

м. с. сахарова, ю. а. черкасов

***иммерсионный  
метод  
минералогических  
исследований***

М. С. САХАРОВА, Ю. А. ЧЕРКАСОВ

# ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Под редакцией проф. С. Д. ЧЕТВЕРИКОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
1970

Печатается по постановлению  
Редакционно-издательского совета  
Московского университета

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие по иммерсионному методу минералогических исследований предназначается для лабораторных занятий студентов геологических специальностей и составлено в соответствии с программой курса иммерсионного метода геологических факультетов государственных университетов. Настоящее руководство знакомит студентов с современным состоянием развития иммерсионного метода как в области теории, так и практики в объеме, необходимом для самостоятельной работы.

В книге рассмотрены различные существующие в настоящее время способы сравнения показателей преломления двух сред и методы определения главных показателей преломления изотропных, одноосных и двуосных минералов. Наряду со способом Бекке, описание которого имеется в существующих учебниках, в книге рассмотрены разработанные в последние годы методы фокального экранирования, способ фазового контраста, описание которых в учебниках практически отсутствует. Отдельные главы посвящены возможностям использования иммерсионного метода для получения других оптических констант и количественного минералогического анализа рыхлых агрегатов.

Главы «Общие сведения об иммерсионном методе», «Иммерсионные среды», «Иммерсионные препараты» и «Применение иммерсионного метода для других целей» составлены М. С. Сахаровой, главы «Аппаратура» и «Способы сравнения показателей преломления минерала и иммерсионной среды» — Ю. А. Черкасовым. Глава «Определение показателей преломления минералов» написана авторами совместно.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность профессору С. Д. Четверикову, взявшему на себя труд редактирования работы, и профессорам Г. П. Барсанову и Е. А. Кузнецову, сделавшим ряд ценных замечаний при подготовке рукописи к печати.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИММЕРСИОННОМ МЕТОДЕ

### ПРИНЦИП МЕТОДА, ЕГО ЗАДАЧИ И ВОЗМОЖНОСТИ

Иммерсионный метод представляет собой микроскопический метод исследования мелкозернистых кристаллических веществ, погруженных в специальные иммерсионные среды с известными показателями преломления. Название метода происходит от латинского слова *immersio*, что означает погружение. Наиболее широко этот метод применяется для определения показателей преломления минерала ( $n$ ) — важнейших оптических констант. Иммерсионный метод завоевал в геологических исследованиях широкую популярность как один из наиболее доступных, простых, быстрых и достаточно точных способов измерения показателей преломления минералов.

Крупным преимуществом иммерсионного метода является возможность использования для работы весьма малого количества вещества (несколько миллиграммов), возможность производить измерения на зернах микроскопических размеров, а также простота подготовки материала для исследования.

Определение показателей преломления минералов обычно производится в целях диагностики минералов, при уточнении состава минералов бинарных изоморфных рядов, особенно в железисто-магнезиальных минералах, при детальной характеристике прозрачных минералов горных пород, при исследовании акцессориев. Помимо главного назначения — определения показателей преломления — иммерсионный метод может быть успешно использован для получения других кристаллооптических констант — для вычисления угла оптических осей, определения оптического знака минерала, оптичности, а также для решения некоторых других кристаллооптических задач. Метод хорошо дополняет другие оптические методы исследований минералов.

Иммерсионный метод может использоваться для исследования спайности минералов, а также для определения их плотности (удельного веса). Весьма перспективна возможность применения иммерсионных препаратов при количественном минералогическом анализе рыхлых агрегатов, особенно в сочетании с различными приемами оптического окрашивания минералов.

Иммерсионные препараты можно также исследовать на столике Федорова. В совокупности с некоторыми дополнительными операциями иммерсионный метод может быть применен для исследования зерен из петрографических шлифов.

Иммерсионный метод — один из основных методов минерало-петрографического изучения осадочных пород, он широко используется при работе с рыхлыми или хрупкими гипергенными образованиями, изготовление шлифов из которых затруднено, а также при работе со шлихами. Этот метод применяют для исследования продуктов микрокристаллохимических реакций, для изучения продуктов минерального синтеза, в ряде областей техники, медицины и т. д. Таким образом, иммерсионный метод является одним из методов, обеспечивающих возможность разностороннего изучения твердого вещества.

Для определения показателей преломления иммерсионным методом используют оптический эффект, возникающий на границе раздела двух сред. С этой целью порошок изучаемого вещества погружают в иммерсионную среду (обычно в жидкость) с известным показателем преломления, и, поместив полученный препарат под микроскоп, сравнивают показатели преломления вещества и иммерсионной среды. Сравнение показателей основано на использовании так называемой световой полоски Бекке — оптического явления, возникающего на границе двух сред с различными показателями преломления и исчезающего при их равенстве, или на наблюдении цветного дисперсионного эффекта, проявляющегося при близких значениях показателей преломления исследуемого вещества и иммерсионной среды.

Путем сравнения показателя преломления вещества и жидкости подбирают иммерсионную жидкость, равную по показателю преломления исследуемому веществу. Точность определения показателей преломления иммерсионным методом обычно составляет  $\pm 0,002$ — $0,001$ . При использовании монохроматического света точность повышается до  $\pm 0,0005$ . При работе с высокопреломляющими жидкими средами она снижается до  $0,005$ — $0,01$ , а при работе с твердыми средами — до  $0,02$ . Основным недостатком иммерсионного метода является ограниченная возможность его применения для исследования веществ с высокими показателями преломления

(более 1,78), при работе с которыми приходится использовать специальные высокопреломляющие жидкости или твердые среды. Указанные жидкости обычно ядовиты и малостойки, что значительно усложняет их использование, а твердые среды не удобны для работы и дают недостаточно точные результаты.

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ИММЕРСИОННОГО МЕТОДА

Оптические явления, лежащие в основе иммерсионного метода определения показателей преломления, впервые были установлены О. Машке, описавшим в 1872 и 1880 гг. возникновение подвижной световой полоски и цветного дисперсионного эффекта на границе двух сред. Им был также предложен ряд иммерсионных жидкостей для определения показателей преломления минералов. Однако в практику минералого-петрографических исследований иммерсионный метод вошел лишь после повторного открытия Ф. Бекке в 1892 г. световой полоски, получившей впоследствии название полоски Бекке. Этот исследователь предложил использовать характер перемещения световой полоски для сравнения показателей преломления минералов между собой и с канадским бальзамом непосредственно в шлифах.

Более широкое применение иммерсионный метод получил после выхода в свет в 1899 г. руководства, составленного Шредер Ван дер Кольком. В этом руководстве была изложена методика работы иммерсионным методом и даны практические рекомендации для определения минералов по значению их показателей преломления. Для сравнения показателей преломления этот исследователь использовал возникновение цветного дисперсионного эффекта (эффекта косо́го освещения) в области сближения показателей преломления вещества и иммерсионной жидкости.

В СССР разработка иммерсионного метода и его широкое применение начинается с 30-х годов. Важная роль в этих работах принадлежит основанной В. В. Аршиновым в Институте прикладной минералогии (ныне ВИМС) оптической лаборатории.

Усовершенствование приемов работы иммерсионным методом и разработка его теоретических основ осуществляются в Москве Н. Е. Веденева, А. Г. Колотушкиным, Н. М. Меланхолиным и в Ленинграде — В. Н. Лодочниковым, О. М. Аншелесом, В. Б. Татарским и др. В этот период выходит первое отечественное руководство по иммерсионному методу (Веденева, 1933), усовершенствуется методика измерения показателей преломления, создается специальная аппаратура.

В 1934 г. Н. Е. Веденеевой и А. Г. Колотушкиным был разработан теодолитно-иммерсионный метод определения показателей преломления, получивший название метода вращающейся иглы. Первой моделью прибора, названной по имени ее конструктора, была вращающаяся «игла Колотушкина», позволяющая осуществлять вращение исследуемого зерна вокруг горизонтальной оси. В иммерсионных исследованиях 20—30-х годов используется преимущественно способ световой полоски Бекке. Повышение точности работ этим способом требовало применения монохроматического света, для чего Н. М. Меланхолиным была создана специальная пластинка — монохроматор, не нашедший, однако, широкого применения.

В дальнейшем для сравнения показателей преломления минералов и иммерсионных сред все шире используется цветной дисперсионный эффект. Использование эффекта косоого освещения привлекается к практике иммерсионного метода О. М. Аншелесом. Появляется метод двойного диафрагмирования, предложенный американским исследователем Сэйлором (1935). В этот же период были предложены методы хроматической, термической и двойной вариации, основывающиеся на изменении величины показателей преломления жидкости в зависимости от длины волны используемого источника света или от температуры. Эти методы не получили широкого применения из-за отсутствия необходимой аппаратуры и сложности работы указанными способами.

Одновременно с усовершенствованием способов сравнения показателей преломления для исследований начинают применяться высокопреломляющие иммерсионные среды, что позволяет расширить диапазон измеряемых показателей преломления. К работе привлекаются твердые сплавы, делаются попытки использования высокопреломляющих жидкостей.

В период 40—50-х годов вопросам дальнейшей разработки методики иммерсионных исследований с использованием эффекта Бекке посвящен ряд работ В. Б. Татарского. Учебное пособие, написанное этим автором, является одним из наиболее обстоятельных руководств по иммерсионному методу.

Дальнейшее развитие иммерсионный метод получил в последнее десятилетие, после того как в 1957 г. Ю. А. Черкасовым был предложен ряд новых способов сравнения показателей преломления двух сред. Эти способы основаны на наблюдении цветного дисперсионного эффекта, возникающего на краях зерен минерала в условиях экранирования светового пучка. В этом случае при пересечении кривых дисперсий исследуемого вещества и иммерсионной жидкости края зерен минерала приобретают окраску, характеризующую область



совпадения. Наибольшей популярностью среди этих способов пользуется так называемое кольцевое, а также центральное экранирование. Последнее представляет особый интерес при изучении тонкодисперсных объектов. Для исследования тонкозернистых агрегатов используют также способ фазового контраста, предложенный Цернике (1941). Метод фокального экранирования в настоящее время широко применяется при иммерсионных исследованиях как в нашей стране, так и за рубежом.

Наряду с разработкой методики исследования в плоских иммерсионных препаратах получил дальнейшее развитие теодолитно-иммерсионный способ. Усовершенствованным вариантом прибора для работы по методу вращающейся иглы является прибор ППМ-1, предложенный В. Г. Фекличевым (1961). Однако этот вид иммерсионных исследований пока не получил широкого применения.

Значительное распространение в последнее время иммерсионный метод получил в практике минералого-петрографических исследований. Этому способствовала разработка новых приемов исследований, выпуск серийной аппаратуры для иммерсионного метода и усовершенствование набора иммерсионных сред, в частности изготовление более стойких высокопреломляющих жидкостей.

Наряду с усовершенствованием методики работы по определению показателей преломления иммерсионные исследования начинают использоваться и для других целей.

Иммерсионные препараты широко применяются при количественном минералогическом анализе рыхлых агрегатов, проб, для контроля различного рода концентратов. Особенно удобным оказалось использование при количественных подсчетах минералов цветных дисперсионных эффектов. Первоначально при подобного рода работах применялся способ косоугольного освещения или двойное диафрагмирование. В последующем с разработкой методов фокального экранирования в практике количественного микроскопического анализа агрегатов, погруженных в иммерсионные среды, широко внедряются методы кольцевого и одностороннего экранирования, позволяющие получать различные цветные оптические окраски для минералов с разными значениями показателей преломления.

Другим видом иммерсионных исследований является метод изучения спайности минералов, разработанный В. Б. Татарским (1965). Многообразие форм проявления спайности минералов в иммерсионных препаратах (трещины, огранка и оптическая ориентировка зерен) позволяет подходить к вопросу о количественной оценке степени совершенства спайности, а совокупность наблюдений форм зерен, характера

спайности и коноскопических фигур может давать информацию о сингонии исследованного вещества.

Помимо рассмотренных выше методик исследований иммерсионный метод может использоваться для определения плотности (удельного веса) минералов (Петров, 1946). Наблюдение под микроскопом характера перемещения (погружение или всплытие) зерен исследуемого вещества в иммерсионной жидкости с известной плотностью дает возможность прямого определения значения плотности, которая связана функциональной зависимостью с ее показателем преломления. Исходя из зависимости между величиной показателя преломления жидкости и ее плотностью, находят плотность минерала.

## Глава II

### АППАРАТУРА

Сравнение показателей преломления иммерсионной среды и погруженного в нее вещества производят, как уже было сказано выше, с помощью наблюдаемого под микроскопом того или иного оптического эффекта, возникающего на границе двух сред.

Из современных микроскопов наиболее удобен для целей иммерсионного метода микроскоп МИН-8 (рис. 1). В связи с тем что описанная модель микроскопа наилучшим образом приспособлена для иммерсионных исследований, все рекомендации, связанные с настройкой микроскопа для работы, будут относиться к этой модели.

Микроскоп МИН-8 по своей конструкции существенно отличается от выпускавшихся ранее моделей поляризационных микроскопов, предназначенных для работы в проходящем свете. Особенностью его конструкции являются, во-первых, сочетание старых конструктивных форм с новыми, а во-вторых, наличие новых конструктивных элементов, ранее не применявшихся на поляризационных микроскопах.

Штатив микроскопа имеет современную форму и отличается повышенной устойчивостью, которая обеспечивается массивным основанием (1) штатива.

На задней стенке основания укреплен осветитель с центрируемым точечным источником света и регулируемой полевой диафрагмой. Внутри корпуса основания расположены дополнительная конденсорная линза и отклоняющая призма. Линза служит для увеличения апертуры освещающего пучка при работе как без конденсора, так и со специальными конденсорами. Она включается в осветительную систему при помощи выведенной наружу рукоятки (14). Отклоняющая призма направляет свет от осветителя в объектив микроскопа. Ее положение в осветительной системе может изменяться при помощи центрировочных винтов, расположенных в передней части основания штатива, что позволяет центрировать

изображение полевой диафрагмы осветителя в поле зрения микроскопа. Конструкция осветительного устройства микроскопа обеспечивает быструю настройку требуемого освещения, что особенно важно при применении современных способов сравнения показателей преломления двух сред, требующих тщательного контроля за освещением.

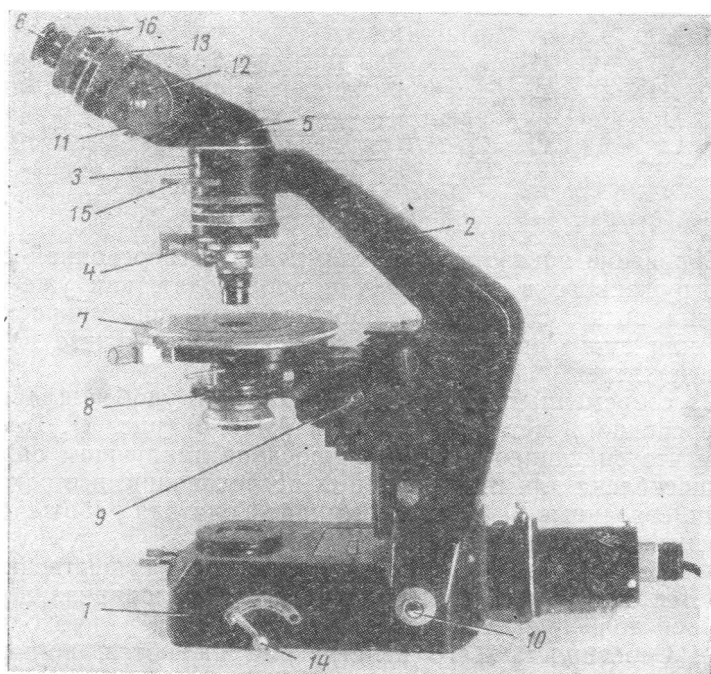


Рис. 1. Общий вид поляризационного микроскопа МИН-8

Помимо оптических деталей внутри основания микроскопа находится микрометрический механизм, осуществляющий перемещение столика. Рукоятки (10) подачи механизма, расположенные по бокам основания, действуют независимо друг от друга, так что при работе одновременно двумя рукоятками скорость перемещения столика становится в два раза больше. Дифференциальный микрометрический механизм позволяет осуществлять более плавную фокусировку микроскопа. На верхней плоскости основания имеется закрываемый крышкой люк, который используется при работе со столиком Федорова.

Конструкция конденсора (8) микроскопа МИН-8 принципиально не отличается от таковой микроскопов типа МИН-4 и МИН-5. Однако важно, что конденсор микроскопа МИН-8

съёмный. Это позволяет дополнительно применять при работе с микроскопом специальные конструкции конденсоров, и, в частности, конденсоры темного поля ОИ-10 и одностороннего освещения ОИ-27, фазово-контрастный конденсор КФ-4 и др. Для применения этих конденсоров в комплект микроскопа введен дополнительный кронштейн со стандартным посадочным диаметром, который устанавливается на место кронштейна обычного конденсора. Возможность использования специальных конструкций конденсоров допускает в свою очередь применение на микроскопе МИН-8 ряда новых способов сравнения показателей преломления объектов в иммерсионных препаратах.

Предметный столик (7) микроскопа укреплен на кронштейне при помощи механизма грубой подачи (9) и может перемещаться по вертикали. Механизм грубой подачи обеспечивает устойчивость столика при любом его положении по высоте. Открытое расположение столика по отношению к микроскописту обеспечивает удобство в работе и в особенности с приспособлениями к микроскопу, устанавливаемыми на предметном столике.

Тубус (3) микроскопа неподвижно укреплен на верхней части тубусодержателя (2). В тубусе имеется паз, в котором установлен поворотный анализатор, и гнездо для установки различных компенсаторов. Нижний торец тубуса имеет направляющую типа ласточкина хвоста, в которую вдвигаются салазки с щипцевым устройством (4), служащим для крепления объективов. Отличительной особенностью тубуса является также наличие в его конструкции встроенного над анализатором ретиверного диска (15) с интерференционными светофильтрами. Устройство такого рода впервые введено в конструкцию отечественного поляризационного микроскопа. Оно обеспечивает возможность проведения иммерсионных исследований в монохроматическом свете.

Для наблюдений объекта микроскоп снабжен наклонной монокулярной насадкой (5), устанавливаемой в гнезде тубуса микроскопа и позволяющей работать в естественном и удобном положении. При такой конструкции окулярной насадки предметный столик микроскопа находится постоянно в горизонтальном положении, что особенно удобно при работе с иммерсионными препаратами. Окулярная насадка содержит в себе центрируемую при помощи винтов (12) линзу Бертра-на, ирисовую диафрагму и приспособление для изменения длины тубуса. Линза Бертра-на постоянно находится внутри окулярной насадки и таким образом защищена от запыления. Введение линзы в освещающий пучок лучей производят при помощи барабана (11).

Ирисовая диафрагма (13) окулярной насадки расположена вблизи фокальной плоскости окуляра (6). Это дает воз-

возможность одновременно видеть в поле зрения микроскопа исследуемый объект и отверстие диафрагмы, что позволяет осуществлять контроль за полнотой изоляции исследуемого участка при коноскопических наблюдениях. Приспособление для изменения длины тубуса (16) служит для получения резкого изображения коноскопической картины. Таким образом, коноскопический аппарат микроскопа МИН-8 более совершенен, чем у прежних моделей микроскопов.

Наружный диаметр трубки окулярной насадки является стандартным, благодаря чему на микроскопе могут быть применены разнообразные окулярные насадки. Наклонная монокулярная насадка микроскопа съемная и при желании может быть заменена на бинокулярную. Пользуясь для наблюдений вместо монокулярной насадки бинокулярной, микроскопист значительно снижает утомление глаз, а также лучше воспринимает наблюдаемую картину, в особенности при длительной работе. Прилагаемый к микроскопу набор объективов и окуляров обеспечивает возможность получения увеличений от  $\times 17,5$  до  $\times 1350$ . В качестве объективов малого увеличения ( $\times 3,5$  и  $\times 9$ ) применены планахроматы, не дающие искривления изображения по краям зрения. Микрообъектив  $\times 9$  снабжен ирисовой диафрагмой и помимо обычных целей предназначен для наблюдений дисперсионных окрасок в иммерсионном препарате, получаемых по способам кольцевого и одностороннего экранирования, а также по методу темного поля. Объектив  $\times 60$  снабжен пружинящей оправой, предохраняющей фронтальную линзу объектива и препарат от возможного повреждения.

