в проверке возникает в двух случаях. Периодическая проверка показателей жидкостей необходима, так как при длительном хранении возможны изменения первоначального зна-

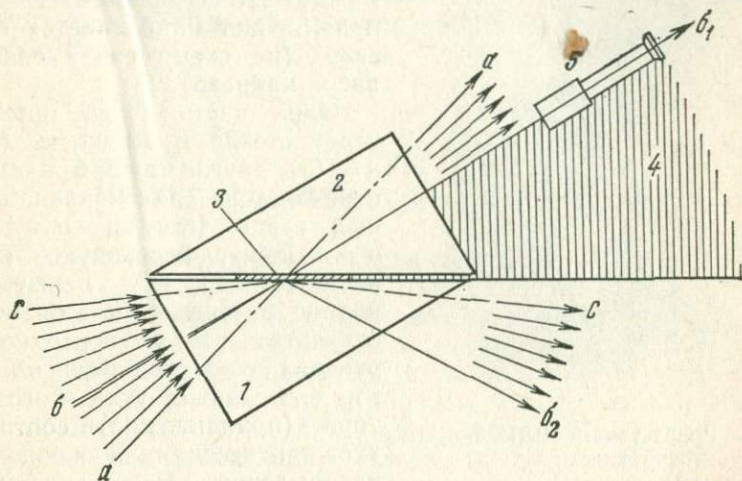


Рис. 3. Ход лучей в рефрактометре.

1—2 — призмы рефрактометра; 3 — испытуемая жидкость; 4 — теневой сектор; 5 — зрительная труба.

чения их величин. Это относится ко всей части ряда, начиная от значения  $n_D = 1,640$  и выше, т. е. к тем жидкостям, в состав которых вошел метилен. Кроме того, в процессе работы систематический контроль за изменением величин показателей преломления необходим в связи с тем, что разные жидкости по-разному реагируют на температурные отклонения. Принятая норма отклонения —  $0,0005$  на  $1^\circ\text{C}$  — справедлива только как средняя норма для какой-то средней части ряда. У низкопреломляющих жидкостей эти отклонения обычно равны  $0,0004$  на  $1^\circ\text{C}$ , у высокопреломляющих достигают  $0,0007$ .

При детальных минералогических исследованиях контроль значений показателей жидкостей становится не переменным элементом работы. Для проверки используют приборы — рефрактометры.

Устройство рефрактометров основано на использовании явления полного внутреннего отражения, возникающего на границе двух сред. Принципиальная схема приборов несложна.

На рис. 3 приведена схема наиболее распространенного и простого в эксплуатации жидкостного рефрактометра РЛУ (рефрактометр Аббе или Аббе-Пульфриха). Основной его частью являются призмы высокопреломляющего стекла ( $n_0 = 1,700$ ).

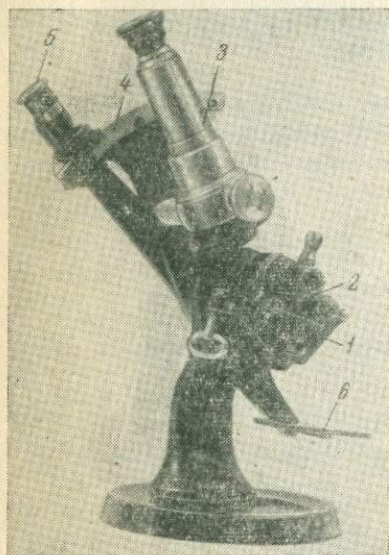


Рис. 4. Рефрактометр РЛУ (общий вид).

1—2 — призма рефрактометра в оправе;  
3 — зрительная труба; 4 — алидада;  
5 — визирная лупа; 6 — зеркало

ее на оси, найти границу света и тени и совместить ее с серединой поля зрения. Найденный угол, заключенный между сторонами, одна из которых лежит в плоскости границы раздела двух сред, а другая совмещена с осью зрительной трубы, является критическим углом падения. Зная его величину, значение показателя преломления жидкости можно рассчитать по формуле

$$n_D = n_0 \sin i_{кр},$$

но при постоянном значении величины преломления одной среды (стекло —  $n_0$ ) величина показателя преломления другой ( $n_D$ ) является функцией величины критического угла падения. Это дает возможность на алидаду, которой снабжен прибор, вместо градуировки углов  $i_{кр}$  нанести соответствующие им значения показателей преломления жидкостей с заранее рассчитанными поправками.

Две треугольные призмы (рис. 3, 1 и 2) сложены так, что напоминают одну прямоугольную, разрезанную по диагонали. Испытуемая жидкость 3 помещается между прилегающими гранями призмы. Свет направляется снизу вверх (на схеме снизу слева — вверх направо).

Одна часть лучей проходит через стекло и жидкость (лучи  $a - b_1$ ), другая (лучи  $b_2 - c$ ) при переходе из высокопреломляющей среды (стекло —  $n_0 = 1,700$ ) в низкопреломляющую (жидкость —  $n_D < 1,700$ ) испытывает полное внутреннее отражение, в результате чего за поверхностью раздела создается теневой сектор 4. Величина угла этого сектора (приблизительно) соответствует критическому значению угла преломления. Чтобы измерить его, надо с помощью зрительной трубы 5, опуская или поднимая

Благодаря этому работа с прибором предельно упрощается. После того как в поле зрения прибора установлена граница света и тени, положение зрительной трубы фиксируется и через специальную соосно с ней совмещенную лупу на алидаде с точностью до 0,0002 берется значение показателя преломления жидкости.

Общий вид прибора приведен на рис. 4. Рефрактометр РЛУ прост в обращении, имеет достаточную точность, требует минимального количества испытуемой жидкости (одну-две капли). Верхний предел показателя преломления жидкости, которую можно испытывать на приборе, ограничен показателем преломления стекла призмы ( $n_0=1,700$ ).

В настоящее время применяется несколько конструкций рефрактометров\*. Среди них особый интерес представляют кристалл-рефрактометры — приборы, позволяющие замерять величины показателей преломления минералов непосредственно на их кристаллах\*\*.

## ГЛАВА II

### МЕТОД ФОКАЛЬНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

773  
Модификацией метода погружения является серия методов фокального экранирования. Эти методы позволяют с достаточной точностью производить определение показателей преломления минералов. Исследования при этом ведутся не на одиночных зернах, выбранных в препарате, а по всей группе зерен, находящихся в поле зрения, таким образом определение производится на основании статистических данных. Одним из преимуществ метода является возможность выяснения дисперсии преломления минералов в видимой области спектра.

*Краткая предыстория метода.* В конце XIX в., т. е. примерно в то время, когда складывалась методика иммерсионных исследований, немецкий физик Тепплер предложил способ определения малых отклонений показателей преломления в однородных средах — в газах, жидкостях и твердых телах. Им была сконструирована несложная оптическая установка, главной особенностью которой является двойное экранирование в фокальных плоскостях применяемых линз. Принципиальная схема установки приведена на рис. 5.

При двойном фокальном экранировании устраняется затухающий эффект бокового освещения и за счет этого резко возрастает чувствительность центрального пучка лучей, идущего от

\* Подробно о конструкциях рефрактометров изложено в учебнике В. Б. Тарского «Кристаллооптика и иммерсионный метод», М., «Недра», 1965, с. 216—228.

\*\* Кристалл-рефрактометр и работа на нем кратко описаны там же.

точечного источника света, к малейшим изменениям оптической плотности среды. С помощью установки Тепплера выявляются неоднородности показателей преломления стекла в оптической промышленности. Позже эта установка нашла применение в аэродинамике для изучения изменения плотности газа в воздушном потоке и т. д.

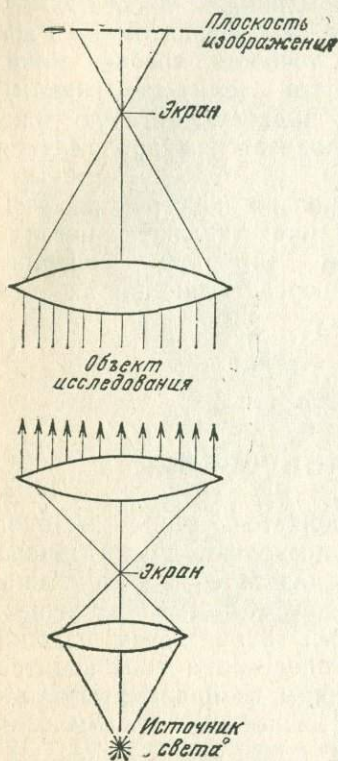


Рис. 5. Схема оптической установки Тепплера с двойным фокальным односторонним экранированием (по С. Таланскому)

В середине 50-х годов XX в. была впервые предпринята попытка использовать сходную оптическую схему для определения показателей преломления минералов. Так Ю. А. Черкасов (1956 г.) разработал серию методов определения показателей преломления и дисперсии преломления минералов на установках с разными способами экранирования — методы одностороннего, кольцевого и центрального экранирования.

Наибольший интерес представляет метод кольцевого экранирования. Ниже излагаются его сущность и техника выполнения замеров.

#### ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ОСНОВА МЕТОДА

Если исследовать известную формулу Снелия-Декарта

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

для условия  $n_1 = n_2$ , то надо допустить, что и  $\sin i = \sin r$ , т. е. при равенстве показателей преломления двух соприкасающихся сред углы падения и преломления будут также равны. Иначе говоря, свет в данных условиях пройдет границу раздела прямолинейно, не преломляясь, независимо от того, под каким

углом он к ней подошел (рис. 6). Оптический эффект этого явления выразится в том, что прозрачное тело ( $n_1$ ) независимо от его внешней формы в прозрачной среде ( $n_2$ ) становится совершенно невидимым.

В жидких органических средах, обладающих значительной величиной дисперсии преломления, например в иммерсионных жидкостях, эффект «невидимости» может наблюдать только в монохроматическом свете, т. е. только при строго определенной длине световых волн. Но равенство  $n_1 = n_2$ , достигнутое для данной длины волн ( $\lambda_3$ ) или данного участка спектра, не сохраняется для других его участков (рис. 7).

В обычных же условиях иммерсионных исследований при  $n_1 \approx n_2$  появляются дисперсионные полосы золотисто-розовая и голубовато-зеленая, расположенные по разные стороны от границы раздела, что указывает на присутствие двух групп волн —

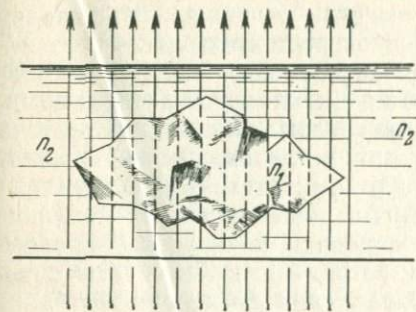


Рис. 6. Прохождение света через границу раздела двух сред при равенстве их показателей преломления

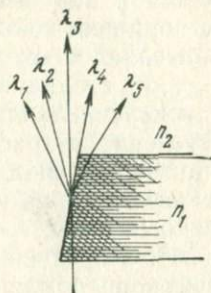


Рис. 7. Прохождение света через границу раздела двух сред при значительной величине дисперсии преломления

одних, испытавших преломление при прохождении через границу раздела, и других претерпевших полное внутреннее отражение. При поднятии тубуса дисперсионные полосы расходятся от границы раздела. При двойном кольцевом фокальном экранировании возникает другое явление — оптической системой устранены и преломленные и отраженные волны. В узком прямолинейном пучке через преломляющие участки зерна минерала, по его периметру, проходят только те волны, для которых достигнуто равенство  $n_1 = n_2$ , т. е. волны, не испытывающие преломления. В связи с тем, что равенство показателей преломления минерала и жидкости может быть достигнуто в любой части видимой области спектра, каемка зерна минерала окрашивается в соответствующий цвет (от красного до фиолетового). В отличие от дисперсионных полосок цветные каемки неподвижны и при поднятии тубуса микроскопа не смещаются. Схема, поясняющая возникновение цветных каемок, приведена на рис. 8.

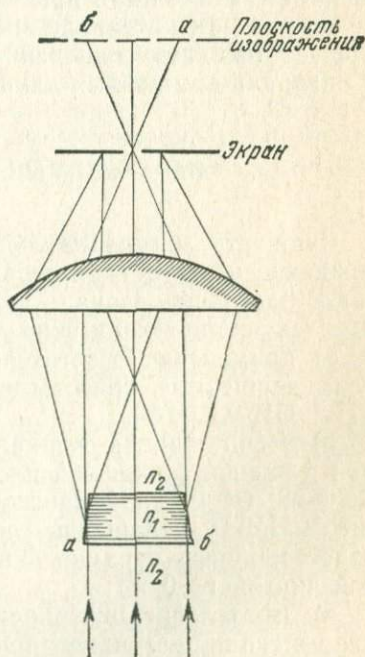


Рис. 8. Схема, поясняющая появление цветных кайм у зерен минералов при кольцевом экранировании (по Ю. А. Черкасову)

Метод фокального экраниро-

вания, таким образом, позволяет установить точные величины показателей преломления минералов в конкретных диапазонах световых волн, т. е. в основе своей он призван решать вопрос о дисперсии минералов. Но для практического решения этой задачи необходимо знать точные величины дисперсии сред, в которых ведутся исследования. Это учтено при составлении наборов иммерсионных жидкостей и они снабжаются специальными таблицами, в которых даны поправки показателей преломления жидкостей для определенных интервалов их ряда, при исследовании их в монохроматическом свете с заданными длинами световых волн.

Величины дисперсии жидкостей  $\Delta n$  колеблются в широких пределах и постепенно возрастают с ростом показателей преломления. Так, например (в наборах, изготовленных Львовским заводом), в начале ряда при  $n_D=1,400$  величина дисперсии  $\Delta n$  равна 0,005 (для красного света,  $\lambda=670$  нм,  $-0,001$ , для голубого,  $\lambda=500$  нм,  $+0,004$ ), в средней части ряда при  $n_D=1,600$   $\Delta n=0,022$ , и, наконец, в высокопреломляющей части ряда при  $n_D=1,780$   $\Delta n=0,042$ . В связи с тем, что значение  $\Delta n$  в несколько раз превышает интервалы изменения  $n_D$  соседних жидкостей в наборе, появляется практическая возможность исследовать дисперсию минералов, замерив его показатели преломления в нескольких жидкостях, близких в ряду (в интервале значений  $n_D$ , равном  $\Delta n$ ). В этом случае следует ожидать совпадение показателей преломления жидкости и минерала при разных длинах волн, т. е. в разных частях спектра.

## НЕОБХОДИМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

Сущность метода заключается в том, чтобы установить прохождение через преломляющие участки зерен минералов световых волн узкого диапазона — волн одного цвета. Для этого необходимы следующие технические условия:

а) применение осветителей с точечными источниками света или оснащенные ирисовыми диафрагмами (пригодны осветители ОИ-7, ОИ-9, ОИ-21);

б) использование специальных объективов с ирисовой диафрагмой в задней фокальной плоскости. Пригодны объективы ОСФ-16, ОСФ-22, ОСФ-40. Микроскоп МП-7 снабжен специальным объективом ИМ-18, оснащенный ирисовой диафрагмой и задвижкой для одностороннего экранирования, а также специальной конденсорной линзой (А-0,28);

в) тщательное центрирование источника освещения и получение узкого параллельного пучка лучей.

Центрирование освещения производится следующим образом:

1. Сузить выходное отверстие диафрагмы осветителя примерно на  $1/2$ .

2. Установить специальный объектив с ирисовой диафрагмой.

3. Отцентрировать положение источника освещения относительно поля зрения. Для этого:

а) убрать матовое стекло (и светофильтры);

б) включить линзу Бертрана;

в) манипулируя отражательным зеркалом микроскопа, установить светящуюся точку в центре поля зрения;

г) сузить диафрагму объектива на  $\frac{3}{4}$  и убедиться, что светящаяся точка сохранила положение посередине полученного отверстия. В случае необходимости уточнить ее положение небольшими наклонами отражательного зеркала;

д) сузить до предела диафрагму осветителя, а затем и диафрагму объектива. При правильной отладке светящаяся точка должна находиться посередине поля зрения. Между нею и кругом, ограниченным диафрагмой, должен быть некоторый зазор.

*Подготовка препарата.* Препарат готовится обычным способом. Единственное требование сводится к тому, чтобы порошок мономинеральной фракции не создавал перекокс покровного стекла. Последнее легко обнаруживается по изменению центрировки освещения при вращении столика микроскопа.

Эту часть работы лучше выполнить в такой последовательности:

а) приготовленный препарат укрепить на столике микроскопа;

б) повернуть столик микроскопа на один оборот (линза Бертрана включена) и при этом проследить за положением светящейся точки. Точка должна оставаться в центре поля зрения;

в) если точка описывает заметную окружность, то препарат надо снять, приподнять покровное стекло и осторожно с помощью препарироваальной иглы убрать наиболее крупные зерна. Или приготовить новый препарат.

### ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

На начальном этапе работы используется обычная методика исследования, т. е. при обычном освещении препарата — полуоткрытых диафрагмах осветителя и объектива, включенном матовом стекле — по поведению световой полосы сравнивается величина показателей преломления минерала и жидкости. Ход исследования контролируется периодическими наблюдениями при суженной диафрагме объектива. Если в этих случаях краевые части зерен минерала имеют темные каймы, смену жидкостей можно производить широким интервалом значений  $n_D$  (до  $\frac{2}{3} \Delta n$ ). Положение цветных каемок, представленных крайними участками спектра — коричнево-красной, если смена жидкостей велась в сторону понижения  $n_D$ , или сине-фиолетовой, если смена велась в сторону повышения  $n_D$ , — указывает на то, что показатели преломления минерала и жидкости сближаются. Необходимо перейти на режимное освещение и уменьшить интервал значений  $n_D$  (до  $\frac{1}{2}$  —  $\frac{1}{3} \Delta n$ ). Определение показателей преломления ведется при появлении цветных каемок, окрашенных в средние части спектра — желтую, желто-зеленую, зеленую, голубую.

Вследствие анизотропии минералов совпадение показателей преломления жидкости и минерала в направлении разных осей индикатрисы будет происходить в разных диапазонах длин волн, а стало быть и цвета каемок в этих направлениях будут разные. Например, у неизвестного минерала, погруженного в жидкость с  $n_D=1,640$ , во всех зернах в направлении  $Np$  была зафиксирована желто-зеленая окраска, в направлении  $Ng$  — голубая. В соответствии с табл. 2, приложенной к иммерсионному набору, величина дисперсии у данной жидкости в желто-зеленом свете ( $\lambda=563 \text{ м}\mu$ ) равна  $+0,005$ , в голубом ( $\lambda=500 \text{ м}\mu$ )  $+0,017$ . Вычисляются значения  $n_p$  и  $n_g$ :  $n_p=1,640+0,005=1,645$ ,  $n_g=1,640+0,017=1,657$ .

Приведенный случай идеален. В реальных условиях в препарате осколки минерала ориентированы более беспорядочно, поэтому и в окраске каемок наблюдается большей разнობой. Так, применительно к приведенному примеру — у одной группы зерен в направлении  $Np$  может быть фиксирована желто-зеленая окраска, в направлении  $Ng$  — зеленая. У другой группы зерен  $Np$  — зеленая,  $Ng$  — голубая. В таких случаях значение  $n_p$  определяется по минимальной окраске (желто-зеленой), значение  $n_g$  по максимальной (голубой). Дальнейший расчет величин  $n_p$  и  $n_g$  аналогичен уже приведенному.

Значение  $n_m$  определяется на зернах с постоянным цветом каймы. Однако такой идеальный случай будет заведомо редким. Поэтому  $n_m$  обычно определяется по максимальной окраске  $n_g^1$  или минимальной по  $n_p^1$ . Во втором случае рассмотренного выше примера и для  $n_p^1 \text{max}$  и для  $n_g^1 \text{min}$  это будет зеленая окраска. Величина дисперсии жидкости в зеленом свете ( $\lambda=527 \text{ м}\mu$ ) равна  $+0,011$ . Значение  $n_m=1,640+0,011=1,651$ .

Определение показателей преломления минерала в двух (и более) соседних жидкостях дает возможность вычислять пределы колебания величин  $n_p$ ,  $n_m$ ,  $n_g$  в некоторых участках спектра. Интерполируя полученные значения, можно установить величину дисперсии. Лучшее всего это пояснить примером:

при определении величины  $n_p$  было установлено, что при погружении в жидкость с  $n_D=1,640$  показатели преломления жидкости и минерала совпали для волн желто-зеленого цвета

$$n_p^{(\lambda=563)} = 1,640 + 0,005 = 1,645,$$

а в жидкости с  $n_D=1,646$  для волн красного цвета

$$n_p^{\lambda=670} = 1,646 - 0,008 = 1,638.$$

Таким образом, в интервале значений  $n_D$  от 1,640 до 1,646 разность показателя преломления  $n_p$  равна 0,007, а жидкости 0,013, т. е. дисперсия минерала в этом интервале длин волн примерно вдвое меньше дисперсии жидкости. Если это соотношение ( $0,007 : 0,013 \approx 1 : 2$ ) принять за среднее, то можно вычислить дисперсию минерала по  $n_p$  и для других волн.

Точно так же устанавливается дисперсия для  $n_g$  и  $n_m$ .

Метод фокального экранирования часто применяется совместно с обычным иммерсионным методом. При этом поиски области совпадения показателей преломления минерала и жидкости производятся с использованием световой полоски (полоска Бекке), исследования внутри области совпадения ведутся с использованием цветowych кайм. Контроль за устойчивостью показателей преломления жидкостей ведется обычным способом (с помощью жидкостного рефрактометра).

### ДРУГИЕ МОДИФИКАЦИИ ИММЕРСИОННОГО МЕТОДА

После практического знакомства с приведенными методами определения показателей преломления минералов становятся ясны причины трудностей иммерсионных исследований. По существу они сводятся к двум положениям: во-первых, зерна мономинеральной фракции, полученные в результате дробления и извлечения из порошка породы, имеют под микроскопом непривычный вид — необычные формы, обусловленные выколами по плоскостям слоистости, необычно высокие интерференционные окраски и резкие различия в окрасках даже одинаково ориентированных зерен и т. д. Во-вторых, невозможно ориентировать выбранное зерно нужным образом. Так, например, все слюдястые минералы ориентируются в иммерсионной жидкости только по базопинакоиду и т. д. Все это усложняет работу и на первых порах требует от исследователя выдержки и терпения.

Существует несколько модификаций иммерсионного метода, позволяющих преодолеть упомянутые трудности. Опишем наиболее интересные из них.

Иммерсионный метод в применении к петрографическим шлифам разработан Н. И. Наковником. В качестве препарата используется обычный стандартный прозрачный шлиф. Подготовка его к работе сводится к следующему: удаляется покровное стекло, растворяется и смывается верхний и нижний слой канадского бальзама, удерживающий тонкую пластинку горной породы. Под микроскопом в пределах пластинки разыскивается заранее выбранный ориентированный разрез минерала. Дальнейшие исследования ведутся по обычной схеме.

Метод очень удобен тем, что позволяет заранее выбрать в шлифе нужный разрез минерала, имеющего привычные формы и вид, обычные интерференционные окраски, и заранее проверить его оптическую ориентировку. В приготовленном препарате зерно более или менее сохраняет первоначальный вид. Наряду с очевидными преимуществами у этого метода имеется один явный недостаток — шлиф горной породы не сохраняется как документ, фиксирующий структурные или другие соотношения, как правило, он гибнет. В связи с этим упомянутый прием приготовления препарата применим только в том случае, когда возможно изготовление шлифа-дубликата.

Иммерсионный метод в применении к петрографическим шлифам просто и подробно описан в работе Н. И. Наковника (1948, 1957).

Теодолитно-иммерсионный метод, как нетрудно догадаться из самого названия, основан на применении подвижных устройств, позволяющих ориентировать зерно минерала в препарате под микроскопом нужным образом. Известно два варианта этого метода. В одном из них в качестве подвижного устройства используется федоровский столик (Эммонс, 1933). Другой основан на применении вращающейся иглы (Веденева Н. Е., 1933; Колотушкин А. Г., 1940).

Метод, предложенный Эммонсом, не получил распространения в связи с трудностями выполнения некоторых операций. Так, например, смена жидкости в препарате, находящемся между сегментами федоровского столика (об устройстве его см. сл. главу), становится весьма сложным делом.

Чаще применяется более простая установка — «вращающаяся игла». Устройство ее несложно. На предметном стекле с помощью прямоугольных кусочков стекла, играющих роль направляющих, укладывается обычная швейная игла. На одном конце ее, со стороны ушка, монтируется барабан для вращения иглы. На другом конце к острию с помощью быстро затвердевающего клея (нерастворимого в иммерсионных жидкостях) приклеивается кристаллик исследуемого минерала (размеры его зерна могут колебаться от сотых долей до 0,3—0,5 мм. Прикрепление зерна к игле производится под бинокулярной лупой). В рабочем положении острие иглы с кристалликом располагается в небольшом зазоре, в щели между двумя узкими полосками стекла, образующими камеру для иммерсионной жидкости.

«Вращающаяся игла» — установка с двумя степенями свободы — исследуемый кристалл может быть повернут относительно главных сечений николей вокруг оси столика микроскопа и вокруг перпендикулярной к ней ориентированной оси иглы. При исследовании произвольно выбранного зерна вначале определяется его общая оптическая ориентировка, т. е. положение длинной и короткой осей эллиптического сечения индикатрисы (соответственно  $n_g^1 - n_p^1$ ). Постепенно поворачивая иглу и столик, определяют истинное положение  $n_g$  и  $n_p$  и их значение. Значение  $n_m$  определяется как минимальная величина  $n_g^1$  или максимальная  $n_p^1$  (если они равны). Детальная последовательность операции методом «вращающейся иглы» приведена в работах упомянутых авторов, а также у В. Б. Татарского (1965).

Рассмотренные методы исследования по своей идее являются приемами изучения индивидуального зерна минерала. Но определения могут вестись с использованием как обычной методики иммерсионных исследований, так и метода фокального экранирования.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТИРОВКИ  
КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В МИНЕРАЛАХ**

---

ГЛАВА III

**ФЕДОРОВСКИЙ СТОЛИК  
И ТЕХНИКА ГРАФИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ**

В 1893 г. на страницах «Трудов Геологического комитета» появилась статья под названием «Теодолитный метод в минералогии и петрографии». Статья принадлежала горному инженеру Е. С. Федорову (1853—1919 гг.). В этой работе были изложены теоретические позиции нового оригинального метода исследования пространственной ориентировки кристаллооптических элементов минералов и приводилось описание первых моделей прибора, специально для этой цели разработанного автором статьи и названного им универсальным столиком.

Так, внешне незаметно произошло событие, о котором через четверть века выдающийся русский петрограф, академик Ф. Ю. Левинсон-Лессинг писал: «...Смело можно сказать, что ни одно из постепенно вводимых усовершенствований не произвело такого коренного изменения, как метод так называемого универсального столика Федорова, составляющий эпоху в развитии кристаллооптических методов исследования».

Возвращаясь к 1893 г., надо отметить, что открытие Федорова не произвело впечатления на научную общественность и не получило поддержки. На это было несколько причин. Математическое обоснование метода казалось современникам слишком сложным и не совсем убедительным. Изготовление предложенного прибора было сопряжено с техническими трудностями и требовало очень высокой по тому времени точности. Необходимость графических построений, составной части нового метода, затрудняла его освоение. Кроме того, для использования метода в конкретных практических целях ряд его положений необходимо было доработать. Все это долгое время сдерживало распространение одного из важнейших научных достижений.

Несколько слов об авторе нового метода. Евграф Степанович Федоров родился в 1853 г. в г. Оренбурге, в семье кадрового военного, генерала инженерных войск Федорова С. И. Смерть отца и возникшие в связи с этим в семье материальные трудности

лишили юношу возможности выбора образования. После неполного курса гимназии он окончил военно-инженерное училище. Затем учился в военно-медицинской академии. Поступил в Горный институт и окончил его в 1883 г. Его выдающиеся математические способности и широкая эрудиция нашли блестящее применение в геологии.

Федоровский метод значительно расширил пределы возможностей исследования строения вещества горных пород. Исключительное значение он приобрел для изучения полевых шпатов, трудной в диагностическом отношении, но весьма важной группы породообразующих минералов. Однако становление метода было сложным. Прошло длительное время, прежде чем метод усовершенствовался и приобрел современные черты. Наибольший труд по его совершенствованию выпал на долю самого Е. С. Федорова. Он на протяжении десяти лет непрерывно совершенствовал методику исследования и прибор — столик.

К 20-му году XX в. федоровский метод получил распространение в России, а в 30-х годах — во всем мире. Значительный вклад в развитие метода внесли русские ученые В. В. Никитин, М. А. Усов, С. Д. Стратонович, А. Н. Заварицкий и др. и зарубежные А. Риттман и Р. С. Эммонс. В. В. Никитин, ближайший помощник и ученик Е. С. Федорова, и М. А. Усов многое сделали для внедрения метода в практику петрографических исследований, участвовали в разработке отдельных его положений и, в частности, диаграмм для определения полевых шпатов. В систематизации трудов Е. С. Федорова большая заслуга принадлежит В. В. Никитину, благодаря его усилиям федоровский метод приобрел широкую известность у нас в стране и за рубежом.