Для наблюдений используются широкоугольные окуляры  $\times 5$  и  $\times 8$  со стандартным посадочным диаметром. Помимо указанных окуляров в комплект микроскопа введены окуляры с увеличениями  $\times 10$  и  $\times 15$ , которые могут быть использованы как при визуальных наблюдениях, так и при микрофотографических работах.

В комплекте микроскопа имеются три сменных конденсора с апертурами 1,25; 0,85 и 0,22. Конденсор с апертурой 0,85 совместно с линзой Лазо используется для всех объективов, кроме  $\times 90$ . Для работы с последним применяется конденсор с апертурой 1,25. Конденсор с апертурой 0,22 предназначен исключительно для работы со столиком Федорова.

В качестве поляризатора и анализатора на микроскопе МИН-8 используются поливиниловые поляризационные светофильтры, которые являются более совершенными поляризаторами, чем призмы из дефицитного исландского шпата. Качественно изготовленные поляризаторы обладают нейтральным цветом. Их кривые абсорбции идентичны таковым бесцветного стекла.

Поляриды имеют следующие преимущества перед николями:

1) дают более совершенное темное поле в скрещенном положении;

2) позволяют полнее использовать апертуру конденсора, повысить яркость освещения и улучшить качество интерференционных картин;

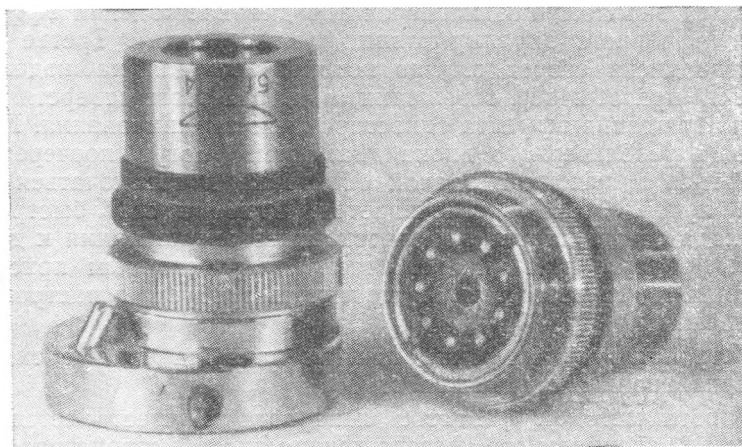


Рис. 2. Микрообъектив с ирисовой диафрагмой ОМ-2И

3) дают возможность применять конденсаторы типа Аббе, фазово-контрастное устройство и конденсор темного поля.

Иммерсионные исследования при работе по способу Бекке не требуют применения специальных объективов.

Для применения современных методов измерения показателей преломления микроскоп снабжен специальными устройствами — микрообъективами с ирисовой диафрагмой или устройством типа Радуга-1<sup>1</sup>. Из объективов, снабженных ирисовой диафрагмой, отечественной промышленностью выпускается в настоящее время лишь объектив с увеличением  $\times 9$  (рис. 2). Эти объективы включены в комплект оптики современных поляризационных микроскопов (МИН-8, МПД), а также выпускаются отдельной номенклатурой под шифром ОМ-2И. Указанный объектив устанавливается на место обычного объектива микроскопа. Устройство «Радуга-1» (рис. 3, а) применяется с объективами  $\times 8$  и  $\times 9$ . Оно навинчивается на

<sup>1</sup> Устройство «Радуга» выпускается заводом «Геологоразведка» (Ленинград).

резьбу применяемого для работы объектива, и вместе с последним при помощи центрировочной оправы объектива устанавливается в щипцевое устройство микроскопа (рис. 3, б). Устройство «Радуга-1» снабжено револьверным диском с тремя отверстиями.

В одном из отверстий установлена диафрагма с точечным отверстием, служащая для наблюдения эффекта кольцевого экранирования, в другом — диафрагма с центральным непрозрачным экраном, предназначенным для наблюдения эффекта центрального экранирования (темного поля). Третье отверстие диска свободно. Оно используется для наблюдений объекта при обычном освещении, а оправа этого отверстия — для наблюдения эффекта одностороннего экранирования. При помощи револьверного диска диафрагмы могут поочередно вводиться в выходной зрачок объектива и выключаться из хода лучей. Этим обеспечивается возможность быстрого перехода от одного вида дисперсионного окрашивания к другому. Револьверный диск снабжен центрировочным приспособлением, что позволяет осуществлять требуемую настройку освещения.

Устройство может быть использовано на любых типах поляризационных микроскопов.

Работа методом фазового контраста осуществляется с помощью специального фазово-контрастного устройства, характеристика которого дана при описании указанного метода исследования (см. стр. 53).

Освещение иммерсионных препаратов белым светом при работе на микроскопе МИН-8 производится с помощью встроенного осветителя. При работе с системами микроскопов (МИН-4, МИН-5), не имеющих подобного устройства, могут применяться осветители типа ОИ-9 или ОИ-19, имеющие точечный источник света.

Для получения монохроматического света используются светофильтры или специальные приборы — монохроматоры. Монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 589 \text{ нм}$  дает натриевая лампа.

Как уже упоминалось, микроскоп МИН-8 снабжен устройством для освещения объекта монохроматическим светом. Для получения монохроматического света используются интерференционные светофильтры, обеспечивающие при сравнительно узкой полосе пропускания (10 нм) высокую яркость освещения. Установленные на микроскопе фильтры позволяют освещать объекты светом с длинами волн 620, 589 и 486 нм. Введение в конструкцию микроскопа интерференционных фильтров имеет большое значение для повышения точности иммерсионных и других исследований при массовой работе. Среди моделей монохроматоров для иммерсионных



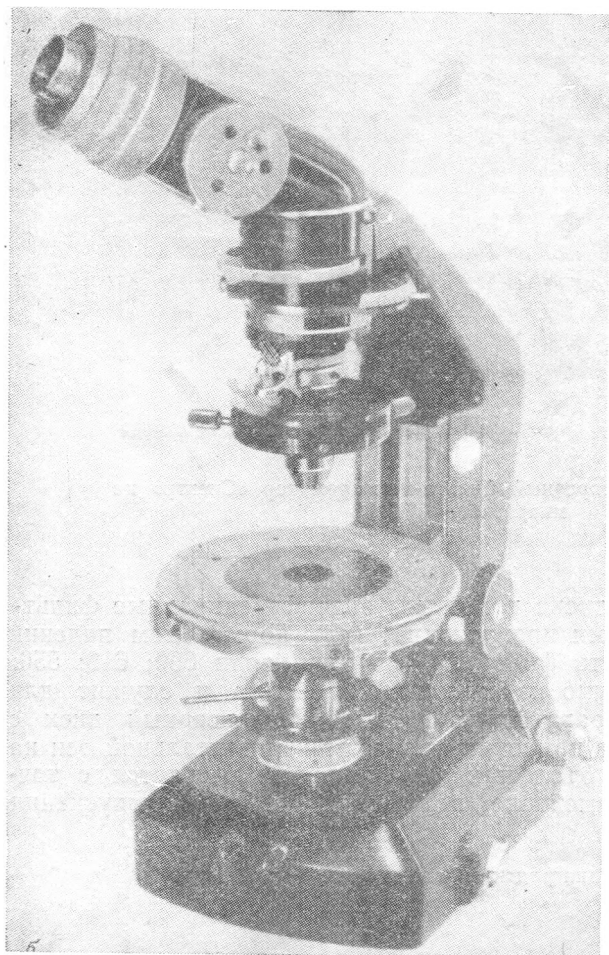
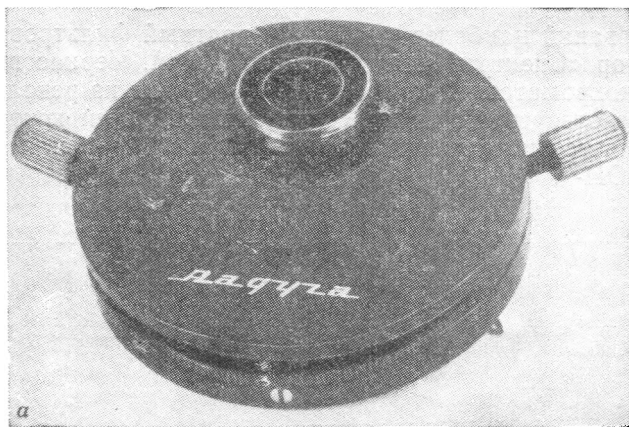


Рис. 3. Устройство «Радуга» (а); то же устройство на микроскопе МИН-8 (б)

исследований наиболее удобен поворотный фильтровой монохроматор «Спектр»<sup>1</sup>, предложенный Ю. А. Черкасовым.

Монохроматор «Спектр» (рис. 4) состоит из револьверного диска с отверстиями и подставки, при помощи которой диск закрепляется под столиком микроскопа МИН-8 или на осветителе ОИ-9.



Рис. 4. Поворотный фильтр-монохроматор «Спектр» на микроскопе МИН-8

В отверстиях диска помещены интерференционные фильтры с максимумами пропускания (при нормальном падении света на плоскость фильтра) для длин волн 650; 610; 550; 500 и 450  $\mu\text{m}$ . Одно из отверстий свободно и служит для освещения препарата белым светом. Револьверный диск с фильтрами может наклоняться вокруг горизонтальной оси на  $45^\circ$  от нормали. Угол наклона фильтра измеряется с точностью до  $1^\circ$ . Изменение положения полосы пропускания

<sup>1</sup> Выпускается ленинградским заводом «Геологоразведка».

фильтров по отношению к исходной производится путем их наклона вокруг горизонтальной оси. При этом полоса пропускания фильтра смещается в сторону более коротких длин волн. Фильтры подобраны таким образом, что последовательным их введением в ход лучей и наклоном на  $35\text{--}40^\circ$  по отношению к нормальному падению света на плоскость фильтров можно осуществлять плавное изменение длины волны света, пропускаемого фильтрами в диапазоне длин волн от 650 до 420 *нм*. Длина волны, пропускаемая данным фильтром при данном угле наклона, находится по прилагаемым к прибору градуировочным кривым.

Поворотный фильтровый монохроматор «Спектр» представляет первую отечественную модель светосильного монохроматора, приспособленного специально для работы с поляризационными микроскопами.

Простота конструкции и удобство эксплуатации прибора открывают возможность для широкого применения монохроматического света при массовых иммерсионных исследованиях.

## ИММЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ

### ИММЕРСИОННЫЕ ЖИДКОСТИ

Для определения показателей преломления иммерсионным методом служат эталонные жидкости и твердые среды (сплавы) с различными показателями преломления. Стандартный набор иммерсионных жидкостей, выпускаемый Львовским заводом химических реактивов, состоит из 98 жидкостей с показателями от 1,408 до 1,780 (приложение 1). Значения показателей преломления жидкостей набора даны для света с длиной волны 589 нм (спектральная линия  $D$  паров натрия) при температуре 20°. Показатели, определенные в этих условиях, обозначаются символом  $n_D^{20}$ . Практически используется интервал спектра, близкий по длине к 589 нм (область желтого света). Для измерения более высоких показателей преломления употребляются так называемые высокопреломляющие иммерсионные жидкости (ВИЖ) или сплавы, а для меньших значений — специальные низкопреломляющие жидкости.

Иммерсионные жидкости должны отвечать следующим требованиям:

- 1) не вступать в химическую реакцию с исследуемым веществом и не растворять его;
- 2) быть устойчивыми, т. е. не разлагаться на свету, в воздухе и т. д. и не менять свой показатель преломления при хранении;
- 3) не изменять значительно свой показатель преломления при изменении температуры;
- 4) легко смешиваться друг с другом во избежание образования остаточных оболочек вокруг зерен при смене жидкости;
- 5) должны быть бесцветными или слабо окрашенными;
- 6) по возможности быть безвредными;
- 7) не должны быть летучими;

8) в составе смесей должны обладать близкими скоростями испарения.

Иммерсионные жидкости стандартного набора готовятся из нескольких исходных путем смешивания их в различных пропорциях. В качестве исходных жидкостей для составления смесей используются изоамиловый спирт ( $n_D = 1,408$ ), легкие погоны нефти и фракция керосина с температурой кипения  $220-240^\circ$  ( $n_D$  от 1,408 до 1,460),  $\alpha$ -хлорнафталин ( $n_D = 1,633$ ), йодистый метилен ( $n_D = 1,737$ ), насыщенный раствор серы в йодистом метиле ( $n_D = 1,780$ ). Смешивание исходных жидкостей друг с другом дает возможность получить смесь с любым промежуточным показателем преломления, определяемым по формуле

$$n_x = n_A \frac{V_B}{V_B - V_A} (n_B - n_A),$$

где  $n_x$  — искомый показатель смеси;  $n_A$  и  $n_B$  — показатели преломления исходных жидкостей;  $V_A$  и  $V_B$  — объемы исходных жидкостей.

Жидкости иммерсионного набора, имеющие в своем составе йодистый метилен, на свету легко разлагаются и темнеют. Чтобы не допустить порчи указанных жидкостей, в них помещают металлические стружки, которые поглощают йод, выделяющийся при разложении йодистого метилена.

Жидкости иммерсионного набора должны храниться в закупоренном состоянии в специальном деревянном ящике при температурах, близких к  $+20^\circ$ , но не ниже  $+10^\circ$ . Для хранения жидкостей употребляют стеклянные флаконы со стеклянными притертыми пробками, имеющими оттянутый закругленный конец, погруженный в жидкость. При вынимании пробки на ее оттянутом конце всегда будет находиться капля иммерсионной жидкости, которая легко может быть перенесена на предметное стекло.

К набору прилагается таблица (приложение 1) со значениями показателей преломления  $n_D$ , определенными с точностью до  $\pm 0,001$ , и величиной температурных поправок, а также таблица поправок на дисперсию жидкости для различных длин волн (приложение 2).

Показатель преломления иммерсионных жидкостей может заметно изменяться в зависимости от температуры: уменьшаться с ее повышением и наоборот. В связи с этим при определении показателей преломления исследуемых минералов следует вводить температурную поправку. Температурный коэффициент (поправка)  $\frac{dn}{dt} = \Delta n$  характеризует изменение

показателя преломления жидкости при изменении температуры на  $1^\circ$ . Для жидкостей стандартного набора со значениями

показателя преломления до 1,60 поправка составляет в среднем около 0,0004, для жидкости с показателями от 1,60 до 1,70 — около 0,0005, а для высокопреломляющих (от 1,70 до 1,80) — 0,0006—0,0007.

Показатель преломления жидкости при температуре  $t$  вычисляется по формуле

$$n_D^t = n_D^{20} + (20^\circ - t^\circ) \Delta n,$$

где  $n_D^t$  — показатель преломления жидкости при температуре  $t^\circ$ ;  $\Delta n$  — температурная поправка, взятая по таблице;  $t^\circ$  — температура рабочего помещения. Например, жидкость с показателем преломления при температуре  $20^\circ$   $n_D^{20} = 1,615$  при  $30^\circ$  будет иметь показатель  $n_D^{30} = 1,610$ , а при  $10^\circ$   $n_D^{10} = 1,620$ .

Показатель преломления жидкости изменяется в области различных длин волн. Поправка на величину дисперсии жидкости  $\lambda$ , т. е. разность в значениях показателя преломления жидкости в области желтого света ( $n_D$ ) и для других длин волн, дана в специальной таблице, прилагаемой к стандартному набору (приложение 2). Поправка на дисперсию жидкости вводится при работе со светофильтрами в монохроматическом свете и при использовании для сравнения показателей преломления дисперсионного эффекта. На применении ее мы остановимся при рассмотрении методики измерения показателей преломления минералов.

При правильном хранении стандартного иммерсионного набора жидкости со средними значениями показателей преломления ( $n_D$  от 1,45 до 1,63) устойчивы и мало изменяются со временем. Показатели преломления низкопреломляющих жидкостей набора ( $n_D$  менее 1,45) со временем повышаются. Наиболее неустойчивы жидкости с показателями преломления 1,64—1,73, представляющие смеси с йодистым метиленом, благодаря испарению которого со временем происходит понижение показателей преломления. Для жидкости № 98 ( $n_D = 1,780$ ), представляющей собой насыщенный раствор серы в йодистом метиле, с понижением температуры показатель уменьшается вследствие выпадения серы из раствора. В этих случаях флакон с жидкостью следует слегка подогреть на водяной бане до растворения серы.

Для получения высокопреломляющих жидкостей с показателями преломления от 1,78 до 2,10 используются растворы серы и сернистого мышьяка в трехбромистом мышьяке ( $n_D = 2,00—2,07$ ), растворы серы, сернистого и йодистого мышьяка в йодистом метиле ( $n_D = 2,05—2,09$ ), растворы селена и сернистого мышьяка в трехбромистом мышьяке ( $n_D = 2,11$ ), а также растворы серы и фосфора в йодистом метиле ( $n_D = 2,06$ ). Основным недостатком всех высокопре-

ломляющих жидкостей является их сильная ядовитость, кроме того фосфористые среды легко воспламеняются, что ограничивает возможность их применения. Недостатком жидкостей, содержащих трехбромистый мышьяк, является их кислотная реакция, в результате чего они взаимодействуют с некоторыми минералами, а также склонность к гидролизу. Жидкости, содержащие йодистый метилен, на свету быстро разлагаются.

Выпускаемый в настоящее время набор высокопреломляющих иммерсионных сред содержит 46 жидкостей с показателями преломления  $n_D$  от 1,743 до 2,15 (приложение 3). Первые 4 жидкости дополняют большие интервалы в показателях преломления стандартного набора. Набор высокопреломляющих жидкостей изготовлен на основе растворов серы и сернистого мышьяка в трехбромистом метиле и йодистого метилена. Значения показателей преломления ВИЖ даны для 589 нм при 20° с точностью до  $\pm 0,001$ . Для отдельных жидкостей показатели преломления измерены для шести длин волн (приложение 4). Температурная поправка ВИЖ составляет 0,0006—0,0007 на 1°. При длительном хранении и при понижении температуры возможно выпадение кристаллов из жидкостей с наиболее высокими показателями и увеличение их вязкости. В этих случаях флакон с жидкостью следует осторожно подогреть до 50—120°.

Высокопреломляющие жидкости весьма ядовиты и работа с ними требует особой осторожности. После перенесения капли жидкости на предметное стекло набор тотчас же необходимо плотно закрыть. Нельзя допускать попадания жидкости на кожу и особенно в порезы или царапины. В случае попадания пораженные места необходимо сразу же тщательно промыть водой с мылом.

Следует указать, что смешивание высокопреломляющих жидкостей с целью получения промежуточных значений можно производить в пределах либо более низкопреломляющей части набора (1,74—2,00), либо в высокопреломляющей (2,00—2,15). Смешивание указанных частей набора недопустимо.

Потребность в низкопреломляющих жидкостях в минералогической практике более ограничена. Эти жидкости применяются для определения показателей преломления фторидов, некоторых сульфатов, фторсодержащих стекол и некоторых других веществ. Для работы в интервале значений 1,330—1,450 применяются смеси легких фракций нефти, а также смеси глицерина и спирта с водой. Неудобство работы с последними связано с растворимостью в них некоторых низкопреломляющих минералов (отдельные сульфаты, сода). В качестве иммерсионных сред в интервале  $n_D = 1,292—1,411$

используются специальные смеси, содержащие полимеры хлорфторэтилена.

При определении показателей преломления веществ, растворимых в стандартных жидкостях, пользуются водными растворами солей тяжелых металлов. Среди последних применяются жидкости Туле (насыщенный водный раствор ртутно-йодисто-калиевой соли с  $n_D=1,718$ ) и Сушине-Рорбаха (насыщенный водный раствор ртутно-йодисто-бариевой соли с  $n_D=1,795$ ). Разбавлением этих жидкостей водой можно получить среды с различными промежуточными показателями преломления. Однако все рассмотренные жидкости также ядовиты и при длительном действии на кожу могут вызвать тяжелые поражения. Вследствие испарения воды показатели преломления высокопреломляющих жидкостей быстро изменяются и требуют частой проверки.

### ТВЕРДЫЕ ИММЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ (СПЛАВЫ)

Для измерения высоких показателей преломления в качестве иммерсионных сред используются твердые сплавы. Они могут применяться наряду с высокопреломляющими жидкостями для определения показателей преломления в интервале 1,78—2,10. Наибольшее применение сплавы получили для исследования высокопреломляющих веществ со значениями показателей от 2,0 до 2,78. Для получения твердых иммерсионных сред используются легкоплавкие вещества, застывающие после их расплавления в виде изотропной прозрачной массы. Использование твердых сплавов в качестве иммерсионных сред дает менее точные результаты, чем работа с жидкими средами; их точность составляет  $\pm 0,01—0,02$ . В качестве высокопреломляющих твердых сред используются сплавы пиперина с йодидами мышьяка и сурьмы, сплавы серы с селеном, селена с селенистым или сернистым мышьяком и галогениды таллия.

Сплавы пиперина с йодидами мышьяка и сурьмы наиболее легкоплавки ( $70—130^\circ$ ). Они обладают значительной дисперсией и светопоглощением, возрастающими при увеличении содержания йодидов. Наборы пипериновых сплавов имеют сравнительно низкие показатели преломления — от 1,80 до 2,05, и работы в этом диапазоне более легко осуществимы с помощью высокопреломляющих жидкостей.

Для получения более высокопреломляющих твердых сред используются сплавы серы с селеном и смешанные галогениды таллия. Сплавы серы с селеном, взятые в различных пропорциях, имеют показатели преломления от 2,0 до 2,7. Их точки плавления лежат в интервале температур  $200—300^\circ$ . При значениях показателей преломления от 2,7 до 3,17 используются сплавы селена с сернистым мышьяком. Примене-



ние сплавов селена осложнено высокой температурой их плавления, при которой возможно разложение исследуемого вещества. К недостаткам сплавов селена относятся также их сравнительно интенсивная окраска и недостаточная прозрачность. Сплавы, богатые селеном, прозрачны лишь для красного света. Вследствие различной летучести компонентов сплавов серы с селеном и более легкой летучести серы при температурах плавления сплавов может происходить изменение состава сплава и, следовательно, может измениться его показатель. Возможно также взаимодействие сплава с исследуемым веществом. Все это делает мало удобным работу со сплавами селена.

Из галогенидов одновалентного таллия используются его хлористые, бромистые и йодистые соединения. Значения показателей преломления этих соединений — от 2,25 до 2,78. Галогениды таллия представляют собой изотропные иммерсионные среды, характеризующиеся значительно большей прозрачностью и устойчивостью показателей преломления, чем селенсодержащие сплавы. Однако температура плавления таллиевых соединений превышает  $400^\circ$ , что ограничивает возможность их применения. В настоящее время в качестве твердых высокопреломляющих сред используются также прессованные порошки галогенидов таллия и их смешанных кристаллов ( $TlCl-TlBr$ ,  $TlBr-TlI$  и  $TlCl-TlI$ ). Эти вещества изотропны, характеризуются невысокой твердостью и при надавливании (без нагревания) легко спрессовываются в прозрачные таблетки с различными значениями показателей преломления.

К твердым иммерсионным средам относится также канадский (пихтовый) бальзам ( $n=1,537$ ). Он употребляется обычно для склейки шлифа со стеклом и может также использоваться в качестве твердой иммерсионной среды.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИММЕРСИОННЫХ СРЕД

Определение показателей преломления иммерсионных сред производится на специальных приборах — рефрактометрах. Принцип работы рефрактометров основан на определении величины предельного угла полного внутреннего отражения (угла  $\varphi$ ), происходящего на границе двух сред. Согласно закону преломления света, лучи, падающие на границу раздела сред со стороны более преломляющей среды под углом, превышающим предельный угол  $\varphi$ , полностью отражаются от границы раздела.

Измерение предельного угла может производиться двумя способами: 1) при освещении границы раздела пучком лучей, направленным со стороны среды с более высоким показате-

лем преломления (рис. 5, а), и 2) при освещении границы раздела сред скользящим пучком лучей со стороны слабопреломляющей среды (рис. 5, б).

В первом случае пучок лучей 1—3 направляется таким образом, что лучи, падающие под углом больше предельного угла  $\varphi$  (луч 3), полностью отражаются от границы раздела сред. Лучи, угол падения которых меньше предельного (луч 1), преломляются на границе и проникают в слабопре-

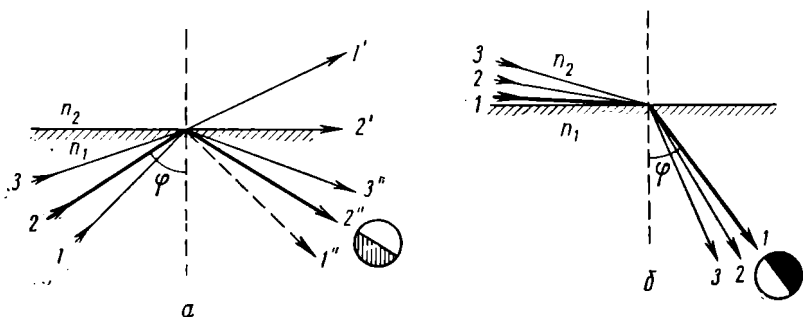


Рис. 5. Два способа наблюдения предельного угла полного внутреннего отражения  $\varphi$  на границе двух сред: а — в отраженном свете; б — способ «скользящего» освещения (в проходящем свете);  $n_1$  — среда с более высоким показателем преломления;  $n_2$  — среда с меньшим показателем преломления

ломляющую среду (луч 1'). Частично эти лучи также будут отражаться обратно в высокопреломляющую среду (луч 1''). Однако интенсивность отраженного света настолько мала, что может не приниматься во внимание. В этом случае рассматривают отраженные лучи.

При освещении границы раздела скользящим пучком лучей наблюдаются преломленные лучи (см. рис. 5, б). Испытывать преломление на границе раздела и проникать в высокопреломляющую среду будут лишь лучи, падающие под предельным углом (луч 1) и меньшим предельного (лучи 2, 3). В обоих случаях наблюдается граница света и тени. Способ скользящего освещения дает более контрастную границу, но пригоден только для прозрачных сред.

Величина предельного угла на границе двух сред зависит от показателей преломления этих сред. Следовательно, если известен показатель преломления одной из сред ( $n$  стекла рефрактометра) и величина предельного угла полного внутреннего отражения  $\varphi$ , показатель преломления второй среды (иммерсионной жидкости) может быть найден по формуле

$$n_{ж} = n_{ст} \sin \varphi.$$

Измерение показателя преломления на рефрактометре делается с точностью до 0,0005.

Удобство рефрактометрического способа измерения показателей преломления состоит в том, что при этом способе необходима лишь плоская граница раздела сред и нет необходимости придавать исследуемому веществу определенную геометрическую форму. Другое преимущество — малый расход жидкости. Недостатком рефрактометрического способа является ограниченный интервал измеряемых показателей преломления (обычно до 1,70, реже до 1,85), лимитирующихся значениями показателей преломления оптической системы рефрактометра (высокопреломляющее стекло).

Следует отметить, что в настоящее время освоено производство высокопреломляющих стекол, позволяющих проводить рефрактометрические измерения до 2,10.

Для определения показателей преломления высокопреломляющих жидкостей ( $n > 1,7$ ), а также твердых сред обычно используется метод призмы.

В настоящее время существует целый ряд систем рефрактометров, описание которых имеется в специальной литературе. Кратко остановимся на устройстве некоторых основных типов рефрактометров, используемых при работе с иммерсионными жидкостями.

*Рефрактометр с составной призмой* — наиболее распространенный тип рефрактометра, применяемого в практике минералого-петрографических исследований. Обычно он называется рефрактометром типа Аббе. Отечественной моделью указанного типа рефрактометра является ИРФ-22.

Работа на рефрактометре с составной призмой производится в белом свете (дневном или электрическом). Основная часть прибора — прямоугольная призма из высокопреломляющего стекла, состоящая из двух призм — измерительной и осветительной (рис. 6, а). Осветительная призма имеет матовую диагональную грань. Измерительная призма — полированная.

Для измерения показателя преломления тонкий слой испытуемой жидкости помещается между двумя призмами. Свет через вспомогательную призму поступает в исследуемую жидкость. Явления, используемые для определения светопреломления, происходят на границе жидкости с измерительной полированной призмой. Лучи, проходящие параллельно гипотенузной грани призмы, не будут входить в нее. Лучи иного направления будут входить в измерительную призму, претерпевая преломление на границе жидкости с призмой и повторное преломление — на границе призмы с воздухом. При наблюдении в зрительную трубу рефрактометра поле зрения будет разделено на светлую и темную части, границу раздела которых требуется совместить с крестом нитей зрительной трубы. Вследствие дисперсии света на границе раздела возникают радужные полосы, устранение которых достигается

специальным компенсатором, в который входит так называемая призма прямого видения (призма Амичи). Угол отклонения луча зависит от соотношения показателей преломления стекла и испытуемой жидкости. Вращающийся призмный блок в рефрактометре ИРФ-22 соединен со стеклянной шкалой. Шкала рефрактометра подсвечивается зеркалом и проектируется в поле зрения трубы рефрактометра, в котором

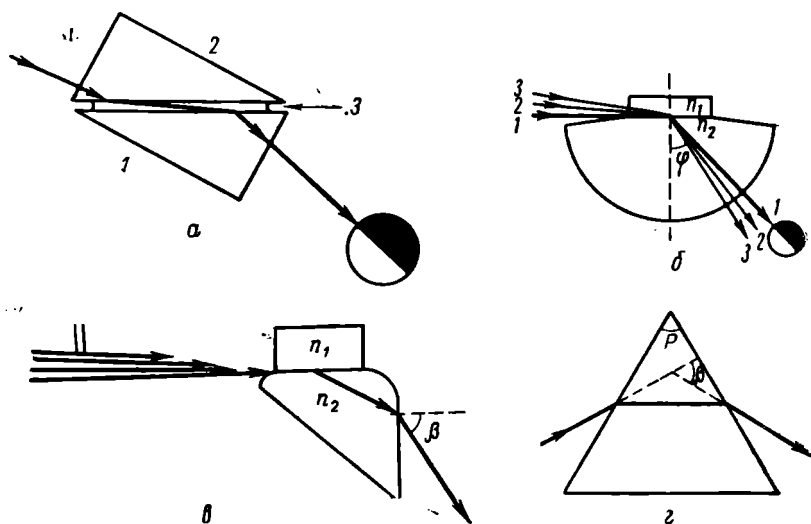


Рис. 6. Схема хода лучей в рефрактометрах: *a* — с составной призмой (типа Аббе); 1 — измерительная призма; 2 — осветительная призма; 3 — слой исследуемой жидкости; *б* — с полусферой; *в* — с неподвижной призмой (типа Пульфрихта);  $P$  — преломляющий угол призмы;  $\beta$  — угол отклоненных лучей

одновременно наблюдается шкала и граница раздела. Для измерения показателя преломления жидкости границу светлого и темного поля следует совместить с крестом нитей и взять отсчет по визирному штриху шкалы. Шкала рефрактометра ИРФ-22 градуирована непосредственно в значениях показателя преломления испытуемой жидкости для желтого света (значение  $n_D$ ). Цена деления шкалы рефрактометра 0,001. Отсчет по шкале может быть сделан с точностью  $\pm 0,0002—0,0003$ . Диапазон измеряемых показателей преломления составляет от 1,3 до 1,7.

*Рефрактометр с полусферой (кристалл-рефрактометр)* менее удобен для работы с иммерсионными жидкостями, чем модель, описанная выше. Однако он имеет преимущество при

измерении показателей анизотропных тел, обусловленное возможностью вращения полусферы и изменения положения исследуемого тела относительно падающих на него лучей.

Основной частью прибора является полушарие из высокопреломляющего стекла. Исследуемое вещество помещается на горизонтальную плоскую грань полусферы и освещается с помощью плоского зеркала скользящим монохроматическим светом (рис. 6, б). Внутри полусферы проникают лишь преломленные лучи, падающие под предельным и меньшими углами.

В зрительную трубу наблюдается граница освещенной и темной частей поля зрения. Эта граница соответствует лучам, проходящим через центр полусферы под предельным углом. В некоторых системах рефрактометра с полусферой исследуемое вещество освещается снизу сквозь полусферу.

Вследствие того, что лучи, идущие из центра полусферы, не испытывают преломления на сферической поверхности, угломерное устройство рефрактометра позволяет непосредственно определять величину предельного угла  $\varphi$ . Отсчет этой величины производится по лимбу, соединенному со зрительной трубой. Для исключения возможной ошибки осветительная часть и труба перебрасываются в обратное положение, при котором производится повторное определение.

Величина показателя преломления вычисляется по указанной ранее формуле:  $n_{\text{ж}} = n_{\text{ст}} \sin \varphi$ , в связи с чем необходимо знать константу рефрактометра ( $n$  стекла полусферы). Последняя обычно указывается в паспорте прибора. При необходимости произвести измерения с высокой точностью, для определения константы рефрактометра используются стеклянные эталоны—пластинки, показатель преломления которых определен с большой точностью. Пластинку помещают на грань полусферы и, измерив предельный угол  $\varphi$ , находят константу рефрактометра.

Важным условием определения величины предельного угла является правильная юстировка полусферы (совмещение оси вращения зрительной трубы с центром полусферы). Эта операция довольно сложна и требует навыка.

Сложность юстировки и необходимость применения монохроматического освещения ограничивают возможность применения рефрактометра с полусферой. Он используется преимущественно при минералого-петрографических исследованиях в качестве кристалл-рефрактометра.

*Рефрактометр с неподвижной призмой (рефрактометр типа Пульфрихта)* широко применяется в области химии и может использоваться для измерения показателей преломления иммерсионных жидкостей. Современной моделью прибора этого типа является рефрактометр ИРФ-23.

Главная часть прибора — измерительная призма с преломляющим углом  $90^\circ$  (рис. 6, а). Одна из граней призмы располагается горизонтально. Края горизонтальной грани сошлифованы по сфере. К ней приклеивается полый стеклянный цилиндр, вмещающий исследуемую жидкость. Монохроматический свет освещает жидкость параллельно горизонтальной поверхности призмы и, преломляясь, выходит через вторую грань, обращенную к зрительной трубе. Совмещая крест нитей окуляра зрительной трубы с границей светлой и темной части поля зрения, измеряют угол  $\beta$ .

Показатель преломления жидкости  $n$  вычисляется по формуле

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 \beta},$$

где  $N$  — показатель преломления стекла рефрактометра. К прибору приложены таблицы для нахождения величины  $n$  по значению угла  $\beta$ . Комплект рефрактометра ИРФ-23 содержит три сменные призмы со значениями  $N_D$  равными 1,617; 1,740 и 1,806, что позволяет использовать данный рефрактометр для измерения показателей преломления до 1,78.

Недостаток прибора — значительный расход жидкости.

Для измерения показателей преломления сплавов и высокопреломляющих жидкостей используется гониометрический способ, обычно называемый методом призмы. Этот способ основан на точном измерении угла отклонения при прохождении лучей через призму, установленную на одноокружном гониометре. При работе с твердыми сплавами призма изготавливается непосредственно из сплава. В случае высокопреломляющих жидкостей используется полая стеклянная призма с плоскопараллельными стенками, в которую помещается исследуемая жидкость. При повороте призмы вокруг оси прибора угол отклонения лучей изменяется, достигая минимума в положении, когда направление луча параллельно основанию призмы (рис. 6, б). Угол наименьшего отклонения лучей  $\beta$  связан с величиной показателя преломления призмы  $n$  и преломляющим углом призмы  $P$  следующей формулой:

$$n = \frac{\sin \frac{\beta + P}{2}}{\sin \frac{P}{2}}.$$

Метод призмы позволяет получать более точные значения показателей преломления, чем измерения на рефрактометре. Его чувствительность обычно составляет 0,0001. Она зависит от величины преломляющего угла призмы и точности отсче-

тов углов на гониометре. Гониометры, обычно используемые при минералогических исследованиях, позволяют определить угол отклонения лучей с точностью до минуты. При определении углов с точностью до секунд и соблюдении ряда других условий (качество призмы, термостатирование прибора и др.) значение показателей преломления вещества может быть повышено до единиц шестого знака.

Недостатком метода призмы является необходимость применения гониометра и сложность изготовления призмы.

## ИММЕРСИОННЫЕ ПРЕПАРАТЫ

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Препараты для работы иммерсионным методом изготавливаются из мелкозернистого материала. С этой целью исследуемые агрегаты минералов или кристаллы размельчаются в агатовой или фарфоровой ступке с помощью минералогической наковальни или молоточка. Минералы с невысокой твердостью удобно измельчать непосредственно на предметном стекле с помощью шпателя или стеклянной палочки. Измельчение материала должно быть по возможности равномерным; при заметной разнородности тонкую и наиболее крупную фракции следует отсеять на сите.

Размер кристаллических зерен не должен превышать 0,25—0,30 мм. Наиболее удобны для работы зерна размером 0,05—0,10 мм. Для изготовления одного препарата достаточно 1—2 зерен размером 1,0 мм в поперечнике. При подготовке препаратов необходимо иметь чистые, тщательно протертые спиртом или ацетоном сухие предметные и покровные стекла. Размер последних определяется задачами исследования. При определении показателя преломления и других оптических констант можно использовать не целое стандартное покровное стекло (18×18 мм), а  $\frac{1}{4}$  или  $\frac{1}{9}$  часть его. При количественных минералогических подсчетах следует пользоваться целыми покровными стеклами. Разрезать целое покровное стекло можно с помощью специального резца, осколка кварца либо острого края предметного стекла или бритвы. Для этой цели покровное стекло, которое требуется разрезать, помещается поверх предметного и наполовину покрывается линейкой или вторым предметным стеклом, вдоль края которого прочерчивают резцом. Пододвинув линию надреза к краю подстилающего стекла, легким нажимом делается надлом. Для работы следует пользоваться покровными стеклами с прямолинейными ограничениями, криволинейные



выколки для работы неудобны. При иммерсионных исследованиях для изготовления первых препаратов следует выбирать жидкости с показателем преломления, близким к значению показателя предполагаемого минерала. При работе с неизвестным веществом рекомендуется начинать со среднего значения показателя преломления (1,52—1,56).

Изготовление препаратов с использованием жидких иммерсионных сред производится двумя способами: 1) без закрепления минеральных зерен и 2) с закреплением их.

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПРЕПАРАТОВ БЕЗ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗЕРЕН

Небольшое количество исследуемого вещества насыпается на чистое предметное стекло. Легким потряхиванием или при помощи минералогической иглы порошок тщательно разравнивается. Зерна в препарате должны лежать в один слой, не накладываясь друг на друга, излишняя густота зерен в препарате не желательна. Препарат накрывается покровным стеклом. Иммерсионную жидкость извлекают из флакончика

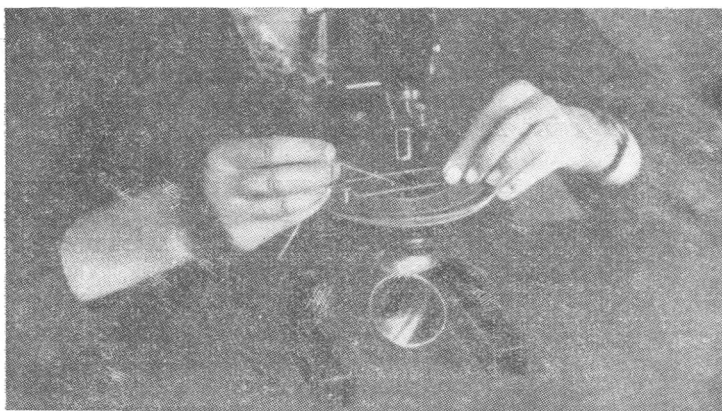


Рис. 7. Заполнение препарата иммерсионной жидкостью

с помощью оттянутого закругленного конца стеклянной пробки. Капля жидкости переносится на предметное стекло и помещается рядом с краем покровного стекла, накрывающего порошок (рис. 7). Капиллярными силами иммерсионная жидкость засасывается под покровное стекло. Для лучшего проникновения жидкости препарат можно слегка наклонить, приподняв край предметного стекла на 2—3 мм. Надо внимательно следить, чтобы в препарате не оставалось пузырьков воздуха. В случае их наличия следует слабо надавить

на покровное стекло для «выжимания» пузырей. Жидкость должна полностью заполнить промежуток между зернами, для чего операцию перенесения жидкости обычно повторяют несколько раз. Избыток жидкости удаляют полоской фильтровальной бумаги.

В некоторых случаях, например, при работе с тонкозернистым веществом можно предварительно поместить каплю иммерсионной жидкости на предметное стекло и вводить в нее исследуемый материал с помощью иглы, добиваясь его равномерного распределения, после чего накрыть агрегат покровным стеклом.