В 1929 г. А. Риттман обобщил и систематизировал работы по определению плагиоклазов в кристаллических зонах. Им был разработан ряд положений применительно к федоровскому методу и оформлен в виде метода зон или зонального метода определения плагиоклазов. В том же году Р. С. Эммонс усовершенствовал федоровский столик, к нему была добавлена пятая ось вращения. Это новшество таило в себе возможность значительного усовершенствования метода и упрощения операций при исследовании минералов. Однако в полной мере эта возможность была реализована лишь в 1943 г. А. Н. Заварицким, который разработал новую методику определения состава плагиоклазов прямым измерением оптической ориентировки на пятиосном столике.

В настоящее время ни одно серьезное петрографическое или минералогическое исследование немислимо без применения федоровского метода и использования федоровского столика.

### **ФЕДОРОВСКИЙ СТОЛИК**

Федоровский столик представляет прибор, с помощью которого разрезу минерала в шлифе можно придать всевозможные наклоны относительно оптической оси микроскопа и, пользуясь трехмерной

системой отсчета, точно ориентировать его в любом заданном положении, а также замерять угловые расстояния между кристаллографическими и кристаллооптическими элементами минералов.

Конструктивно столик представляет серию концентрически расположенных колец, которые поворачиваются или вращаются друг относительно друга вокруг нескольких взаимно пересекающихся направлений — осей столика.

Общий вид прибора и рабочее положение на столике микроскопа показано на рис. 9. Взаимное расположение колец и осей четырехосного столика показано на прилагаемой схеме (рис. 10).

Для устранения возможности отражения света от поверхности шлифа и обеспечения равных условий прохождения света через шлиф, независимо от угла наклона его к оси микроскопа и источнику света, столик снабжен стеклянными сегментами.

С сегментов удобнее всего и начать описание устройства прибора. Сегменты представляют собой два небольших стеклянных полшара диаметром 20 мм. Плотнo прилегая к нижней и верхней поверхности шлифа, они образуют правильную шаровую форму, создающую одинаковые условия прохождения света во всех направлениях (рис. 11). Для крепления на столике сегменты оправлены в металлические пластины. Оправа нижнего сегмента имеет вид плоского кольца, а верхнего — вид ромба с закругленными углами и ушками для винтов (рис. 12).

Нижний сегмент укладывается на столике так, чтобы оправа его вошла в специальный паз внутреннего кольца столика — кольца *п*. На плоский срез сегмента укладывается шлиф, а на шлиф — верхний сегмент, который неподвижно крепится специальными винтами к тому же кольцу. Во избежание грубых преломлений света в системе сегмент—шлиф—сегмент из-за разницы в величинах показателей преломления минерала и стекла столик снабжается несколькими парами сегментов с разными показателями преломления стекла. Обычно прилагаются сегменты с показателями преломления для работы со следующими минералами:

1,516 — с калиевыми полевыми шпатами и другими низкопре-

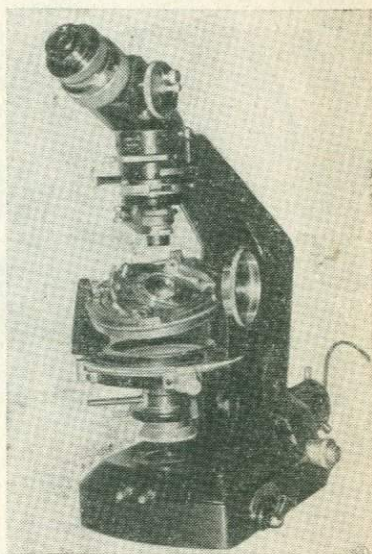


Рис. 9. Рабочее положение столика на микроскопе МИН-8

ломляющими минералами; 1,548 — с плагиоклазами; 1,647 — с цветными минералами.

Внутреннее кольцо  $n$  вкладывается в специальный паз кольца  $h$  и свободно вращается вокруг оси  $N$ , ориентированной перпендикулярно его плоскости и плоскости шлифа.

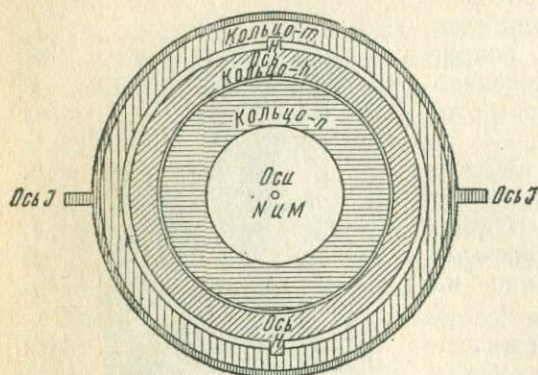


Рис. 10. Расположение колец осей четырехосного столика

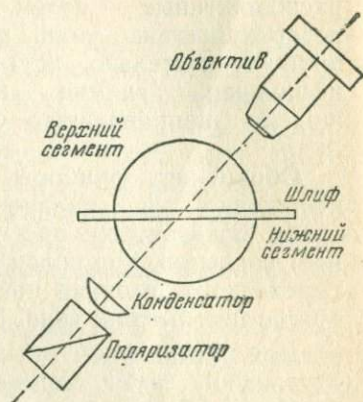


Рис. 11. Положение шлифа между сегментами относительно оптической оси микроскопа

Здесь и далее в тексте оси федоровского столика обозначены прописными буквами латинского алфавита так, как в свое время это было сделано автором:  $N$  — *Normalachse* — нормальная ось,  $H$  — *Hiefsachse* — вспомогательная ось,  $M$  — *Mobilachse* — подвижная ось,  $I$  — *Immobilachse* — неподвижная ось. Теми же буквами, но строчными обозначены соответствующие кольца.

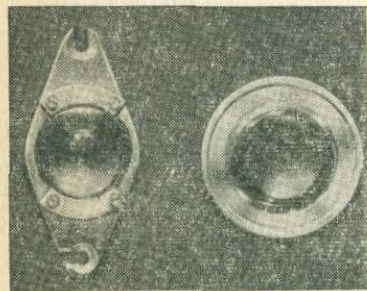


Рис. 12. Стекланные сегменты

В установочном или основном положении федоровского столика на столике микроскопа, когда все оси столика на нулевых отсчетах, ось  $N$  должна точно совпадать с оптической осью микроскопа (ось  $O$ ). Отсчет углов поворота оси  $N$  берется по градуированному лимбу кольца  $h$  против риски, высеченной на кольце  $n$ .

Кольцо  $h$  вращается вокруг оси  $H$ , лежащей в его плоскости. В установочном положении эта ось ориентирована параллельно вертикальной нити окуляра. Замер углов наклона кольца  $h$  производится с помощью специальных дужек с градуировкой. Эти дужки укрепляются на кольце  $t$ . В случае необходимости поднимается

правая или левая дужка, по которой и производится отсчет. Отсчет берется против риски на выступе кольца  $h$ .

Кольцо  $m$  вращается вокруг оси  $M$ , ориентированной перпендикулярно его плоскости так же, как и кольцо  $n$ . В установочном положении ось  $M$  совпадает с осью микроскопа — осью  $O$  и осью столика  $N$ . Отсчет углов поворота по оси  $M$  берется по градуированному лимбу кольца  $m$  против риски на оправочном кольце, в паз которого оно вложено.

Вся система колец вращается вокруг оси  $I$ . В установочном положении направление оси  $I$  совпадает с горизонтальной нитью окуляра. Ось  $I$  приводится во вращение с помощью специального кольца — барабана, укрепленного на продолжении оси и расположенного в рабочем положении справа. Отсчет углов поворота производится по градуировке на кольце — барабане  $i$ .

Ось  $I$  покоится на специальных опорах штатива столика. Опоры имеют форму треугольников, вершины которых поддерживают ось  $I$ , а основания неподвижно укреплены на кольцевой опоре. К столику микроскопа кольцевая опора федоровского столика крепится с помощью двух винтов.

Точность работы на федоровском столике зависит от нескольких причин и, в частности, от того, насколько точно удастся совместить плоскость препарата (шлифа) с точкой пересечения осей этого прибора. В практике работы могут встретиться шлифы с нестандартной толщиной предметного стекла, вследствие чего срез породы окажется над точкой пересечения осей столика или под ней.

Для устранения этого недостатка кольцо  $n$  делается сложным и снабжается так называемым штурвальным устройством, расположенным под кольцом (рис. 13). Вращая штурвальное устройство, можно приподнимать или опускать плоскость кольца  $n$  относительно точки пересечения осей столика.

Градуировка лимбов, дужек и рукояти произведена через  $1^\circ$ . Таким образом, наибольшая точность прямого отсчета  $0,5^\circ$ . Исключение представляет отсчет по оси  $I$ , где кроме градуировки на кольце есть нониус, позволяющий брать отсчет с точностью до  $0,1^\circ$ , т. е. до  $6'$ .

Положение всех осей столика, кроме оси  $N$ , фиксируется стопорными винтами-фиксаторами. Кольцо  $N$  не имеет фиксатора.

Предупреждение: во всех моделях столиков — и отечественных, и зарубежных — неудачно конструктивно оформлен фиксатор

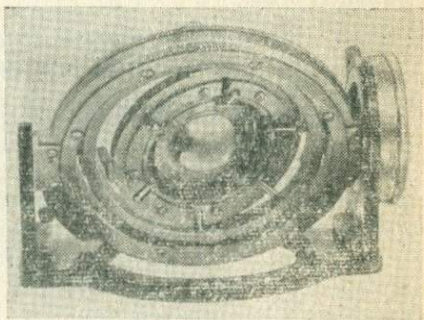


Рис. 3. Штурвальное устройство столика

оси  $H$ . Он расположен на цапфе оси и имеет вид кольцевого бандажа. В связи с тем, что фиксатор зажимает не кольцо  $h$ , а ось  $H$ , диаметр которой около 2 мм, удерживающие усилия его легко преодолеваются тем рычагом, каким является само кольцо. При недостатке опыта фиксатор можно легко сорвать.

Во избежание аварии в начале работы фиксатор оси  $H$  надо отпустить и далее пользоваться им только по мере необходимости, не применяя силы при зажатии.

В комплекте к федоровскому столику прилагаются длинно-фокусные объективы с увеличением  $3,7\times$  и  $5,5\times$  и конденсорная линза А-0,22.

### ПОДГОТОВКА ФЕДОРОВСКОГО СТОЛИКА И МИКРОСКОПА К РАБОТЕ

Для подготовки столика к работе надо все его оси установить на нулевые отсчеты, а шлиф укрепить между сегментами. После установки нулевых отсчетов оси умеренно зажимаются винтами-фиксаторами. В этом положении все кольца столика располагаются в одной горизонтальной плоскости.

Если шлиф просто уложить между сегментами и приступить к работе, то уже при средних углах наклона все поле зрения неожиданно становится черным. Происходит это вследствие полного внутреннего отражения света от тонких воздушных полостей между шлифом и сегментом. Для того чтобы устранить это явление, пространство между шлифом и сегментом принято заполнять глицерином.

Подготовка федоровского столика к работе производится следующим образом:

- 1) установить все оси в нулевое положение, слегка зажать фиксаторы и опустить дужки;
- 2) сухой фланелевой тряпочкой протереть нижний сегмент, стараясь при этом не прикасаться пальцами к стеклу, и вложить его в кольцевой паз кольца  $n$  выпуклой стороной вниз;
- 3) на плоскую поверхность сегмента осторожно пипеткой опустить каплю глицерина;
- 4) фланелевой тряпочкой протереть шлиф и предметным стеклом вниз осторожно опустить его на сегмент, на каплю глицерина так, чтобы последняя постепенно расплылась, заполняя все пространство между шлифом и сегментом;
- 5) проверить на свет, нет ли под шлифом пузырьков воздуха. На прозрачном фоне сегмента пузырьки воздуха образуют зеркально-белые или черные пятна. При наличии пузырьков шлиф и сегмент надо снять, промыть спиртом, насухо протереть фланелевой тряпочкой и повторить все сначала (с пункта 2);
- 6) на покровное стекло пипеткой опустить каплю глицерина;
- 7) чисто протертый верхний сегмент аккуратно опустить на шлиф. Лучше всего это сделать так: ввернуть один из винтов в гнездо на кольце  $n$  и осторожно ввести под его выступ отверстие

на оправе сегмента, вырезанное в виде серьги (рис. 14). Поддерживая снизу кольцо  $h$  и осторожно нажимая пальцем на свободный конец оправы сегмента, прижать его к шлифу, следя за тем, чтобы капля глицерина равномерно растекалась под сегментом. Не отпуская пальца, укрепить сегмент вторым винтом;

8) проверить на свет, нет ли под верхним сегментом пузырьков воздуха. Если пузырьки обнаружены, все повторить сначала.

Проверить удерживающее усилие винтов сегмента. Винты должны быть зажаты настолько, чтобы шлиф не имел возможности самостоятельно перемещаться между сегментами, но двигался при небольшом усилии пальцев. В таком виде федоровский столик подготовлен к установке.

Подготовка микроскопа к установке на нем федоровского столика сводится к двум группам операций. Первая из них включает общие проверки микроскопа, к которым относятся:

а) проверка перпендикулярности нитей окуляра; б) проверка скрещенности николей и параллельности их главных сечений нитям окуляра; в) центрировка объективов, приданных федоровскому столику.

Эта группа операций является частью общей подготовки микроскопа к работе и поэтому не требует объяснений. При необходимости можно обратиться к соответствующим руководствам. После того как проверки произведены, можно продолжить подготовку.

Вторая группа операций сводится к тому, чтобы приспособить микроскоп к работе с федоровским столиком. Для этого у микроскопов марки МП надо поднять тубус, а у микроскопов марки МИН (МИН-8, МИН-10) опустить столик. То и другое делается так, чтобы без помех можно было установить на столик микроскопа федоровский столик. Кроме того, чтобы обеспечить необходимые при работе наклоны по осям столика и прежде всего по оси  $I$ , надо снять внутреннее кольцо столика микроскопа, снять зажимы — держатели шлифов и опустить осветительное устройство.

В связи с тем, что препарат в новых условиях работы будет находиться на значительном расстоянии от осветительного устройства, обычная конденсорная линза А-0,96 становится непригодной к работе. Ее заменяют линзой А-0,22. По той же причине обычные объективы сменяются длиннофокусными с увеличением  $3,7\times$  и  $5,5\times$ .

Практически эта группа подготовительных операций сводится к следующему:

а) поднять тубус микроскопа (марка МП) или опустить столик (марки МИН-8 и МИН-10);

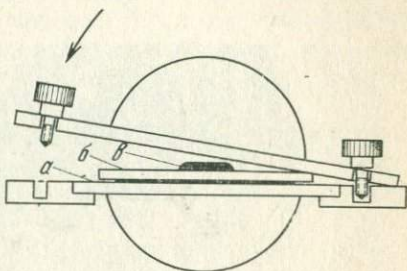


Рис. 14. Накладка верхнего сегмента:

$a$  — нижний слой глицерина (первая капля),  $b$  — шлиф,  $v$  — верхняя капля глицерина (вторая капля)

- б) вынуть съемное кольцо со столика микроскопа и снять зажимы (уложить то и другое в коробку федоровского столика);
- в) опустить осветительное устройство;
- г) сменить конденсорную линзу;
- д) снять объектив.

В таком виде микроскоп подготовлен к установке на нем федоровского столика (рис. 15).

Подготовленный к работе федоровский столик надо осторожно

поставить на столик микроскопа и прикрепить винтами. Винты следует зажимать умеренно так, чтобы столик можно было передвигать в пределах свободного хода небольшим усилием пальцев.

Попытка работать на полученной установке будет бессмысленной, если не достигнуто единство оптической ориентировки обоих приборов. Необходимо решить задачу по совмещению пространственных осей микроскопа — его оптической оси и осей главных сечений николей — с тремя пространственными осями столика. Следует найти установочное или основное положение столика на данном микроскопе.

Совмещение оптической оси микроскопа с вертикальной осью столика сводится к центрировке последнего относительно оси

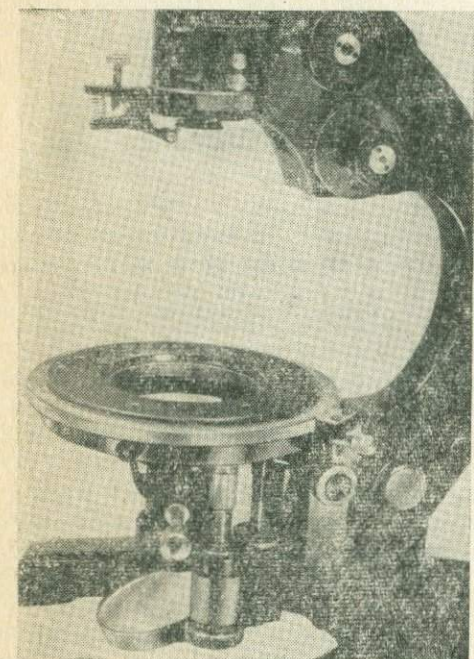


Рис. 15. Микроскоп подготовлен к установке федоровского столика

О. По выполнению процесс центрировки столика сходен с центрировкой микроскопа (первый способ). Центрировка производится в следующем порядке:

- а) в шлифе выбирается хорошо заметная точка и движением шлифа совмещается с перекрестием нитей окуляра;
- б) поворотом по оси  $N$  (кольца  $n$ ) устанавливается величина эксцентриситета;

в) замечается наибольшее удаление выбранной точки от перекрестия нитей и столик перемещается к центру руками на половину расстояния. На вторую половину расстояния перемещается шлиф (тоже руками) до совмещения точки с перекрестием окуляра;

г) поворотом по оси  $N$  снова устанавливается величина эксцентриситета и т. д. (как в пункте «в»). Операция продолжается до тех пор, пока не будет полностью устранен эксцентриситет. После этих операций производится следующее:

д) опора столика винтами плотно прижимается к столику микроскопа. Затягивание винтов надо производить постепенно и при этом не отрывать глаз от окуляра с тем, чтобы в последний момент, зажимая винты, не сбить центрировку.

Необходимо помнить, что центрировка столика выполняется при вращении кольца  $n$  и перемещениях столика и шлифа. Все остальные оси столика и столик микроскопа неподвижны и зажаты фиксаторами.

На всех марках микроскопов с наклоняющейся ручкой-держателем центрировка производится в вертикальном положении установки, т. е. при горизонтальном положении столика микроскопа.

Для начинающего исследователя центрировка федоровского столика утомительна. Она занимает много времени, в течение которого работающий стоит в неудобной позе, нагнувшись над установкой. При этом он должен производить очень точные движения, требующие напряжения рук, не опираясь локтями о стол. Поэтому с самого начала надо внимательно отнестись к этой операции с тем, чтобы освоить ее как можно быстрее. У опытного исследователя центрировка занимает 2—5 мин.

После того как центрировка закончена, т. е. достигнуто совпадение оптической оси микроскопа  $O$  с осью  $N$  федоровского столика, надо перейти к совмещению осей  $H$  и  $I$  с осями главных сечений николей. В правильно подготовленном микроскопе на эти направления указывают нити окуляра.

Работу можно выполнить двумя приемами.

**Первый прием.** 1. Совмещение оси  $I$  с горизонтальной нитью окуляра:

а) приподнять тубус и опустить осветительное устройство;

б) снять объектив;

в) отпустить фиксатор оси  $I$  и повернуть эту ось так, чтобы все кольца располагались вертикально, а ребро кольца  $i$  оказалось против нижнего среза тубуса;

г) глядя в окуляр, совместить ребристый край кольца  $i$  с горизонтальной нитью. В пределах поля зрения по всей длине он должен быть параллельным нити;

д) если этого не произошло — край кольца не параллелен нити — надо поступить следующим образом: отпустить стопорный винт столика микроскопа и повернуть его вокруг оси  $O$  до нужного положения кольца  $i$  относительно горизонтальной нити;

е) записать отсчеты по правому или левому нониусу столика. Стопорный винт зажать.

Записанные отсчеты являются установочными для оси  $I$  на данном микроскопе. В процессе работы ими надо пользоваться как

нулевыми отсчетами столика микроскопа и всегда возвращаться в установочное положение.

2. Совмещение оси  $H$  с вертикальной нитью окуляра:

а) при том же положении тубуса и осветительного устройства повернуть кольцо  $h$  вертикально;

б) глядя в окуляр, совместить ребристый край кольца с вертикальной нитью;

в) если совмещения не произошло — край кольца и нить непараллельны — надо отпустить фиксатор кольца  $m$  и, поворачивая это кольцо, добиться совмещения;

г) записать отсчет по оси  $M$  и зажать фиксатор кольца  $m$ . Этот отсчет является установочным для оси  $H$ .

**Второй прием.** 1. Совмещение оси  $I$  с горизонтальной нитью окуляра:

а) не снимая объектива, приподнять тубус настолько, чтобы в фокусе оказалась верхняя поверхность сегмента. Обратите внимание на пылинки на ней;

б) отпустить фиксатор оси  $I$  и, делая небольшие повороты на  $25-30^\circ$  по оси  $I$  «на себя» и «от себя», проследить траекторию пылинок. Она должна быть параллельна вертикальной оси окуляра. Тогда сама ось  $I$ , при условии перпендикулярности нитей окуляра, будет параллельна горизонтальной нити;

в) в случае необходимости внести корректировку поворотом столика микроскопа (по оси  $O$  так же, как в первом варианте);

г) записать установочное положение.

2. После того как ось  $I$  столика возвращена в нулевое положение, те же операции проделать, поворачивая препарат по оси  $H$ . Траектория пылинок должна совпадать с направлением горизонтальной нити. При необходимости откорректировать положение оси  $H$  поворотом по оси  $M$  (так же как в первом варианте).

Записать установочное положение.

Итак, создана единая система ориентировки: с оптической осью микроскопа совмещена ось  $N$  федоровского столика, с плоскостью главного сечения одного из николей — ось  $I$ , с плоскостью главного сечения другого — ось  $H$ . Микроскоп и установленный на нем федоровский столик готовы к работе.

Демонтаж установки производится в следующем порядке:

а) оси столика, кроме оси  $M$ , возвращаются в нулевое положение. Ось  $M$  остается на установочном отсчете;

б) снимается объектив;

в) снимаются сегменты со шлифом, промываются спиртом, насухо протираются и убираются: нижний в гнездо в коробке, верхний крепится на кольцо  $n$ , на обычном месте, с помощью винтов;

г) отпускаются и отвинчиваются винты, крепящие столик к микроскопу;

д) федоровский столик осторожно снимается и убирается в коробку;

е) на столик микроскопа укладывается внутреннее съёмное кольцо, укрепляются зажимы, опускается тубус и поднимается осветительное устройство.

### Рекомендация

Среди подготовительных работ есть несколько трудоёмких элементов. Один из них — центрировка. Как отмечено, даже в опытных руках центрировка продолжается от 2 до 5 мин. Чтобы сократить и это время, если общие навыки центрировки освоены, рекомендуется поступать следующим образом:

а) перед демонтажем приподнять тубус и снять сегменты и шлиф, промыть их спиртом и протереть;

б) небольшой лист чистой бумаги  $10 \times 5$  см сложить вчетверо в форме шлифа и на верхней его стороне посередине остро отточенным карандашом прочертить две пересекающиеся линии;

в) уложить сегменты и заложенный между ними лист на столик и закрепить винтами;

г) глядя в окуляр, совместить перекрестие линий на бумаге с перекрестием нитей окуляра;

д) прижать верхний сегмент винтами так, чтобы лист самопроизвольно не мог перемещаться;

е) снять федоровский столик и уложить в коробку.

В следующий раз центрировка столика сведется к тому, чтобы, установив его на столике микроскопа, совместить перекрестие линий на закреплённом листке и нитей окуляра и закрепить в этом положении федоровский столик. Накладывать шлиф в этом случае придется на установленный столик. Не забудьте перед этим поднять тубус и снять объектив.

### СЕТКА ВУЛЬФА

Методика работы на федоровском столике предусматривает графические построения, которые выполняются с помощью сетки Вульфа. Сетка Вульфа используется в кристаллографии и минералогии для точного изображения пространственного положения кристаллографических элементов минералов.

Применительно к федоровскому столику принята следующая система ориентировки и отсчета на сетке: ось *I* соответствует горизонтальной («экваториальной») осевой линии сетки, отсчеты по этой оси откладываются от осевой линии вверх (к «северному полюсу») при повороте на себя или вниз (к «южному полюсу») при повороте от себя. Ось *H* соответствует вертикальной осевой линии сетки — прямой, соединяющей полюса. Отсчеты наклонов по оси *H* откладываются от осевой линии сетки вправо, если отсчет взят по правой дужке, или влево — если по левой дужке. Ось *N* проектируется в виде точки в центре сетки (вертикально). Отсчеты поворотов по этой оси ведутся по внешнему лимбу сетки, точно так же, как и отсчеты по лимбу кольца *n* (см. прилож. 1).

## ТЕХНИКА НАНЕСЕНИЯ ПРОЕКЦИИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЗАМЕР УГЛОВ С ПОМОЩЬЮ СЕТКИ ВУЛЬФА

Отсчеты принято наносить не на саму сетку Вульфа, а на кальку, которая вырезается по размерам сетки и на нее накладывается. Подготовка кальки к работе ведется в следующем порядке: а) наложить лист кальки на сетку; б) прочертить на кальке крест, перекрестием которого обозначается центр сетки; в) прочертить окружности и стрелкой отметить нулевой отсчет на лимбе сетки. В таком виде калька готова к работе.

Технику нанесения кристаллографических элементов и замер углов на сетке Вульфа лучше всего рассмотреть на конкретном примере.

**Пример.** Даны отсчеты по осям столика, характеризующие положение плоскостей спайности кристалла амфибола в шлифе:

- |                  |                            |             |
|------------------|----------------------------|-------------|
| 1. $N=180^\circ$ | $H_{\text{лево}}=34^\circ$ | $I=0^\circ$ |
| 2. $N=254^\circ$ | $H_{\text{лево}}=48^\circ$ | $I=0^\circ$ |

**Задача.** По заданным отсчетам нанести проекции плоскостей спайности на сетку Вульфа. Найти полюсы этих плоскостей, т.е. проекции перпендикуляров к ним; замерить углы между плоскостями спайности, между полюсами к ним, между осью  $c$  кристалла и нормалью к плоскости шлифа.

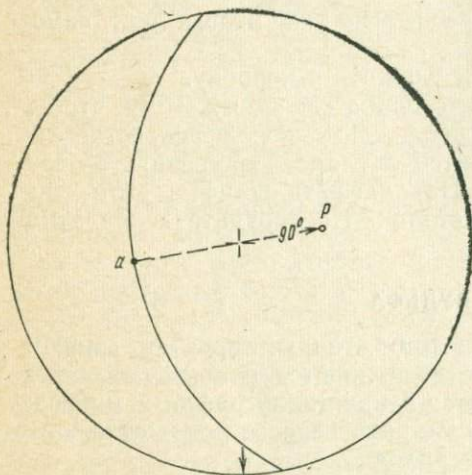


Рис. 16. Нанесение проекции плоскости спайности и восстановление ее полюса

от точки  $a$  через центр отсчитать  $90^\circ$  и поставить точку  $P$  — полюс плоскости (или проекция перпендикуляра к ней) (рис. 16).

Точно так же наносится проекция второй плоскости спайности: поворотом вокруг центра стрелка на кальке совмещается со вторым отсчетом по оси  $N$ ; от центра по горизонтали отсчитывается угол наклона по оси  $H$ , прочерчивается меридиональная кривая — проекция плоскости спайности. Определяется положение полюса этой плоскости —  $P_2$ .

Для замера угла между плоскостями спайности надо: а) поворотом кальки вокруг центра совместить точку пересечения проекций плоскостей спайности с горизонтальной (экваториальной) прямой; б) от точки пересечения через центр отсчитать  $90^\circ$ ; в) от конца отсчета по направлению к полюсам провести мери-

к ним; замерить углы между плоскостями спайности, между полюсами к ним, между осью  $c$  кристалла и нормалью к плоскости шлифа.

Нанесение проекций плоскостей спайности с помощью сетки Вульфа осуществляется следующим образом: а) повернуть кальку до совмещения стрелки с отсчетом на сетке, равным отсчету по оси  $N$ ; б) убедиться, что центры кальки и сетки, а также окружности совпадают; в) от центра сетки по горизонтали влево отсчитать число градусов, равное отсчету по оси  $H$ , и поставить точку  $a$ ; г) через точку  $a$  к полюсам сетки в обе стороны провести кривую, повторяя очертания ближайших меридиональных линий.