При необходимости длительного сохранения препарата для предотвращения испарения жидкости край покровного стекла следует промазать парафином или менделеевской замазкой. Подобная предосторожность особенно необходима при работе с легколетучими или ядовитыми жидкостями.

### **ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПРЕПАРАТОВ С ЗАКРЕПЛЕНИЕМ ЗЕРЕН**

Работа с иммерсионными препаратами, зерна которых не закреплены и могут свободно перемещаться, в ряде случаев бывает неудобна, так как выбранные разрезы зерен легко теряются при смене жидкости в препарате. Количественные подсчеты в незакрепленных препаратах затруднительны. Чтобы избежать этих неудобств, зерна препарата закрепляются на стекле.

Прикрепление зерен к предметному стеклу, в случае нерастворимых в воде веществ, осуществляется с помощью очень слабого (0,5%) водного раствора желатина. Следует избегать более концентрированных растворов, так как при высыхании раствора может происходить обволакивание зерен, мешающее наблюдению эффекта применяемого способа сравнения. Для прикрепления зерен к предметному стеклу В. Б. Татарский рекомендует использование чистой воды или слабого раствора сахара (несколько крупинок на стакан). Однако подобные препараты обычно не прочны и менее удобны для работы.

Капли раствора помещают на чистое сухое предметное стекло. На поверхность капли тонким ровным слоем насыпают небольшое количество измельченного вещества, которое благодаря силам поверхностного натяжения жидкости распределяется покровом толщиной в одно зерно. При растекании капли по стеклу равномерность распределения вещества достигается с помощью стеклянной палочки или иглы. Когда материал равномерно распределен, избыток влаги отсасывают полоской фильтровальной бумаги, аккуратно поднося ее к краю капли. По удалении влаги препарат подсуши-

вают над электрической лампой, спиртовкой или плиткой (избегать перегрева!) или оставляют подсыхать на 10—15 мин. После просушивания зерна оказываются приклеенными к предметному стеклу. Дальнейшее изготовление препарата производится тем же способом, что и при незакрепленных зернах.

При систематической работе с закреплением зерен можно заранее заготовить предметные стекла с нанесенным на них тонким слоем желатина. Для этого стекла погружаются в 1%-ный раствор желатина и просушиваются. Можно также использовать эмульсионный слой отфиксированной диапозитивной пластинки. В этих случаях для изготовления препарата материал равномерно распределяется по стеклу и увлажняется дыханием или паром, после чего зерна оказываются приклеенными к стеклу. Для приклеивания веществ, растворимых в воде, применяется спирт, бензин

### СМЕНА ЖИДКОСТИ В ПРЕПАРАТЕ

В тех случаях, когда исследуемое вещество имеется в неограниченном количестве или нет необходимости производить измерения на определенных разрезах, при смене жидкости изготавливается новый препарат. Когда количество материала ограничено или необходимо сохранить выбранный разрез зерна, работа ведется в одном и том же препарате со сменой жидкости. Зерна в препарате в этих случаях обязательно должны быть закреплены.

Смена жидкости может осуществляться непосредственно на столике микроскопа. Исследуемое зерно в этих случаях ставится на крест нитей и препарат тщательно закрепляется на столике микроскопа. Полоску фильтровальной бумаги осторожно подносят к краю покровного стекла и приводят в соприкосновение с жидкостью. Покровное стекло при этом следует слегка приподнять, придерживая иглой. Для полного удаления жидкости фильтровальную бумагу следует сменить несколько раз. После тщательного отсасывания в препарат вводится новая иммерсионная жидкость.

Полного удаления жидкости нередко трудно достигнуть, особенно при работе с мелкозернистыми агрегатами. В этом случае ряд исследователей рекомендует ставить покровное стекло вертикально и сбрасывать с препарата. После удаления жидкости препарат накрывается чистым покровным стеклом. При работе с более густыми иммерсионными средами, например, с кедровым или касторовым маслами, которые плохо удаляются фильтровальной бумагой, препарат перед введением новой жидкости необходимо промыть спиртом или ксилолом.

Обычно при тщательной работе количество жидкости, остающееся между зернами препарата, невелико и ошибкой, происходящей от неполного удаления жидкости, можно пренебречь. Эта ошибка не будет оказывать существенного влияния при заметной разнице в значениях показателей преломления минерала и среды.

Однако при сближенных значениях показателей минерала и жидкости неполное удаление предыдущей жидкости может привести к искажению результатов определения. В таких случаях необходимо тщательно удалять старую жидкость и перед введением новой промывать препарат спиртом или другим легколетучим веществом. Можно также прибегнуть к удалению вновь введенной жидкости и повторному заполнению ею препарата. Подобный прием практически исключает влияние ошибки от неполноты удаления старой жидкости.

### **ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПРЕПАРАТОВ ПРИ ПОМОЩИ ТВЕРДЫХ ИММЕРСИОННЫХ СРЕД**

В тех случаях, когда для приготовления препаратов в качестве иммерсионных сред используются твердые сплавы, измельченные зерна исследуемого вещества смешиваются с небольшим количеством сплава (около  $1 \text{ мм}^3$ ) и смесь помещается на предметное стекло. Препарат ставится на толстую металлическую пластинку или асбестовую сетку и медленно нагревается на электроплитке, спиртовке или песчаной бане. Сплав пиперина с йодидами мышьяка и сурьмы и сплавы галогенидов таллия следует нагревать до расплавления, а сплавы серы и селена — до появления дыма. Нужно помнить, что повышение концентрации селена увеличивает температуру плавления сплава. Необходимо остерегаться перегрева сплавов, так как препарат при этом становится неоднородным и в нем появляются пузырьки. Перегрев может приводить также к потере серы, что изменит показатель преломления в сплаве. При недогреве сплав остается густым, что затрудняет изготовление препарата. Среды со значительной концентрацией серы при недостаточном прогревании в последующем быстро раскристаллизовываются.

Нагретый препарат с равномерно распределенным по стеклу сплавом снимается с плитки и накрывается покровным стеклом. Покровное стекло прижимается к препарату для получения по возможности более тонкого слоя сплава. Особенно важно получить тонкий слой в тех случаях, когда работа ведется с малопрозрачным сплавом, например, со сплавом селена.

Если работу проводят с минералами, не изменяющими своих показателей преломления при нагревании, следует предварительно смешать сплав с исследуемым веществом, на-

крыть препарат покровным стеклом, после чего препарат нагреть. Во избежание раскристаллизации сплавов препарат после нагревания необходимо закалить путем быстрого охлаждения.

Следует помнить, что в стекловатом материале сплава могут присутствовать тонкие непроплавленные обломки, которые в окрашенных или недостаточно прозрачных сплавах можно ошибочно принять за исследуемые зерна. Чтобы не допустить подобных ошибок, исследуемый материал необходимо предварительно просматривать в препарате с жидкими средами.

Окраска, присущая сплавам, затрудняет наблюдение в препарате дисперсионных явлений, вследствие чего при работе со сплавами для сравнения показателей преломления вещества и среды рекомендуется пользоваться эффектом Бекке.

При использовании в качестве иммерсионных сред прессованных порошков в силу их пластичности введение исследуемого вещества в таблетку может осуществляться без ее расплавления.

#### **ПРИГОТОВЛЕНИЕ ИММЕРСИОННЫХ ПРЕПАРАТОВ ИЗ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИХ ШЛИФОВ**

Для определения показателей преломления минералов в петрографических шлифах бывает необходимо изготовить иммерсионный препарат непосредственно из шлифа. С этой целью покровное стекло удаляется путем нагревания шлифа со стороны стекла до расплавления канадского бальзама (до появления пузырьков), после чего стекло сдвигается в сторону иглой или пальцем. Далее из освобожденного от покровного стекла шлифа полностью удаляется канадский бальзам, для чего препарат погружается в ванночку с ксилолом на 15—20 мин. Удаление канадского бальзама должно производиться весьма тщательно, так как остатки его могут мешать сравнению показателей преломления. При полном удалении бальзама минеральная пластинка должна легко перемещаться на предметном стекле. Не следует снимать пластинку с предметного стекла, так как ее легко повредить.

После растворения бальзама препарат тщательно (2—3 раза) промывается спиртом и просушивается. Отпариванная таким образом минеральная пластинка закрепляется иммерсионной жидкостью и накрывается покровным стеклом. Избыток жидкости удаляется полоской фильтровальной бумаги. Смена жидкости в препарате производится описанным выше способом. Если для исследования берется лишь одно зерно или небольшой участок шлифа, он может быть отрезан от остальной части с помощью бритвы и перенесен на другое предметное стекло для изготовления препарата.

## СПОСОБЫ СРАВНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МИНЕРАЛА И ИММЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

Определение показателя преломления исследуемого объекта заключается в подборе жидкости, равной ему по величине своего показателя. Выполнение этой задачи осуществляется путем сравнения с эталонными средами.

Существует несколько способов сравнения показателей преломления двух сред, например способ Бекке, способы фокального экранирования, фазового контраста и др.

Ни один из этих способов не универсален и каждый имеет определенные преимущества и недостатки. Целесообразность выбора метода сравнения показателей преломления определяется исследуемым объектом, стадией работы и задачей производимых определений.

Ниже дано описание существующих способов сравнения показателей преломления, комплексное применение которых обеспечивает эффективное решение задач иммерсионного метода.

### СПОСОБ БЕККЕ

Описываемый способ основан на наблюдении подвижной световой полоски, возникающей вблизи границы раздела двух сред с различными показателями преломления при дефокусировке микроскопа.

Образование области усиленной освещенности, проявляющейся в виде световой полоски, можно объяснить следующим образом.

Представим себе, что исследуемое зерно с показателем преломления  $n_1$  погружено в иммерсионную жидкость с показателем преломления  $n_2$ , причем  $n_1 > n_2$ . Пусть снизу на такой препарат (рис. 8, а) падает параллельный световой пучок, направленный вдоль оси микроскопа. Лучи освещаю-

щего пучка, падающие на плоскопараллельные участки препарата и помеченные цифрами 1 и 3, идут через эти участки, не меняя направления (прямой свет). Лучи того же пучка (например, лучи 2), прошедшие через границу раздела двух

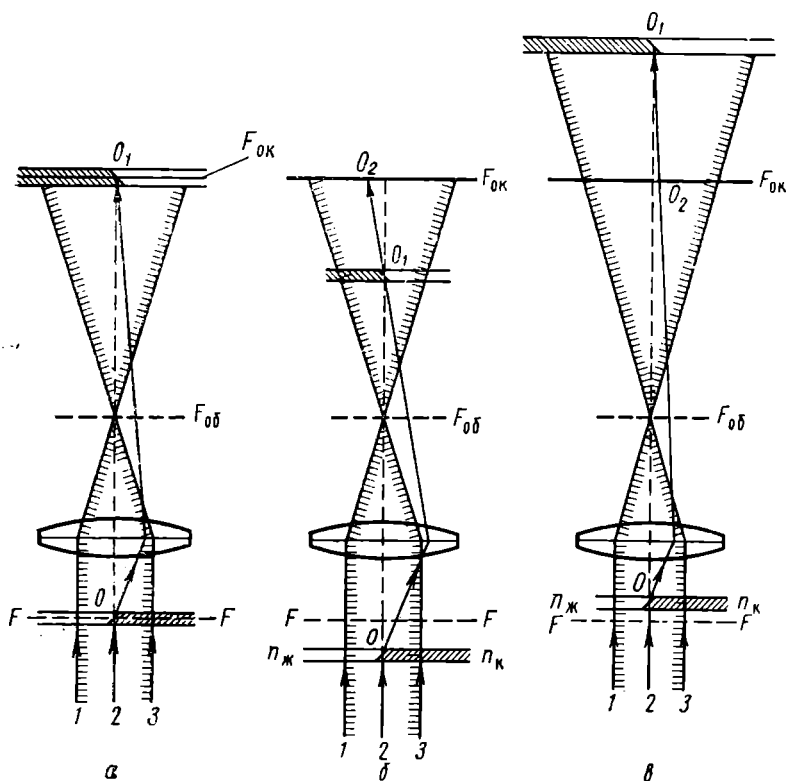


Рис. 8. Схема образования полосы Бекке при дефокусировке микроскопа: *a* — ход лучей при наведении на фокус; *б* — при опускании столика (поднятии тубуса) микроскопа; *в* — при поднятии столика (опускании тубуса) микроскопа;  $F_{об}$  — задняя фокальная плоскость объектива;  $F_{ок}$  — фокальная плоскость окуляра; 1, 3 — лучи, прошедшие без преломления; 2 — преломленные лучи

сред, в результате преломления отклоняются от первоначального направления и выходят из препарата под некоторым углом к оптической оси микроскопа. Если микроскоп сфокусирован на препарат (рис. 8, *a*), то в плоскости изображения препарата, совпадающей в данном случае с фокальной пло-

скостью окуляра ( $F_{ок}$ ), наблюдают равномерное распределение света<sup>1</sup>.

Если же изменить положение рассматриваемого препарата по отношению к плоскости установки, т. е. поднять или опустить столик или тубус микроскопа, как изображено на рис. 8, б, в, то в обоих случаях лучи, отклоненные краем кристаллического зерна, пересекут фокальную плоскость окуляра на участках, освещаемых прямым светом.

Взаимодействие прямого и отклоненного света вызывает усиление яркости света на данных участках, что и выражается в появлении в изображении препарата, вблизи границы раздела двух сред, световой полоски, называемой полоской Бекке (рис. 9).

Если показатель преломления кристалла больше, чем жидкости, то при подъеме тубуса отклоненные лучи пересекают фокальную плоскость окуляра на участке, освещаемом прямым светом, прошедшим через кристалл (рис. 8, б). Вследствие этого наблюдателю кажется, что в изображении кристалла, на некотором расстоянии от границы раздела, имеется белая полоска более яркая, чем фон поля зрения.

Указанная полоска тем дальше смещается от края зерна к его центру, чем выше поднят тубус или опущен столик микроскопа.

При опускании тубуса (подъеме столика) микроскопа отклоненные лучи, пройдя через объектив микроскопа, пересекают фокальную плоскость окуляра на участке, освещаемом прямым светом, прошедшим через жидкость. В этом случае наблюдатель видит световую полоску на стороне жидкости (рис. 8, в).

Таким образом, при поднятии тубуса (опускании столика) полоска Бекке перемещается в сторону более высокопреломляющей среды, а при опускании тубуса (поднятии столика) — в противоположную сторону.

Для лучшего запоминания правила перемещения полоски Бекке В. Н. Лодочников сформулировал его в мнемонической форме.

При поднятии тубуса полоска перемещается в положительную сторону, а при опускании тубуса — в отрицательную.

При равенстве показателей преломления двух сред полоска Бекке исчезает, так как в этом случае не происходит преломления света на границе двух сред.

---

<sup>1</sup> В действительности этого не происходит, так как в образовании изображения препарата помимо указанных лучей принимают участие также и дифрагированные лучи света, благодаря чему объект оказывается видимым и на фоне поля зрения.





Рис. 9. Вид полоски Бекке в иммерсионном препарате ( $n_k > n_{ж}$ ):  
а — столик опущен (тубус поднят); б — столик поднят (тубус опущен)

Однако исчезновение полоски Бекке может быть достигнуто только при работе в монохроматическом свете. При освещении препарата белым светом равенство показателей преломления двух сред, а следовательно, и исчезновение полоски Бекке может наступать только для лучей какой-либо одной длины волны видимого света. Это объясняется следующими причинами. Известно, что величина показателя преломления того или иного вещества зависит от длины волны. Указанное явление называется дисперсией показате-

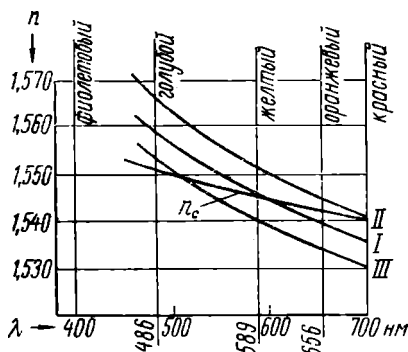


Рис. 10. Кривые дисперсии обыкновенного ( $n_0$ ) показателя преломления кварца и близких к нему жидкостей

ля преломления. У большинства бесцветных прозрачных веществ показатель преломления плавно возрастает с уменьшением длины волны (нормальная дисперсия). Величины дисперсии колеблются от вещества к веществу, но в большинстве случаев дисперсия жидких сред, как правило, больше, чем дисперсия твердых сред. На рис. 10 в качестве примера дано графическое изображение дисперсии показателя преломления кварца и ряда близких к нему по показателям преломления жидкостей. Из рисунка видно, что пересечение изображенных на нем кривых дисперсий возможно только в одной точке, соответствующей той или иной длине волны света.

Как уже было сказано выше, лучи с длиной волны, отвечающей точке пересечения кривых дисперсий, не участвуют в образовании полоски Бекке. Это приводит к появлению цветных полос Бекке, схема образования которых поясняется на рис. 11.

Допустим, что показатели преломления двух сред совпадают в желтой части спектра ( $D$ ), тогда согласно графику

дисперсии, изображенному на рис. 10, показатели преломления кристалла для более длинных волн (красных) будут больше, а для более коротких (фиолетовых и синих) меньше, чем показатели жидкости. Поэтому первые (лучи *C*, рис. 11) будут отклоняться в сторону кристалла, а вторые (лучи *F*) в сторону жидкости.

В результате этого при слабой расфокусировке микроскопа (ход лучей, изображенных на рис. 11 пунктиром) образуются две цветные полосы, перемещающиеся в разные стороны от границы двух сред по известному нам правилу. При более сильной дефокусировке происходит расчленение цветных полос на составляющие их спектральные области. Это явление особенно хорошо наблюдается при больших разностях дисперсий двух сред.

Из сказанного следует, что характер окраски цветных полос Бекке зависит от того, в какой части спектра уравниваются показатели преломления кристаллического зерна и жидкости. Эти данные приведены в табл. 1.

Таким образом, по окраскам полосок Бекке можно установить область спектра, в которой показатели преломления исследуемого минерала и жидкости совпадают. Следует отметить, что наряду с подвижными цветными полосками непосредственно на краях кристаллического зерна может возникать неподвижная цветная кайма. Она обязана своим происхождением лучам, которые проходят через края зерен без отклонения (лучи *D*, рис. 11). Цвет этой каймы непосредственно выражает область спектра, в которой уравниваются показатели преломления. Чувствительность способа Бекке в монохроматическом свете  $\pm 0,0005$ . При использовании дисперсионных окрасок она снижается до  $\pm 0,001-0,003$ .

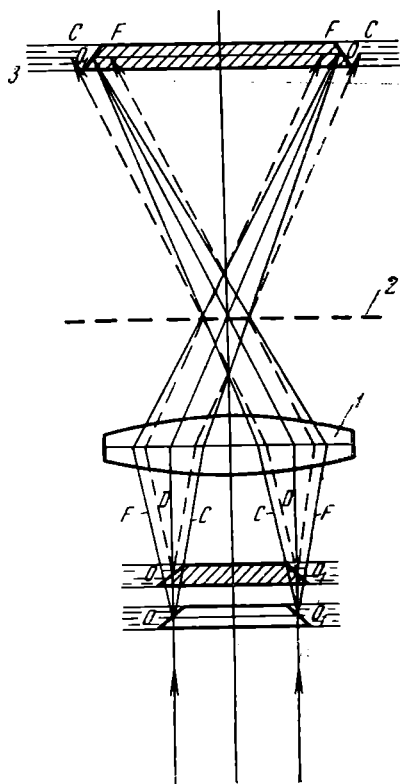


Рис. 11. Схема образования цветных полос Бекке: *FF* — плоскость установки; *1* — объектив; *2* — фокальная плоскость объектива; *3* — фокальная плоскость окуляра

Для практического применения описываемого способа не требуется какой-либо специальной аппаратуры, кроме обычного поляризационного микроскопа и осветителя к нему с точечным источником света типа ОИ-9 или ОИ-19.

Таблица 1

Дисперсионные окраски полосы Бекке

Спектральная область совпадения показателей преломления кристалла и жидкости	Наблюдаемые цветные полосы
Красная	темно-красная и бледно-зеленовато-голубоватая
Желтая	оранжево-красная и светло-зеленовато-голубая
Зеленая	оранжевая и синевато-голубая
Голубая	канареечно-желтая и синяя
Синяя	желтая и сине-фиолетовая
Фиолетовая	бледно-желтая и фиолетовая

Способ Бекке требует освещения препарата параллельным пучком лучей, направленным вдоль оптической оси микроскопа. Такое освещение можно осуществлять двумя путями: 1) значительным уменьшением апертуры освещающего пучка с помощью апертурной диафрагмы конденсора; 2) освещением препарата без конденсора.