Полученная кривая и есть проекция плоскости спайности, нанесенная на кальку с помощью сетки Вульфа по первому отсчету.

Не меняя положения кальки на сетке, можно нанести проекцию полюса плоскости спайности. Для этого

диональную кривую до пересечения с проекциями спайности (рис. 17); г) по сетке замерять величину углового расстояния между точками пересечения — численно она равна величине угла между плоскостями спайности.

В кристаллах амфибола направление третьей кристаллографической оси [001] или  $c$  определяется как след пересечения спайностей по граням (110) и  $(\bar{1}\bar{1}0)$ . На кальке за проекцию этой оси принимается точка пересечения проекций плоскостей спайности. Эта точка обозначается как  $c$ .

Для того чтобы определить угол наклона оси  $c$  к нормали шлифа, достаточно повернуть кальку вокруг центра до совмещения точки  $c$  с вертикальной или горизонтальной осью сетки и отсчитать число градусов до центра. Полученный угол и есть угол наклона.

Аналогичным образом определяется величина угла между полюсами спайности. Для этого, поворачивая кальку вокруг центра, совместить оба полюса на один «меридиан» и замерять угловое расстояние между точками полюсов.

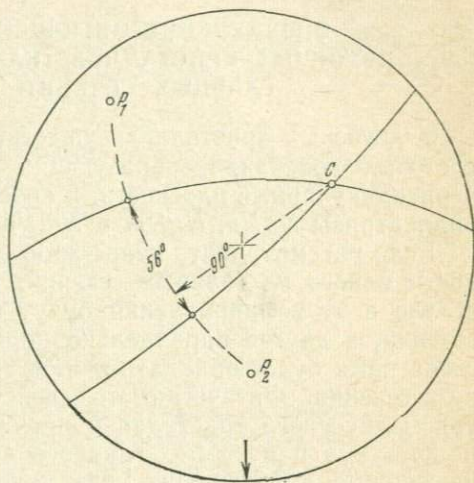


Рис. 17. Определение угла между плоскостями спайности

### Задание для упражнения

1. Подготовить кальку.
2. Отложить проекции плоскостей спайности минерала по отсчетам:

- |                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| а) $N = 21^\circ$ | $H = 34^\circ$ лево; |
| б) $N = 73^\circ$ | $H = 48^\circ$ лево. |

3. Найти проекции полюсов.
4. Определить углы между плоскостями и полюсами.

Задача может быть расширена, и в порядке тренировки использован федоровский столик. Например, совместить с оптической осью микроскопа попеременно сначала один, а затем другой полюсы плоскостей или точку пересечения проекций плоскостей.

Выполняется это следующим образом:

а) на сетке оба полюса совмещаются на одну меридиональную кривую и определяются координаты плоскости, в которой эти полюсы расположились, т. е. отсчеты по осям сетки  $N$  и  $H$ ;

б) эти же отсчеты (если они в пределах углов наклона по осям столика) откладываются по осям столика — кольцо  $n$  поворачивается до отметки по оси  $N$ , кольцо  $h$  наклоняется в заданную сторону на необходимый угол (отсчет по оси  $H$ );

в) на кальке, положение которой сохраняется (пункт а), от экваториальной прямой по меридиану отсчитать угловое расстояние до ближайшего полюса плоскости (например, выше экваториальной прямой);

г) поворотом оси  $I$  «на себя» на величину найденного угла полюс плоскости спайности — т. е. направление перпендикуляра к плоскости спайности — совмещается с осью  $O$ .

В том же порядке (пункты «в» и «г») производится совмещение второго полюса.

Для того чтобы совместить с оптической осью микроскопа точку пересечения проекций плоскостей, надо на столике установить одну из них по ее отсчетам, а затем поворотом по оси  $I$  на угол, вычисленный на кальке, произвести совмещение.

## ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТИРОВКИ ДВУОСНЫХ КРИСТАЛЛОВ (НАХОЖДЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНЫХ СЕЧЕНИЙ ИНДИКАТРИСЫ)

В двуосных кристаллах существует три основных направления световых колебаний, образующих пространственно три взаимно перпендикулярные плоскости, в которых попарно расположены оси индикатрисы  $NgNp$ ,  $NgNm$  и  $NmNp$  — ее главные сечения.

Если рассматривать какое-либо направление, выбранное в плоскости одного из главных сечений, то световые колебания в кристалле в этом направлении будут происходить одно в плоскости сечения, а другое параллельно нормали к этой плоскости. Этими свойствами будет обладать любое направление, выбранное в главном сечении. Физически это свойство главного сечения индикатрисы двуосного кристалла обнаружится в том, что если его расположить в плоскости главного сечения одного из николей, то независимо от величины угла поворота кристалла в плоскости этого сечения он все время будет находиться в положении погасания.

Задача нахождения плоскости главного сечения индикатрисы сводится, таким образом, к тому, чтобы, используя оси федоровского столика, придать разрезу кристалла такое положение, при котором он сохранял бы состояние устойчивого погасания при любом повороте в плоскости главного сечения одного из николей.

Практически это осуществляется следующим образом:

а) разрез кристалла ставится в положение погасания поворотом по оси  $N$ ;

б) отпускается фиксатор оси  $I$  и шлиф поворачивается от себя до отказа;

в) если при этом произошло просветление, то поворотом по оси  $H$  кристалл снова возвращается в положение погасания;

г) шлиф поворачивается по оси  $I$  на себя до отказа;

д) в случае наступления просветления кристалл гасится поворотом по оси  $N$  в сторону ближайшего погасания.

Шлиф поворачивается по оси  $I$  на себя и от себя и поочередно поправляется поворотом по осям  $N$  и  $H$  до тех пор, пока не наступит устойчивое состояние полного погасания. Если это состояние достигнуто и при поворотах по оси  $I$  просветление не наступает, значит положение главного сечения найдено. Его координаты по сям записываются в виде табл. 2.

По этим координатам проекция плоскости главного сечения наносится на кальку (так же как и плоскость спайности). Устанавливается полюс плоскости.

После этого можно приступить к поискам другой плоскости главного сечения индикатрисы в том же кристалле. Для этого ось  $H$  приводится в нулевое положение, а ось  $N$  поворачивается на угол около  $90^\circ$  в любую сторону — от первого положения до погасания кристалла. Поиски положения второго сечения ведутся в той же последовательности.

Плоскости главных сечений индикатрисы пересекаются под прямыми углами. После нанесения проекции второго главного сечения на кальку естественно ожидать, что оно расположится под углом  $90^\circ$  к первому, и, таким образом, пройдет через точку его полюса, а полюс второго сечения совпадет с проекцией плоскости первого. Допустимое несовпадение —  $2-4^\circ$ . Если оно превышает эту величину, значит в нахождении главных сечений была допущена грубая ошибка. Работу следует повторить сначала.

Положение третьего сечения индикатрисы находится графически. По условию оно расположено перпендикулярно первым двум, т. е. его проекция на кальку должна пройти через точки обоих полюсов найденных сечений. Графическое построение производится следующим образом: а) точка пересечения проекций первых двух сечений поворотом кальки вокруг центра совмещается с горизонтальной осевой линией сетки; б) от точки пересечения через центр отсчитывается  $90^\circ$ ; в) через полученную точку и точки полюсов первых двух сечений проводится меридиональная кривая, которая является проекцией третьей плоскости главного сечения индикатрисы.

Таблица 2  
Координаты главных сечений индикатрисы

	$N$	$H$	
1			

### НАХОЖДЕНИЕ ВЫХОДОВ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ ДВУОСНОГО КРИСТАЛЛА И ЗАМЕР УГЛА МЕЖДУ НИМИ

Любое из найденных главных сечений может быть плоскостью оптических осей. В процессе их установки выходы оптических осей не могли себя обнаружить, так как кристалл был в положении погасания. Но если плоскость найденного сечения индикатрисы повернуть относительно главного сечения николя на  $45^\circ$ , положение изменится: при поворотах в плоскости главного сечения индикатрисы кристалл будет погасать только в момент совпадения его оптической оси с оптической осью микроскопа.

Нахождение выходов оптических осей кристалла производится следующим образом:

- положение главного сечения установить на столике и проверить поворотом по оси  $I$ . Оно не должно просветляться;
- отпустить стопорный винт столика микроскопа, повернуть

его на  $45^\circ$  в любую сторону, но лучше против часовой стрелки и закрепить его в этом положении;

в) повернуть столик по оси  $I$  на себя и от себя до отказа;

г) в случае появления темнот надо точно отметить момент полного погасания кристалла отсчетом по оси  $I$ ;

д) чтобы убедиться в правильности найденного направления оптической оси, надо сделать поворот по оси  $O$  на  $180-200^\circ$  в ту и другую сторону — кристалл не должен просветляться;

е) отсчеты по оси  $I$  записать в таблицу, пометив, взяты ли они при повороте оси  $I$  на себя или от себя, и нанести на кальку.

Выход оптической оси помечается буквой  $A$ . Если удалось установить оба выхода оптических осей, они помечаются буквами  $A_1$  и  $A_2$ . Ось, обнаруженная при повороте оси  $I$  на себя, наносится на кальку выше экваториальной линии сетки, от себя — ниже.

Величина угла оптических осей измеряется непосредственно по выходам оптических осей, т. е. по разности отсчетов по оси  $I$ . Если в доступных исследованию главных сечениях индикатрисы кристалла выходы оптических осей не обнаружены, плоскостью оптических осей считается графически построенное сечение. Проекцию плоскости оптических осей на кальку полезно поднять двойной линией.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИМЕНОВАНИЯ ОСЕЙ ИНДИКАТРИСЫ

После того как найдена плоскость оптических осей, можно приступить к определению наименования осей индикатрисы.

Наименование одной из них определяется уже по имеющимся данным — это нормаль к плоскости оптических осей, ее полюс — ось  $Nm$  (рис. 18, *a*). Наименование двух других, условно  $Nx$  и  $Ny$ , определяется с помощью компенсатора.

Для этого, учитывая положение оси  $Nm$ , надо:

а) на столике установить одно из главных сечений индикатрисы, т. е. совместить две ее оси с плоскостью главного сечения николя, а третья будет совмещена с осью  $I$ ;

б) поворотом по оси  $I$  одну из осей данного сечения индикатрисы совместить с оптической осью микроскопа — ось  $O$ , предварительно рассчитав по проекции этого сечения на сетке величину угла поворота и его направление (на себя или от себя). Другая, неизвестная, ось расположится горизонтально (т. е. в плоскости столика микроскопа);

в) повернуть столик по оси  $O$  на  $45^\circ$  против часовой стрелки и совместить, таким образом, горизонтально расположенную ось индикатрисы с направлением, параллельно которому вводится компенсатор;

г) в прорез тубуса ввести компенсатор и по изменению интерференционной окраски определить наименование этой оси индикатрисы.

Так определяется одна из неизвестных осей индикатрисы. Другая неизвестная ось может быть определена методом исключения, но для самопроверки лучше определить и ее. Сделать это нетрудно, особенно если ясно представить ход определения в том или ином случае.

Для быстрого определения наименования обеих неизвестных осей индикатрисы рекомендуется пользоваться следующей схемой.

В зависимости от ориентировки изучаемого кристалла в шлифе возможны два варианта хода определения его осей.

**Первый вариант.** Плоскость оптических осей обнаружена непосредственными наблюдениями в процессе исследования кристалла. Она устанавливается на столике. Нормаль к этой плоскости —  $Nm$  — в этом случае будет совмещена с осью столика  $I$ .

С направлением ввода компенсатора совмещается и определяется в описанном выше порядке (пункты б, в, г) сначала одна из неизвестных осей, а затем поворотом по оси  $I$  на  $90^\circ$  другая.

**Второй вариант.** Плоскость оптических осей находится вне пределов наблюдений и ее положение определено только графически. На столике устанавливается одно из уже найденных главных сечений индикатрисы, в котором лежит ось  $Nm$ , и одна из неизвестных осей. Другая неизвестная ось совмещена с осью  $I$ .

Поворотом по оси  $I$  с оптической осью микроскопа совмещается

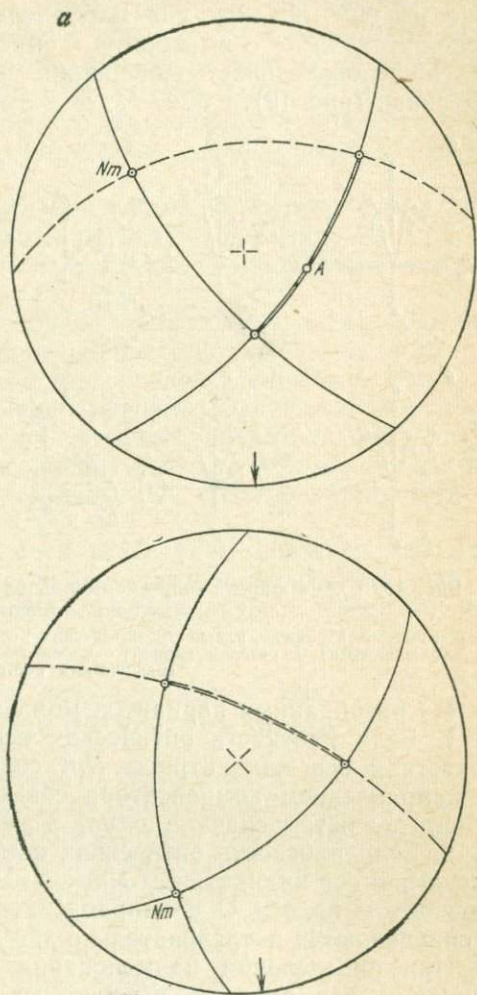


Рис. 18. Определение положения оси  $Nm$ . Ось  $Nm$  определяется как полюс плоскости оптических осей, независимо от того, как найдена последняя, — непосредственными наблюдениями (а) или графическими построениями (б) (плоскость оптических осей показана двойной линией)

ось  $Nm$ , далее поворотом на  $45^\circ$  по оси  $O$  с направлением ввода компенсатора совмещается и определяется сначала одна из неизвестных осей, а затем поворотом столика вокруг той же оси  $O$  еще на  $90^\circ$  (на этот раз параллельно вводу компенсатора расположится ось  $I$ ) совмещается и определяется другая ось.

Последовательность операций приведена на схематических рисунках (рис. 19).

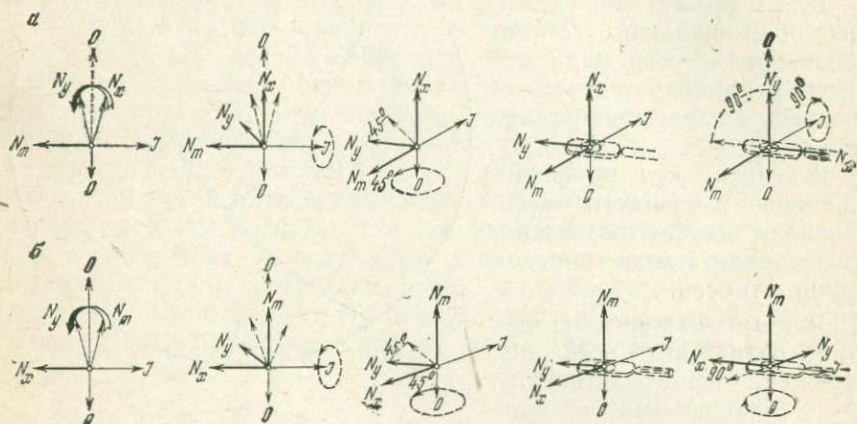


Рис. 19. Схема определения наименования осей индикатрисы (последовательность операций).

*a* — первый вариант — плоскость оптических осей установлена непосредственными наблюдениями; *b* — второй вариант — плоскость оптических осей установлена путем графических построений

Из разобранных вариантов можно сделать следующие выводы:

1. Если плоскость оптических осей доступна наблюдению, то известная ось индикатрисы  $Nm$  совмещается с осью столика  $I$ . С направлением компенсатора совмещаются поворотом по оси  $I$  и определяются сначала одна, а затем другая неизвестная оси.

2. Если плоскость оптических осей недоступна наблюдению, то известная ось индикатрисы  $Nm$  совмещается с осью микроскопа  $O$ . Поворотом по оси  $O$  с направлением компенсатора совмещаются и определяются последовательно две другие.

При определении наименования осей индикатрисы возможен случай, когда одна из неизвестных осей на изучаемом разрезе кристалла ориентирована близко к направлению оси  $N$  столика (т. е. к нормали к плоскости шлифа). В связи с тем, что такую ось «уложить» горизонтально, т. е. параллельно компенсатору, невозможно, наименование ее определяется методом исключения.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ЗНАКА И УГЛА $2V$

Располагая проекциями главных сечений индикатрисы на кальке, нетрудно определить оптический знак минерала и угол  $2V$ . Единственным и необходимым условием для этого является обнаружение выходов оптических осей.

Если выходы оптических осей были обнаружены непосредственными наблюдениями, то угол между ними, как уже отмечено, измеряется поворотами по оси  $I$ . В зависимости от величины угла и наименования оси индикатрисы, расположенной между выходами оптических осей, вычисляется значение  $2V$  и оптический знак. Так, например, угол между выходами оптических осей равен  $94^\circ$ , ось индикатрисы, расположенная на кальке между  $A_1$  и  $A_2$ , —  $Ng$ . Очевидно, что в данном случае ось  $Ng$  является тупой биссектрисой. Отсюда первый вывод: оптический знак минерала отрицательный.

Угол при острой биссектрисе — в данном случае, при  $Np$  — определяется как дополнение найденного угла между  $A_1$  и  $A_2$  до  $180^\circ$ ,  $180 - 94 = 86^\circ$ . Второй вывод: угол  $2V$  определяемого минерала равен  $86^\circ$ .

Нередко обнаруживается только один выход оптической оси. Угловое расстояние между проекцией этого выхода на кальке и ближайшей осью индикатрисы дает представление о величине  $V$  (половине величины  $2V$ ) и знаке минерала. Однако достоверность такого определения значительно уступает замерам по двум выходам. Поэтому всегда надо оговариваться, что обе константы — и оптический знак и  $2V$  — определены по одному выходу оптической оси.

Если выходы оптических осей недоступны прямому наблюдению, т. е. лежат в плоскости, субпараллельной плоскости шлифа, то определение знака и угла  $2V$  на таком разрезе минерала, как правило, не производится\*.

### ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ И ОПТИЧЕСКИХ ЗНАКОВ

При замерах на федоровском столике выход оптической оси определяется в плоскости  $NgNp$  по наступлению полного погасания зерна минерала, не просветляющегося при любых поворотах по оси  $O$ . Появление темноты, т. е. сближение оптической оси кристалла с оптической осью микроскопа, происходит постепенно, и момент их совпадения определяется как средняя точка в некотором диапазоне углов максимального погасания.

Установить эту среднюю точку становится не так просто при одном из следующих условий:

а) угол оптических осей мал — темноты обоих выходов осей без просвета сливаются в одну темноту. Так как это происходит в точке выхода одной из осей индикатрисы ( $Ng$  или  $Np$ ), то двусосный

---

\* При ограниченном количестве зерен минерала в шлифе оптический знак его и угол  $2V$  можно определить даже на таком разрезе, где выходы оптических осей лежат в плоскости шлифа. Для этого необходимо использовать методику, разработанную А. Н. Заварицким. Она изложена в его статье «Об определении угла оптических осей кристалла в шлифах, когда эти оси недоступны прямому наблюдению». Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова». М., Изд-во АН СССР, 1953.

минерал становится неотличимым от одноосного, особенно если его угол  $2V$  не превышает  $8-10^\circ$ ;

б) угол оптических осей достаточный, но двупреломление минерала низкое ( $n_g - n_p = 0,007$  и ниже) — полная темнота прослеживается в растянутом диапазоне углов, при определении  $2V$  возможна грубая ошибка;

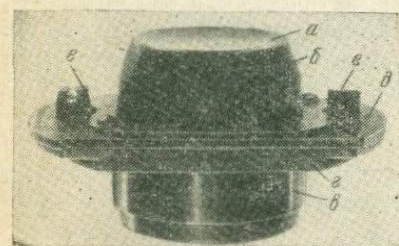


Рис. 20. Конденсор КСФ.

*а* — фронтальная поверхность верхней линзы; *б* — обойма; *в* — упругое кольцо; *г* — нижняя опорная пластина; *д* — верхняя опорная пластина; *е* — скрепляющие винты

в) дисперсия оптических осей велика (у некоторых моноклинных минералов) — темнота не имеет выраженного максимума.

В этих случаях замеры на федоровском столике обычным способом не гарантируют точности, но хорошие результаты дает исследование в сходящемся свете (если позволяют размеры изучаемого объекта).

Для получения коноскопического

эффекта на федоровском столике использовать обычные устройства — линзу Лазо и короткофокусные объективы — невозможно. Нужны специальные приспособления: более мощный длиннофокусный конденсор и длиннофокусные объективы с достаточным увеличением.

Отечественная промышленность выпускает для этой цели специальный конденсор КСФ (рис. 20) с апертурой  $A=0,62$  и набор длиннофокусных ахроматических объективов типа ОСФ с 16-, 22- и 40-кратными увеличениями (рис. 21).



Рис. 21. Длиннофокусные объективы:  
*а* — ОСФ — 22 $\times$ ; *б* — ОСФ — 16 $\times$ ; *в* — ОСФ — 40 $\times$ .

Конденсор КСФ представляет систему линз, оправленных в металлическую обойму (*б*), укрепленную с помощью упругого кольца (*в*) на опорных пластинах (*г* и *д*), скрепленных двумя винтами (*е*).

Конденсор устанавливается на столике микроскопа вместо съемного кольца так, чтобы нижняя опорная пластина (*г*) вошла в паз этого кольца. Верхняя опорная пластина (*д*) плотно входит в кольцевую опору федоровского столика. Если винты, скрепляющие пластины, отпущены, то верхняя из пластин (к которой крепится упругое кольцо) может перемещаться на некоторое расстояние вместе с опорой федоровского столика относительно нижней пластины, неподвижно укрепленной на столике микроскопа.

Это дает возможность производить центровку столика при установленном конденсоре.

Подготовку федоровского столика и микроскопа к работе в сходящемся свете для первого знакомства лучше всего вести в следующей последовательности:

1. Отцентрировать длиннофокусные объективы.
2. На микроскопе, подготовленном для установки федоровского столика, устанавливается конденсор КСФ.
3. Установить федоровский столик. Верхняя опорная пластина конденсора должна плотно войти в кольцевое отверстие опоры столика.
4. Отпустить скрепляющие винты конденсора, отцентрировать федоровский столик в обычном порядке и зажать винты столика и конденсора.

5. Не опуская тубуса микроскопа, укрепить на нем длиннофокусный объектив и выключить анализатор.

На первых порах для того, чтобы уяснить основной принцип работы, лучше всего использовать не шлиф, а пластинку биотита (так же, как и при изучении минералов в сходящемся свете на обычном столике микроскопа). Поскольку пластинка тоньше шлифа, то в целях правильной установки столика надо под пластинку слюды подложить чистое предметное стекло, либо поднять штурвальным устройством кольцо  $n$ .

6. Осторожно опуская тубус микроскопа, отфокусировать его по поверхности слюды и, вращая ось  $I$ , убедиться, что установка столика произведена правильно, т. е. детали кристалла, расположенные у креста нитей, при наклонах столика по оси  $I$  не перемещаются ни вверх, ни вниз.

7. Перейти на сходящийся свет: включить анализатор и линзу Бертрана.

8. Проверить точность совмещения плоскости главного сечения индикатрисы с плоскостью главного сечения николя. Критерием точности в данном случае является совпадение вертикальной ветви креста фигуры интерференции с вертикальной нитью окуляра. Если эти направления пересекаются или сходятся под углом, точность установки необходимо тщательно проверить.

Надо заметить, что работа в сходящемся свете требует более строгого контроля за системой ориентировки всей установки.

Если крест нитей окуляра параллелен или совпадает с крестом фигуры интерференции, можно продолжать дальнейшую работу.

9. Совместить крест фигуры интерференции с перекрестием нитей окуляра и повернуть столик микроскопа вокруг оси  $O$  на  $45^\circ$  против часовой стрелки. Поворотом на оси  $I$  совместить точку перегиба одной из изогир с перекрестием окуляра, взять первый отсчет по оси  $I$ . Если обнаружено смещение изогир — нужна проверка.

10. Поворотом по оси  $I$  совместить точку перегиба второй изогри с перекрестием нитей окуляра и взять второй отсчет.

Разность отсчетов дает величину угла  $2V$ .

Оптический знак в этом случае легко определяется по реакции кристалла на ввод компенсатора: у оптически положительного кристалла на вогнутой стороне изогри появляется желтая окраска, у оптически отрицательного — синяя.

Биотит или флогопит являются хорошими примерами минералов с малыми углами  $2V$ . В качестве примера минерала с низким двупреломлением (в направлении острой биссектрисы) можно взять мусковит.

В петрографической практике необходимость в коноскопических исследованиях возникает чаще всего тогда, когда величину  $2V$  не удастся определить обычным путем или когда замеры ее необходимо производить с особой тщательностью. В ходе ортоскопического изучения оптическая ориентировка кристалла уже обычно бывает известна. Для производства замеров в сходящемся свете остается только установить нужную плоскость индикатрисы в положение непроектируемой темноты и, не снимая федоровский столик, установить конденсор КСФ и сменить обычный объектив на длиннофокусный.

Делается это следующим образом:

1. Поднять до конца тубус и снять объектив.
2. Повернуть столик по оси  $I$  «на себя» до предела.
3. Осторожно, избегая соприкосновения верхней линзы конденсора с нижним сегментом столика, установить конденсор на место, предварительно отпустив винты, скрепляющие его опорные пластины.
4. Поворотом по оси  $I$  вернуть столик в горизонтальное положение.
5. Установить длиннофокусный объектив и приступить к исследованию в сходящемся свете.

Следует обратить внимание на то, что верхняя опорная пластина конденсора входит в кольцевую опору федоровского столика с некоторым трудом. Для установки конденсора на место на его верхнюю пластину надо нажать большими пальцами обеих рук, одновременно поддерживая остальными пальцами рук столик микроскопа снизу. Эта операция требует особой осторожности при работе с микроскопами, у которых столики подвижные (МИН-8, МИН-10).

Точность определения угла  $2V$  в сходящемся свете достигает  $1-2^\circ$ , иногда  $0,3^\circ$ , т. е. превышает обычную точность определения этой константы на федоровском столике.

На точность определений  $2V$  влияет величина двупреломления минерала и, хотя момент выхода оптической оси определяется не по наступлению полной темноты, а по совмещению перекрестия нитей окуляра с точкой перегиба изогри, балки изогри имеют тем более резкие и тонкие очертания, чем с большим увеличением при-

меняется объектив (при обычной толщине шлифа) или чем толще пластинка шлифа. Иногда для этой цели изготавливают специальные более толстые шлифы.

Исследование минералов с выраженной дисперсией оптических осей производится с применением светофильтров или в монохроматическом свете. Величины угла  $2V$  в этом случае записываются отдельно для тех длин волн, в которых производились измерения.

Надо отметить, что исследования в сходящемся свете широко используются для получения количественных характеристик таких важных констант, как величина, характер и вид оптических дисперсий. Однако это является предметом специальных методик и в данной работе не рассматривается.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ПОГАСАНИЯ

Угол погасания является критерием для определения ориентировки оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей. На обычном столике микроскопа этот угол определялся путем замера углового расстояния между следом какого-либо кристаллографического направления, чаще всего обозначенным спайностью, и ближайшей к этому направлению осью эллипсоида. Таким образом, уже в самой методике такого замера есть элементы условности.

Федоровский столик позволяет производить точные замеры углового расстояния между кристаллографической осью и осью индикатрисы независимо от наличия в шлифе соответствующим образом ориентированного разреза и особенностей ориентировки кристаллографического направления, относительно которого производится измерение.

Точное определение углов погасания имеет большое значение для таких минералов, как пироксены и амфиболы. У этих минералов легко распознается направление третьей кристаллографической оси, оно определяется как след пересечения двух направлений спайности.

Техника определения угла погасания в этом случае сводится к тому, чтобы на одну и ту же кальку нанести сначала проекции главных сечений индикатрисы и определить наименование ее осей, а затем — проекции плоскостей спайности и отметить точку их пересечения символом  $[001]$  или буквой  $c$ .

Угловое расстояние между осью  $c$  и ближайшей осью индикатрисы и есть искомый угол.

Определение углов погасания для роговой обманки приведено на рис. 22.

Приступая к практическому решению задачи по определению величины угла погасания в кристаллах амфибола (или пироксена) в шлифе, надо выбрать разрезы с двумя отчетливо выраженными направлениями спайности. При исследовании цветных минералов

применяются сегменты  $n=1,647$ . На первых порах рекомендуется отработать следующую последовательность операций:

1. Выбранный разрез совместить с перекрестием нитей.

2. Найти и нанести на кальку проекции главных сечений индикатрисы кристалла.