Второй способ настройки освещения обеспечивает большую степень параллельности освещающего пучка и его использование более рационально. Для настройки освещения этим способом необходимо:

- 1) выключить конденсорную линзу из осветительной системы;
- 2) установить рукоятку, находящуюся с правой стороны осветительной подставки микроскопа МИН-8, в положение «выключено»;
- 3) лампочку в корпусе осветителя вдвинуть до предела;
- 4) включить линзу Бертрана и с помощью центрировочных винтов, расположенных на корпусе осветителя, а также центрировочных винтов, расположенных в передней части осветительной подставки микроскопа МИН-8, привести наблюдаемое в выходном зрачке объектива изображение источника света в центр поля зрения.

При правильной установке освещения в выходном зрачке объектива наблюдают картину, изображенную на рис. 12, а.

По окончании настройки освещения выключают линзу Бертрана и переходят к наблюдению препарата. Наблюдение препарата можно вести со всеми объективами, входящими в комплект микроскопа, но наиболее удобен для работы объектив  $\times 20$ .

Оптимальный размер зерен исследуемого вещества в препарате 0,05—0,10 мм. При очень мелких зернах эффект Бекке видоизменяется. В этом случае при подъеме тубуса микроскопа зерно целиком просветляется, если его показатель преломления больше, чем у окружающей среды, и темнеет, если соотношение показателей преломления двух сред имеет противоположный характер. При малых различиях показателей

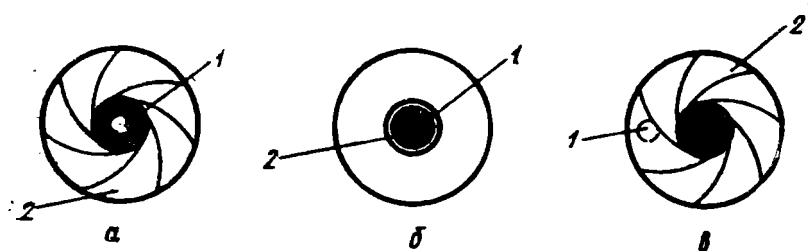


Рис. 12. Взаимное расположение изображения источника света (1) и диафрагмы (2) в выходном зрачке объектива: а — при кольцевом экранировании; б — при центральном экранировании; в — при одно-стороннем экранировании

преломления двух сред описанный эффект становится неразборчивым и пользоваться им затруднительно.

Когда объект представлен очень тонкими пластинками, например, пластинками слюды, по обе стороны границы раздела двух сред появляется несколько световых полос дифракционного происхождения, имеющих яркость, сравнимую с полоской Бекке. В этом случае судить о направлении перемещения последней не представляется возможным. Загрязнение зерна исследуемого объекта веществом с иным показателем преломления также затрудняет определения, так как в этом случае не удастся добиться полного исчезновения полоски Бекке при равенстве показателей преломления двух сред.

Способ Бекке широко используется для измерения показателей преломления в практике минералого-петрографических исследований.

Основным недостатком способа Бекке следует считать факт, что наблюдаемый при нем оптический эффект (световые полосы), на основе которого судят о соотношении показателей преломления двух сред, является подвижным, и должен наблюдаться лишь в положении погасания зерен. Это обстоятельство не позволяет наблюдать указанный эффект одновременно на нескольких зернах препарата, находящихся в поле зрения микроскопа, что затрудняет определение главных показателей преломления анизотропных минералов.

## СПОСОБЫ ФОКАЛЬНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Данный способ сравнения показателей преломления, предложенный Ю. А. Черкасовым, основан на наблюдении оптического эффекта, возникающего в иммерсионном препарате при устранении (экранировании) той или иной группы лучей, прошедших через объект и участвующих в образовании его изображения. В зависимости от того, какая группа лучей устраняется, различают кольцевое, центральное и одностороннее экранирование.

### 1. Кольцевое экранирование

Способ основан на наблюдении оптического эффекта, возникающего в иммерсионном препарате при экранировании лучей, преломленных объектом. Если в фокальной плоскости объектива поместить непрозрачный экран так, чтобы он закрыл точки фокальной плоскости, в которых собираются лучи, преломленные краями зерна (рис. 13), то в изображении

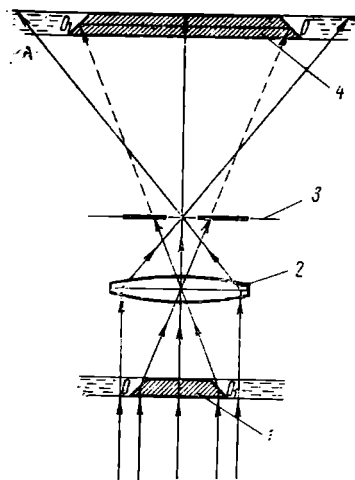


Рис. 13. Схема хода лучей в микроскопе при кольцевом экранировании: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — фокальная плоскость объектива; 4 — изображение объекта

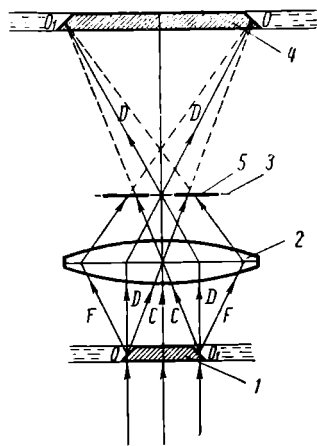


Рис. 14. Схема образования дисперсионного (цветного) эффекта при кольцевом экранировании: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — фокальная плоскость объектива; 4 — изображение объекта; 5 — экран

зерна на его краях будет наблюдаться резкая темная кайма.

При равенстве показателей преломления двух сред указанная темная кайма исчезает и изображение кристалла становится невидимым, так как свет, прошедший через края

кристаллического зерна, не испытывает отклонения и, следовательно, не задерживается экраном.

Последнее явление имеет место только при работе в монокроматическом свете. При применении белого света в том же случае на краях зерна возникает цветной эффект (рис. 14).

Как указывалось, вследствие различий в дисперсии твердых и жидких сред совпадение их показателей преломления может быть достигнуто только для какой-либо одной длины волны видимой области спектра. Лучи с этой длиной волны ( $D$ ) проходят через преломляющие участки зерна без отклонения и попадают в плоскость изображения. Лучи всех других длин волн видимого света ( $C, F$ ) на тех же участках зерна отклоняются от своего первоначального направления и задерживаются экраном (рис. 14). Вследствие этого на краях зерен появляется цветная окраска (см. табл. 1). Наблюдаемая окраска непосредственно выражена светом с той длиной волны (практически узкой частью спектра), для которой уравниваются показатели преломления двух сред.

Эффект кольцевого экранирования наблюдается одновременно на всех зернах препарата, находящихся в поле зрения микроскопа при фокусировании последнего на объект. Это обстоятельство имеет большое значение при исследовании анизотропных минералов.

Высокая яркость и четкость цветного эффекта, наблюдаемого при кольцевом экранировании, обеспечивают более точные и надежные результаты определения показателей преломления, чем дисперсионный эффект способа Бекке.

Для наблюдения эффекта кольцевого экранирования применяют микрообъективы, снабженные присовой диафрагмой или устройством типа «Радуга-1», описанным выше. Из объективов, снабженных присовой диафрагмой, в комплекте микроскопа МИН-8 имеется объектив с увеличением  $\times 9$  (см. рис. 2), также выпускаемый отдельно под шифром ОМ-2И. Требуемый объектив устанавливают на место обычного объектива микроскопа.

Правильная настройка освещения — важнейшее и решающее условие для наблюдения эффекта кольцевого экранирования. В связи с этим следует обращать особое внимание на точное соблюдение всех требований, предъявляемых к освещению. В общих чертах настройка освещения не отличается от таковой для способа Бекке. Отличительной особенностью является лишь более строгая центрировка освещающего пучка. Эта центрировка производится по отношению к отверстию экранирующей диафрагмы.

Изображение источника света или апертурной диафрагмы конденсора должно находиться строго в центре отверстия закрытой до предела присовой диафрагмы объектива или то-

ческой диафрагмы устройства «Радуга-1» и быть по размеру меньше отверстия диафрагмы. Для лучшего наблюдения диафрагмы необходимо сфокусировать глазную линзу окуляра путем вращения ее оправы с нарезкой относительно корпуса окуляра. При правильной настройке освещения в выходном зрачке объектива должна наблюдаться картина, изображенная на рис. 12, а.

Чтобы настройка освещения не нарушалась в процессе работы, препарат не должен обладать клиновидностью, которая может образоваться при наличии резко отличных по размерам зерен исследуемого объекта или при неполном заполнении препарата жидкостью.

Если по каким-либо причинам не удастся избежать указанного дефекта препарата, то рекомендуется в процессе работы вращать не предметный столик микроскопа, а поляризатор. В этом случае препарат остается неподвижным по отношению к освещающему пучку лучей, и наличие клиновидности не сказывается на первоначальной настройке освещения.

Желательный размер зерен в препарате 0,1 мм и выше. При меньших размерах зерен эффект кольцевого экранирования слабо заметен.

## 2. Центральное экранирование (способ темного поля)

В отличие от способа кольцевого экранирования данный способ основан на наблюдении оптического эффекта, возникающего при экранировании лучей, прошедших через объект без преломления (рис. 15). Из рисунка видно, что в образовании изображения объекта в этом случае принимают участие лишь лучи, отклоненные краевыми частями зерен. Вследствие этого края зерна при различии в показателях преломления двух сред ярко освещены и резко выделяются на темном фоне поля зрения. При равенстве показателей преломления двух сред и освещении препарата монохроматическим светом изображение контуров кристалла исчезает. Если же препарат освещается белым светом, то, как и в случае кольцевого экранирования, на краях кристаллических зерен возникает цветной эффект (рис. 16). При этом наблюдаемые окраски являются дополнительными к той длине волны (практически узкой части спектра), для которой уравниваются показатели преломления двух сред. Таким образом, если цветной эффект кольцевого экранирования принять за позитив, то цветной эффект, наблюдаемый по способу темного поля, представляет собой негатив. В табл. 2 приведены окраски, наблюдаемые при равенстве показателей преломления двух сред в различных частях спектра.

Благодаря тому что цветной эффект наблюдается на тем-



ном фоне поля зрения, его контрастность чрезвычайно высока. Этот фактор позволяет наблюдать цветной эффект на более мелких объектах, чем способ кольцевого экранирования, а также на объектах, обладающих сравнительно интенсивной собственной окраской, исследование которых предыдущими способами затруднено. Точность измерений показателей преломления в монохроматическом свете  $\pm 0,0005$ , в белом  $\pm 0,001$ .

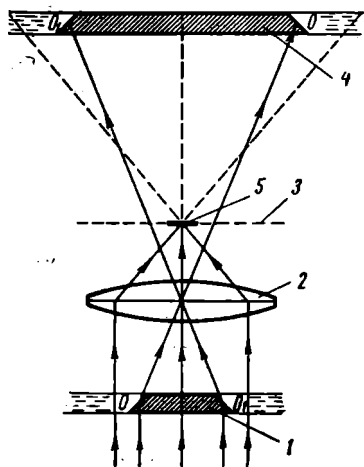


Рис. 15. Схема хода лучей в микроскопе при центральном экранировании: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — фокальная плоскость объектива; 4 — изображение объекта; 5 — экран

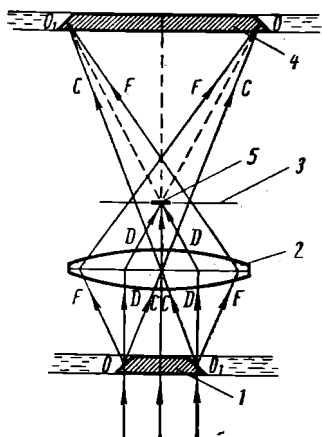


Рис. 16. Схема образования дисперсионного (цветного) эффекта при центральном экранировании: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — фокальная плоскость объектива; 4 — изображение объекта; 5 — экран

Таблица 2

Дисперсионные окраски «темного поля»

Спектральная область совпадения показателей преломления	Наблюдаемые окраски каемок	
	при наведении на фокус	при расфокусировке микроскопа
Красная	зеленовато-голубая разбавленная фиолетовая малиновая	зеленовато-голубая красная и сине-голубая оранжево-красная и сине-фиолетовая
Желтая		
Зеленая		
Голубая	разбавленная оранжево-красная	оранжевая и сине-фиолетовая
Синяя	разбавленная оранжевая бледно-желтая	желтая и фиолетовая бледно-желтая
Фиолетовая		

Способ может быть применен при работе с обычными объективами  $\times 8$  и  $\times 9$ , а также при работе с микрообъективом  $\times 9$ , снабженным ирисовой диафрагмой. В первом случае объективы применяются совместно с устройством «Радуга-1», а во втором — с конденсором фазово-контрастного устройства КФ-4 или КФ-5.

При работе с устройством «Радуга-1» для наблюдения эффекта темного поля применяется непрозрачный точечный экран, который при помощи револьверного диска устанавливается в выходном зрачке объектива. Объект освещается при помощи обычного конденсора, апертурная диафрагма которого затягивается до таких размеров, при которых ее изображение, наблюдаемое в выходном зрачке объектива, становится несколько меньше размеров экрана. После этого экран при помощи центрировочных винтов револьверного диска совмещается с изображением апертурной диафрагмы конденсора. При правильной настройке освещения в выходном зрачке объектива должна наблюдаться картина, изображенная на рис. 12, б.

При работе с конденсором фазово-контрастного устройства для наблюдения эффекта темного поля используется микрообъектив  $\times 9$  с ирисовой диафрагмой, при помощи которой экранируется изображение кольцевой диафрагмы упомянутого конденсора, возникающее в выходном зрачке объектива и наблюдаемое при помощи линзы Бертрана.

Центрировка изображения кольцевой диафрагмы конденсора по отношению к ирисовой диафрагме объектива осуществляется посредством центрировочных винтов револьверного диска конденсора. Из ряда кольцевых диафрагм, установленных в револьверном диске упомянутого конденсора, при работе с объективом  $\times 9$  используется диафрагма, предназначенная для работы с фазовым объективом  $\times 10$ .

Так же как в случае кольцевого экранирования, исследуемый препарат по возможности не должен иметь клиновидности. Предметные и покровные стекла препарата должны быть тщательно протерты и не иметь царапин, так как всякого рода загрязнения и неоднородности, которые не видны при наблюдениях в светлом поле, здесь выступают чрезвычайно отчетливо.

Размер зерен исследуемого вещества в препарате должен быть значительно меньше, чем при кольцевом экранировании. Оптимальный размер зерен 0,01—0,05 мм. При уменьшении размеров зерен ослабляется яркость цветного эффекта, а при увеличении происходит расчленение однородных окрасок на двухцветные, вследствие того, что отдельные участки кристаллов оказываются за пределами плоскости установки микроскопа.

### 3. Одностороннее экранирование

Способ основан на наблюдении оптического эффекта, возникающего в препарате при частичном экранировании лучей, преломленных объектом. Такое экранирование, как это показано на рис. 17, в случае различия показателей преломления двух сред приводит к неравномерному распределению

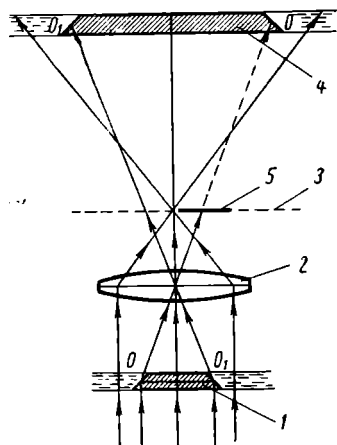


Рис. 17. Схема хода лучей в микроскопе при одностороннем экранировании: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — фокальная плоскость объектива; 4 — изображение объекта; 5 — экран

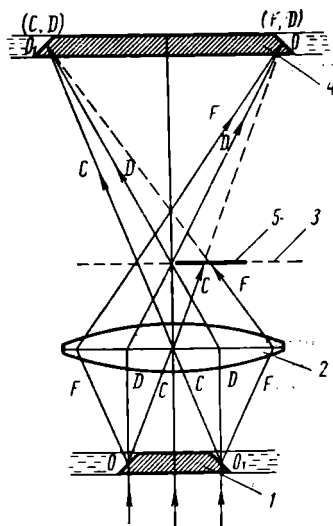


Рис. 18. Схема образования дисперсионного (цветного) эффекта при одностороннем экранировании: 1 — объект; 2 — объектив; 3 — фокальная плоскость объектива; 4 — изображение объекта; 5 — экран

света в изображении объекта. Последнее выражается в том, что одна из сторон кристалла оказывается освещенной значительно ярче другой (см. рис. 17). Из приведенного рисунка нетрудно видеть, что это явление происходит по той причине, что при указанном на рис. 17 расположении экрана последним задерживаются лишь лучи, отклоненные объектом в одном направлении по отношению к оптической оси микроскопа, а именно в направлении движения часовой стрелки. Если показатель преломления кристалла больше, чем жидкости, то в указанном направлении будут отклонены лучи, преломленные левым краем кристалла, а при обратном соотношении показателей преломления тех же сред — правым краем кристалла.

Таким образом, эффект одностороннего экранирования не только позволяет установить различие в показателях преломления двух сред, но и определить характер этого различия. При равенстве показателей преломления в монохроматическом свете эффект неравномерного распределения света не возникает, и изображение кристалла становится невидимым на фоне окружающей его среды. При освещении препарата белым светом в том же случае возникает цветной эффект (рис. 18). Он выражается в появлении на противоположных сторонах изображения кристалла различных окрасок, например, оранжевой и синевато-голубой.

Характер наблюдаемых окрасок (табл. 3) зависит от того, в какой части спектра уравниваются показатели преломления той и другой среды, а также от положения экрана в выходном зрачке объектива.

Таблица 3

Дисперсионные окраски одностороннего экранирования

Спектральная область совпадения показателей преломления	Наблюдаемые окраски	
	серое поле (1-е положение экрана)	темное поле (2-е положение экрана)
Красная	темно-красная и бледно-зелено-голубая	зелено-голубая темная
Желтая	красная и зеленая	красная и голубовато-зеленая
Зеленая	оранжевая и синевато-голубая	оранжево-красная и синевато-голубая
Голубая	канареечно-желтая и синяя	оранжевая и сине-фиолетовая
Синяя	желтая и сине-фиолетовая	желтая и фиолетовая
Фиолетовая	бледно-желтая и темно-фиолетовая	бледно-желтая темная

Первая группа соответствует положению экрана, при котором лучи, прошедшие через препарат без отклонения, не задерживаются экраном (серое поле). Вторая группа окрасок наблюдается в момент экранирования прямого света (темное поле). В последнем случае с одной стороны кристалла наблюдается окраска, образованная лучами с длинами волн, для которых показатель преломления кристалла больше, а с другой — меньше, чем показатель жидкости. В светлом поле к каждой из этих окрасок примешивается окраска, соответствующая длине волны, дающей совпадение показателей преломления.

Описанные окраски отчетливо наблюдаются не только на краях кристалла, но и на участках, удаленных от краев, т. е. носят более или менее площадной характер.

Способ одностороннего экранирования более чувствителен, чем предыдущие способы.

Для наблюдения эффекта одностороннего экранирования применяют обычные объективы  $\times 8$  и  $\times 9$ , дополненные устройством «Радуга-1», а также объективы  $\times 9$ , снабженные ирисовой диафрагмой.

При работе с устройством «Радуга-1» для наблюдения эффекта одностороннего экранирования используется оправа свободного отверстия револьверного диска, при помощи которой экранируется изображение апертурной диафрагмы конденсора. При использовании объектива с ирисовой диафрагмой параллельный пучок лучей от осветителя направляется под небольшим углом к оптической оси объектива. При работе с микроскопом МИН-8 это достигается путем изменения положения преломляющей призмы, находящейся в осветительной системе микроскопа, с помощью центрировочных винтов, расположенных в передней части осветительной подставки микроскопа. При правильной установке освещения изображение полевой диафрагмы осветителя должно находиться на периферии выходного зрачка объектива.