3. Определить наименование осей.

4. На ту же кальку нанести проекции плоскостей спайности и отметить точку их пересечения буквой  $c$ .

5. Убедиться, что  $c$  совпало с проекцией одного из главных сечений индикатрисы.

6. Если совпадения не произошло, то из точки пересечения проекций спайности на проекцию главного сечения опустить перпендикуляр. Точку пересечения отметить —  $c'$ .

7. Замерять угол между  $c$  (или  $c'$ ) и ближайшей осью индикатрисы.

8. Записать угол погасания, например: угол погасания  $c : Ng = 21^\circ$ .

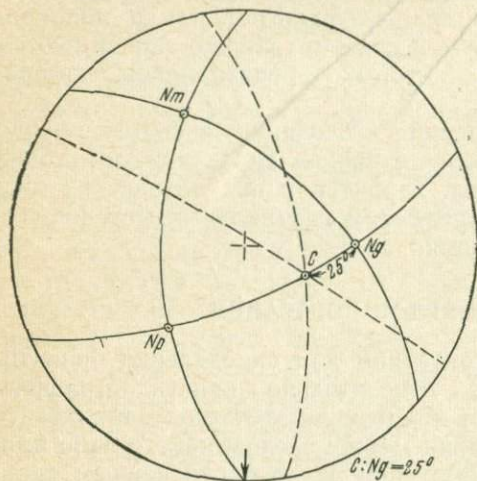


Рис. 22. Определение углов погасания. Роговая обманка

## ГЛАВА V

### ПЛАГИОКЛАЗЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

В современной методике исследования вещественного состава горных пород плагиоклазы стоят обособленной группой. Значение их трудно переоценить хотя бы потому, что для решения вопросов о составе пород, их происхождении, формировании и становлении информация, которую несут плагиоклазы, по важности и объему не сопоставима со сведениями, которые может дать любая другая группа минералов. Неудивительно, что точному определению плагиоклазов всегда придавалось большое значение, хотя на обычном столике микроскопа необходимая точность не всегда достижима.

В исследовании плагиоклазов федоровский метод произвел подлинную революцию: трудную в диагностическом и методическом отношении группу минералов представилось возможным определять почти с математической точностью.

Ниже будут приведены необходимые сведения по кристаллографии и кристаллооптике плагиоклазов. Будет изложена методика их исследования на федоровском столике. Во избежание повторения систематика плагиоклазов здесь опускается.

## ПЛАГИОКЛАЗЫ

Эта группа породообразующих минералов относится к числу наиболее распространенных и в подавляющем большинстве магматических пород составляет весьма существенный объем их кристаллической массы.

В зависимости от условий образования плагиоклазы приобретают те или иные формы кристаллов. Наиболее обычные среди них таблитчатые, иногда призматические, удлиненно-призматические и игольчатые, реже пластинчатые. Тенденцию к образованию этих форм они в той или иной степени проявляют не только в эффузивах, но и в большинстве полнокристаллических пород.

В правильных, хорошо образованных кристаллах всегда наиболее четко выражена грань второго пинакоида (010), третьего (001), иногда грани призмы (110) и ( $\overline{110}$ ), а также грани (021) и ( $\overline{021}$ ).

На свежем сколе кристаллов и в срезе шлифов отчетливо видна совершенная спайность по второму и третьему пинакоидам.

Отличительной особенностью плагиоклазов является способность их кристаллов к срастанию в двойники по разнообразным законам. В связи с тем, что эта особенность имеет существенное значение в принятых методиках кристаллооптического определения, необходимо кратко ознакомиться с наиболее распространенными законами двойникования плагиоклазов и элементами двойников. В интересах стройности изложения удобнее начать с последних.

## ЭЛЕМЕНТЫ ДВОЙНИКОВ

Среди элементов двойников различают плоскость срастания двойников, нормаль к плоскости срастания, двойниковую ось и плоскость двойникования.

*Плоскостью срастания двойников* называется грань кристалла, по которой произошло срастание двух индивидов двойника. Наиболее часто такой гранью у плагиоклазов является плоскость второго пинакоида (010), иногда третьего пинакоида (001), относительно редко грани призмы (110) и ( $\overline{110}$ ), плоскость первого пинакоида (100), грани (021) и ( $\overline{021}$ ), очень редко другие грани.

Срастание может произойти и по плоскости, не являющейся гранью, например, по так называемому ромбическому сечению.

Под микроскопом плоскость срастания наблюдается в виде тонкой прямой линии — шва срастания или двойникового шва. Она разграничивает индивиды (или неделимые) двойника.

*Нормаль к плоскости срastания* проектируется на кальке в виде точки — полюса плоскости срastания или полюса грани.

*Двойниковой осью* называется кристаллографическое направление, вокруг которого один индивид «повернут» на  $180^\circ$  относительно другого. Она может быть ориентирована перпендикулярно плоскости срastания или располагается параллельно ей. Двойниковая ось является бисектрисой углов между одноименными осями индикатрис двойников. В связи с этим она будет как бы осью оптического подобия двойников, если двойниковую ось совместить с оптической осью микроскопа, то при поворотах шлифа вокруг этой оси двойниковое строение «исчезает». Двойники будут вести себя как монокристалл, т. е. одновременно погасать и просветляться.

*Двойниковой плоскостью* называется плоскость, перпендикулярная двойниковой оси. В одних случаях она совпадает с плоскостью срastания, в других перпендикулярна ей. Двойниковая плоскость является плоскостью оптической симметрии двойников: если ее совместить с главным сечением одного из николей, то при поворотах столика микроскопа двойники будут иметь симметричные погасания.

### ДВОЙНИКИ ПЛАГИОКЛАЗОВ

Двойниками называются сложные кристаллы, в которых в закономерных парных срastаниях находится некоторое число индивидов (или неделимых) одного и того же минерала. При этом неделимые в парном сростке как бы повернуты один относительно другого на  $180^\circ$ .

В морфологическом отношении двойники могут быть простыми, когда они состоят из одной пары неделимых, групповыми — из двух-трех пар и, наконец, полисинтетическими — из серии пар (рис. 23).

Законы двойникования плагиоклазов принято систематизировать по положению двойниковой оси относительно плоскости срastания. По этому признаку все возможные комбинации закономерных срastаний укладываются в две группы законов. Первая группа — нормальных законов двойникования или нормальная гемитропия — она характеризуется тем, что двойниковая ось ориентирована перпендикулярно (нормально) плоскости срastания. Вторая группа — параллельных законов двойникования или параллельная гемитропия — двойниковая ось расположена параллельно плоскости срastания (на стереографической проекции двойника ось совпадает со следом плоскости срastания, в этом понятии она расположена в плоскости срastания).

Ниже приведены характерные признаки групп, а также краткое описание наиболее распространенных двойников. Сведения о редко встречающихся двойниках приведены в сводной табл. 3.

**Группа нормальных законов двойникования.** Отличительной

особенностью этой группы является симметричное погасание двойников относительно установленной плоскости срастания. (Плоскость срастания следует считать установленной, если она ориентирована в плоскости главного сечения одного из николей). Кроме того, при повороте столика микроскопа на  $45^\circ$  двойники приобретают одинаковую окраску (т. е. одну и ту же степень просветления).

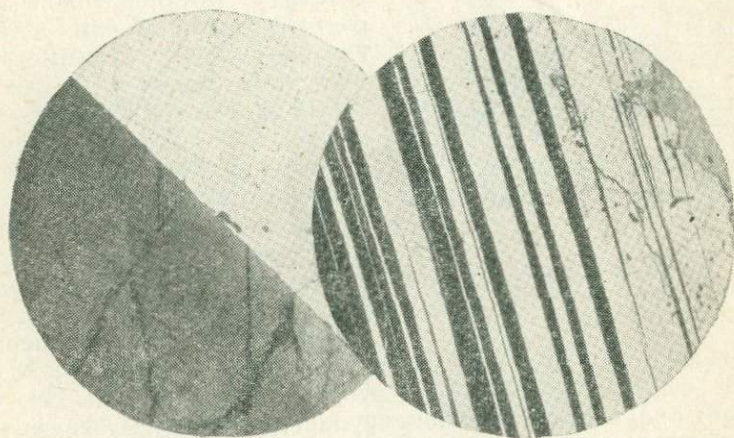


Рис. 23. Простые и полисинтетические двойники плагиоклазов (одноструктурные двойники)

В группу нормальных законов входят альбитовый, манебахский, бавенский и некоторые другие.

Альбитовый закон двойникования наиболее распространен среди плагиоклазов. Он характеризуется следующими признаками: плоскость срастания — второй пинакоид  $(010)$ , двойниковая ось — перпендикуляр к плоскости  $(010)$ . В морфологическом отношении двойники полисинтетические. Символ закона —  $\perp (010)$ .

Манебахский закон двойникования встречается реже. Двойники срастаются по третьему пинакоиду  $(001)$ , двойниковая ось ориентирована перпендикулярно к этой плоскости —  $(001)$ . Двойники простые. Символ закона —  $\perp (001)$ .

Бавенский закон двойникования наблюдается также относительно редко. Плоскостью срастания является грань  $(021)$  у правого двойника и  $(\overline{021})$  — у левого, двойниковая ось ориентирована перпендикулярно этой грани —  $(021)$  и  $(\overline{021})$ . Двойники простые. Символ закона —  $\perp (021)$  для правого и  $\perp (\overline{021})$  — для левого.

Бавенские двойники легко распознаются под микроскопом по внешнему виду, если срез проходит через кристалл перпендикулярно первой кристаллографической оси  $[100]$ . На таком разрезе на

фоне двух пересекающихся спайностей по второму и третьему пинакоидам отчетливо виден двойниковый шов, ориентированный почти по диагонали (рис. 24). При этом спайность по (010) одного индивида почти параллельна спайности по (001) в другом индивиде.

**Группа параллельных законов двойникования.** Отличительная особенность этой группы двойников заключается в том, что относительно установленной плоскости срастания они в общем случае имеют несимметричные погасания. Более того, для некоторых законов этой группы в значительной части зоны срастания характерно погасание двойников при повороте в одну сторону.

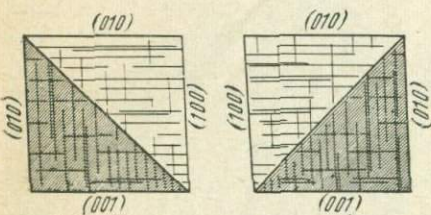


Рис. 24. Бавенские двойники. Разрез перпендикулярный [100]

По положению двойниковой оси относительно кристаллографических осей группа параллельных законов отчетливо делится на две подгруппы. В первой — двойниковой осью является кристаллографическая ось — подгруппа законов оси. Во второй — ориентировка двойниковой оси более сложная: она является перпендикуляром к кристаллографической оси — подгруппа сложных законов.

**Подгруппа законов оси.** В подгруппу входят карлсбадский, эстерельский, аклиновый и периклиновый законы.

Карлсбадский закон двойникования наиболее распространен в этой подгруппе. Плоскостью срастания является второй пинакоид (010), двойниковая ось расположена в плоскости срастания и совпадает с третьей кристаллографической осью [001]. Двойники простые. Символ закона  $\frac{[001]}{(010)}$ . Иногда встречается разновидность этого закона, у которой плоскостью срастания является (100). Символ закона  $\frac{[001]}{(100)}$ .

Эстерельский закон двойникования (или закон Ала) характеризуется тем, что плоскостью срастания является второй пинакоид (010), двойниковая ось совпадает с первой кристаллографической осью [100]. Двойники групповые. Символ закона —  $\frac{[100]}{(010)}$ .

Аклиновый закон двойникования — плоскость срастания — третий пинакоид (001), двойниковой осью является вторая кристаллографическая ось [010]. Двойники полисинтетические. Символ закона —  $\frac{[010]}{(001)}$ .

Периклиновый закон близок к аклиновому, а для некоторых номеров плагиоклазов неотличим от него.

У периклиновых двойников плоскостью срастания является не третий пинакоид, а так называемое ромбическое сечение. Несколькими словами об этом сечении.

Если у кристалла плагиоклаза развиты грани призмы (110) и  $\overline{(110)}$ , то плоскость этого сечения пересекает их так, что срез приобретает форму правильного ромба. В зависимости от состава пла-

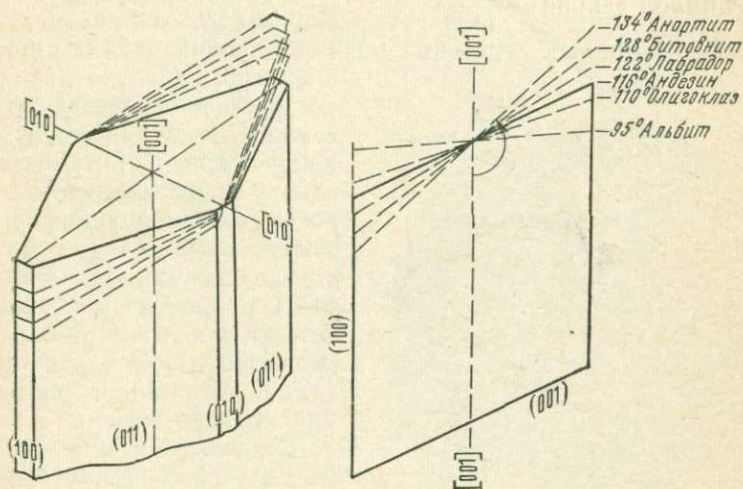


Рис. 25. Ромбическое сечение

гиоклазов длинная диагональ ромба, т. е. след пересечения ромбической плоскости со спайностью по (010), образует с третьей кристаллографической осью разные углы. В кристаллах андезина, где ромбическое сечение параллельно плоскости третьего пинакоида (001), этот угол равен  $116^\circ$ . У более кислых членов ряда угол постепенно уменьшается до  $95^\circ$  (у альбита). У основных разновидностей, наоборот, этот угол постепенно увеличивается и достигает  $134^\circ$  (у анортита) (рис. 25). При этом ось наклона сечения всегда является второй кристаллографической осью  $[010]$  — короткая диагональ ромбического сечения.

Итак, у периклиновых двойников плоскостью срастания является ромбическое сечение, а двойниковой осью — вторая кристаллографическая ось. Двойники полисинтетические. Символ закона —  $\frac{[010]}{p. c.}$ .

*Подгруппа сложных законов.* Наиболее распространенными законами этой подгруппы являются альбит-карлсбадский и альбит-эстерельский.

Альбит-карлсбадский закон двойникования (или закон Роктурне) характеризуется тем, что плоскостью срастания двойников является второй пинакоид (010), двойниковая ось ориентирована перпендикулярно третьей кристаллографической

оси [001]. Двойники групповые или полисинтетические. Символ закона —  $\frac{\perp[001]}{(010)}$ .

Альбит-эстерельский закон — плоскость срастания — второй пинакоид (010), двойниковая ось — перпендикуляр к первой кристаллографической оси —  $\perp [100]$ . Двойники полисинтетические. Символ закона —  $\frac{\perp[100]}{(010)}$ .

Более подробный перечень законов двойникования приведен в табл. 3.

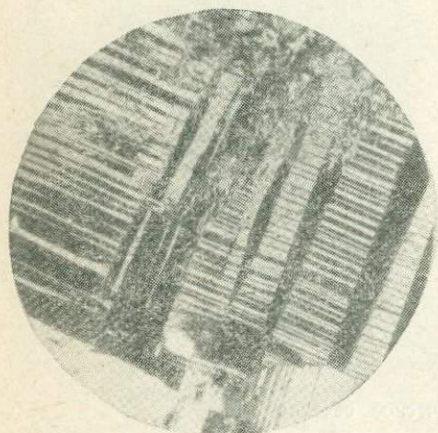


Рис. 26. Комбинированные двойники плагиоклазов

Кристаллы, сдвойникованные по нескольким законам одновременно, следует называть комбинированными двойниками. В отличие от них кристаллы, сдвойникованные только по одному какому-либо закону, можно назвать односложными (или моноструктурными) двойниками.

### КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАГИОКЛАЗОВ

Как уже отмечалось, плагиоклазы представляют непрерывный ряд минералов с постепенно меняющимся составом от чистого альбита через последующее возрастание содержания анортита до чистого анортита. По мере изменения состава меняются оптические свойства кристаллов: величина  $2V$ , оптический знак, величины двупреломления и показатели преломления. Характер изменения этих констант в общих чертах известен уже давно на основании материалов детальных исследований глубинных магматических и метаморфических пород. Однако на протяжении последних двух десятилетий в работах отечественных и зарубежных ученых многие вопросы кристаллооптики плагиоклазов получили уточнение и

дальнейшее разрешение. Это относится главным образом к плагио-клазам, формирование которых происходило в обстановке быстрого охлаждения, закалки, вследствие чего минералы сохранили неупорядоченность кристаллической решетки, а поэтому и несколько иные значения оптических констант по сравнению с кристаллами глубинных пород, формировавшихся в обстановке постепенно меняющегося теплового фона.

Суть явления в следующем.

Для плагиоклазов эффузивов, гипабиссальных интрузий и их жильных серий характерно состояние неупорядоченного распределения Al и Si в пространственных тетраэдрах кристаллических решеток. Пределы возможной неупорядоченности для разных членов ряда плагиоклазов различны. Так, чистый анортит может существовать только в упорядоченном состоянии. Это объясняется тем, что анортит имеет предельное стехиометрическое отношение  $Al:Si=1:1$ , при котором возможно только строгое чередование Al и Si тетраэдров. По направлению к альбиту, для более кислых членов

ряда по мере изменения отношения  $Al:Si$  пределы неупорядоченности возрастают и достигают максимальной величины для крайних членов — группы альбита, для которого отношение  $Al:Si=1:3$ . Наиболее чувствительными оптическими константами, позволяющими судить о структурном состоянии минералов этой группы, являются угол оптических осей и ориентировка оптической индикатрисы. Различие в величинах углов оптических осей у низко- и высокотемпературных плагиоклазов наиболее заметно выражено в кислой части ряда, меньше — в основной части.

Зависимость между составом плагиоклазов и величиной угла  $2V$  и оптическим знаком изображена на диаграмме (рис. 27).

Кривая значений  $2V$  у высокотемпературных плагиоклазов имеет сравнительно простой вид (рис. 27, 1—2). В начале ряда  $2V$  имеет отрицательные значения, а абсолютная величина угла постепенно возрастает по мере увеличения основности от средних углов до больших. В средней и основной части ряда кривая переходит в область положительных значений  $2V$ , образует точку перегиба и к концу ряда снова возвращается в область отрицательных значений.

Кривая значений  $2V$  у низкотемпературных плагиоклазов име-

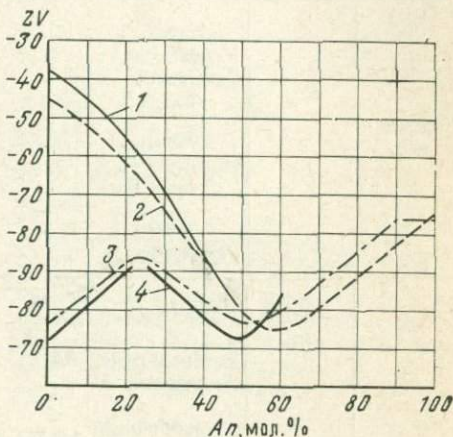


Рис. 27. Диаграмма углов оптических осей плагиоклазов. *Высокотемпературные:*

1 — по Шварцману (1956); 2 — по Смитту (1958); *низкотемпературные:* 3 — по Смитту (1958); 4 — по А. С. Марфунину (1962)

## Законы двойникования плагиоклазов

Группа законов (гемитропия)	Подгруппа законов	Закон	Плоскость срастания	Двойниковая ось	Морфология двойников
Нормальные		Альбитовый . . . . .	(010)	$\perp$ (010)	Полисинтетические
		Манебахский . . . . .	(001)	$\perp$ [001]	
		Бавенский правый . . . . .	(021)	$\perp$ [021]	Простые
		левый . . . . .	( $\overline{021}$ )	$\perp$ ( $\overline{021}$ )	
		Призмы правый . . . . .	(110)	$\perp$ (110)	»
		левый . . . . .	( $\overline{110}$ )	$\perp$ ( $\overline{110}$ )	
		Закон $x$ . . . . .	(100)	$\perp$ (100)	»
Параллельные	Законы оси	Карлсбадский . . . . .	(010) (100)	[001] [001]	Простые »
		Эстерельский (Ала) . . . . .	(010)	[100]	
		Аклиновый . . . . .	(001)	[010]	»
		Периклиновый . . . . .	Р. с.	[010]	
	Сложные законы	Альбит-карлсбадский (Роктурне)	(010)	$\perp$ [001]	Групповые Полисинтетические
		Альбит-эстерельский . . . . .	(010)	$\perp$ [100]	
		Манебах-эстерельский . . . . .	(001)	$\perp$ [100]	Групповые Полисинтетические
		Манебах-аклиновый . . . . .	(001)	$\perp$ [010]	
		$x$ -периклиновый . . . . .	(100)	$\perp$ [010]	» Групповые
		$x$ -карлсбадский . . . . .	(100)	$\perp$ [001]	

ет более сложный вид (рис. 27, 3—4). Она образует две точки перегиба. В начале и в средней части ряда располагается преимущественно в области положительных значений. Абсолютная величина угла меняется в более узком интервале, оставаясь всегда более 60°.

О характере изменений величин показателей преломления и двупреломления плагиоклазов можно судить по двум другим диаграммам (рис. 28, 29).

Кривые изменения величины двупреломления плагиоклазов разного происхождения близки по характеру. Но у высокотемпературных кристаллов значения ( $n_g - n_p$ ) выше в начале и в конце ряда и круче изменяются к его середине. В средней части ряда кривые сливаются (т. е. отличий не обнаруживается). И в том, и в другом случае диапазон колебаний — 0,007—0,013 (для наиболее распространенной части ряда — 0,007—0,010).

Показатели преломления на протяжении всего ряда, как это

видно из диаграммы (см. рис. 28), изменяются довольно равномерно и повышают значения по мере повышения основности. Наиболее заметные отличия между высоко- и низкотемпературными плагиоклазами обнаруживаются главным образом в начале ряда.

Диаграммы, с одной стороны, дают представление о том, как изменяются оптические свойства плагиоклазов по мере изменения их состава, а с другой — насколько не совпадает характер этих изменений у разных по происхождению кристаллов.

Из приведенных данных видно, что изменение большинства оптических свойств в поинтервальных промежутках ряда происходит либо в очень малых пределах значений констант, т. е. в пределах, сопоставимых с точностью существующих методов исследования (см. диаграмму двупреломления), либо происходит циклично, с повторяющимися значениями в разных частях ряда (угол  $2V$ , оптический знак). И в том, и в другом случае использовать эти свойства для определения состава практически невозможно.

Исключение представляют величины показателей преломления. Широкие пределы их конечных значений и равномерный характер изменения на протяжении ряда дают возможность практически использовать это свойство для определения состава. Иногда это и осуществляется с помощью иммерсионного метода.

Однако общепризнанным критерием для выяснения места плагиоклаза в структурно-изоморфном ряду является определение его оптической ориентировки. Установлено, что по мере изменения состава и состояния упорядоченности кристаллической решетки ориентировка оптической индикатрисы эволютивно изменяется на протяжении всего ряда в относительно широких пределах. При этом равномерному изменению состава соответствует равномерное изменение положения индикатрисы. Что же касается возможных пределов колебаний неупорядоченности решетки, то они сокращаются по мере приближения к основной части ряда (кристаллы чистого анортита всегда в упорядоченном состоянии). Но независимо от условий образования кристалла, т. е. и в интрузивных, и в

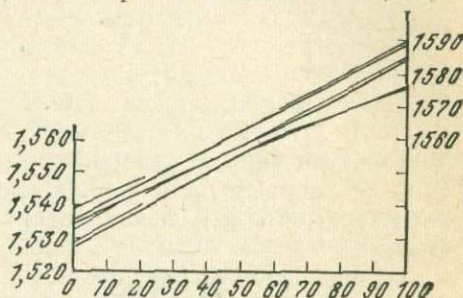


Рис. 28. Диаграмма показателей преломления плагиоклазов. Тонкие линии — высокотемпературные плагиоклазы, широкие — низкотемпературные (по Дж. Смитю).

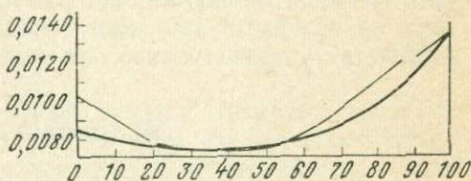


Рис. 29. Диаграмма двупреломления плагиоклазов (по Дж. Смитю)

вулканических и в метаморфических породах, данному его составу и степени упорядоченности соответствует только одна единственная ориентировка оптической индикатрисы относительно кристаллографических направлений. Это положение явилось принципиальной основой кристаллооптического метода определения плагиоклазов.

\* \*  
\*

Теоретически обоснованная и практически разработанная Е. С. Федоровым задача определения плагиоклаза по кристаллооптическим данным позволяет использовать два варианта решения:

- 1) определение плагиоклазов по положению кристаллографических элементов относительно главных сечений индикатрисы;
- 2) определение плагиоклазов по положению осей индикатрисы относительно характерных граней кристаллов.

Ниже будут рассмотрены оба варианта.

Первый из них — определение законов двойникования и состава плагиоклазов по положению проекции двойниковой оси и полюса срастания на плоскости главного сечения индикатрисы — известен как универсальный или федоровский метод.

### ФЕДОРОВСКИЙ МЕТОД

Определение состава плагиоклазов федоровским методом, с точки зрения последовательности проведения операций, отчетливо делится на три этапа:

1. На федоровском столике определяются плоскости характерных сечений индикатрисы в смежных индивидах двойника и с помощью сетки Вульфа их положение относительно осей столика проектируется на одну и ту же кальку. На кальку наносится проекция плоскости срастания и ее полюс. Графически на той же кальке определяется положение двойниковой оси. По сетке вычисляются координаты этой оси и полюса срастания относительно осей индикатрисы.

2. С помощью полярной стереографической сетки или сетки Федорова, у которой за начало отсчета взяты оси индикатрисы, по координатам наносится положение двойниковой оси и полюса срастания на плоскости главного сечения индикатрисы —  $NgNp$ . Другими словами, во втором этапе совершается переход от одной системы отсчета к другой.

3. Сопоставлением полученных проекций с кривыми на диаграммах В. В. Никитина, нанесенных на ту же плоскость, определяется закон двойникования и состав плагиоклазов.

## ПЕРВЫЙ ЭТАП. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ ХАРАКТЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ ИНДИКАТРИС ДВОЙНИКОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСЕЙ СТОЛИКА

Методика определения ориентировки осей индикатрис в двойнике отличается от изложенной выше в монокристалле только тем, что исследование ведется в двух смежных индивидах двойника и проекции сечений индикатрис наносятся на одну и ту же кальку.

На первых порах работу лучше всего начинать с кристаллами плагиоклазов из основных интрузивных пород габбро, норитов. У плагиоклазов из этих пород относительно широкие полосы двойников по сравнению с кислыми членами ряда. В них обычно слабее развита зональность.

Предварительно на плоском столике надо осмотреть шлиф и выбрать разрезы кристаллов с наиболее четкими полосками двойников.

Приступая к работе на федоровском столике, необходимо убедиться в том, что плоскость срастания двойников не осложнена наличием тонкого неделимого, не замеченного при предварительном осмотре на столике микроскопа.

В процессе работы надо следить за тем, чтобы шлиф оставался в одном и том же положении относительно сегментов столика. Для контроля выбранный кристалл, совмещенный с перекрестием окуляра, зарисовывается при нулевых отсчетах столика и время от времени его положение проверяется.

Если кристалл сложен тонкими полосками полисинтетических двойников, то вся работа ведется только с двумя смежными неделимыми в центре кристалла. Изучаемый участок кристалла совмещается с центром поля зрения. Работа ведется в следующей последовательности:

1. На столике микроскопа осмотреть шлиф и выбрать разрезы кристаллов с двойниками, обладающими резкими границами и четкими швами срастания.

2. Подготовить к работе федоровский столик.

3. Произвести наклейку шлифа. Произвести центрировку.

4. Выбранный в шлифе кристалл совместить с центром поля зрения, а шов срастания двойников — с перекрестием нитей.

5. Зарисовать кристалл при нулевых отсчетах столика.

6. Подготовить к работе кальку.

7. Найти положение главных сечений индикатрисы и определить наименование ее осей ( $Ng_1$ ,  $Nm_1$ ,  $Np_1$ ) для первого индивида и нанести их на кальку.

8. Установить оси столика в нулевое положение и проверить положение кристалла.

9. Найти положение главных сечений индикатрисы и определить наименование ее осей ( $Ng_2$ ,  $Nm_2$ ,  $Np_2$ ) для второго индивида и нанести их на ту же кальку.

10. Вернуть оси столика в нулевое положение и проверить положение кристалла.