Эффект одностороннего экранирования наблюдается в момент, когда при закрывании ирисовой диафрагмы объектива последняя экранирует все или большую часть изображения полевой диафрагмы микроскопа (см. рис. 12, в).

Требования к препарату те же, что и при кольцевом экранировании. Заметим лишь, что эффект одностороннего экранирования лучше всего наблюдается на слабо наклонных поверхностях зерен.

### СПОСОБ ФАЗОВОГО КОНТРАСТА

Описываемый способ сравнения показателей преломления двух сред основан на искусственном вмешательстве в фазовые соотношения лучей, участвующих в образовании изображения бесцветных прозрачных объектов.

Исследуя фазовые соотношения упомянутых лучей, голландский физик Цернике обнаружил, что в случае незначительного различия показателей преломления прозрачного объекта и окружающей его среды фаза колебания света, дифрагированного (отклоненного) объектом, отличается приблизительно на  $\pm\pi/2$  от фазы колебания света, прошедшего через объект без отклонения (рис. 19). Цернике также показал, что если в рассматриваемом случае изменить фазу колебания прямого света на  $\pm\pi/2$ , то в зависимости от знака вводимого фазового сдвига и соотношения показателей пре-

ломления двух сред изображение объекта будет казаться светлее или темнее фона поля зрения (рис. 20). Для того чтобы осуществить фазовый сдвиг прямого света, на его путь устанавливается специальная фазовая пластинка.

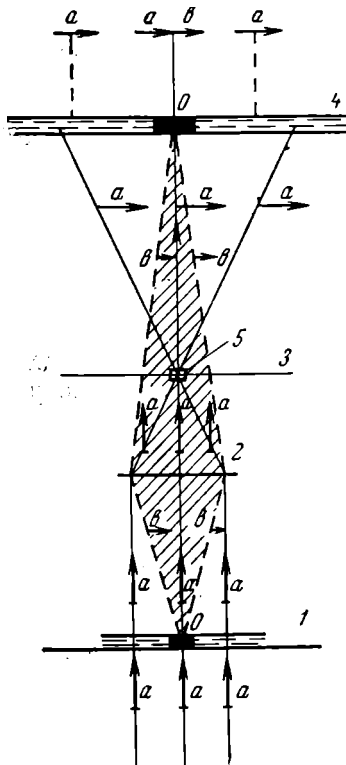


Рис. 19. Схема образования эффекта фазового контраста

для настройки освещения на микроскопах, не имеющих линзы Бертрана.

Для наблюдения фазового контраста поступают следующим образом:

а) на место обычных объектива и конденсора микроскопа МИН-8 устанавливают фазовый объектив и конденсор с кольцевыми диафрагмами;

б) при нулевом положении револьверного диска конденсора, перемещая конденсор по высоте, добиваются резкого изображения полевой диафрагмы осветителя в поле зрения микроскопа;

Результаты, получаемые при наблюдении с фазовым контрастом, отображены в табл. 4.

Если препарат освещают монохроматическим светом, то при равенстве показателей преломления двух сред, эффект фазового контраста не возникает и изображение объекта становится невидимым. В белом свете в том же случае в препарате возникает цветной эффект (табл. 5).

Чувствительность метода в монохроматическом свете  $\pm 0,0001-0,0002$ , в белом свете  $\pm 0,001-0,002$ .

Для практического применения метода фазового контраста отечественной промышленностью выпускаются фазово-контрастные устройства КФ-4 (рис. 21) и КФ-5, рассчитанные на позитивный фазовый контраст. Они могут быть применены на микроскопах МИН-8 и МПД.

В комплект фазово-контрастного устройства входит конденсор с набором кольцевых диафрагм, набор специальных фазовых объективов ( $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 40$ ,  $\times 90$ ) и вспомогательный микроскоп МИР-1, предназначенный

## Эффект фазового контраста в монохроматическом свете

Соотношение показателей преломления двух сред	Отрицательный (негативный) фазовый контраст	Положительный (позитивный) фазовый контраст
$n_k > n_{ж}$	кристалл светлее, а окружающий его ореол темнее фона поля зрения	кристалл темнее, а ореол светлее фона поля зрения (рис. 20, б)
$n_k < n_{ж}$	кристалл темнее, а окружающий его ореол светлее фона поля зрения	кристалл светлее, а ореол темнее фона поля зрения (рис. 20, а)

в) в ход лучей конденсора включают кольцевую диафрагму, соответствующую увеличению применяемого объектива;

г) установив на место окуляра микроскопа вспомогательный микроскоп МИР-1 или включив линзу Бертрана с по-

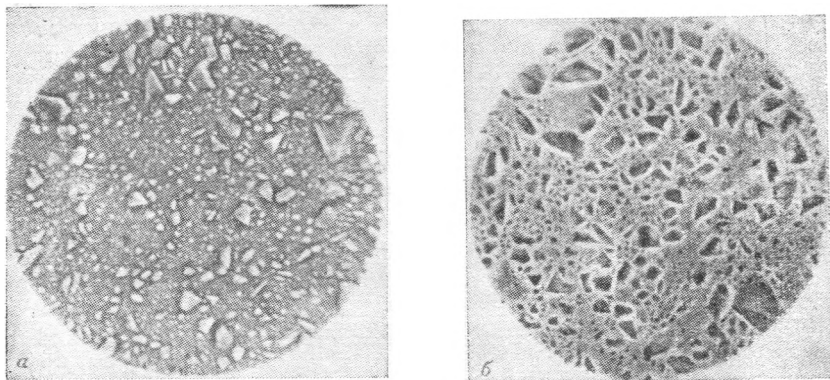


Рис. 20. Эффект позитивного фазового контраста в монохроматическом свете: а —  $n_k < n_{ж}$ ; б —  $n_k > n_{ж}$

мощью центрировочных винтов конденсора центрируют наблюдаемое в выходном зрачке объектива изображение кольцевой диафрагмы по отношению к фазовому кольцу объектива. Правильной настройкой считается такая, при которой изображение кольцевой диафрагмы точно совмещается с фазовым кольцом объектива;

д) установив на место окуляра или включив линзу Бертрана, переходят к наблюдению объекта.

Приготовленный препарат должен быть прежде всего достаточно тонким и свободным от посторонних примесей. Предметные и покровные стекла должны быть особенно тщательно протерты.

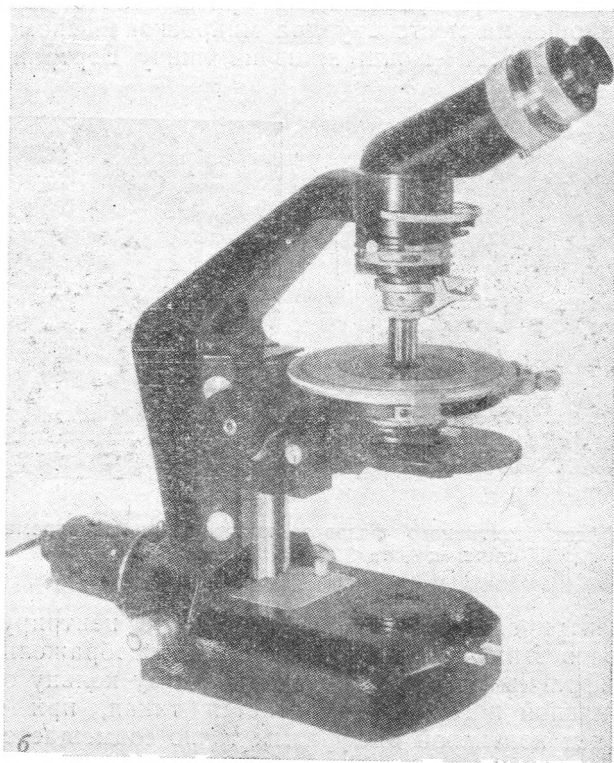


Рис. 21. Фазово-контрастное устройство КФ-4 (а); то же устройство на микроскопе МИН-8 (б)



## Дисперсионные окраски фазового контраста

Спектральная область совпадения показателей преломления	Наблюдаемые окраски	
	на зерне	вокруг зерна (ореол)
Красная	бледно-зелено-голубая	темно-красная
Желтая	зелено-голубая	красная
Желто-зеленая	голубая	оранжево-красная
Зеленая	голубовато-синяя	оранжевая
Голубая	сине-фиолетовая	канареечно-желтая
Синяя	фиолетовая	желтая
Фиолетовая	темно-фиолетовая	бледно-желтая

Оптимальный размер зерен в препарате при употреблении объектива  $\times 40$  0,008—0,012 мм, а при объективе  $\times 90$  — 0,004—0,006 мм.

Среди рассмотренных способов сравнения показателей преломления двух сред ни один не является универсальным. Рациональность выбора для работы того или иного способа определяется характером исследуемого материала. При исследованиях крупно- и среднезернистых препаратов, приготовленных из бесцветных минералов изверженных горных пород, удобнее пользоваться кольцевым и односторонним экранированием, а также методом Бекке.

При исследовании мелко- и тонкозернистых препаратов, например, приготовленных из известняков, песчаников, эффузивных образований, а также в случае окрашенных минералов следует применять центральное экранирование (метод темного поля). Для исследования особо тонкодисперсных объектов, например, глинистых образований, илов, тонких химических осадков, используют метод фазового контраста.

При работе с окрашенными объектами, при использовании сплавов, а также высокопреломляющих жидкостей следует пользоваться методом Бекке.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
МИНЕРАЛОВ

Согласно особенностям распространения света в кристаллах, последние подразделяются в кристаллооптике на оптически изотропные и оптически анизотропные. У изотропных кристаллов показатель преломления не зависит от направления распространения света в кристалле и направления колебаний электрического вектора. Оптическая индикатриса таких кристаллов имеет форму шара. Отсюда следует, что изотропные кристаллы могут быть охарактеризованы одним показателем преломления, который можно определить в любом сечении индикатрисы (т. е. в любом зерне).

Показатель преломления анизотропных кристаллов изменяется в определенных, характерных для каждого минерала пределах, в зависимости от направления распространения света в таких кристаллах и направления колебаний электрического вектора.

Анизотропные кристаллы подразделяются на оптически одноосные и двуосные. Оптическая индикатриса одноосных кристаллов представляет собой эллипсоид вращения с двумя главными осями, одна из которых пропорциональна минимальному, а другая — максимальному показателям преломления кристалла. Эти показатели преломления называются главными и обозначаются соответственно  $n_p$  и  $n_g$ . Один из главных показателей преломления, который может быть как минимальным ( $n_p$ ), так и максимальным ( $n_g$ ) называется обыкновенным и обозначается  $n_o$  (ординарный). Его величина не зависит от направления распространения света в кристалле и, следовательно, он может быть измерен в любом сечении индикатрисы, которое в общем случае представляет собой эллипс, одна из полуосей которого пропорциональна по величине обыкновенному показателю преломления. Другой главный показатель преломления одноосных кристаллов, называемый необыкновенным ( $n_e$  — экстраординарный), в за-

висимости от направления распространения световых колебаний может принимать все значения ( $n_e'$ ) от  $n_o$  до  $n_e$ . Поэтому главное значение необыкновенного показателя преломления может быть определено только в сечениях индикатрисы, плоскостью параллельной оси вращения эллипсоида (оптической оси). Оптическая индикатриса двuosных кристаллов представляет собой эллипсоид с тремя взаимно перпендикулярными главными осями, пропорциональными трем главным показателям преломления, один из которых минимальный, второй — максимальный, а третий имеет промежуточное значение между двумя первыми. Указанные показатели преломления обозначаются соответственно  $n_p$ ,  $n_g$ ,  $n_m$ . Главные показатели преломления двuosных кристаллов могут быть определены только в частных сечениях индикатрисы. Такими сечениями могут быть сечения: 1) параллельные главным плоскостям ( $NgNp$ ,  $NpNm$ ,  $NgNm$ ), 2) параллельные главным осям ( $Ng$ ,  $Np$ ,  $Nm$ ) индикатрисы и 3) сечение, нормальное к любой из двух оптических осей индикатрисы. Во всех других эллиптических сечениях индикатрисы показатели преломления кристалла имеют промежуточные между  $n_p$  и  $n_g$  значения, обозначаемые  $n_p'$  и  $n_g'$ .

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ИЗОТРОПНЫХ МИНЕРАЛОВ

Согласно сказанному выше, для определения показателя преломления изотропного минерала теоретически достаточно одного зерна этого минерала. Однако для удобства работы и большей уверенности в результатах определения рекомендуется готовить препарат с 5—6 зернами исследуемого минерала.

При определении показателя преломления изотропного минерала с помощью подвижной полоски Бекке в общем случае поступают следующим образом. Устанавливают иммерсионный препарат под микроскопом и, перемещая по высоте с помощью микрометричного винта тубус микроскопа, наблюдают за направлением перемещения полоски Бекке. Определив при помощи последней, какая из двух сред имеет больший показатель преломления, производят смену жидкости<sup>1</sup> в препарате в направлении сближения показателей преломления минерала и жидкости.

Если наблюдение ведут в монохроматическом свете с длиной волны  $\lambda$  на света ( $\lambda = 589 \text{ нм}$ ), то по мере сближения показателей преломления яркость световой полоски и контрастность изображения зерен уменьшаются. При достижении

---

<sup>1</sup> При достаточном количестве исследуемого материала удобнее приготовить новый препарат.

равенства показателей преломления двух сред полоска Бекке исчезает, а зерна едва заметны на фоне поля зрения или сливаются полностью с ним, как бы «растворяясь». В этом случае показатель преломления кристалла принимают равным показателю преломления  $n$  той жидкости, в которой наблюдают указанный эффект.

Однако чаще всего не удается добиться полного исчезновения полоски Бекке ввиду того, что применяемые для приготовления препаратов наборы иммерсионных жидкостей не образуют непрерывного ряда значений показателей преломления.

В этом случае искомый показатель преломления находят как среднее арифметическое значение из значений показателей преломления двух соседних жидкостей набора, показатель преломления одной из которых больше, а другой меньше, чем показатель испытываемого зерна минерала:

$$n_m = \frac{n_1 + n_2}{2},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления жидкостей.

Например, если в жидкости с  $n_D = 1,500$  световая полоска при опускании столика микроскопа перемещается от краев зерна минерала к его центру, а в жидкости с  $n_D = 1,504$  — в обратном направлении, то, согласно сказанному,  $n_D$  минерала будет равен

$$\frac{1,500 + 1,504}{2} = 1,502.$$

Точность измерений описанным способом, при интервале между значениями показателей преломления соседних жидкостей набора, не превышающем 0,006, составляет  $\pm 0,001$ .

Если наблюдение иммерсионного препарата ведут в белом свете, то по мере сближения показателей преломления двух сред отмечают тот же эффект, что и в монохроматическом свете. При достижении равенства показателей преломления кристалла и жидкости полоска Бекке не исчезает, а вместо одной бесцветной полоски возникают две окрашенные, перемещающиеся в противоположные стороны при дефокусировке микроскопа. Если наблюдаемые окраски выражены относительно четко, что обычно имеет место при работе с жидкостями со средним и высоким светопреломлением, с их помощью устанавливают участок спектра, в котором указанное равенство достигнуто (см. табл. 1).

Если наблюдаемые окраски указывают на совпадение показателей преломления двух сред в желтой ( $D$ ) части спектра, то искомый показатель преломления ( $n_D$ ) минерала:

определяется непосредственно значением показателя преломления ( $n_D$ ) взятой жидкости.

При совпадении показателей преломления в любой другой части спектра, отличной от желтой, значение  $n_D$  кристалла находят путем внесения соответствующих поправок на дисперсию кристалла и взятой жидкости.

Значения показателей преломления применяемых иммерсионных жидкостей для различных участков спектра обычно известны. В частности, они прилагаются к стандартному набору иммерсионных жидкостей в виде таблицы (см. приложение 2), показывающей величины разностей показателей преломления жидкостей для различных длин волн света от значений показателей преломления тех же жидкостей для желтой части спектра ( $\lambda = 589 \text{ нм}$ ).

Располагая этими данными и определив при помощи наблюдаемого дисперсионного эффекта участок спектра, в котором уравниваются показатели преломления двух сред, находят значение показателя преломления минерала для этого участка спектра. Например, в жидкости, показатель преломления которой в желтой части спектра ( $n_D$ ) равен 1,540, на зернах минерала наблюдают голубую и оранжевую полосы Бекке, перемещающиеся при дефокусировке микроскопа в противоположные стороны. Это наблюдение указывает на то, что показатели преломления минерала и жидкости совпадают в зеленой части спектра. Известно, что показатель преломления данной жидкости в зеленой части спектра (для  $\lambda = 527 \text{ нм}$ ) равен  $1,540 + 0,004$ . Следовательно, и минерал в данной части спектра имеет тот же показатель преломления. Для того чтобы из значения показателя преломления минерала, измеренного для какого-либо участка спектра, найти значение такового для желтой части спектра, необходимо ввести соответствующую поправку на дисперсию показателя преломления минерала. Эмпирически установлено, что в большинстве случаев величины дисперсии показателей преломления минералов приблизительно в два раза меньше тех же величин для жидкостей. Таким образом, для того чтобы от значений показателей преломления минерала, полученных для участков спектра, отличных от желтого, перейти к значению, отвечающему желтой части спектра ( $n_D$ ), необходимо из упомянутых значений вычесть половину поправки на дисперсию светопреломления жидкости для соответствующих участков спектра:

$$n_D = n_{\text{ж}} - \frac{\Delta\lambda}{2}.$$

В рассмотренном случае найдено, что показатель преломления минерала в зеленой части спектра равен 1,544, при

этом поправка на дисперсию показателя преломления жидкости для этой части спектра составляла  $+0,004$ . Отсюда согласно сказанному  $n_D$  минерала равен

$$1,544 - \frac{0,004}{2} = 1,542.$$

Иначе говоря, для того чтобы на основе дисперсионного эффекта, отвечающего совпадению показателей преломления двух сред в любой части спектра, отличной от желтой, определить значение показателя преломления, отвечающее последней, необходимо к значению  $n_D$  взятой жидкости прибавить половину соответствующей поправки на ее дисперсию.

Описанный способ введения дисперсионных поправок не во всех случаях достаточно надежен, поэтому для получения гарантированных результатов поправку на дисперсию светопреломления минерала определяют опытным путем.

Для этого устанавливают участки спектра, в которых уравниваются показатели преломления минерала и близких к нему по показателю преломления жидкостей, и определяют значения показателей преломления минерала для этих участков. Затем разность полученных значений для минерала сравнивают с разностью показателей преломления жидкостей для тех же участков спектра. Полученное при этом отношение определит отношение величин дисперсии двух сред. Допустим, что в жидкостях с  $n_D=1,600$  и  $n_D=1,603$  совпадение показателей преломления минерала и жидкости происходит соответственно в голубой и зеленой частях спектра, а поправка на дисперсию жидкости для этих частей спектра равны  $+0,008$  и  $+0,004$ . Отсюда показатель преломления минерала в голубой части спектра равен  $1,600+0,008=1,608$ , а в зеленой —  $1,603+0,004=1,607$ . Величина, на которую изменяется показатель преломления минерала в данном спектральном интервале, равна  $1,608-1,607=0,001$ . Та же величина для жидкости равна  $0,008-0,004=0,004$ . Следовательно, дисперсия минерала в 4 раза меньше, чем дисперсия жидкости.

Пользуясь экспериментально найденным соотношением дисперсий двух сред, можно избежать ошибок измерений, связанных с введением поправок на дисперсию минерала. При использовании дисперсионных поправок точность измерений составляет  $0,001-0,002$ , если для получения численного значения показателя преломления используют окраски, отвечающие совпадению показателей преломления в средней части спектра (желтой, желто-зеленой, зеленой).

Указанная выше точность измерения повышается до  $\pm 0,0005$ , если для уточнения спектральной области совпадения показателей преломления двух сред используют монохроматический свет. При этом поступают следующим образом. Вы-

бирают в препарате зерно минерала, для которого намерены уточнить точку пересечения кривых дисперсий двух сред, и освещают препарат монохроматическим светом той области спектра, в которой согласно наблюдаемому дисперсионному эффекту уравниваются показатели преломления минерала и жидкости. Плавно изменяя длину волны света в пределах этой спектральной области, отмечают ту длину волны (или узкий диапазон длин волн), при которой световая полоска Бекке исчезает и зерно «растворяется» на фоне поля зрения микроскопа. Этот способ может быть реализован при помощи поворотного фильтрового интерференционного монохроматора (см. рис. 4).

В тех случаях, когда дисперсионный эффект выражен слабо и с его помощью трудно точно установить спектральную область совпадения показателей преломления двух сред, пользуются эффектом относительной скорости перемещения цветных полос при расфокусировке микроскопа. При этом, если обе цветные полосы смещаются при расфокусировке в противоположные стороны с одинаковой скоростью относительно границы раздела двух сред, считают, что показатели преломления двух сред равны в средней части спектра. Точность определения показателя преломления этим способом несколько меньше, чем при предыдущих. Выше было отмечено, что при помощи окрашенных полосок Бекке не всегда удается с достаточной точностью установить спектральную область совпадения показателей преломления двух сред. Этот недостаток устраняют способы «фокального экранирования», при которых возникает исключительно четкий дисперсионный цветной эффект. Причем для его наблюдения не требуется дефокусировка микроскопа. В связи с этим упомянутый метод при работе в белом свете оказывается более эффективным, чем метод Бекке.

Ниже в качестве примера дается ход определения показателя преломления изотропного минерала с применением способа кольцевого экранирования.

Иммерсионный препарат устанавливают под микроскопом, объектив которого снабжен ирисовой диафрагмой или устройством «Радуга-1», и фокусируют, добиваясь резкости изображения. После этого вводят в тубус микроскопа линзу Бертрана и производят настройку освещения, как это необходимо для наблюдения эффекта кольцевого экранирования. По окончании настройки выключают линзу Бертрана и переходят к наблюдению препарата.

Если на краях зерен минерала наблюдают резкую черную кайму, это указывает на то, что показатель преломления минерала значительно больше или меньше показателя преломления взятой жидкости. Для того чтобы в этом случае установить, в каком порядке (в сторону повышения или пони-

жения показателя преломления) следует производить смену жидкости, переходят к наблюдению за поведением подвижной полоски Бекке. Установив при помощи последней соотношение показателей преломления двух сред, готовят новый препарат или меняют жидкости в прежнем препарате, так чтобы новая жидкость отличалась по величине показателя преломления от первой примерно на 0,050 и снова производят наблюдения по способу кольцевого экранирования. Так поступая до появления на краях зерен цветной каймы, которая свидетельствует о совпадении показателей преломления минерала и жидкости, а цвет каймы непосредственно указывает участок спектра, в котором осуществляется совпадение. Например, появление на краях зерен каймы зеленого цвета указывает на совпадение показателей преломления двух сред в зеленой части спектра и т. д.

Для получения точных результатов измерений рекомендуется подбирать жидкость таким образом, чтобы наблюдаемые окраски каемок не выходили за пределы окрасок, принадлежащих средней части спектра (желтой, желто-зеленой, зеленой). Эти окраски называют фиксирующими. Окраски, отвечающие совпадению показателей преломления двух сред в крайних частях видимой области спектра (синие, красные, фиолетовые), называют ориентирующими или наводящими. Их используют главным образом для быстрого подбора подходящих для измерений иммерсионных жидкостей, так как они позволяют примерно оценить, насколько показатели преломления минерала и жидкости отличаются между собой в желтой части спектра.

Например, если в жидкости с  $n_D = 1,600$  на краях зерен исследуемого минерала наблюдают фиолетовые или темно-красные (красновато-коричневые) окраски, это указывает на то, что в первом случае  $n_D$  минерала примерно на 0,025—0,030 больше, а во втором случае на такую же величину меньше, чем  $n_D$  жидкости. Наблюдение синих или красных окрасок каемок в той же жидкости свидетельствует о том, что разница в показателях преломления двух сред для желтой части спектра составляет величину порядка  $\pm 0,015$ . Чем выше показатель преломления иммерсионной жидкости, в которой наблюдают ориентирующий эффект, тем больше различие показателей преломления двух сред, и наоборот. Это обстоятельство надо учитывать при использовании ориентирующих окрасок для подбора жидкостей для измерений. При появлении на зернах препарата одной из фиксирующих окрасок определяют  $n_D$  минерала, как это было описано выше. Если для уточнения наблюдаемых при кольцевом экранировании окрасок используют монохроматор, то для определения  $n_D$  минерала могут быть использованы также и окраски, отвечающие крайним частям спектра (ориентирующие окрас-



ки), и тем самым дополнительно сокращено время на подбор иммерсионной жидкости.

Ход измерений показателя преломления изотропного минерала при помощи методов темного поля, фазового контраста и косоого освещения принципиально не отличается от описанного для кольцевого экранирования. Различие состоит лишь в том, что наблюдаемый при этих способах сравнения дисперсионный эффект не прямо, а косвенно выражает спектральную область совпадения показателей преломления двух сред. Кроме того, упомянутые способы позволяют сравнивать показатели преломления до достижения цветного эффекта и, следовательно, при них отпадает необходимость прибегать в процессе измерений к способу Бекке.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МИНЕРАЛОВ

### 1. Одноосные кристаллы

Определение показателя преломления оптически одноосных кристаллов по сравнению с определением показателя преломления изотропных кристаллов представляет более сложную задачу. Это связано с тем, что в общем случае каждому направлению распространения света в таких кристаллах отвечают два показателя преломления. Причем один из показателей преломления, а именно необыкновенный ( $n_e$ ) — величина переменная. В зависимости от направления распространения световой волны он может принимать все значения между численной величиной постоянного показателя преломления, называемого обыкновенным ( $n_o$ ), и некоторой характерной для данного кристалла величиной, большей или меньшей, чем первая. Обыкновенный показатель преломления и экстремальное значение необыкновенного называются главными и представляют собой максимальный ( $n_g$ ) и минимальный ( $n_p$ ) показатели преломления. Обыкновенный показатель преломления, который в нашем случае удобнее называть постоянным, может быть измерен в любом сечении оптической индикатрисы, представляющем в общем случае эллипс, в то время как экстремальное значение необыкновенного, который удобнее называть переменным, может быть получено только в сечениях индикатрисы, плоскостью параллельной оптической оси, т. е. в частных сечениях. Для того чтобы присутствие последних, а вместе с тем и возможность определения обоих главных показателей преломления в данном иммерсионном препарате была вероятной, необходимо иметь в препарате достаточное число зерен анализируемого минерала. В частности, для минералов со средней величиной двупреломления ( $n_g - n_p$ ) это число должно составлять

10—15, а с высоким двупреломлением — порядка 25—30 зерен. При очень высоком двупреломлении, каким обладают, например, карбонаты, число зерен в препарате увеличивают до 100. Для нахождения в препарате зерен, оптическая ориентировка которых позволяет определить оба главных показателя преломления, применяют различные способы. Один из них состоит в использовании интерференционного эффекта, наблюдаемого на зернах препарата при скрещенных николях. При этом способе для определения выбирают зерна, показывающие наиболее высокую интерференционную окраску, т. е. обладающие максимальным двупреломлением. Однако вследствие различной толщины зерен в иммерсионном препарате наивысшие окраски могут наблюдаться на зернах, представляющих сечения индикатрисы с промежуточными значениями двупреломления ( $n_o - n_e'$ ). Таким образом, в рассматриваемом случае интерференционная окраска — недостаточно надежный признак для нахождения оптически ориентированных сечений.

Другой способ выбора зерен основан на использовании дисперсионного эффекта. При этом способе в препарате выбирают те зерна, значение необыкновенного показателя преломления которых характеризуется наиболее низкой, из наблюдаемых, дисперсионной окраской, если указанный показатель преломления меньше обыкновенного, и наоборот наиболее высокой, если тот же показатель преломления больше обыкновенного. Повышением дисперсионной окраски считается смещение точки пересечения кривых дисперсий двух сред в направлении от длинноволновой части спектра к коротковолновой.

Этот способ особенно выгодно применять при сравнении показателей преломления двух сред методами «фокального экранирования», позволяющими наблюдать интенсивные дисперсионные окраски. Так как в отличие от интерференционных дисперсионные окраски не зависят от толщины, последний способ более эффективен.

Однако ни тот, ни другой из описанных способов не являются абсолютными, поэтому выбираемые с их помощью зерна рекомендуется подвергать проверке коноскопическим методом, позволяющим получать однозначный ответ на вопрос об оптической ориентировке выбранных сечений. Так, если при коноскопическом исследовании последних наблюдают фигуру в виде широкого размытого креста, быстро расходящегося при повороте столика микроскопа, то это свидетельствует о том, что анализируемое зерно представляет сечение индикатрисы, параллельное оптической оси и, следовательно, в данном сечении могут быть измерены оба главных показателя преломления. Если измерения проводят при помощи полоски Бекке, то в этом случае поступают следующим об-

разом. Устанавливают анализируемое зерно сначала в одно, а затем в другое положение погасания и при выключенном анализаторе наблюдают за характером перемещения полоски Бекке в каждом из указанных положений зерна. По результатам наблюдений судят о соотношении того и другого показателей преломления зерна и взятой жидкости.

Численные значения указанных показателей преломления зерна определяют, подбирая соответствующим образом жидкости и пользуясь приемами, описанными в предыдущем разделе.

При определении главных показателей преломления рассматриваемых минералов при помощи дисперсионного эффекта метода фокального экранирования ход определений отличается от описанного выше. Ниже в качестве примера приводится ход определения главных показателей преломления одноосных минералов при помощи эффекта кольцевого экранирования.

Приготовив иммерсионный препарат с той или иной жидкостью, устанавливают его под микроскопом, предварительно настроенным для наблюдения эффекта кольцевого экранирования. Если при этом ни на одном из зерен препарата в процессе вращения столика микроскопа или поляризатора не наблюдают появления цветного эффекта, производят смену жидкости. При появлении на зернах препарата цветного эффекта определяют, является ли он ориентирующим или фиксирующим. Если на всех без исключения зернах препарата наблюдаются ориентирующие окраски (красных, синих и фиолетовых тонов), то это указывает на то, что минимальный и максимальный показатели преломления зерен минерала в препарате значительно отличаются по величине от показателя преломления взятой жидкости. В частности, если оба указанных показателя преломления больше, чем таковой жидкости, на всех зернах препарата наблюдают окраски сине-фиолетовых тонов. При обратном соотношении показателей преломления зерен минерала и жидкости на зернах минерала наблюдают красновато-коричневатые окраски. Добившись появления указанных окрасок и примерно оценив на их основе разность показателей преломления двух сред, меняют жидкости в препарате. Так поступают до появления на зернах препарата фиксирующих окрасок (желтых, желто-зеленых, зеленых). При этом могут иметь место следующие случаи.

1. На всех зернах препарата наблюдаются только фиксирующие окраски.

В этом случае, возможном лишь при малом двупреломлении минерала, в данном препарате могут быть определены минимальный и максимальный показатели преломления. Первый, по наиболее низкой, а второй по наиболее высокой

из всех окрасок, наблюдаемых на различных зернах препарата при вращении предметного столика или поляризованных микроскопа.

2. Помимо фиксирующих окрасок на части зерен препарата наблюдают ориентирующие окраски, выраженные синефиолетовыми тонами.

В таком препарате определяют только минимальный показатель преломления. При этом руководствуются наиболее низкой фиксирующей окраской из числа наблюдаемых. Для определения максимального значения меняют в препарате жидкость в направлении повышения ее показателя преломления, добиваясь наблюдения эффекта, описанного в пункте 3.

3. Помимо фиксирующих окрасок на части зерен наблюдают ориентирующие окраски красноватых тонов.

В этом случае в препарате определяется лишь максимальный показатель преломления. Для определения минимального значения меняют жидкость в препарате в направлении понижения показателя преломления до достижения эффекта, описанного в пункте 2.

4. Наряду с фиксирующими окрасками в препарате наблюдают ориентирующие окраски синефиолетовых и красных тонов.

В последнем случае не могут быть определены ни минимальный, ни максимальный показатели преломления. При этом необходимо приготовить новые препараты и добиться поочередно наблюдения эффектов, описанных в пунктах 2 и 3.

Резюмируя сказанное, можно сформулировать следующие правила для определения минимального и максимального значений показателей преломления одноосных минералов на основе дисперсионного эффекта кольцевого экранирования. Минимальный показатель преломления определяют по наиболее низкой, а максимальный — по наиболее высокой окраскам, наблюдаемым на зернах препарата, причем обе окраски должны быть фиксирующими. Последнее в большинстве случаев достигают в препаратах, приготовленных с жидкостями различных показателей преломления, в одном из которых определяют минимальный, а в другом — максимальный показатели преломления. На основе дисперсионных окрасок устанавливают также, какой из измеренных показателей (максимальный или минимальный) является обыкновенным. Например, если дисперсионная окраска, отвечающая максимальному показателю преломления  $n_g$ , появляется на всех произвольно выбранных зернах препарата при вращении поляризатора или столика микроскопа, то, следовательно, последний является обыкновенным и наоборот, если описанный эффект наблюдается для окраски, определяющей минимальный показатель преломления  $n_p$ , то он — обыкновенный.

Зерна, на которых определяется главное значение необык-

новенного показателя преломления, рекомендуется подвергать коноскопической проверке.

## 2. Двуосные кристаллы

Оптическая индикатриса двуосных кристаллов представляет собой эллипсоид с тремя взаимно перпендикулярными полуосями, каждая из которых пропорциональна по величине показателю преломления световой волны, совершающей колебания вдоль этих полуосей. Отвечающие указанным полуосям показатели преломления называются главными. Один из них является максимальным ( $n_g$ ), другой — минимальным ( $n_p$ ), а третий имеет промежуточное значение между двумя первыми и называется средним ( $n_m$ ).

Как и в случае одноосных кристаллов каждому направлению световой волны здесь отвечают два показателя преломления (за исключением направлений, совпадающих с направлениями оптических осей), но в отличие от первых в данном случае оба показателя преломления являются необыкновенными. В зависимости от направления распространения световой волны в кристалле один из них может принимать все значения от  $n_g$  до  $n_m$ , а другой от  $n_p$  до  $n_m$ . Эти промежуточные значения обозначаются соответственно  $n_g'$  и  $n_p'$ . Таким образом, главные показатели преломления двуосных кристаллов могут быть определены только в частных, оптически ориентированных сечениях.

Таковыми сечениями являются сечения, параллельные главным плоскостям ( $NgNp$ ,  $NgNm$ ,  $NmNp$ ) или главным осям ( $Ng$ ,  $Np$ ,  $Nm$ ) оптической индикатрисы, а также сечение, нормальное к любой из двух оптических осей ( $NmNm$ ) двуосного кристалла (см. приложение 5).

Из этого следует, что, как и в случае одноосных минералов, для определения главных показателей преломления двуосных кристаллов необходимо иметь в иммерсионном препарате достаточное число зерен анализируемого минерала. Нахождение в препарате зерен, представляющих оптически ориентированные сечения, осуществляется теми же способами, что и в случае одноосных минералов. В частности, разрезы (сечения), параллельные плоскости  $NgNp$ , находят по наивысшей интерференционной окраске (с учетом толщины зерен), наблюдаемой в скрещенных николях, а разрезы, нормальные к оптической оси ( $NmNm$ ) — по отсутствию на таких разрезах эффекта двупреломления (изотропные сечения). Выбранные разрезы проверяются коноскопическим методом, руководствуясь наблюдениями фигур, приведенных в приложении 5.

При появлении в препарате дисперсионного эффекта по-

следний также с успехом может быть использован для решения рассматриваемой задачи (см. одноосные минералы).

Определение численной величины показателей преломления в оптически ориентированных сечениях ничем не отличается от такого для изотропных минералов.

Ниже в качестве примера приводится ход определения главных показателей преломления двuosных кристаллов при совместном применении метода Бекке и метода кольцевого экранирования.

Когда анализируемый минерал не известен, для приготовления первоначального препарата берут жидкость с  $n_D = 1,540—1,550$ . Если в указанной жидкости ни на одном из зерен не наблюдают цветного эффекта кольцевого экранирования, соотношение показателей преломления двух сред определяют при помощи подвижной полоски Бекке. Например, проверка при помощи полоски Бекке показывает, что  $n_D$  минерала больше  $n_D$  жидкости. Тогда, меняя соответствующим образом жидкость в препарате (в данном случае в направлении повышения ее показателя преломления), добиваются появления на зернах препарата цветного окрашивания. Если при этом все наблюдаемые окраски являются ориентирующими, например, синими или фиолетовыми, снова производят смену жидкости, добиваясь такого положения, когда наиболее низкой окраской из наблюдаемых на различных зернах препарата становится фиксирующая, т. е. принадлежащая средней части спектра (желтая, желто-зеленая или зеленая). Очевидно, что в рассматриваемом случае она определяет минимальную величину показателя преломления в данном препарате. Для того чтобы установить, определяет ли указанная окраска одновременно минимальный показатель преломления минерала ( $n_p$ ), зерна, на которых ее наблюдают, проверяют в коноскопе. При положительных результатах проверки дисперсионный эффект, наблюдаемый на этих зернах, используют для определения численной величины минимального показателя преломления минерала ( $n_p$ ). Одновременно в том же препарате отличают высшую окраску из всех наблюдаемых, а также высшую из окрасок, выражающих значения  $n_p'$ , и низшую из окрасок, выражающих значения  $n_g'$  на различных зернах препарата. Если указанные окраски также являются фиксирующими, а две последние по цвету совпадают между собой, то с их помощью определяют два других главных показателя преломления  $n_m^1$  и  $n_g$ . В отношении  $n_g$  вопрос решается после коноскопической проверки зерен, на которых наблюдают высшую окраску. В том слу-

---

<sup>1</sup> Для определения  $n_m$  используют также разрезы, на которых не наблюдается изменение дисперсионной окраски при вращении предметного столика микроскопа.

чае, когда только низшая из наблюдаемых окрасок является фиксирующей, после определения  $n_p$  производят смену жидкости, добиваясь появления фиксирующих окрасок для  $n_m$  и  $n_g$ . При определении  $n_g$ , как уже было сказано, фиксирующая окраска должна быть одновременно и высшей окраской из всех наблюдаемых в препарате. При достижении фиксирующих окрасок для упомянутых главных показателей преломления определяют их численные величины.

Если анализируемый минерал находится в тонкодисперсном состоянии и его коноскопическая проверка невозможна, в этом случае за главные показатели преломления принимают величины, полученные на основе анализа дисперсионного эффекта. Для большей уверенности в результатах измерений в этом случае увеличивают число зерен в препарате и неоднократно изменяют их ориентировку на предметном стекле путём легкого постукивания иглой по покровному стеклу. Главные показатели преломления анизотропных минералов могут быть измерены в одной жидкости только у минералов со слабым двупреломлением. Чаше для тех же целей приходится прибегать к двум-трем жидкостям.

В тех случаях, когда выбор точно ориентированного разреза неосуществим, за главные показатели преломления принимают максимальное ( $n_g$ ) и минимальное ( $n_p$ ) значения, полученные на выбранных (по величине двупреломления) разрезах. При этом количество исследованных зерен должно быть увеличено в несколько раз. Значение  $n_m$ , лежащее между  $n_g$  и  $n_p$ , может быть определено статистически как верхний предел значений  $n_p'$  или нижний предел  $n_g'$ . В том случае, если эти значения несколько различаются по величине, показатель  $n_m$  определяется как полусумма этих величин:

$$n_m = \frac{n_g' + n_p'}{2} .$$

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МИНЕРАЛОВ ТЕОДОЛИТНО-ИММЕРСИОННЫМ МЕТОДОМ (МЕТОД ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ИГЛЫ)**

Описанная выше методика измерений главных показателей преломления анизотропных минералов требует нормированного числа зерен в препарате и поэтому не удовлетворительна при малом количестве исследуемого материала. Ее применение затруднительно и в том случае, когда исследуемый минерал обладает совершенной спайностью, вследствие чего большинство зерен в препарате оказывается одинаково оптически ориентированными, а также при работе со смесями минералов, показатели преломления которых перекрываются. В этих случаях применяется теодолитный метод. Существуют два варианта теодолитного метода. Один из них связан с ис-

пользованием столика Федорова, а другой основан на применении вращающейся иглы. Рассмотрим последний как наиболее простой и универсальный вариант.

В основе метода вращающейся иглы, разработанного в Советском Союзе Н. Е. Веденеевой и А. Г. Колотушкиным, лежит теорема, доказывающая, что при вращении анизотропного кристалла вокруг оси, нормальной к оптической оси микроскопа, среди всех положений, которые будут последовательно занимать в пространстве оси индикатрисы кристалла, всегда найдутся (для каждой оси) такие, при которых ось индикатрисы будет располагаться в плоскости столика микроскопа.