Если обнаружится во время проверок, что кристалл по каким-либо причинам сместился со своего первоначального места, то дальнейшие наблюдения приостановить и работу начать сначала (с п. 4).

### УСТАНОВКА ПЛОСКОСТИ СРАСТАНИЯ

После того как главные сечения эллипсоидов двойника перенесены на кальку и определены наименования осей индикатрисы, необходимо на столике установить плоскость срастания двойника и спроектировать ее на ту же кальку.

Установка точного положения этой плоскости является важным элементом работы на федоровском столике. Несмотря на кажущуюся простоту, эта операция требует большой тщательности и аккуратности.

Задача установки сводится к тому, чтобы совместить плоскость срастания с плоскостью главного сечения николя. Операция производится в два приема:

1. Не прикасаясь к шлифу, поворотом по оси  $N$  двойниковый шов совместить с вертикальной нитью окуляра или ориентировать параллельно ей.

2. Наклонами по оси  $H$  совместить плоскость срастания с оптической осью микроскопа.

Точность совмещения с вертикальной нитью окуляра проверяется поворотами по оси  $I$ : при любых поворотах линия шва должна оставаться параллельной вертикальной линии.

Труднее проверить второй элемент операции. Дело в том, что хотя наклонами по оси  $H$  довольно быстро выбирается сектор, в котором двойниковый шов становится четкой тонкой линией, но безошибочно выбрать в этом секторе точное направление плоскости срастания трудно, даже располагая опытом. Необходимы проверки. Их может быть два вида.

Первый вид проверки заключается в том, чтобы путем серии повторных установок плоскости выбрать какой-то средний отсчет. Делается это так:

а) наклонами по оси  $H$  двойниковый шов устанавливается в такое положение, при котором он имеет вид очень четкой и очень тонкой черты;

б) записывается угол наклона оси  $H$  по соответствующей дужке;

в) ось  $H$  возвращается в исходное положение и снова повторяется установка плоскости.

Этот прием повторяется несколько раз и из серии отсчетов выбирается средний.

Второй вид проверки заключается в том, чтобы путем приподнимания и опускания тубуса «пройти» фокусом объектива по всей толщине плоскости срастания, т. е. так, как это делается при проверке точности ориентировки спайности. Тубус поднимается и опуска-

кается микрометрическим винтом. Если в фокусе появляются новые детали этой плоскости, надо уточнить ее положение.

После того как плоскость срастания установлена, координаты ее (отсчеты по осям столика) записываются в таблицу, а проекция наносится на кальку. На кальке же устанавливается полюс этой плоскости и обозначается  $Pc$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ ЗАКОНОВ ДВОЙНИКОВАНИЯ

Определение группы законов двойникования может быть произведено путем определения характера погасания двойников в зоне их срастания, т. е. после того как исследуемый двойник установлен в плоскости срастания.

Как уже отмечено, двойники разных групп в этой зоне погасают по-разному. Одни из них всегда погасают симметрично (группа нормальных законов), другие, в общем случае, гаснут несимметрично (группа параллельных законов). У последних в зоне срастания есть единственное направление, в котором двойники погасают тоже симметрично. Это направление образовано следом пересечения двух плоскостей — плоскости срастания с двойниковой плоскостью.

Это обстоятельство заставляет внимательно отнестись к выяснению характера погасания двойников. Для того чтобы гарантировать себя от ошибки, замеры углов погасания рекомендуется производить трижды, при трех положениях оси  $I$ : при нулевом отсчете, при повороте «на себя» на  $25-30^\circ$  и «от себя» на тот же угол.

Выводы о группе законов, к которой относится изучаемый двойник, записываются под таблицей.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

После того как плоскость срастания двойников установлена на столике и координаты ее записаны, производится замер углов погасания в каждом из индивидов. Для этого следует:

- 1) отпустить стопорный винт столика микроскопа;
- 2) поворотом по оси  $O$  сначала в одну сторону замеряется угол погасания одного индивида. Отсчет записывается. Вычисляется угол погасания;
- 3) поворотом в другую сторону гасится другой индивид. Отсчет записывается. Вычисляется угол погасания;
- 4) столик микроскопа возвращается в установочное положение;
- 5) по оси  $I$  шлиф поворачивается «на себя» на  $25-30^\circ$ . Ось фиксируется;
- 6) замеряются углы погасания индивидов двойника в этом положении;

7) столик микроскопа возвращается в установочное положение, ось  $I$  в нулевое;

8) по оси  $I$  шлиф поворачивается «от себя» на  $25-30^\circ$ . Замеряются углы погасания индивидов.

В заключение дается краткая формулировка; «В зоне срастания двойники гаснут несимметрично — группа параллельных законов».

Далее необходимо перейти к определению положения двойниковой оси.

Пространственное положение двойниковой оси и ее проекция на кальку могут быть определены двумя способами — по выходу, обнаруженному непосредственно с помощью федоровского столика, и по проекции оси, определенной с помощью графических построений. Оба способа применимы, каждый имеет преимущества и ограничения. Ниже приводится их описание.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДВОЙНИКОВОЙ ОСИ СПОСОБОМ ГРАФИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

Двойниковая ось является биссектрисой углов между одноименными осями индикатрисы двойников. Зная расположение и наименование осей индикатрисы в обоих индивидах двойника,

с помощью графических построений нетрудно найти ее проекцию на кальку.

Для этого поступают следующим образом: поворачивая кальку вокруг центра, совмещают на одной меридиональной линии точки выходов одноименных осей индикатрисы, например  $Ng_1$  и  $Ng_2$ , и проводят через них меридиональную дугу от полюса до полюса. Последовательно то же проделывают с  $Np_1$  и  $Np_2$ , а затем с  $Nm_1$  и  $Nm_2$ . Полученная точка пересечения трех дуг и является проекцией двойниковой оси (рис. 30).

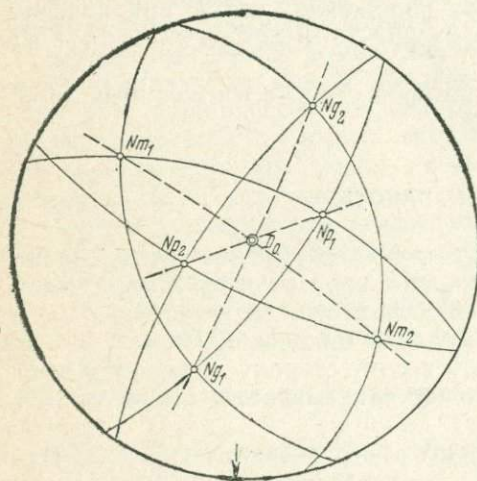


Рис. 30. Двойниковая ось. Проекция  $D_0$  на кальку

В идеальном случае дуги пересекаются в одной точке — это показатель точной и аккуратной работы. Иногда же, а на первых порах довольно часто, в результате допущенных неточностей, дуги, пересекаясь, образуют треугольник погрешностей. Раз-

меры треугольника могут быть разными, но считаются допустимыми, если длинная сторона его измеряется дугой не более  $20^\circ$ , а короткая не более  $10^\circ$ . За точку проекции двойниковой оси принимается центр тяжести треугольника погрешностей (рис. 31).

Графический способ определения положения двойниковой оси не эффективен в одном случае.

При исследовании полевых шпатов в альбитофирах, кварцевых кератофирах и некоторых других породах, содержащих очень кислый плагиоклаз — альбит первых номеров, во взаимном расположении оптических индикатрис двойников иногда обнаруживается одна особенность: одна пара одноименных осей индикатрисы, обычно  $Np_1$  и  $Np_2$ , на проекции располагается очень близко друг к другу. Вследствие этого две пары других одноименных осей расположатся почти на одной меридиональной линии.

В этом случае дуги, соединяющие одноименные оси индикатрис, пересекаются в одной точке только как исключение. Обычно же получается треугольник погрешностей, имеющий форму очень узкого и очень длинного клина (рис. 32). В данных условиях определить проекцию двойниковой оси, как центр тяжести треугольника, нельзя. Требуется либо дополнительные графические построения, как это рекомендует А. К. Подногин (1937 г.), либо, что представляется более

правильным, — определение двойниковой оси по непосредственному выходу.

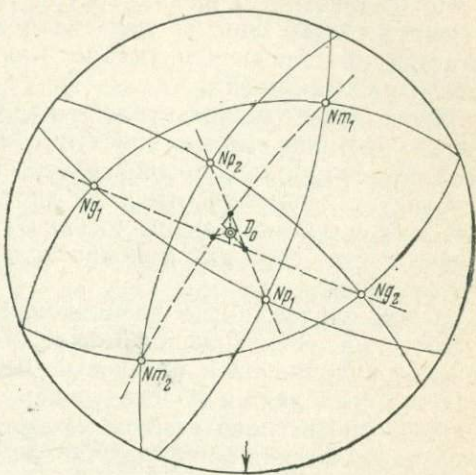


Рис. 31. Нахождение проекции двойниковой оси при наличии треугольника погрешностей

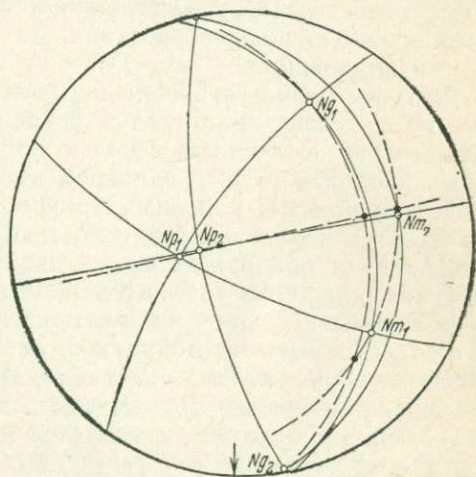


Рис. 32. Вид треугольника погрешностей при сближенном расположении пары одноименных осей

г.), либо, что представляется более

двойниковой оси по непосредственному выходу.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДВОЙНИКОВОЙ ОСИ И ДВОЙНИКОВОЙ ПЛОСКОСТИ ПО НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВЫХОДАМ

По отношению к плоскости срастания двойниковая ось может занимать только одно из двух возможных положений: она располагается либо перпендикулярно (нормально) к этой плоскости, либо параллельно ей.

После того как установлен характер погасания двойников в зоне срастания, можно приступить к определению выходов двойниковой оси или двойниковой плоскости.

Следует напомнить, что если двойниковая ось совмещена с оптической осью микроскопа (осью  $O$ ), то при поворотах по оси  $O$  двойник ведет себя как монокристалл, т. е. просветляется и гаснет одновременно.

В том случае, когда двойниковая ось находится вне пределов наблюдений, ее положение может быть точно установлено по положению двойниковой плоскости. Двойниковая плоскость, как известно, определяется по следующему признаку: двойник, установленный относительно этой плоскости, имеет симметричное погасание индивидов при поворотах по оси  $O$ .

Если ранее было установлено, что двойники в зоне срастания гаснут симметрично, то это указывает, что плоскость срастания одновременно является и двойниковой плоскостью. Тогда полюс этой плоскости одновременно является двойниковой осью. Отметку, обозначающую полюс срастания, на кальке надо дополнить знаком двойниковой оси —  $P_c = D_o$ .

Если же ранее установлено несимметричное погасание двойников, то всю зону срастания в пределах поворота по оси  $I$  надо внимательно исследовать с целью обнаружения направлений, в которых двойники гаснут одновременно, как монокристалл (выход двойниковой оси), или симметрично (след пересечения плоскости срастания с двойниковой плоскостью).

Если был обнаружен выход двойниковой оси, то его положение записывается в таблицу в виде отсчета по оси  $I$  и наносится на кальку на проекцию плоскости срастания в виде кружочка с отметкой  $D_o$ . Если был обнаружен след пересечения двойниковой плоскости с плоскостью срастания, эта точка наносится на кальку и отмечается знаком  $D_p$ . От нее по проекции плоскости срастания отсчитывается  $90^\circ$  и делается отметка выхода двойниковой оси  $D_o$ .

Описанный способ позволяет надежно определить положение двойниковой оси почти для всего ряда плагиоклазов. Исключение представляют олигоклазы, а точнее — средние номера олигоклазов № 19, 20, 21, которые для всех законов двойникового срастания по второму пинаконду дают прямые или близкие к прямым погасания. В этом случае определение лучше производить с помощью графических построений.

При внимательном анализе полученных данных выбор способа определения двойниковой оси может быть сделан заранее, тем более, что признаки, указывающие на неприменимость одного из них, выражены обычно достаточно отчетливо.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ КООРДИНАТ ДВОЙНИКОВОЙ ОСИ И ПОЛЮСА СРАСТАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСЕЙ ИНДИКАТРИСЫ

Для того чтобы вычислить координаты двойниковой оси и полюса срастания относительно осей индикатрисы, надо замерять по сетке Вульфа угловые расстояния от этих точек до выходов осей индикатрис. Результаты замеров до одноименных осей усредняются и записываются в таблицу, образец которой приведен ниже.

При вычислении координат  $D_o$  и  $P_c$  следует обратить внимание на два обстоятельства.

Таблица 4

Вычисление координат двойниковой оси  
и полюса срастания относительно осей индикатрисы

Оси индикатрисы	$P_c$		$D_o$	
	Отсчеты	Координаты	Отсчеты	Координаты
$Ng$	—		—	
$Nm$	—		—	
$Np$	—		—	

Во-первых, разница отсчетов угловых расстояний до одноименных осей должна быть минимальной и, если она не превышает 2—3°, точность работы можно считать хорошей.

Во-вторых, при больших угловых расстояниях, превышающих 90°, следует учитывать не непосредственно отсчитанный угол, а его дополнение к 180°. Например, при замере угловых расстояний до осей  $Ng_1$  и  $Ng_2$  получены отсчеты  $Ng_1=87^\circ$  и  $Ng_2=95^\circ$ . Второй отсчет надо откорректировать:  $Ng_2=180^\circ-95^\circ=85^\circ$ . Записывается:  $Ng_2=85^\circ$ .

Необходимость корректировки объясняется тем, что замеренный угол (95°) не является наименьшим. На сферической поверхности (часть которой изображает сетка Вульфа), где любая ось имеет два выхода по отношению к данной точке (двойниковой оси или полюсу срастания), ближайший выход расположен непременно на угловом расстоянии менее 90°. Так как оба выхода находятся на расстоянии 180° друг от друга, то располагая отсчетом

к одному из них, легко высчитать угловое расстояние до другого (ближайшего).

### ПОРЯДОК РАБОТЫ

Подготовить (разграфить) таблицу координат.

1. Поворачивая кальку вокруг центра, совместить на одну меридиональную кривую оси  $Ng_1$  и  $D_0$ .

2. Замерить угловое расстояние между ними и записать в таблицу отсчет (например:  $Ng_1=87^\circ$ ).

3. Поворачивая кальку вокруг центра, совместить оси  $Ng_2$  и  $D_0$ , и записать в таблицу отсчет.

Примечание. Если появилась необходимость откорректировать отсчет, то в таблицу записывается исправленный результат (например:  $Ng_2=95^\circ$ ,  $180-95=85^\circ$ , записывается:  $Ng_2=85^\circ$ ).

4. Усреднить полученные отсчеты и записать в графу «координаты» результат (например:  $\frac{87+85}{2}=86^\circ$ , координата  $D_0$  по оси  $Ng=86^\circ$ ).

Таким же образом вычисляются координаты по осям  $Np$  и  $Nm$ .

После того как координаты двойниковой оси вычислены, приступают к вычислению координат полюса срастания ( $P_c$ ). Работа ведется в той же последовательности.

### ВТОРОЙ ЭТАП.

#### НАНЕСЕНИЕ ПРОЕКЦИИ ДВОЙНИКОВОЙ ОСИ ( $D_0$ ) И ПОЛЮСА СРАСТАНИЯ ( $P_c$ ) НА ПЛОСКОСТЬ ГЛАВНОГО СЕЧЕНИЯ ИНДИКАТРИСЫ

Располагая координатами двойниковой оси и полюса срастания относительно осей индикатрисы, можно с помощью полярной стереографической сетки или сетки Федорова нанести их проекции на одну из плоскостей главного сечения индикатрисы.

Общий вид полярной сетки см. в прилож. 2. Она предназначена для нанесения проекций на плоскость главного сечения индикатрисы  $NgNp$ , поэтому оси индикатрисы расположены следующим образом:  $Ng$  и  $Np$  в плоскости сетки —  $Ng$  горизонтально,  $Np$  — вертикально, ось  $Nm$  расположена перпендикулярно плоскости сетки, она проектируется в центре в виде точки.

Отсчеты ведутся по оси  $Nm$  от центра к периферии, по оси  $Ng$  — от правой и левой полярных точек к центру, по оси  $Np$  — от верхней и нижней полярных точек к центру. Окружности и дуги проведены через  $5^\circ$ . Для начала проекции двойниковой оси ( $D_0$ ) и полюса срастания ( $P_c$ ) наносятся каждая на отдельную кальку (или, в крайнем случае, на одну, но разными цветами).

Подготовка кальки к работе на полярной стереографической сетке несложна. Она сводится к тому, чтобы отметить центр, про-

чертить окружность большого круга, обозначить индексами и буквами начало осей — координат  $Nm$ ,  $Ng$  и  $Np$ .

Техника нанесения проекций на плоскость индикатрисы также проста.

1. Подготовленную кальку наложить на стереографическую сетку.

2. От центра в любом направлении отсчитывается значение координаты по оси  $Nm$  (например,  $67^\circ$ ), ставится точка и прочерчивается концентрическая окружность, соответствующая отсчету.

3. От правой и левой полярных точек к центру отсчитывается значение координаты  $Ng$  (например,  $52^\circ$ ) и прочерчиваются дуги в правом и левом полукружье сетки.

4. Точно так же отсчитывается значение координат по оси  $Np$  ( $48^\circ$ ) и прочерчиваются дуги в верхнем и нижнем полукружье сетки.

Точки взаимного пересечения круга и дуг представляют проекции двойниковой оси (или полюса срастания) на плоскости  $NgNp$ . При точном выполнении измерения все линии пересекаются, образуя четыре точки по одной в каждом квадрате. В случае появления треугольников погрешностей за точку проекции двойниковой оси (или полюса срастания) принимаются их центры тяжести.

### ТРЕТИЙ ЭТАП.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАГИОКЛАЗОВ ПО ДИАГРАММАМ ПОЛЮСОВ СРАСТАНИЯ И ДВОЙНИКОВЫХ ОСЕЙ

Диаграммы полюсов срастания ( $P_c$ ) и двойниковых осей  $D_o$ . Определение производится с помощью специальных диаграмм, связывающих пространственную ориентировку кристаллографических и кристаллооптических элементов плагиоклазов с их составом. Общий вид диаграмм показан в прилож. 3, 4. Принцип построения диаграмм разработан Е. С. Федоровым и сводится к следующему.

На плоскость одного из главных сечений индикатрисы — на плоскость  $NgNp$  — проектируются положения двойниковых осей  $D_o$  (или полюсов плоскостей срастания  $P_c$ ) сначала для кристаллов, сдвойникованных по одному какому-то закону для всего ряда, затем по другому закону и т. д. (так как в основе этого построения лежит статистический метод, то для достоверности результатов количество замеров точек  $D_o$  должно быть достаточно большим). Точки проекций двойниковых осей для данного закона расположатся на плоскости  $NgNp$  в виде роя или полосы определенной конфигурации. При этом в пределах полосы плагиоклазы распределяются так, что в одном конце ее будут находиться наиболее кислые члены ряда, в середине они перейдут в средние, а в другом конце — в основные.

Если усреднить положение точек, соответствующих десятым номерам ряда, и только их оставить на плоскости  $NgNp$ , то вместо роя окажется пунктирная трасса с номерами десятичных точек от 0 до 10. Плавно соединяя точки этой трассы, мы получим кривую. Она будет соответствовать среднему положению точек проекции двойниковых осей для данного закона двойниковогоания. Тем же способом строятся диаграммы полюсов плоскостей срастания.

Сбор исходных данных для построения диаграмм представлял огромную по объему, очень кропотливую и точную работу. Первые кривые и первые диаграммы были построены Федоровым в 1898 г. Несколько позже тот же принцип построения использовали М. А. Усов (1910 г.), Дюпарк и Рейнгард (1923) и, наконец, один из учеников Федорова В. В. Никитин (1926 г.). В настоящее время наиболее точными являются диаграммы В. В. Никитина, окончательно отредактированные им в 1936 г.

Диаграммы  $P_c$  и  $D_o$  приведены раздельно. Сделано это, с одной стороны, для удобства пользования, а с другой — для того, чтобы оттенить некоторое различие их назначения.

С помощью диаграммы  $P_c$  определяется состав плагиоклазов и законы двойниковогоания нормальной группы.

С помощью диаграммы  $D_o$  определяется состав плагиоклазов и законы двойниковогоания параллельной группы.

Однако различие не только в этом.

Для того чтобы уяснить назначение диаграммы  $P_c$ , придется вернуться к описанному.

Уже было отмечено, что взаимное расположение кристаллографических и кристаллооптических элементов плагиоклазов является функцией их состава. Поэтому положение любого хорошо выраженного кристаллографического элемента, в частности полюса грани, относительно осей или характерных сечений индикатрисы может быть критерием для определения состава плагиоклаза. И не имеет значения — это надо подчеркнуть — как морфологически этот элемент выражен. Например, плоскость второго пинакоида (010) может быть: а) внешней гранью кристалла, б) плоскостью спайности, в) плоскостью срастания одного из видов двойников (альбитового, карлсбадского и др.).

Совершенно независимо от того, чем она является в данном случае, проекция полюса этой грани — для плагиоклаза данного состава — займет на плоскости сечения  $NgNp$  всегда одно и то же положение. Оно, это положение, будет меняться только в зависимости от состава минерала.

Таким образом, с помощью диаграммы  $P_c$  можно определить состав плагиоклаза независимо от того, по какому закону он сдвойникован (и даже если он не сдвойникован).

Кривые на этой диаграмме обозначены индексами граней, полюса которых на них спроектированы, и знаком перпендикуляра, стоящего перед ними, например:  $\perp (010)$ ,  $\perp (001)$  и др.

Для определения наименования законов двойникования, как уже описано, пользуются диаграммами и  $P_c$  и  $D_o$ .

Координаты двойниковой оси для группы нормальных законов двойникования, строго говоря, одни и те же, что и для полюса плоскости срастания. Естественно, что наименование закона определяется на диаграмме  $P_c$  по символу на соответствующей кривой.

В принятых обозначениях индекс закона выражает положение двойниковой оси относительно кристаллографических направлений и плоскости срастания. Индексы нормальных законов, как это видно, полностью совпадают с формой записи полюсов граней тех же законов.

Координаты  $D_o$  для группы параллельных законов не совпадают с координатами  $P_c$ . Наименование законов этой группы производится с помощью диаграммы  $D_o$ , также по индексам на соответствующей кривой.

### ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Для того чтобы произвести определение изученного кристалла по полученным данным, надо сопоставить положение проекций его двойниковой оси и полюса плоскости срастания с кривыми на диаграммах. Проще говоря, надо кальку с проекциями  $D_o$  и  $P_c$  наложить на соответствующую диаграмму, ориентируя при этом кальку нужным образом.

Кристаллы плагиоклазов, сросшиеся по нормальным законам, определяются на диаграмме  $P_o$ , где одним приемом устанавливается и закон двойниковая, и номер плагиоклаза.

Кристаллы плагиоклазов, сросшиеся в параллельные двойники, определяются в два приема: сначала по диаграмме  $P_c$ , где по проекции полюса плоскости срастания определяется номер плагиоклаза, а затем по диаграмме  $D_o$ , где определяется наименование его двойников. По той же диаграмме  $D_o$  еще раз определяется номер плагиоклаза. Это определение носит вспомогательный характер. Оно должно подтверждать правильность первого заключения о составе и, тем самым, правомерность наименования закона.

Основанием для выводов о составе плагиоклаза и законах двойникования служит совпадение точек проекции  $P_c$  и  $D_o$  с теми или иными кривыми. При этом факт совпадения точки проекции с кривой является критерием для установления наименования закона, а положение точки проекции относительно десятичных точек кривой — для установления состава плагиоклаза.

На этом заключительном этапе работы требуется внимание и правильный анализ получаемых результатов.

Нужно это по следующим причинам:

1. Довольно часто точки проекций  $P_c$  и  $D_o$  попадают не на кривую, а несколько в стороне от нее. Это и не удивительно, так как сами кривые являются лишь осевыми линиями полос точек, принадлежащих тому или иному закону. Номер плагиоклаза в этом

случае определяется по положению перпендикуляра, опущенного на кривую с точки проекции.

2. На кальке получается четыре проекции одной и той же точки по одной в каждом квадрате. Естественно ожидать такой вариант в работе, когда проекции совпадут с разными кривыми сразу в нескольких квадрантах, или расположатся на равных расстояниях от двух кривых в одном из квадрантов и т. д., т. е. появляется одновременно несколько вариантов внешне правомерных решений.

Для выбора наиболее правильного из них надо привлечь весь комплекс признаков, которыми характеризуется изучаемый кристалл. К ним относятся:

а) морфология двойника — простой, групповой, полисинтетический (альбитовые двойники всегда полисинтетические, карлсбадские, наоборот, простые и т. д.);

б) кристаллографическая выраженность зоны срастания. Например, бавенские двойники, если они рассматриваются в направлении [100], имеют черты, неповторимые в других двойниках. То же можно сказать о двойниках по закону призмы и некоторых других;

в) вероятность закона двойниковая — всегда вероятнее и при разных шансах предпочтительнее более распространенный закон двойникования;

г) соответствие по составу. Состав, определенный по проекции  $D_o$ , должен соответствовать составу по  $P_c$ . Поэтому из рассмотрения должны быть исключены варианты, где состав не совпадает с установленным по  $P_c$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАГИОКЛАЗОВ

По сравнению с низкотемпературными аналогами высокотемпературные плагиоклазы имеют ограниченное распространение. Их всегда следует ожидать в кайнотипных экструзиях, т. е. в свежих, не подвергшихся вторичным изменениям эффузивах и породах субвулканической фации, а также в краевых частях молодых гипабиссальных интрузий.

Как уже отмечено, явления закалки кристаллов в условиях быстрого охлаждения и затвердения магматической массы приводят к фиксации высокотемпературной модификации кристаллической решетки. Под влиянием внешних факторов, главным образом изменившейся температуры, в кристалле возникают усилия, ведущие к перестройке кристаллической решетки в более устойчивое в данных условиях, в упорядоченное состояние.

Таким образом, высокотемпературные кристаллы (в данном случае плагиоклазы) представляют самоупорядочивающиеся системы.

Степень упорядоченности, т. е. уровень завершенности перехода от одной модификации кристаллической решетки к другой, может быть различной в каждом отдельном случае в зависимости от

конкретных геологических условий, в которых происходило формирование данной горной породы. Оптическая ориентировка высокотемпературных плагиоклазов подчиняется в основном той же закономерности, что и у низкотемпературных образований, однако эта зависимость усложняется еще характером упорядоченности, вследствие чего кристаллографические направления претерпевают дополнительные отклонения относительно осей индикатрисы.

Для определения кислых и средних высокотемпературных плагиоклазов А. С. Марфуниным (1962) предложена диаграмма для кристаллов, сдвойникованных по трем наиболее распространенным законам: по альбитовому, карлсбадскому и альбит-карлсбадскому. На диаграмме (прилож. 5) проекции кристаллографических направлений плагиоклазов относительно осей индикатрисы изображены не в виде кривых, а дивариантными полями, каждая точка на площади которых определяется соотношением двух переменных — составом плагиоклазов и состоянием упорядоченности.

Дивариантное поле каждого закона двойникования ограничено двумя кривыми, характеризующими две крайние степени упорядоченности кристаллической решетки. Кривые обозначены цифрами, символизирующими уровень упорядоченности: 0,0 — состояние полной неупорядоченности и 1,0 — состояние полной упорядоченности. Интервалы между кривыми разделены дополнительными линиями для оценки промежуточных состояний (в условных величинах: 0,25, 0,50, 0,75).

Кроме того, дивариантные поля разделены изолиниями составов — короткими кривыми, соединяющими точки равных составов плагиоклазов на основных и дополнительных линиях. Изолинии проведены с интервалом, соответствующим 2 % анортитовых молекул.

Диаграммы с дивариантными полями А. С. Марфунина, несмотря на некоторую их ограниченность и по числу приведенных законов двойникования, и по составу определяемых плагиоклазов, по сравнению с диаграммами В. В. Никитина обладают определенным преимуществом: они позволяют определять состав плагиоклаза независимо от его принадлежности к высоко- или низкотемпературным модификациям. Если же определяется заведомо высокотемпературный минерал, то положение проекции полюса грани или двойниковой оси на площади поля позволяет решить вопрос и о степени упорядоченности его кристаллической решетки.

---

Состав плагиоклазов может быть определен еще одним вариантом решения задачи — исследованием ориентировки осей индикатрисы относительно кристаллографических плоскостей или зон. В петрографической литературе этот способ известен как «зональный метод». В следующей главе будет дано его описание.

## НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ НА ФЕДОРОВСКОМ СТОЛИКЕ

### ЗОНАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАГИОКЛАЗОВ

Зональный метод был предложен А. Риттманом в 1929 г. В нашей литературе он появился в 1933 г. в переводе Ю. Кузнецова\*.

При разработке метода А. Риттманом были использованы, с одной стороны, старые, давно известные приемы приблизительного определения состава плагиоклазов по углам погасания в определенных зонах (Мишель-Леви, Бекке и Беккер, Фуке и др.), а с другой — новые возможности, которые открыл федоровский столик, позволяющий получить более полное представление об ориентировке индикатрисы в кристаллах.

Для характеристики метода лучше всего привести слова самого А. Риттмана, который пишет: «Необходимо категорически подчеркнуть, что он (зональный метод — С. О.) ни в коем случае не может служить заменой более точного и теоретически лучше обоснованного федоровского — никитинского метода...». Далее он отмечает, что зональный метод позволяет «определить состав плагиоклаза с точностью до 5—10%» (Риттман, 1933).

В своем развитии зональный метод претерпел определенную эволюцию и усовершенствование. В настоящее время считается, что точность его около 2—5 номеров (Соболев, 1964). Если к этому добавить, что метод прост, удобен, что на замеры требуется очень мало времени, не нужны графические построения, то станут ясны причины его популярности среди петрографов.

На рис. 33, *а, б, в, г, д, е* в схематическом обобщенном виде показаны положения элементов индикатрисы в различных группах ряда плагиоклазов относительно пинакоидальных плоскостей кристаллов. Из рассмотрения рисунков видно, что если производить оптические исследования в створах этих плоскостей или в кристаллографических зонах, то каждая группа плагиоклазов может быть охарактеризована определенными величинами углов между кристаллооптическими и кристаллографическими элементами. Иначе говоря, величины этих углов могут быть критерием для определения состава плагиоклазов.

В практике петрографических исследований такие углы измеряются как углы погасания.

Характер изменения углов погасания в кристаллографических зонах плагиоклазов изучен детально, и под зональным методом в широком смысле слова следует подразумевать комплекс иссле-

\* Приложение к книге А. К. Подногина «Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова». М., Нефтеиздат, 1933.

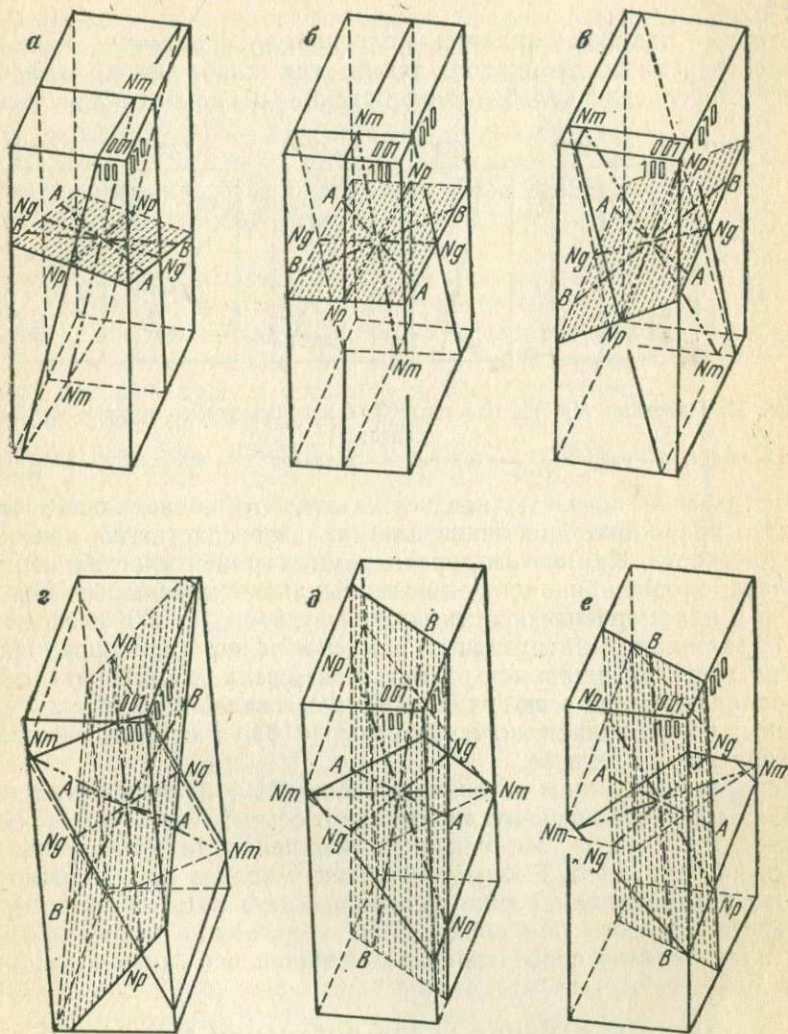


Рис. 33. Ориентировка элементов индикатрисы относительно пинакциональных плоскостей в различных группах плагиоклазов:  
*a* — альбит, *б* — олигоклаз, *в* — андезин, *г* — лабрадор, *д* — битовнит  
*e* — анортит

дований в разнообразных зонах кристаллов этой группы. Но в практическом отношении зоны неравноценны. Наибольший интерес представляет зона второго пинакоида (010). Поэтому здесь зональный метод будет рассматриваться применительно только к этой зоне.

Второй пинакоид является плоскостью срастания наиболее распространенных двойников, таких, как альбитовые, карлсбадские, эстерельские, альбит-карлсбадские и альбит-эстерельские.

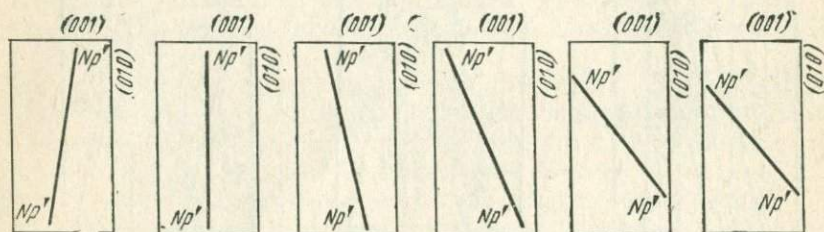


Рис. 34. Проекция  $Np'$  на плоскость (100) в различных группах плагиоклазов:

*a* — альбит, *b* — олигоклаз, *в* — андезин, *г* — лабрадор, *д* — битовинит, *е* — анортит

Статистические подсчеты подтверждают, что подавляющее большинство природных двойников плагиоклазов срастаются именно в этой плоскости. Кроме того, среди других граней кристаллов плагиоклаза второй пинакоид лучше выражен морфологически не только в идиоморфных кристаллах эффузивов, но и в ксеноморфных образованиях интрузивных и метаморфических пород. Наконец, по второму пинакоиду развита совершенная спайность, обычно совпадающая с осью удлинения кристалла. Все это, с одной стороны, подчеркивает значение зоны (010), а с другой — облегчает поиски ее в шлифе.

Характерным углом погасания в зоне (010) является угол между швом плоскости второго пинакоида и осью  $Np'$ .

Представление о том, как меняется величина этого угла для одного из направлений зоны у различных членов ряда, можно получить, рассматривая серию рисунков (рис. 34), на которых на плоскости первого пинакоида (100) кристаллов разных групп ряда плагиоклазов спроектирована меньшая ось сечения индикатрисы  $Np'$  \*.

#### ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ УГЛОВ ПОГАСАНИЯ В ЗОНЕ (010) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА ПЛАГИОКЛАЗА

Характер изменения величин углов погасания в зоне (010) трудно исследовать с помощью федоровского столика.

\* Во избежание недоумений, которые могут возникнуть при сравнении рис. 33 и 34, необходимо еще раз подчеркнуть, что под  $Np'$  подразумевается не направление, близкое к  $Np$ , а меньшая ось сечения индикатрисы в данном направлении. В этом значении  $Np'$  употребляется и далее в тексте.



пологим изгибом, замеры углов погасания рекомендуется производить в этой части зоны через сближенные интервалы, т. е. через 3—5° поворота по оси I.

Второе направление — [100], как уже сказано выше, опознается по наличию спайности по (001). Устанавливая двойник в этом направлении, необходимо добиться такого положения шлифа, при котором полосы спайности по (010) и (001) были бы наиболее четкими, тонкими и резкими.

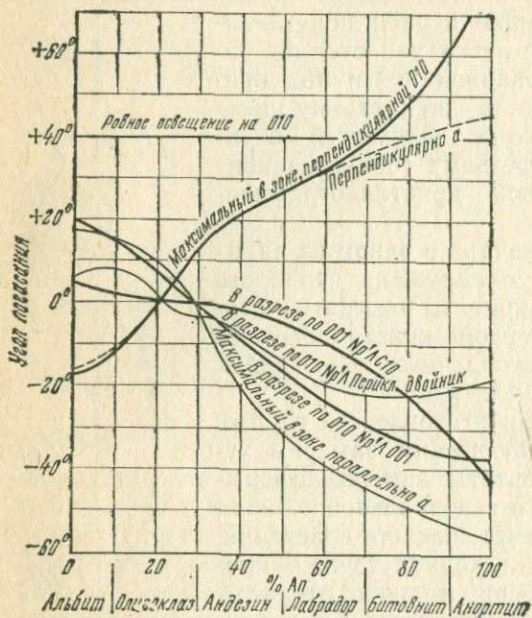


Рис. 36. Диаграмма углов погасания в характерных направлениях для ряда плагиоклазов

максимального угла погасания. В этом отношении зональный метод имеет преимущества перед основным методом изучения плагиоклазов, который мало применим к такой важной структурной разновидности кристаллов, как микролиты эффузивных пород.

Для определения состава плагиоклазов по углам погасания используют диаграмму, приведенную ниже (рис. 36). На диаграмме для каждого из характерных направлений дана отдельная кривая, но для зоны  $\perp$  (010) на значительном участке кривые сливаются в одну линию и расходятся лишь в начале ряда (от  $N=0$  до  $N=13$ ) и в конце его (начиная с  $N=60$ ).

Для закаленных кристаллов эффузивных пород, имеющих неупорядоченную структуру, приводится еще одна диаграмма (рис. 37). На ней даны две кривые, обе для направления

В практике исследований приходится пользоваться и тем, и другим направлением. При изучении достаточно крупных кристаллов с хорошо различимыми под микроскопом деталями внутреннего строения предпочтительнее направление [100]. Но в тех случаях, когда кристаллы настолько малы, что такие подробности строения, как спайность по (001), уверенно установить невозможно, надо использовать направление

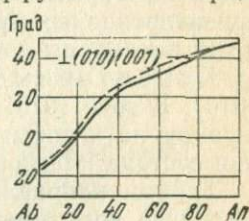


Рис. 37. Диаграмма углов погасания в направлении [100] для высокотемпературных и низкотемпературных плагиоклазов

[100]. Одна из них для упорядоченных кристаллов — идентична кривой на первой диаграмме. Другая — для кристаллов эффузивных пород.

Отсчеты углов погасания, взятые по второй кривой, дают составы плагиоклазов почти на 10 номеров ниже, чем по первой.

**На диаграммах откладываются углы погасания, замеренные на установленных двойниках.** Углы, замеренные на смежных индивидах, имеют вспомогательное значение.

### Проверка зоны (010).

Приступив к исследованию разреза кристалла плагиоклаза, трудно по одним внешним данным решить вопрос о наименовании плоскости, в которой срослись его двойники. Если при некоторых условиях можно легко распознать плоскости (021) и  $(\overline{021})$  на разрезах, перпендикулярных первой кристаллографической оси, или плоскости (110) и  $(\overline{110})$  на разрезах  $\perp [001]$ , или ромбическое сечение для основных и кислых плагиоклазов на разрезах  $\perp [010]$ , то различить плоскость (010) от плоскости (001) (кстати, наиболее часто встречающиеся плоскости срастания двойников) не так просто.

Вопрос может приобрести определенную остроту в тех случаях, когда кристаллы плагиоклазов не обладают четко выраженным габиту-сом, т. е. признаки плоскости (010), перечисленные

в вводном разделе этого метода, не могут быть использованы, а двойники представлены комбинированными разностями, в которых одновременно присутствуют срастания и по второму и по третьему пинакоидам.

Возникает необходимость в методике или приеме, который позволил бы уверенно выделять зону срастания (010) среди других зон и отличить ее прежде всего от зоны (001).

В свое время А. Ритманом был изучен характер изменения величины углов погасания разных по составу плагиоклазов в зонах (010) и (001). Для этой цели было исследовано несколько образцов плагиоклазов, взятых из разных пород и представляющих разные части ряда (№ 0,5, 13, 25, 35, 52, 73, 97). На основании

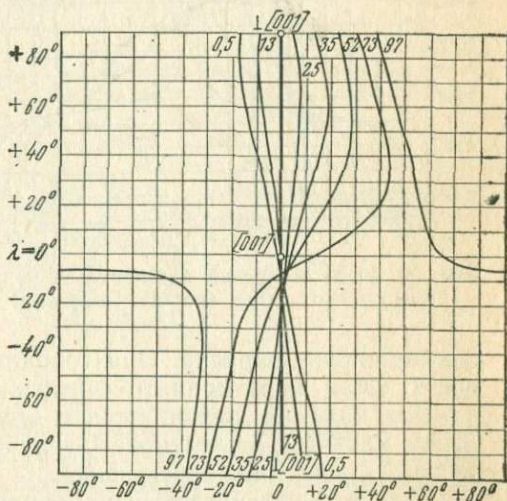


Рис. 38. Углы погасания плагиоклазов в зоне (010)— $Np'$ : (010) (по А. Ритману)

систематического замера углов погасания в зонах (010) и (001) были построены графики, которые приводятся на рис. 38, 39.

Как видно из первого из них (см. рис. 38), в зоне (010) большинство членов ряда, от альбита до битовнита № 73, имеют угол между  $Np'$  и следом плоскости (010) — угол погасания  $Np':(010)$  — менее  $45^\circ$ . Только у крайних членов ряда — битовнитов и анортитов этот угол круто возрастает.

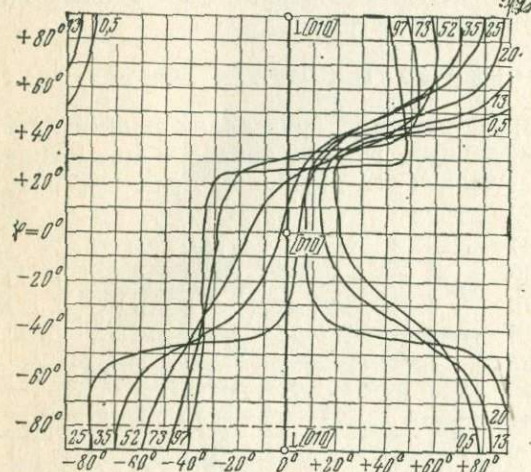


Рис. 39. Углы погасания плагиоклазов в зоне (001) —  $Np':(001)$  (по А. Риттману)

В зоне (001) — второй график — отчетливо видна другая закономерность. У большей части ряда (№ 0 до № 73) характерны резкие изменения величины угла  $Np':(001)$ . При этом вблизи выхода оси [100] они не превышают  $45^\circ$ , а за этой частью зоны быстро возрастают.

Реакция кристаллов на ввод компенсатора в разных зонах разная.

В зоне (010) для большей части ряда (от № 0 до № 73) характерна зеленовато-голубая интер-

ференционная окраска. Она сохраняется при любых наклонах по оси  $I$ . Знак зоны принято считать отрицательным.

Для крайних членов ряда в этой зоне (для № свыше 73) окраска меняется от зеленовато-голубой до желтой или желто-оранжевой — знак зоны переменный.

В зоне (001) интерференционная окраска меняется от зеленовато-голубой вблизи выхода [100] до желтой и желто-оранжевой при наклонах по  $I$  более  $40^\circ$ . Знак зоны переменный.

По описанному признаку — наличие устойчивого отрицательного знака зоны — можно уверенно опознавать зону (010) для большей и наиболее распространенной части ряда от № 0 до № 73. Более основные различия плагиоклазов в этой зоне имеют переменный знак, т. е. не могут быть уверенно отличены от других различий в зоне (001), а поэтому не могут быть точно и определены.

В этом ограниченность зонального метода.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАКА ПОГАСАНИЯ

При углах погасания меньше  $16^\circ$  возникает двухзначность решения вопроса о составе плагиоклаза. Как видно из диаграммы, эту область углов кривая проходит дважды — до нулевой линии

и после нее, охватывая часть ряда от № 0 до № 34. Для правильного решения вопроса о том, в какой части кривой брать отсчет, необходимо прибегнуть к дополнительным наблюдениям.

Плоскости спайности по второму и третьему пинакоиду, пересекаясь, образуют углы не равные  $90^\circ$ . Один из них острый — около  $88^\circ$ , другой тупой — около  $92^\circ$ . Если ось  $Np'$  спроектировать на плоскость первого пинакоида, как это показано на рис. 40, а и

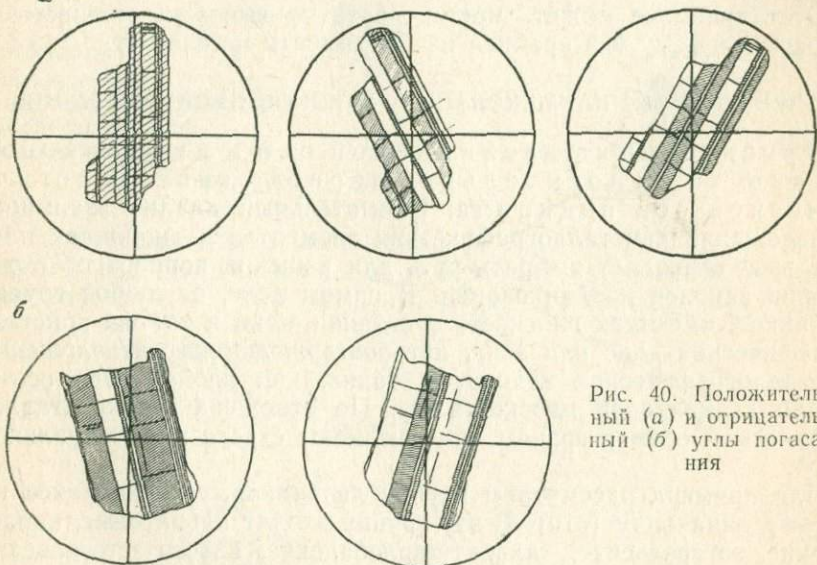


Рис. 40. Положительный (а) и отрицательный (б) углы погасания

б, то у начала ряда, у альбитов и средних олигоклазов, ось  $Np'$  будет направлена в тупой угол. В этом случае в момент погасания двойников вертикальная нить окуляра пересечет вершины тупых углов, образованных полосками спайности по (010) и (001) (рис. 40, б). Такие углы погасания принято называть отрицательными, их отсчеты ведутся на отрезке кривой ниже нулевой линии — номера плагиоклазов от 0 по 20.

У олигоклаза № 21 погасание прямое, на диаграмме ему соответствует точка пересечения кривой с нулевой линией отсчета.

Для остальной части ряда  $Np'$  направлена в острый угол, образованный плоскостями пинакоидальной спайности. Углы погасания считаются положительными, а отсчеты ведутся на кривой выше нулевой линии — номера плагиоклазов от 22 и выше.

Изложенный способ определения знака погасания применим в том случае, если кристалл достаточно крупный, а на его разрезе плоскость спайности по (001) находится в пределах, доступных наблюдению на столике. Но при исследовании конкретного разреза этого может и не быть. И если при этом выбор очень ограничен, приходится использовать дополнительные признаки, кото-

рые позволяют с определенной долей уверенности решать вопрос о знаке погасания.

Одним из таких признаков, как уже отмечалось, является величина показателя преломления. При грубых замерах в шлифе — при условии, что показатель преломления канадского бальзама около 1,54 — состав плагиоклаза считается больше № 20, если при поднятии тубуса световая полоска перемещается на минерал (в направлении  $Np$ ).

Этот прием не может претендовать на высокую точность, и прибегать к нему без крайней необходимости не следует.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИМЕНОВАНИЯ ЗАКОНОВ ДВОЙНИКОВАНИЯ

Ориентировка двойниковой оси и двойниковой плоскости относительно первой кристаллографической оси индивида. Внимательный анализ взаимного расположения кристаллографических элементов в двойниках плагиоклазов позволяет выбрать путь для решения вопроса об определении законов двойникования. В самом деле, в любой группе двойников, имеющих плоскость срастания, один и тот же кристаллографический пояс или зону, нет повторяющегося расположения кристаллографических элементов, таких, как двойниковая ось —  $D_o$  или двойниковая плоскость  $D_p$ . По отношению к кристаллографическим осям и граням они занимают строго индивидуальное место.

Для примера рассмотрим группу двойников, срастающихся по второму пинакoidу (010). В эту группу входят альбитовые, карлсбадские, эстерельские, альбит-карлсбадские, альбит-эстерельские двойники. Напомним, что  $D_o$  и  $D_p$  у них по отношению к кристаллографическим осям и граням ориентированы следующим образом:

альбитовый закон . . . . .	$D_o \perp (010)$	$D_p \parallel (010)$
карлсбадский » . . . . .	$D_o = [001]$	$D_p : [100] \approx 26^\circ$
эстерельский » . . . . .	$D_o = [100]$	$D_p : [001] \approx 26^\circ$
альбит-карлсбадский закон . . . . .	$D_o : [100] \approx 26^\circ$	$D_p \parallel [001]$
альбит-эстерельский » . . . . .	$D_o : [001] \approx 26^\circ$	$D_p \parallel [100]$

Для распознавания ориентировки двойника в шлифе исключительное значение имеет обнаружение первой кристаллографической оси одного из неделимых. Как уже было отмечено,  $[100]$  обнаруживается по четкому морфологическому признаку — наличию спайности в двух направлениях. В непосредственной близости от выхода этой оси, т. е. в нешироком секторе зоны (010), прилегающем к направлению  $[100]$ ,  $D_o$  и  $D_p$  расположены следующим образом (см. табл. 5 и рис. 41).

Из приведенного видно, что  $D_o$  (или  $D_p$ ) либо совпадают с выходом  $[100]$ , либо располагаются под углом около  $26^\circ$  к ней. Вся дальнейшая работа сводится к выяснению их точного расположения.

## Расположение двойниковой оси и двойниковой плоскости в двойниках, срастающихся по второму пинакoidу (010)

Закон	Положения $D_o$ и $D_p$ по отношению к выходу [100]	Примечание
Альбитовый	$D_p \parallel [100]$	$D_p \parallel (010)$
Карлсбадский	$D_p: [100] \approx 26^\circ$	$D_p \perp (010)$
Альбит-карлсбадский	$D_o: [100] \approx 26^\circ$	
Альбит-эстерельский	$D_p \parallel [100]$	$D_p \perp (010)$
Эстерельский	$D_o = [100]$	

Некоторые вопросы практического характера.  $D_o$  и  $D_p$  распознаются под микроскопом по отчетливым оптическим признакам (см. стр. 50). Но, приступив к поискам их выходов, надо внима-

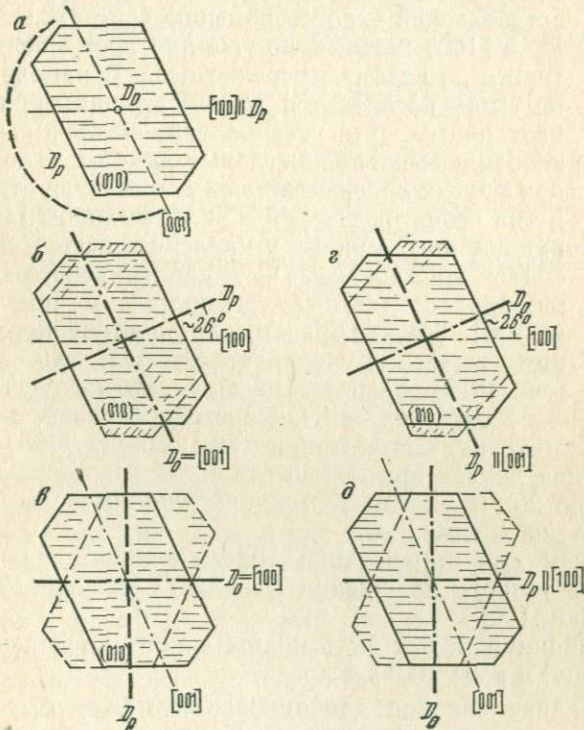


Рис. 41. Ориентировка  $D_o$  и  $D_p$  в двойниках, срастающихся по (010). Двойники:

а — альбитовый, б — карлсбадский, в — эстерельский, г — альбит-карлсбадский, д — альбит-эстерельский

тельно следить за особенностями погасания обоих индивидов. Уже первые наблюдения за углами погасания дают важную информацию для принятия правильного решения. Любая пара неделимых, срастаясь по одному из законов, дает характерный график углов погасания (рис. 42, 43). Как видно из графиков, в секторе зоны (010), прилегающем к выходу [100] установленного индивида, двойники отчетливо делятся по характеру погасания на две подгруппы. В первую входят альбитовые, карлсбадские и альбит-эстерельские двойники, неделимые которых гаснут при повороте столика в разные стороны (одно это уже говорит о непосредственной близости выхода  $D_p$ ). Во вторую подгруппу входят эстерельские и альбит-карлсбадские двойники — их неделимые гаснут при повороте в одну сторону (признак, указывающий на близость выхода  $D_o$ ).

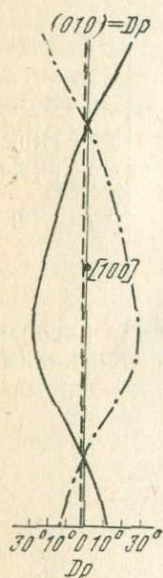


Рис. 42. График углов погасания альбитовых двойников лабрадора в зоне (010)

Из всех возможных вариантов по углам погасания в направлении первой кристаллографической оси бесспорно может быть установлен только один закон — эстерельский — по совпадению  $D_o$  с [100]. Совпадение  $D_p$  с [100] характерно уже для двух законов — альбитового и альбит-эстерельского. В направлении [100] по углам погасания и другим внешним признакам они неотличимы. Для установления различия между ними необходимы дополнительные замеры углов погасания при других положениях оси  $I$ , при поворотах «от себя» и «на себя» на угол  $20\text{--}30^\circ$ . С выходом [100] не совпадают ни  $D_o$ , ни  $D_p$  у карлсбадского и альбит-карлсбадского двойников — у карлсбадского  $D_p$ , а у альбит-карлсбадского  $D_o$  расположены под углом  $\sim 26^\circ$  к [100]. Таким образом, для достоверного определения положения двойниковой оси или двойниковой плоскости в зоне (010), необходимо и достаточно сделать три замера при трех положениях оси  $I$ . Первый, основной, замер производится в положении, соответствующем выходу [100] — исходное положение, два других при поворотах оси  $I$  «на себя» и «от себя» на угол около  $26^\circ$  (с учетом возможной ошибки — на угол  $26 \pm 4^\circ$ ) от исходного положения.

Основанием для определения наименования закона служит установление точного положения  $D_o$  или  $D_p$  в зоне (010) относительно выхода [100].

Тот же принцип может быть положен при определении законов двойникования в зоне (001) и др.

Наименование законов двойникования может быть определено по морфологическим признакам. Такая методика разработана А. С. Марфуниным (1962). Она основана на выявлении ориентировки положительного и отрицательного концов оси [100], характера погасания и т. д. Главные положения ее приведены ниже.

Ориентировка первой кристаллографической оси  $[100]$  и положение плоскостей спайности по  $(001)$  и  $(010)$ . Общепринятая ориентировка кристалла пла-

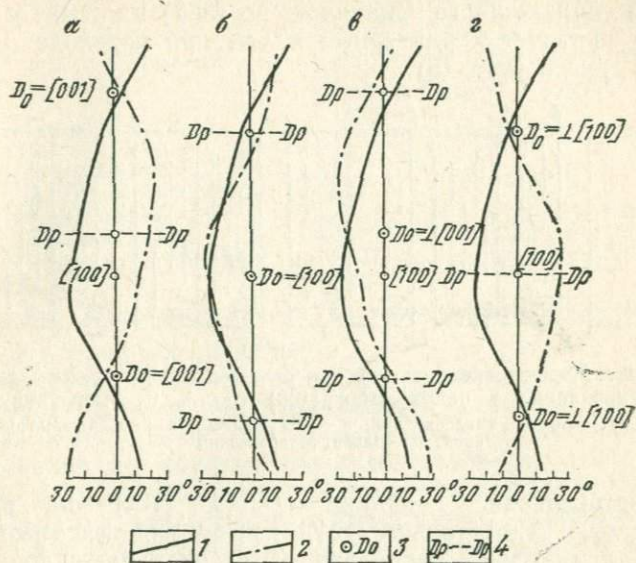


Рис. 43. Графики углов погасания параллельных двойников лабрадора в зоне  $(010)$ :  
 а — карлсбадский, б — эстерельский, в — альбит-карлсбадский и г — альбит-эстерельский.  
 1 — кривая погасания установленного индивида; 2 — кривая погасания смежного индивида; 3 — проекция двойниковой оси  
 4 — проекция двойниковой плоскости

гиоклаза приведена на рис. 44. На этом же рисунке дана ориентировка кристаллографических осей с обозначением их положительных и отрицательных концов и положение плоскостей спайности по  $(001)$  и  $(010)$ . В первом октанте углы между осями имеют такие приблизительные значения:  $\alpha \approx 93^\circ$ ,  $\beta \approx 116^\circ$ ,  $\gamma \approx 90^\circ$ . Угол между  $(001)$  и  $(010)$  около  $94^\circ$ .

Считается, что положительный конец оси  $[100]$  обращен к исследователю, если у рассматриваемого индивида тупой угол  $(001) : (010)$  расположен слева внизу (или справа сверху) (рис. 44).

Во всех двойниках рассматриваемой группы спайность по  $(010)$  естественно ориентирована параллельно двойниковому шву. Положение спайности по  $(001)$  более сложно и в данном случае более симптоматично, так как именно оно опре-

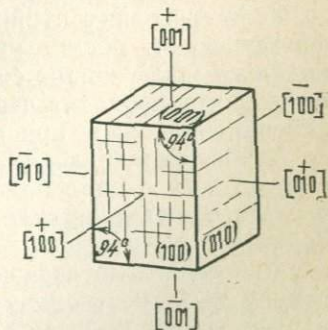


Рис. 44. Ориентировка кристалла плагиоклаза

деляет знак конца оси  $[100]$  на установленном разрезе кристалла. Так, у альбитовых двойников —  $D_o \perp (010)$  — положительному концу  $[100]$  установленного индивида соответствует отрицательный конец  $[100]$  сопряженного. Спайность по  $(001)$  на стыке у двойникового шва образует характерный излом при переходе из одного индивида в другой (рис. 45).

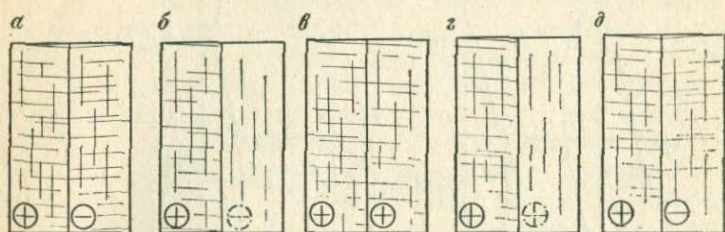


Рис. 45. Морфологические особенности двойников плагиоклаза, ориентированных в направлении  $[100]$  (по А. С. Марфунину): а — альбитовый, б — карлсбадский, в — эстерельский, г — альбит-карлсбадский, д — альбит-эстерельский

Альбит-эстерельские двойники —  $D_o \perp [100]$  — на разрезах, ориентированных относительно  $[100]$ , имеют вид, сходный с альбитовыми: параллельно расположены разнозначные концы осей  $[100]$ , полосы спайности по  $(001)$  на стыке образуют характерный излом (см. 45, а, д). Сходство усугубляется симметричным погасанием индивидов. Однако отличие быстро обнаруживается при поворотах по оси  $I$  — во всех направлениях, кроме  $[100]$ , погасание индивидов несимметрично.

Карлсбадские двойники —  $D_o = [001]$  — имеют важный внешний признак — спайность по  $(001)$  видна только у установленного индивида. У смежного она становится видимой при повороте по  $I$  на значительный угол — около  $52^\circ$ . Таким образом, направление  $[100]$  у неделимых не совпадает и в одну сторону обращены разнозначные концы осей.

У эстерельских двойников —  $D_o = [100]$  — первые кристаллографические оси обоих индивидов расположены параллельно, их положительные концы совпадают (рис. 45, в). Спайность по  $(001)$  без излома проходит через двойниковый шов. Погасание индивидов одновременное при повороте в одну сторону.

Альбит-карлсбадские двойники —  $D_o \perp [100]$  — по внешнему виду сходны с карлсбадскими — спайность по  $(001)$  видна только у установленного индивида (у смежного она становится отчетливо видимой при повороте по оси  $I$  на угол около  $52^\circ$ ). Таким образом, первые кристаллографические оси индивидов не параллельны, но в одну и ту же сторону (под углом  $\sim 52^\circ$ ) направлены их однозначные концы (рис. 45, г).

Погасание происходит в одну сторону, но индивиды гаснут не одновременно.

Сравнительные морфологические признаки различных двойников

Двойники	Ориентировка концов оси [100] индивидов и характер погасания	
	установленный	смежный
Альбитовый . . . . .	+	—
Альбит-эстерельский . . . . .	+	—
Карлсбадский . . . . .	+	—
Эстерельский . . . . .	+	+
Альбит-карлсбадский . . . . .	+	+

Ниже приводится табл. 6 сравнительных морфологических признаков различных двойников.

Приведенные методики не универсальны и каждая в отдельности имеет ограничения, вытекающие из самих принципов, заложенных в их основу. Так, определение наименования законов двойникования по морфологическим признакам, среди которых одним из ведущих является ориентировка концов [100], будет малоэффективна в приложении к кристаллам, сдвойникованным в тонкие и тончайшие полисинтетические двойники, и к мелким микролитам, так как достоверное установление направления спайности по (001) в этом случае весьма затруднительно. Прямое определение наименования законов по расположению  $D_o$  и  $D_p$  относительно [100] применимо во всех случаях, где используется зональный метод, но для средних олигоклазов от № 18 до № 22, имеющих практически прямые погасания, этот способ мало применим. В каждом конкретном случае это надо учитывать.

### ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Установка кристалла.** Кристалл ориентируется относительно плоскости срastания двойников и выясняется наименование этой плоскости. Для этого двойниковый шов устанавливается параллельно вертикальной нити окуляра и наклонами по оси  $H$  приводится в положение наибольшей тонкости и четкости. С помощью компенсатора определяется наименование зоны срastания. Признаком зоны (010) является устойчивая зеленовато-голубая интерференционная окраска при любых поворотах по оси  $I$  (если состав плагиоклаза не выше № 73).

Затем кристалл ориентируется относительно спайности по (001). Для чего поворотом по оси  $I$  один из индивидов устанавливается в положение, при котором спайность по (001) видна наиболее четко. Такой индивид двойника принимается за установленный, угол угасания его обозначается как  $E_y$  (сросшийся с ним индивид называется сопряженным или смежным, угол угасания его

$E_c$ ). Отсчет по  $I$  в этом положении столика фиксируется и принимается как исходный.

Определение состава. Во всех случаях, когда один из индивидов удалось ориентировать относительно спайности по (001), определение состава плагиоклаза производится способом в направлении первой кристаллографической оси. (Если это по каким-либо причинам добиться не удастся — слишком малы размеры кристаллов — микролитов или тонки полоски двойников — определение состава производится по максимальному углу погасания).

Замеряются и записываются величины углов погасания —  $E_y$  и  $E_c$ . Состав плагиоклаза определяется по величине  $E_y$ . Плагиоклазы эффузивов, гиабиссальных интрузий и их жильных серий определяются по высокотемпературной кривой диаграммы (рис. 37). Если нет предварительных данных о степени упорядоченности кристаллов, то необходимо измерять величину  $2V$  (для кислых и средних плагиоклазов).

Определение закона двойникования. Наименование законов двойникования определяется по положению двойниковой оси  $D_o$  или двойниковой плоскости  $D_p$  относительно первой кристаллографической оси [100]. Для решения вопроса привлекаются также морфологические признаки — ориентировка концов оси [100], спайности по (001), характер двойникования (двойники простые, групповые, полисинтетические) и т. д.

Окончательные результаты исследования оформляются в виде таблицы. Рекомендуется следующая запись (табл. 7).

В приведенных примерах записи результатов исследования в графе 5 дают три замера углов погасания при трех положениях

Таблица 7

Определение закона двойникования

№ пп.	Порода	Характер двойникования	Знак погасания	Углы погасания в зоне (010)			Ориентировка $D_o$ ( $D_p$ ) по отношению к [100]	Состав (группа, номер), закон
				замер	$E_y$	$E_c$		
037	Габбро	Полисинтетические	—	1	+28°	-28°	$D_p \parallel [100]$ $D_p \parallel [100]$	Лабрадор № 54, альбитовый
				2	+24°	-24°		
				3	+32°	-32°		
18/4	Габбро-норит	Простые	—	1	+34°	-22°	$D_p: [100] = 26^\circ$	Лабрадор № 65, карлсбадский
				2	+28°	-28°		
				3	+21°	-31°		
051	Габбро-норит	Полисинтетические	—	1	+36°	+20°	$D_o: [100] = 26^\circ$	Лабрадор № 70, альбит-карлсбадский
				2	+18°	+34°		
				3	+30°	+30°		

оси  $I$ . Первый замер основной, по значению  $E_y$  его определяется состав плагиоклаза. Второй и третий замеры производятся после поворота столика по оси  $I$  «на себя» и «от себя» на угол около  $26^\circ$  от исходного положения. Следует только учитывать, что точно «попасть» на выход  $D_o$  или  $D_p$  трудно, из-за ошибок, которые возникают при установке кристалла в исходное положение. Поэтому после поворота «на себя» или «от себя» требуется некоторая доводка, уточнение положения кристалла и проверка, после которых выход  $D_o$  или  $D_p$  обычно уже не вызывает сомнения.

Перед величиной угла погасания указывается знак конца первой кристаллографической оси (если его удалось установить). Это одновременно дает представление о характере погасания — разноименные знаки при  $E_y$  и  $E_o$  указывают на погасание индивидов в разные стороны, одноименные знаки — на одностороннее погасание. На основании полученных данных заполняются графы 6 и 7.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЛИНАТРОВЫХ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ

### Общие замечания

Щелочные или калинатровые полевые шпаты занимают одно из ведущих мест по своему значению в горных породах. В количественном отношении, по данным А. Н. Заварицкого, они значительно уступают только плагиоклазам и лишь немного объему всех цветных породообразующих минералов вместе взятых. В отличие от плагиоклазов распространение их ограничено главным образом кислыми и средними — преимущественно щелочными — породами.

Присутствие калинатровых полевых шпатов придает породам светлую окраску и обуславливает их желтый, розовый, красный или светло-серый цвет. В структурном узоре пород, особенно там, где они являются главными породообразующими минералами — в гранитах, гранодиоритах, граносиенитах, монцонитах и т. д. — их распределение и форма выделений среди других компонентов носят подчиненный характер, они образуют ксеноморфные выделения и только в эффузивах, в пегматитах и некоторых других породах присутствуют в виде хорошо образованных призматических или таблитчатых кристаллов.

На форме выделений сказываются в первую очередь условия кристаллизации, главным образом химизм магмы — ее кислотность, обуславливающая относительную вязкость, ее щелочность, а также стабильность теплового фона кристаллизующего расплава.

Если меняются условия — меняется габитус кристаллов. Могут появиться такие формы, как пластинчатая, столбчатая или игольчатая.

В породах эффузивного облика липаритового состава вследствие меняющихся условий кристаллизации часто возникают две резко различные генерации кристаллов калинатровых полевых шпатов, присутствующих одновременно в одном и том же теле: вкраплен-

ников, интрателлурических образований, имеющих форму относительно крупных толстых таблиц или призм, и мельчайших игольчатых кристаллов — микролитов, появившихся в поверхностных (или приповерхностных) условиях и, как правило, сгруппированных в радиально лучистые агрегаты — сферолиты.

Из естественных кристаллографических ограничений лучше развиты грани третьего (001) и второго (010) пинакоидов, грани призмы (110) и  $(\bar{1}\bar{1}0)$ , хуже — грани (101), (201) и (111). На сколах кристаллов и их срезах (в шлифах) хорошо выражена совершенная спайность по (001) и менее совершенная, но ясно видимая по (010).

Известны две структурные разновидности калинатовых полевых шпатов: моноклинные — санидины и ортоклазы и триклинные — микроклины.

Связь калиевых полевых шпатов со щелочной ветвью плагиоклазов, с альбитами, в значительной мере предопределяется особенностями их кристаллической решетки. В каркасной структуре полевых шпатов, основой которой является группа (Al, Si) O<sub>2</sub>, одновалентные катионы K и Na располагаются в пространственных полостях каркаса и могут находиться в любых количественных соотношениях друг с другом.

Более ограничена растворимость в пределах этого ряда анортитовой (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) и целъзиановой (BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) составляющих полевых шпатов, что, вероятно, связано с ограниченными возможностями структурной перестройки основы каркасной группы и, в частности, с изменением соотношения в ней ионов Al и Si.

Щелочные полевые шпаты характеризуются невысокими показателями преломления, ниже 1,54, и низким двупреломлением ( $ng - np$ ) = 0,005—0,007. В шлифах обычной толщины под микроскопом наблюдается серая или серо-белая интерференционные окраски и низкий всегда отчетливо отрицательный рельеф.

Оптические и кристаллографические особенности калинатовых полевых шпатов сведены в табл. 8, которая приводится ниже.

Представление о полевых шпатах калинатового ряда значительно расширилось благодаря исследованиям советских и зарубежных ученых. Особо следует отметить монографию А. С. Марфунина (1962 г.).

В результате применения наиболее современных точных методов изучения тончайших структур кристаллов были получены данные, которые позволили систематизировать уже известные отрывочные сведения и обобщить новые материалы о калинатовых полевых шпатах, как об упорядочивающейся кристаллической системе. Установлено, что модификации неупорядоченных кристаллов этой группы имеют более широкое региональное распространение в различных комплексах горных пород — шире, чем это представлялось ранее. Выяснилось, что некоторые минералогические особенности, в частности: связь между степенью упорядоченности, вещественным составом и оптическими свойствами более

## Оптические и кристаллографические особенности калинатровых полевых шпатов

Константы	Минералы		
	Санидины	Ортоклазы	Микроклины
Симметрия	Моноклинная	Моноклинная (псевдомоноклинная)	Триклинная
Формы кристаллов	Толстотаблитчатая, короткопризматическая, пластинчатая по (001), столбчатая и игольчатая по (100)		
Слайность	Совершенная по (001), менее совершенная по (010)		
Двойники	Карлсбадские, реже бавенские и манебахские		Альбит-периклиновые (решетчатые), карлсбадские, бавенские, манебахские
$n_g$	1,5245—1,5267	1,5250—1,5300	1,5277—1,5321
$n_m$	1,5245—1,5267	1,5242—1,5289	1,5256—1,5301
$n_p$	1,5198—1,5218	1,5192—1,5238	1,5215—1,5253
$(n_g - n_p)$	0,0047—0,0069	0,0058—0,0062	0,0062—0,0068
$2V$	0,0°—45,0°	45,0°—85,0°	45,0°—85,0°
Оптические знаки	Отрицательные		
Оптическая ориентировка	Пл. $NgNp \parallel (010)$ Угол $a:Np=0-9^\circ$ , $Nm \parallel b$ или пл. $NgNp \perp (010)$ $Ng \parallel b$	Пл. $NgNp \perp (010)$ Угол $a:Np=3-12^\circ$ $Ng \parallel b$	Пл. $NgNp \approx \perp (010)$ Угол $a:Np'=5-6^\circ$ на разрезе $\parallel (010)$ $a:Np'=15-19^\circ$ на разрезе $\parallel (001)$

сложная, чем, например, у плагиоклазов. Она не всегда поддается однозначной и достоверной расшифровке в процессе обычного микроскопического изучения.

В настоящее время полное и точное изучение минералов этой группы мыслится как комплекс методов и прежде всего как сочетание оптического и рентгеноструктурного исследований, позволяющих определить положение минерала в структурном ряду, его состав и т. д. В связи с этим обычная методика оптических исследований подлежит пересмотру. Наиболее рациональная ее форма будет рассмотрена ниже, после изложения современных представлений об особенностях развития структур минералов этого ряда.

Изучение тонкостей строения кристаллов калинатровых полевых шлатов позволило проследить в них определенную направленность процесса перехода высокотемпературных образований в низкотемпературные модификации кристаллов. В кратком, а поэтому в несколько схематическом виде, это можно изложить следующим образом.

С момента образования из магматического расплава в кристаллах происходит ряд превращений, завершающихся формированием наиболее устойчивой в данных условиях упорядоченной кристаллической решетки.

В глубинных магматических породах в обстановке относительно стабильных физико-химических параметров процесса кристаллизации магмы эти превращения происходят постепенно и почти повсеместно завершаются, вероятно, к моменту полной консолидации и ее остывания.

В излившихся породах, в эффузивах и экструзиях (отчасти в жильных породах и в эндоконтактах интрузий) в условиях быстрого охлаждения расплава резко снижается скорость переходных процессов — происходит закалка кристаллов. Существование непрерывного калинатрового ряда подтверждается наличием среди высокотемпературных образований эффузивов вполне гомогенных кристаллов, представляющих различные промежуточные члены ряда.

Рентгеноскопическое и оптическое исследование кристаллов, в которых превращения были приостановлены закалкой на разных уровнях, дало возможность следующим образом представить ход процесса.

Наименее упорядоченную часть ряда возглавляют высокотемпературные минералы. Они характеризуются вполне определенными данными — кристаллизуются в моноклинной сингонии, имеют низкие значения угла  $2V$ , ниже  $40^\circ$ .

Гомогенные высокотемпературные кристаллы находятся в метастабильном состоянии. При понижении температуры твердый раствор этих кристаллов обнаруживает тенденцию к распаду на две фазы — на калиевую и натровую. Происходит пертитизация кристаллов.

В зависимости от конкретных геологических условий, определяющих большую или меньшую эффективность диффузионных движений в кристаллах, пертиты могут быть выражены по-разному. В одних случаях они настолько крупные, что хорошо видны невооруженным глазом (макропертиты) или при малых увеличениях микроскопа (микропертиты). В других — они неразличимы даже при максимальных увеличениях, но могут быть установлены рентгеновским методом (субмикропертиты). В третьих — тончайшее пертитовое строение, есть основание предполагать, но рентгеновским методом оно не устанавливается (субрентгенопертиты).

Глубина поляризации фаз пертитов или степень распада пропорциональна структурной упорядоченности. Под степенью упо-

рядочности кристаллической решетки разумеется уровень перехода одинаковых атомов (радикалов, субъядер) к расположению их по правильной системе точек, т. е. к однородному их структурному положению в кристаллических решетках.

На первых порах упорядочение идет с сохранением моноклинной симметрии кристалла, позже наблюдается постепенный переход к триклинной ориентировке. Различается «моноклинная» и «триклинная упорядоченность». По степени моноклинной упорядоченности — по мере повышения порядка выделяются «высокие», «промежуточные» и «низкие» санидины. Высокие, т. е. наименее упорядоченные, санидины от всех остальных членов ряда отличаются характерной оптической ориентировкой — плоскость оптических осей параллельна (010). С повышением упорядоченности в высоких санидинах в них происходит своеобразное изменение такой оптической константы, как угол оптических осей —  $2V$  — постепенно понижается (от  $60^\circ$  до  $0^\circ$ ).

В промежуточных и низких санидинах плоскость оптических осей перпендикулярна (010), а величина  $2V$  с повышением упорядоченности постепенно повышается и достигает в низких, т. е. в наиболее упорядоченных санидинах величины  $44-45^\circ$ .

По степени триклинной упорядоченности выделяются «высокие», «промежуточные» и «максимальные» микроклины. Оптическая ориентировка кристаллов в этой части ряда более или менее однообразна: плоскость оптических осей близка, но не совпадает с направлением перпендикуляра к (010). Это несовпадение, или угол между  $\perp$  (010) и осью  $Ng$ , по мере увеличения порядка увеличивается (т. е. возрастает триклинность кристалла). В том же направлении возрастают значения  $2V$  (от  $44-45$  до  $84^\circ$ ).

Переход от моноклинной к триклинной упорядоченности ( $2\nu > 45^\circ$ ) сопровождается развитием микроструктурного двойникового, вызванного фазовыми превращениями.

В наиболее завершенном виде в упорядоченных максимальных микроклинах оно реализуется в форме решетчатых двойников, т. е. образованием полисинтетических двойников, представляющих комбинацию альбитового и периклинового законов. Для менее упорядоченных микроклинов — промежуточных и высоких — более характерно субмикроскопическое двойникование. Оно неразличимо оптически, но четко фиксируется рентгеновским методом. Есть ряд доводов, указывающих на существование еще более тонкого субрентгеновского двойникового (А. С. Марфунин, 1962).

Микроструктурное двойникование часто затрудняет оптическую диагностику кристаллов. Так, в ряде случаев — при наличии триклинности, отчетливо установленной рентгеновским методом, при значениях  $2\nu > 50^\circ$  — кристалл не обнаруживает «оптической триклинности» и под микроскопом он неотличим от моноклинного. Псевдомоноклинная форма симметрии в данном случае объясняется наличием тончайшей сетки равномерно расположенных и правильно чередующихся субмикроскопических неделимых, т. е. урав-

новешенность двойникования субмикроскопически сдвойникованного кристалла.

Такое же положение будет наблюдаться в кристаллах с уравновешенным субрентгеновским двойникованием.

В случае неуравновешенного двойникования оптически фиксируется различная степень «оптической триклинности». Как исключение, она может быть равной той степени триклинности, которая соответствует упорядоченности несдвойникованного кристалла. Во всех остальных возможных вариантах оптическая триклинность будет ниже реальной.

За оптически моноклинными (псевдомоноклинными) субмикроскопически или субрентгеновски сдвойникованными минералами, с углами  $2V$  более  $45^\circ$  и плоскостью оптических осей, близкой к (010), сохранено групповое название ортоклазов.

Неуравновешенность двойникования может носить местный характер в разных участках кристалла, обуславливая его блоковое строение. При этом каждый из блоков может иметь свою величину оптической триклинности.

Между степенью упорядоченности, пертитовым состоянием и микроструктурным двойникованием существует определенная связь. А. С. Марфуни характеризует ее следующим образом: «Все природные щелочные полевые шпаты, упорядоченные в той или иной степени (триклинная упорядоченность), представляют собой пертиты. Все пертиты состоят из проросших друг друга псевдомоноклинных блоков микроскопически, субмикроскопически и субрентгеновски (пропорционально степени уменьшения порядка) сдвойникованных натровой и калиевой фаз; кристаллографические направления этих псевдомоноклинных блоков совпадают. При продвинувшейся упорядоченности ( $2V > 50^\circ$ ) фазы пертитов представлены почти чистыми конечными членами» (Марфуни, 1963, стр. 126).

Упорядочение каждой из фаз пертитов происходит автономно и они «... или близки, или натровая фаза более упорядочена, чем калиевая...».

Наиболее надежным критерием упорядоченности и наиболее чутким ее индикатором является величина угла оптических осей, которая не зависит ни от степени фазового распада, ни от характера симметрии, ни от оптической ориентировки, а является отражением существующего в данный момент структурного сорасположения ионов Al и Si в каркасной решетке.

Предположительная зависимость между углом  $2V$  и состоянием упорядоченности выражается в виде диаграммы (рис. 46), на которой по вертикали отложены величины углов  $2V$ , а по горизонтали степень упорядоченности. Для каждого вида симметрии ее степень определяется в условных величинах от 0,0 — полная неупорядоченность до 1,0 — полная упорядоченность. Кривая, характеризующая эту зависимость, имеет вид гиперболы. Нижняя ее часть (сплошная линия) построена по данным исследования реальных

природных кристаллов. Верхняя часть (штриховая линия) по данным исследования кристаллов, подвергнутых предварительному отжигу, т. е. нагреву до высокой температуры ( $1000^{\circ}\text{C}$  и более).

Распад гомогенной системы на две фазы (натровую и калиевую) начинается до триклинной упорядоченности, но в разных частях калинатрового ряда переход в пертитовое состояние происходит, вероятно, на разных уровнях упорядоченности кристаллической решетки и, во всяком случае, при разных значениях  $2V$ . Как отмечено, высокотемпературные гомогенные кристаллы характеризуются углами  $2V$  до  $30^{\circ}$ , криптопертиты и пертиты имеют  $2V$  более  $50^{\circ}$ . В промежуточной зоне  $2V$  (от  $30$  до  $50^{\circ}$ ) переход в пертитовое состояние зависит от соотношения калиевой и натровой фаз. На диаграмме (рис. 47) кривая, обозначающая границу этого перехода, имеет форму асимметричной круто изогнутой дуги.

Следует добавить, что при содержании натровой составляющей до 10% пертитизация не происходит.

Оптические свойства кристаллов-пертитов заметно меняются в зависимости от степени распада, упорядоченности и состава. Если в микропертитах каждая из фаз более или менее отчетливо проявляет присущие ей оптические свойства, то в криптопертитах обнаруживаются промежуточные между натровой и калиевой фазами свойства, изменяющиеся в ту или иную сторону в зависимости от количественных соотношений этих фаз. Зависимость между составом криптопертитов, величиной угла  $2V$  и ориентировкой оптической индикатрисы — в данном случае углом между  $Nm$  и  $\perp(001)$  в виде диаграммы изображена на рис. 48.

Состав криптопертитов с помощью этой диаграммы может быть определен с точностью до 10% содержания альбита.

Та же зависимость прослеживается и в гомогенных кристаллах, однако определение состава их затруднено малым диапазоном углов

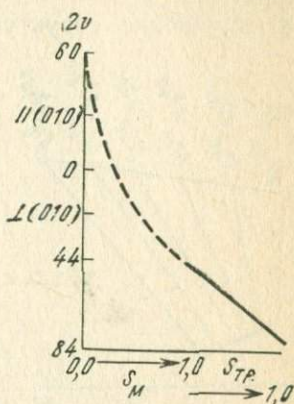


Рис. 46. Предположительная зависимость угла оптических осей калиевых шпатов от степени упорядоченности при сохранении моноклинной ( $S_M$ ) и триклинной ( $S_{TP}$ ) симметрии (по А. С. Марфунину)



Рис. 47. Распределение гомогенных и пертитовых калинатровых полевых шпатов в зависимости от состава и угла оптических осей (по А. С. Марфунину)

$Nm$ :  $\perp(001)$ , менее  $10^\circ$ , и  $2V$  — менее  $30^\circ$ . (Более надежные результаты дает рентгенографическое определение).

В калинатовых полевых шпатах происходит сложный процесс упорядоченности. Он выражается в следующих превращениях:

- изменение структурного сорасположения ионов Al и Si в каркасной решетке;
- распад твердого раствора на две фазы;
- микроструктурное двойникование фаз;
- постепенный переход калиевой фазы из одного вида симметрии в другой;
- закономерное изменение некоторых оптических свойств.

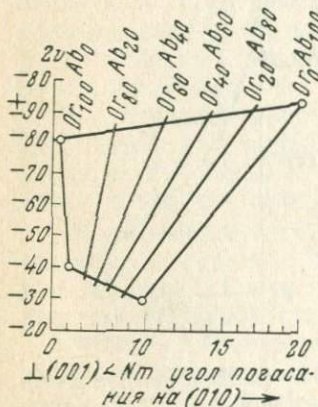


Рис. 48. Диаграмма для определения состава псевдомоноклинных и близких к ним пертитов (по А. С. Марфунину)

Детальное исследование минералов этой группы, с одной стороны, позволило выяснить общую направленность происходящих в них процессов, а с другой — позволило уточнить систематизацию и сузить терминологические рамки группы; уточнить и упрочить одни понятия и устранить, как излишние, другие.

По существующим представлениям щелочные полевые шпаты образуют двухмерный ряд, одним измерением которого являются непрерывные вещественные изменения от калиевых до натровых разностей, а другим — структурные превращения от высокотемпературных до низкотемпературных модификаций (от высокого санидина до максимального микроклина).

Уточнено определение ортоклазов, как групповое понятие о разновидности субмикроскопически или субрентгеновски сдвойникованных триклинных калиевых полевых шпатов с уравновешенным или частично неуравновешенным двойникованием. (Схема структурного ряда дана на рис. 49).

Представляет рядя нецелесообразным дальнейшее употребление таких названий, как адуляр, барбьерит, натровый микроклин, изомикроклин, изоортоклаз и другие, как излишние или ошибочно введенные.

Несколько неопределенно положение анортоклазов. Некоторые исследователи предлагают сохранить это название за крайней существенно натровой частью ряда щелочных полевых шпатов (в пределах от  $Og_{37}Ab_{63}$  до  $Og_0Ab_{100}$ ), т. е. выделить в калинатовом ряду отдельную группу, подобно аналогичным группам плагиоклазов (альбиты, олигоклазы и т. д.).

Однако эта часть систематики щелочных полевых шпатов разработана еще слабо.

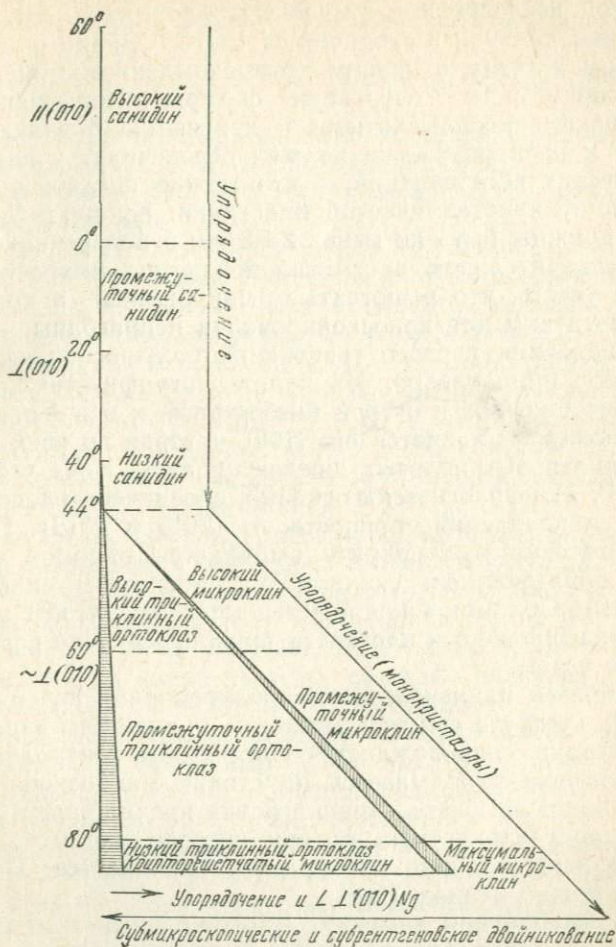


Рис. 49. Диаграмма « $2V$  — упорядоченность» для калиевых полевых шпатов (по А. С. Марфунину)

### ТЕХНИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Препарат.** Для диагностики калинатовых полевых шпатов величина угла оптических осей имеет решающее значение. Поэтому изготовленный для этой цели препарат должен прежде всего обеспечивать возможность замера  $2v$  с наибольшей точностью. В связи с этим возникает первое требование к препарату — он должен быть ориентированным относительно оси  $Np$  — острой биссектрисы оптической индикатрисы кристалла.

Как уже отмечено, величины углов  $2v$  у минералов этой группы колеблются в очень широких пределах. В связи с этим, а также высокими требованиями к точности замеров, обычный ортоскопи-

ческий метод исследования становится неприменимым. Исследования должны вестись в сходящемся свете. Однако шлифы обычной толщины в связи с низким двупреломлением минералов для этой цели непригодны — очертания фигуры интерференции получаются слишком расплывчатыми и неясными. Возникает второе требование к препарату — он должен обеспечивать возможность коноскопических исследований, а это можно сделать только увеличив толщину кристаллической пластинки. Кроме того, размеры кристалла должны быть не менее 2—3 мм в поперечнике.

При предварительном просмотре пород под микроскопом следует также учесть, что решетчатые микроклины и кристаллы с грубыми пертитами для коноскопирования непригодны.

Для выполнения первого требования большое значение имеет точный выбор направления. Из кристаллографических направлений наиболее близким к острой биссектрисе, к оси  $Np$ , и наилучше распознаваемым является ось [100], которая во всех разновидностях калинатровых полевых шпатов образует с  $Np$  угол обычно не более  $10^\circ$ . Морфологически ось [100] обозначена следом пересечения двух направлений спайности по (001) и (010). Поэтому в качестве заготовки к препарату выбирается обломок кристалла с ребром, образованным сколами по плоскостям спайности по (001) и (010). Обломок пришлифовывается так, чтобы ребро скола было ориентировано к плоскости шлифовки по возможности под прямым углом.

Затем образец наклеивается приполированной поверхностью к предметному стеклу и сошлифовывается до толщины около 0,1 мм. Процесс доводки сопровождается оптическим контролем — шлиф время от времени укладывается на столик микроскопа и проверяется в сходящемся свете. Пришлифовка прекращается как только удастся получить четкую фигуру интерференции.

На этом изготовление препарата заканчивается. Покровным стеклом его можно не покрывать.

**Техника выполнения замеров.** Изготовленный препарат устанавливается на федоровском столике и кристаллическая пластинка совмещается с перекрестием нитей окуляра.

При ортоскопической установке микроскопа определяется положение плоскостей спайности по (001) и (010). Их проекции с помощью сетки Вульфа наносятся на кальку, восстанавливаются полюса.

Далее производится переход на сходящийся свет.

При коноскопической установке определяется положение главных сечений индикатрисы, положение и наименование ее осей, замеряется угол между оптическими осями. Проекция плоскостей главных сечений, точки выходов оптических осей и наименование осей индикатрисы переносятся на ту же кальку.

Все замеры производятся с применением сегментов  $n=1,516$ ; при исследованиях в сходящемся свете применяется объектив типа ОСФ-40 $\times$ .

Порядок работы:

1. Первый этап — работа при ортоскопической установке — пояснений не требует.

2. Второй этап — работа коноскопическим методом — необходимо пояснить

Операция по установлению главных сечений индикатрисы коноскопическим методом сводится к следующему:

1. Поворотом по оси  $N$  с вертикальной нитью окуляра совмещается балка изогир.

2. Поворотом по оси  $I$  проверяется ее положение. Если балка смещается при этом влево или вправо, то наклонами по осям  $N$  и  $H$ , чередуя их с поворотами по  $I$  — точно так же, как и при установке непросветляющейся темноты ортоскопическим методом, — надо добиться такого положения, при котором балка находилась бы параллельно вертикальной нити при любых наклонах по оси  $I$ .

3. Поворотом по оси  $I$  ввести в поле зрения вторую, поперечную, балку изогир и совместить ее с горизонтальной нитью окуляра. При правильной установке они должны расположиться параллельно, сливаясь в одну линию.

Достигнутое положение, когда крест интерференционной фигуры точно совпадает с перекрестием нитей окуляра, свидетельствует о том, что одна из осей индикатрисы совпала с оптической осью микроскопа, а плоскость двух главных сечений ее с плоскостями главных сечений николей. Для дальнейшей работы очень важно выяснить, какое из этих сечений является плоскостью  $NgNp$ . Для решения этого вопроса необходимо:

4. Столик микроскопа повернуть по оси  $\theta$  на  $45^\circ$  против часовой стрелки. Если балка изогир при этом разошлась влево вверх и вправо вниз, то плоскость сечения, совмещенная до этого с вертикальной нитью окуляра, является сечением  $NgNp$ .

Если этого не произошло — балки разошлись вправо вверх и влево вниз — столик надо вернуть в исходное положение и повернуть ось  $N$  на  $90^\circ$ , совместив с вертикальной нитью вторую балку изогир.

5. Снова проверить совпадение вертикальной балки с нитью окуляра поворотами по  $I$ , совместить крест интерференционной фигуры с перекрестием окуляра и проверить направление расхождения изогир.

Если проверка сошлась, работу можно продолжить.

6. Проекцию сечения  $NgNp$  по отсчетам по осям столика  $N$  и  $H$  перенести на кальку. Восстановить и обозначить точкой полюс этого сечения. Далее взять отсчет по  $I$ , соответствующий положению этой оси в момент совмещения горизонтальной балки изогир с нитью окуляра, и перенести его на кальку в виде точки на проекцию первого сечения индикатрисы.

7. Повернуть кальку вокруг центра так, чтобы концы проекции первого сечения совместились с концами экваториальной линии сетки.

8. Через точку на проекции провести меридиональную кривую от полюса до полюса. Восстановить полюс найденного сечения индикатрисы.

9. Графическим методом построить проекцию третьего сечения индикатрисы.

Операция по замеру угла  $2V$  и определению оптического знака кристалла в сходящемся свете на федоровском столике приведена выше (стр. 43—47). Тем же приемом можно воспользоваться и для уточнения наименования осей индикатрисы: выпуклая сторона балки изогриы всегда обращена в сторону острой биссектрисы, вогнутая — в сторону тупой, окраска по обе стороны изогриы у точки ее перегиба при введении компенсатора указывает и на оптический знак кристалла, и одновременно на наименование острой и тупой биссектрис.

Калинатовые полевые шпаты иногда обнаруживают дисперсию оптических осей — в таком случае замер  $2V$  производится в монохроматическом свете с обязательным указанием длины волны применяемого света.

Обычно для этого используют красный и синий свет с отдельным определением угла  $2V$  в каждом.

**Определение минералов.** В результате произведенных замеров на кальке получена серия точек, характеризующих взаимное расположение кристаллографических и кристаллооптических направлений исследуемого минерала. Вычисление угловых расстояний между ними дает ряд констант, позволяющих с помощью приведенных выше диаграмм определить в данном образце калинатового полевого шпата степень его упорядоченности, фазовое состояние, состав, группу симметрии и характер двойникования.

Перечисленные параметры исследуемого минерала могут быть получены по данным оптических наблюдений, но необходимо еще раз напомнить некоторые условия, ограничивающие рамки применения оптического метода.

1. Коноскопический метод исследования в применении его к изучению калинатовых полевых шпатов дает более высокие по точности результаты по сравнению с ортоскопическим, но основанный на использовании суммарного оптического эффекта — на исследовании фигуры интерференции — он не может быть применим к изучению таких структурных разновидностей, как решетчатые микроклины и грубопертитизированные кристаллы.

2. Для определения коноскопическим методом пригодны кристаллы размером не менее 2—3 мм в поперечнике.

3. Наиболее сложным этапом исследования является определение вида симметрии кристалла.

Оптическая триklinность кристалла независимо от степени его упорядоченности в результате субмикроскопического двойникования может быть выражена слабо — в единицах или долях градусов, либо не выражена вовсе. В этом случае необходимо прибегнуть к рентгеноскопическим исследованиям, тем более что для

переходной группы структурного ряда — углы  $2V$  от  $30$  до  $50^\circ$  — вопрос о симметрии имеет принципиальное значение.

4. Оптический метод неприменим для определения состава гомогенных кристаллов. И в этом случае более надежные результаты дает рентгеновский метод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бетехтин А. Г. Минералогия. М., Госгеолиздат, 1950. 956 с.
- Винчел А. Н., Винчел Г. Оптическая минералогия. М., Изд-во иностр. лит., 1953. 502 с.
- Веденева Н. Е. Иммерсионный метод измерения показателей преломления минералов под микроскопом. М., Геолразведиздат, 1933, с. 1—78.
- Доброхотова Е. С. Метод Е. С. Федорова в петрографии. М., Госгеолтехиздат, 1957. 78 с.
- Гюйгенс Х. Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что происходит при отражении и при преломлении, в частности, при странном преломлении исландского кристалла. М.—Л. ОНТИ (Главная редакция общетехнической литературы), 1935. 171 с.
- Заварицкий А. Н. Об определении угла оптических осей кристалла в шлифах, когда эти оси недоступны прямому наблюдению. М.—В кн.: Универсальный столик Е. С. Федорова, 1953, с. 807—809.
- Заварицкий В. А. Применение сходящегося света при красталлооптических исследованиях на универсальном столике Федорова. М., ЭВМО, ч. 82, № 4, 1953, с. 266—270.
- Колотушкин А. Г. Измерение показателей преломления микрокристаллов методом вращающейся иглы. Тр. ВИМС, 1940, вып. 165, с. 18—30.
- Левинсон-Лессинг Ф. Ю. Избранные труды, т. II.—В кн.: Успехи петрографии в России. М., Изд-во АН СССР, 1950, с. 13—32.
- Луцицкий В. И. Петрография, т. I, изд. 6-е, переработанное. М.—Л., Госгеолиздат, 1949. 332 с.
- Марфунин А. С. Полевые шпаты — фазовые взаимоотношения, оптические свойства, геологическое распределение. М., Изд-во АН СССР, 1963. 275 с.
- Наковник Н. И. Иммерсионный метод в применении к петрографическим шлифам. М., Госгеолтехиздат, 1957. 43 с.
- Оникиенко С. К. Практическое руководство по исследованию породообразующих минералов в прозрачных шлифах. М., «Недра», 1964. 92 с.
- Подногин А. К. Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова. М., Нефтеиздат, 1933. 108 с.
- Риттман А. Зональный метод.—В кн.: Подногина А. К. Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова. М., Нефтеиздат, 1933.
- Соболев В. С. Федоровский метод. Изд. 2-е. М., «Недра», 1964, 264 с.
- Таланский С. Удивительные свойства света. М., «Мир», 1969. 136 с.
- Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод исследования минералов. М., «Недра», 1965. 306 с.
- Трёгер В. Е. Таблицы для оптического определения породообразующих минералов. М., «Недра», 1968. 108 с.
- Федоров Е. С. Теодолитный метод в минералогии и петрографии.—В кн.: Универсальный столик Е. С. Федорова, 1953, с. 24—62.

Френель О. Избранные труды по оптике. М., Гостехтеориздат, 1955. 603 с.

Черкасов Ю. А. О применении «фокального экранирования» при измерениях показателей преломления иммерсионным методом.— В кн.: Современные методы минералогического исследования горных пород, руд и минералов. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 184—207.

Четвериков С. Д. Методика кристаллооптических исследований шлифов. М., Госгеолтехиздат. 1949. 106 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

### Часть I.

#### Методы сравнительного определения показателей преломления минералов

Глава I. Иммерсионный метод . . . . .	5
Глава II. Метод фокального экранирования . . . . .	17

### Часть II.

#### Методы исследования пространственной ориентировки кристаллооптических элементов в минералах

Глава III. Федоровский столик и техника графических построений . . . . .	25
Глава IV. Общая методика исследования породообразующих минералов на федоровском столике . . . . .	38
Глава V. Плаггиоклазы и методика исследования их на федоровском столике . . . . .	48
Глава VI. Некоторые способы исследования полевых шпатов на федоровском столике . . . . .	72
Список литературы . . . . .	100

#### Приложения-вкладки:

1. Сетка Вульфа
2. Сетка Федорова
3. Диаграмма полюсов страдания ( $P_c$ )
4. Диаграмма двойниковых осей ( $D_o$ )
5. Диаграмма «состав — упорядоченность — закон двойникования» (по А. С. Марфунину)

СТАНИСЛАВ КУЗЬМИЧ ОНИКИЕНКО  
СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ  
В ПРОЗРАЧНЫХ ШЛИФАХ И ПРЕПАРАТАХ

Редактор издательства Л. С. Цаплина  
Технический редактор Л. В. Дунаева  
Корректор Т. Ю. Шульц

---

Сдано в набор 13/II 1973 г.  
Подписано в печать 13/III 1973 г. Т-03655.  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага № 2.  
Печ. л. 7,25 с вкладками. Уч.-изд. л. 7,9.  
Тираж 4 400 экз. Заказ № 7/4682-14  
Цена 40 коп. с прилож.

---

Издательство «Недра»,  
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.  
Московская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете  
Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

**Уважаемый товарищ!**  
**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НЕДРА»**  
**ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ НОВЫЕ КНИГИ**

**БЕРНШТЕЙН П. С., БЕЗСМЕРТНАЯ М. С., ЧВИЛЕВА Т. Н.**  
и др. **Определение рудных минералов по полированным шлифам по спектрам отражения и твердости.**

Работа содержит описание 160 рудных минералов (самородных элементов, сульфидов, теллуридов, селенидов, сульфосолей, окислов). Для каждого минерала приведены оптические свойства в белом отраженном свете, коэффициенты отражения в интервале спектра  $\lambda=450-1100$  нм, графики спектров отражения, значения твердости по микровдавливанию, основная литература. Исследования проведены на материале эталонной коллекции образцов, диагностированных с помощью рентгенометрического, локального микроспектрального, рентгенохимического и полного химического анализов; при изучении оптических свойств применены новейшие методики и последние модели современной серийной отечественной аппаратуры.

Работа предназначена для специалистов по геологии и переработке руд (минералогов, геохимиков, обогатителей и др.), а также может быть использована в качестве лабораторного пособия-справочника по определению непрозрачных объектов.

**МАРФУНИН А. С. Введение в физику минералов.** 30 л. 3 р. 25 к.

В книге рассмотрены фундаментальные понятия и представления, характеризующие физическую природу минералов. Освещены теория кристаллического поля и оптические спектры поглощения минералов, систематизированные по ионам; рассматривается природа окраски минералов. Большой раздел посвящен методу молекулярных орбиталей, с разбором схем расчета, структуры и химической связи (включая полуэмпирические зонные методы, энергию решетки, решеточные суммы, ионные радиусы), особенностям связи в силикатно-конкретных соединений и интерпретации на их основе спектров отражения рудных минералов и полупроводников. Детально освещаются области спектроскопии твердого тела: оптическая, рентгеновская и рентгеноэлектронная, мессбауэровская; электронный парамагнитный, ядерный магнитный, ядерный квадрупольный и двойные резонансы, а также люминесценция и термолюминесценция. По каждому разделу дается сводка готовых результатов для минералов и их синтетических аналогов.

Книга рассчитана на широкий круг минералогов, геохимиков, петрографов, а также химиков-неоргаников и может быть использована аспирантами и студентами старших курсов соответствующих специальностей.

**Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу или заказать через отдел «книга-почтой» магазинов:**

№ 17 — 199178. Ленинград, в. о. Средний проспект, 61.

№ 59 — 127412. Москва, И-412, Коровинское шоссе, 20.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»**

40 коп.  
с прилож.

773

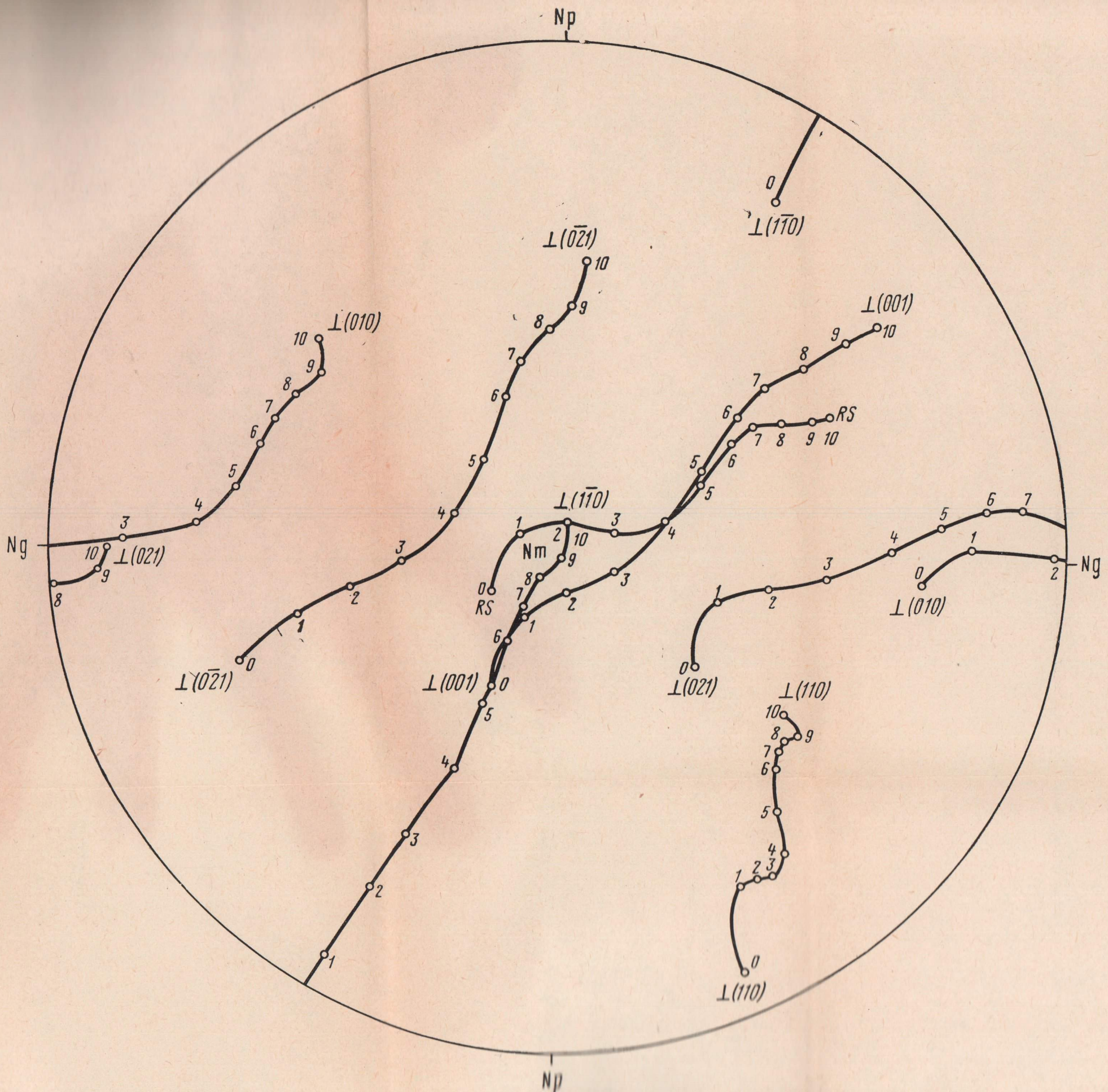
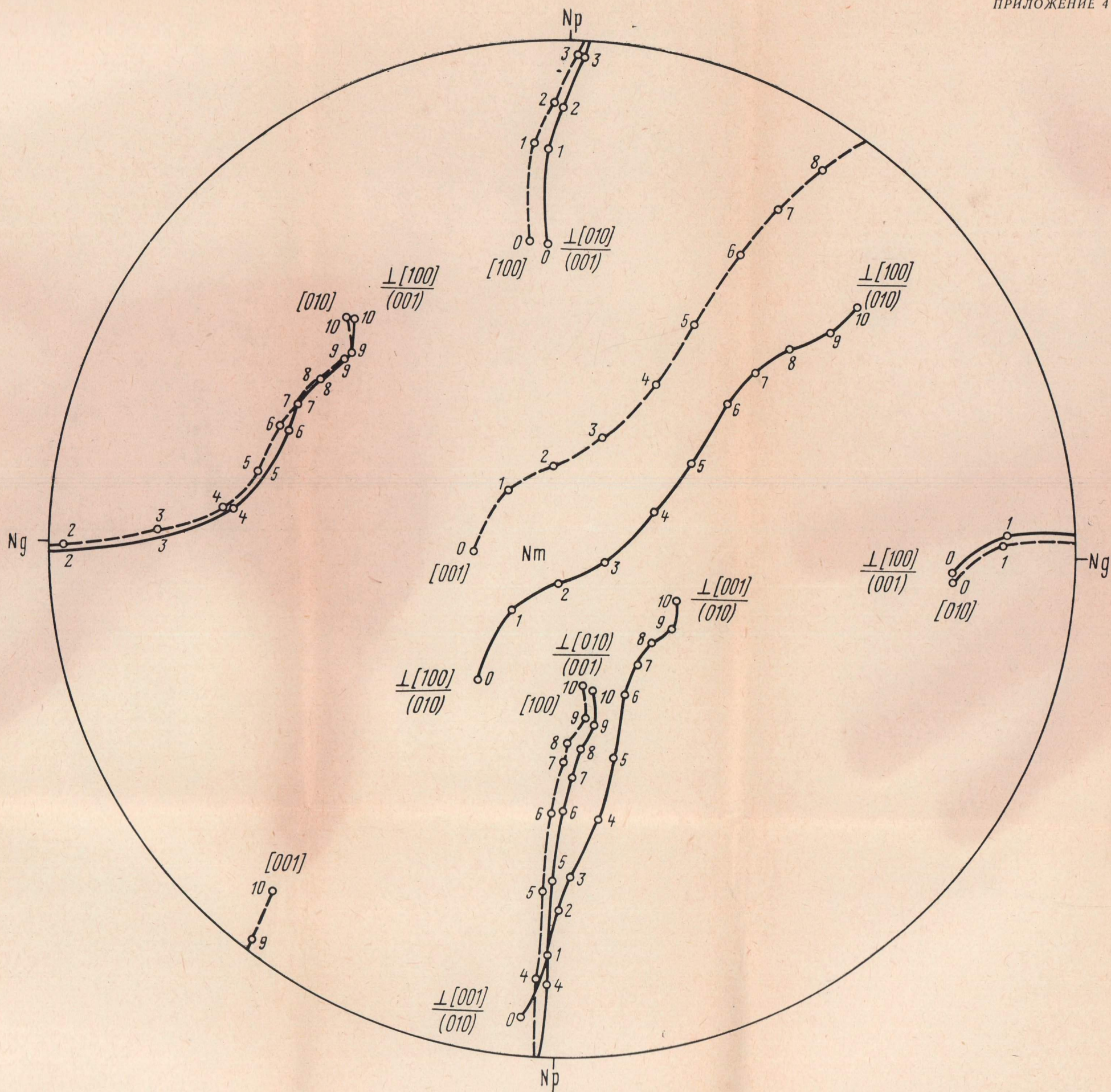


Диаграмма полюсов срастания ( $P_0$ )



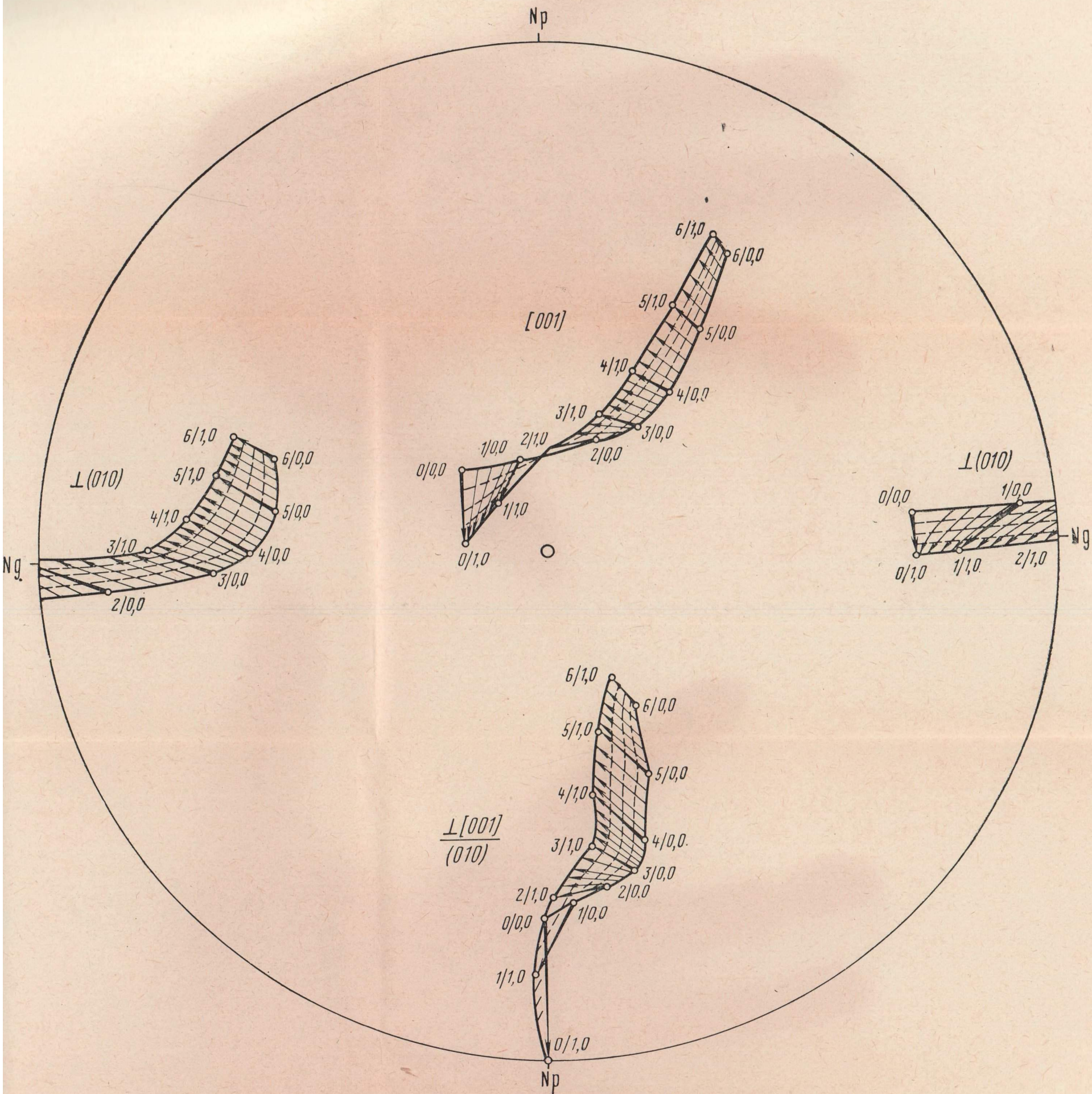


Диаграмма «Состав — упорядоченность — закон двойникования»  
(по А. С. Марфунину)