Установить в процессе вращения кристалла момент нахождения той или иной главной оси индикатрисы в плоскости столика микроскопа и определить соответствующий этой оси показатель преломления можно с помощью дисперсионного эффекта как наиболее простого и быстрого способа сравнения показателей преломления двух сред.

При работе с иглой наиболее удобен способ кольцевого экранирования. Измерения методом вращающейся иглы производят на специальном приборе ППМ-1 (рис. 22). Прибор предназначен для измерения показателей преломления кристаллов на отдельных зернах диаметром 0,1—1,0 мм. Он может быть использован также в качестве рефрактометра для измерения показателей преломления жидкостей. Диапазон измеряемых величин показателей преломления 1,486—1,875.

Принципиальная схема прибора представлена на рис. 23. Он состоит из двух симметрично расположенных частей. Первая представляет собой устройство (1) с горизонтальной осью вращения (2), на конце которой закрепляется исследуемый кристалл (3), вторая — аналогичное устройство (4), на горизонтальной оси (5) которого закреплен двупреломляющий эталонный кристалл (6). Оба устройства связаны между собой общей подставкой (7), в центре которой находится держатель (8) кюветы (9) с иммерсионной жидкостью, в которую помещаются исследуемый объект и эталон. При помощи подставки прибор устанавливается и центрируется на столике микроскопа.

Методика определения главных показателей преломления при работе с прибором очень проста. В стеклянную кювету прибора помещается подходящая для измерений жидкость. Затем в кювету вводится игла с закрепленным на ее конце зерном исследуемого кристалла<sup>1</sup>. Установив требуемое для

---

<sup>1</sup> Для приклеивания исследуемого зерна к игле можно использовать различные клеющие материалы, но наиболее прост и удобен обычный казеиновый клей.



наблюдения эффекта кольцевого экранирования освещение, медленно вращают иглу с кристаллом в ту или иную сторону. Совмещая вращение иглы с вращением поляризатора, наблюдают за изменением окрасок на зерне и отмечают высшую и низшую окраски из всех наблюдаемых. Как уже известно, эти окраски дают возможность определить  $n_p$  и  $n_g$  кристалла.



Рис. 22. Прибор ППМ-1 для работы по методу вращающейся иглы

После этого соответствующим изменением показателя преломления жидкости в кювете последовательно доводят каждую из экстремальных окрасок до фиксирующей, и, пользуясь двупреломляющим эталоном прибора, определяют численную величину максимального и минимального показателей преломления. Для этого двупреломляющий эталон вводится в кювету и вращается вокруг горизонтальной оси до появления на нем окраски, аналогичной наблюдаемой на исследуемом объекте. По углу поворота эталона и прилагаемым к нему градуировочным кривым находят численную величину иско-

мого показателя преломления объекта для длины волны натрового света. Способ определения численной величины показателя преломления при помощи двупреломляющего эталона, предложенный В. Г. Фекличевым, освобождает от необходимости внесения дисперсионных поправок. Следует отметить, что при этом способе делается допущение о равенстве величин дисперсий эталона и исследуемого объекта, что не всегда соответствует действительности.

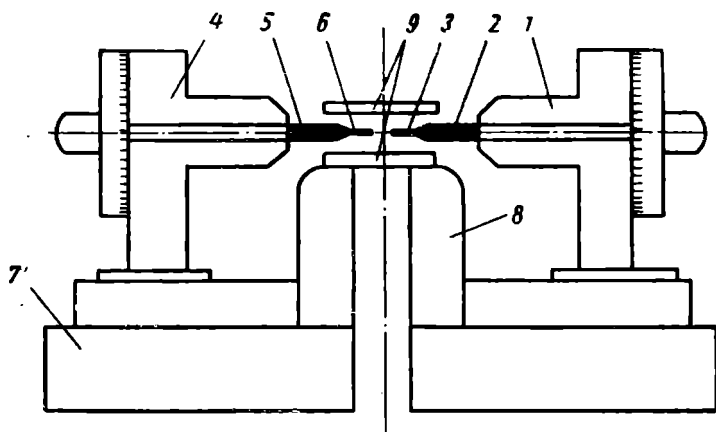


Рис. 23. Схема прибора для работы по методу вращающейся иглы

Показатель преломления  $n_m$  при работе теодолитным методом определяется следующим образом. Медленно вращая кристалл и одновременно вращая поляризатор, наблюдают за сменой окрасок на зерне по двум полуосям непрерывно меняющихся эллиптических сечений и устанавливают в результате этих наблюдений высшую окраску для  $n_p'$  и низшую — для  $n_g'$ . Если указанные окраски одинаковы по цвету, получаем значение  $n_m$ . Если же они существенно отличаются между собой, то следует изменить ориентировку кристалла на зерне и произвести повторный анализ. Та из окрасок, которая в результате повторного анализа совпадает с одной из первоначальных, соответствует значению  $n_m$ .

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Показатели преломления минералов обычно определяются с целью диагностики минералов, для уточнения состава промежуточных членов изоморфных минеральных рядов, а также при детальной характеристике минералов и для других целей.

Результаты измерений показателей преломления могут быть использованы для определения других оптических величин, связанных с показателем преломления функциональной зависимостью, а также для определения оптического характера индикатрисы.

Одноосные минералы в зависимости от того, является их обыкновенный показатель преломления ( $n_o$ ) минимальным ( $n_p$ ) или максимальным ( $n_g$ ), относят соответственно к оптически положительным или отрицательным.

Двуосные минералы определяют как оптически отрицательные, если разность  $n_g - n_m < n_m - n_p$ , и оптически положительные, если  $n_g - n_m > n_m - n_p$ .

Разность между  $n_g$  и  $n_p$  анизотропных минералов определяет величину их двупреломления — одну из важных оптических констант. Пользуясь значениями главных показателей преломления двуосных минералов, в случаях, не требующих высокой точности, можно вычислить угол оптических осей ( $2V$ ), также являющийся одной из важных диагностических констант этих минералов. Однако вычисление угла оптических осей  $2V$  по формулам дает менее точные результаты, чем непосредственные измерения.

Расчет производится по формуле

$$\sin V_g = \frac{n_g}{n_m} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_p^2}} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} V_g = \frac{n_g}{n_p} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_m^2}},$$

где  $V_g$  — угол между осью  $N_g$  и одной из оптических осей.

Вычисления половинного угла оптических осей ( $V$ ) производят по формулам:

$$\operatorname{tg}^2 V_g = \frac{n_g^2 (n_m^2 - n_p^2)}{n_p^2 (n_g^2 - n_m^2)}, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}^2 V_p = \frac{n_p^2 (n_g^2 - n_m^2)}{n_m^2 (n_m^2 - n_p^2)}. \quad (2)$$

В приведенных формулах  $V_g$  и  $V_p$  — половинные углы относительно осей  $N_g$  и  $N_p$  индикатрисы.

При определениях угла  $2V$  могут быть использованы также упрощенные формулы, полученные в результате соответствующих преобразований формул (1) и (2). Они имеют вид

$$\operatorname{tg}^2 V_g = \frac{n_m - n_p}{n_g - n_m},$$

$$\operatorname{tg}^2 V_p = \frac{n_g - n_m}{n_m - n_p}.$$

Важной оптической константой, широко используемой при диагностике минералов, является величина двупреломления ( $n_g - n_p$ ), получаемая как арифметическая разность измеряемых показателей преломления. Следует подчеркнуть, что величина двупреломления в иммерсионном препарате вследствие различия в толщине зерен не может быть определена непосредственным измерением с помощью компенсатора.

В тех случаях, когда определение показателей преломления минерала делается с целью диагностики, с помощью полученных констант минерал находится по справочнику. Наиболее часто при диагностике минералов используют определитель Е. Ларсена и Г. Бермана (1965). В этом справочнике минералы подразделены на три группы — изотропные, одноосные и двуосные, в каждой из которых они расположены в порядке возрастания показателей преломления с подразделением анизотропных минералов на оптически положительные и отрицательные минералы. Одноосные минералы располагаются в порядке возрастания  $n_o$ , двуосные — в порядке возрастания  $n_m$ , в связи с чем точное определение этой константы при диагностических исследованиях весьма важно. В других графах справочника даются дополнительные диагностические признаки. Если ось минерала неизвестна, минерал следует искать как среди одноосных, так и двуосных. Если неизвестен знак минерала или он характеризуется большим значением  $2V$ , то минерал нужно искать как в группе положительных, так и отрицательных.

Ввиду того что для большинства минералов показатель преломления может колебаться в известных пределах, рекомендуется принимать во внимание все минералы с соответствующими значениями  $n_o$  или  $n_m$ . В ряде случаев количество подобных минералов может быть довольно большим. В этих случаях для дальнейшего определения нужно использовать другие физические константы.

Для определения минералов по значению показателей преломления удобно также пользоваться книгой В. Н. Лодочникова (1947), в которой дано подробное описание оптических свойств прозрачных минералов, сгруппированных в порядке возрастания величины показателя преломления. Также могут быть использованы таблицы для оптического определения порообразующих минералов В. Е. Трегера (1968).

Весьма обстоятельным справочником, содержащим наиболее полную оптическую характеристику минералов, является книга А. Н. Винчелла и Г. Винчелла «Оптическая минералогия» (1953), в которой описание минералов дается по классам принятой в минералогии систематики.

Пользование этой книгой особенно целесообразно, когда исследование ведется в целях определения минерального вида внутри определенной группы или класса минералов или

при определении промежуточных членов в изоморфных рядах. В указанной монографии при описании минералов приводятся диаграммы, характеризующие соотношения оптических свойств и химического состава минералов в различных изоморфных рядах или системах. Наиболее подробно рассмотрены минералы класса силикатов.

Для определения синтетических минералов рекомендуется использовать книгу А. Н. Винчелла и Г. Винчелла «Оптические свойства искусственных минералов» (1967).

## ПРИМЕНЕНИЕ ИММЕРСИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ ДРУГИХ ЦЕЛЕЙ

При исследовании минерала иммерсионным методом помимо главных показателей преломления и констант, связанных с ними функциональной зависимостью, может быть определен ряд других оптических констант и свойств минералов. Так, в иммерсионных препаратах могут наблюдаться окраска и характер плеохроизма минералов. Однако при наблюдении этих свойств следует учитывать различия в толщине зерен минерала в препарате. Интенсивность окраски и степень резкости плеохроизма возрастают в более толстых зернах, что может искажать наблюдаемые эффекты.

В иммерсионных препаратах может исследоваться характер и направление спайности. Широкое применение находит иммерсионный метод для количественного минералогического анализа рыхлых агрегатов. Перечисленные выше наблюдения производятся только в препаратах с закрепленными зернами.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СПАЙНОСТИ МИНЕРАЛОВ

Методы исследования спайности в иммерсионных препаратах разработаны В. Б. Татарским (1965). Наблюдение спайности в иммерсионных препаратах имеет по сравнению с петрографическими шлифами некоторые специфические особенности.

В отличие от петрографических шлифов, в которых спайность всегда проявляется в виде системы параллельных или пересекающихся трещин, в иммерсионных препаратах на наличие спайности могут указывать различные признаки. При измельчении минералов для изготовления иммерсионного препарата его зерна будут раскалываться преимущественно по плоскостям спайности и ложиться этой плоскостью на предметное стекло. Наличие нескольких направлений спайности проявляется в этом случае в закономерной форме

обломков, например, спайные выколки по ромбоэдру для кальцита. Весьма совершенная спайность обуславливает одинаковую ориентировку зерен в препарате и наблюдаемая для них коноскопическая фигура одинакова.

Наиболее отчетливо спайность видна в осколках более крупных кристаллических зерен. В тонкозернистых образованиях и зернах минералов, испытавших дезинтеграцию и окатывание, наблюдение спайности затруднено.

Таким образом, на наличие спайности у минералов в иммерсионных препаратах могут указывать: 1) наличие системы трещин; 2) закономерная огранка зерен и 3) закономерная ориентировка зерен препарата.

При исследовании спайности следует обращать внимание на форму обломков и на получаемые в них коноскопические фигуры. Наблюдение спайности дает дополнительную информацию об осности кристалла исследуемого вещества, нередко позволяет установить сингонию кристалла. Ориентировка спайности и степень ее совершенства служат дополнительными диагностическими признаками.

В. Б. Татарский (1965) предлагает использовать для изучения характера спайности то обстоятельство, что в иммерсионном препарате зерна ложатся на предметное стекло своей наиболее крупной гранью, отвечающей направлению наиболее совершенной (главной) спайности минерала. Проверая коноскопически нормированное количество зерен иммерсионного препарата, можно выяснить ориентировку главного направления спайности, наблюдаемой в исследуемом веществе. В тех случаях, когда вещество обладает двумя или несколькими направлениями спайности, добавочная спайность будет видна в прямолинейных контурах зерен. Благодаря оптическим особенностям кристаллов, спайные выколки в препарате имеют различный характер погасания: прямое, косое, симметричное. Исследование форм спайных обломков в сочетании с характером погасания и осности дает возможность определить сингонию исследуемого вещества.

Для кристаллов средних сингоний (одноосных) наиболее часто проявляется спайность по пинакoidу, косой грани (ромбоэдр, дипирамида) и призме. Спайные выколки в первом случае изотропны при скрещенных николях и имеют форму неправильных пластинок, а при наличии добавочной спайности — правильных прямоугольников (тетрагональные кристаллы) или ромбов и параллелограммов (тригональные и гексагональные кристаллы). Спайность по призме сказывается в образовании прямоугольных выколов (брусочков) с неровными очертаниями, обладающих прямым погасанием. Косые грани спайности обуславливают правильную огранку зерна, например, ромбоэдрические выколки минералов группы кальцита.

В кристаллах низших сингоний (двуосных) спайность по призме также дает выколку в форме прямоугольного брусочка с неравными гранями, обнаруживающую в ромбических кристаллах прямые, а в моноклинных — косые погасания. Характерная для кристаллов низших сингоний спайность по пинаконду, в зависимости от положения последнего, приводит к образованию прямоугольных или неправильных выколок с различной ориентировкой погасания. Подробное изложение методики изучения спайности в иммерсионных препаратах дано в книге В. Б. Татарского (1965).

## **КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АГРЕГАТОВ В ИММЕРСИОННЫХ ПРЕПАРАТАХ**

Количественный минералогический анализ, т. е. выяснение количественных соотношений минералов в породе или агрегате, имеет большое значение.

Как известно, химический анализ дает суммарное содержание в породе химических элементов и не может ответить на вопрос, в виде каких минералов они присутствуют. Крупное преимущество минералогического анализа заключается также в том, что он требует значительно меньшей затраты времени, чем химический. Количественный минералогический анализ целесообразно применять для текущего контроля процессов обогащения и технологической переработки руд. Выяснение количественных соотношений минералов при изучении шлифов широко вошло в практику петрографических исследований. Однако изготовление шлифов требует значительной затраты времени, а в случае рыхлых агрегатов порой бывает невыполнимо. Вместе с тем количественный минералогический анализ рыхлых агрегатов легко осуществляется в иммерсионных препаратах.

Для этой цели из рыхлого или специально измельченного до 0,15—0,05 мм материала изготавливаются иммерсионные препараты. Зерна в препаратах, используемых для количественных подсчетов, обязательно должны быть закреплены.

При изготовлении препаратов для количественных подсчетов следует употреблять большие, неразрезанные покровные стекла (18×18 мм). Минеральные зерна, используемые для количественного анализа, по возможности должны быть распределены равномерно, препарат не должен содержать пустых участков и воздушных пузырей. Следует также избегать наложения зерен друг на друга. Введение жидкости при указанных размерах покровных стекол производится с помощью пипетки с очень тонко оттянутым концом. При отсутствии пипетки жидкость может вводиться с помощью стеклянной палочки.



Жидкость, употребляемая для изготовления препаратов при количественных подсчетах, выбирается в зависимости от состава исследуемых агрегатов. При освещении препарата параллельным пучком лучей (светлое поле) следует избегать жидкостей, равных по показателю преломления одному из минералов; так как в этом случае контуры минералов будут расплываться и подсчет зерен будет затруднен. Необходимо также избегать жидкостей с показателем преломления, резко отличающимся от показателей преломления подсчитываемых минералов, так как в этом случае все минеральные зерна будут иметь резкий рельеф и их отличие будет затруднено. Можно рекомендовать жидкости с показателями преломления, промежуточными между показателями подсчитываемых минералов, или жидкости, близкие по показателю преломления к канадскому бальзаму.

Весьма эффективно использование для количественного подсчета цветных дисперсионных окрасок, возникающих под микроскопом в минеральных зернах при погружении их в иммерсионные жидкости, близкие по показателю преломления к исследуемому минералу. Соответствующим подбором жидкости достигается появление различных цветных окрасок для разных минералов агрегата. Выбор жидкости в подобных случаях зависит от числа минералов смеси и соотношения их показателей преломления. Этот способ особенно эффективен при количественном анализе бесцветных агрегатов.

В практике подсчета зерен с использованием цветного дисперсионного эффекта удобно производить отдельный подсчет минералов, изготовляя для каждого из подсчитываемых компонентов препараты со средами, соответственно близкими по показателям преломления минералам, подлежащим количественному анализу. Так, при анализе агрегата флюорита и кварца для подсчета первого минерала используются препараты с жидкостью, близкой по показателю к флюориту ( $n=1,43$ ), зерна которого в этом случае окрашиваются в яркие цвета. Подсчет зерен кварца (не окрашенного в данной жидкости) может производиться как в том же препарате, так и в другом с жидкостью, близкой по показателю преломления к кварцу.

Метод дисперсионного окрашивания не применим, когда показатели преломления минералов смесей перекрываются. В тех случаях, когда два или несколько минералов в исследуемом агрегате близки по оптическим свойствам и их отличие в препарате затруднено, а методы оптического (дисперсионного) окрашивания не применимы, прибегают к избирательному цветному окрашиванию или избирательному травлению минералов специальными реагентами — красителями, под действием которых один минерал протравляется (или окрашивается) вследствие химической реакции, а дру-

гой остается без изменения. Подобное окрашивание успешно применялось для минералов группы карбонатов, глинистых минералов, апатитово-нефелиновых руд и др. Однако подобный способ длителен и применение его в количественных минералогических исследованиях ограничено.

Для получения представительных данных отбор материала для изготовления препаратов должен производиться методами усреднения (квартование, метод дорожки). Подсчет зерен производится под микроскопом. Перемещение препарата на столике осуществляется посредством препаратоводителя. Повторный подсчет одних и тех же участков недопустим. Зерна в препарате подсчитываются при помощи квадратно-сетчатого окуляра точечным методом, либо на интеграционном столике. Возможно применение и других принятых в количественном минералогическом анализе методов (Глаголев, 1941). Точность анализа зависит от числа подсчитываемых зерен, размера и формы их, удельных весов минерала и некоторых других факторов. Для анализа агрегатов рекомендуется использовать равномернозернистый материал. Минимальное число зерен при подсчете определяется требуемой точностью анализа, но должно быть не менее 250—300. Для получения высокой точности ( $\pm 1\%$ ) число зерен должно быть увеличено до 1000 и в полученные данные необходимо вводить ряд поправок.

## ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ИММЕРСИОННОМУ МЕТОДУ

- Бацанов С. С. и Ручкин Е. Д. Высокопреломляющий иммерсионный набор. «Зап. Всес. минерал. о-ва», 1967, вып. 3.
- Бокий Г. Б. Иммерсионный метод. Изд-во МГУ, 1948.
- Веденева Н. Е. Иммерсионный метод измерения показателей преломления под микроскопом. М., 1933.
- Винчелл А. Н. и Винчелл Г. Оптическая минералогия. М., ИЛ, 1953.
- Винчелл А. Н. и Винчелл Г. Оптические свойства искусственных минералов. М., «Мир», 1967.
- Глаголев А. А. Геометрические методы анализа агрегатов под микроскопом. «Тр. ВИМС», 1941, вып. 170.
- Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. М., Госхимиздат, 1960.
- Ларсен Е. и Берман Г. Определение прозрачных минералов под микроскопом. М., «Недра», 1965.
- Лодочников В. Н. Главнейшие породообразующие минералы. М., Госгеолиздат, 1947.
- Меланхолин Н. М. Измерение показателей преломления под микроскопом иммерсионным методом. М., Изд-во АН СССР, 1949.
- Наковник Н. И. Иммерсионный метод в применении к петрографическим шлифам. М., Госгеолтехиздат, 1957.
- Петров В. П. Иммерсионный метод в применении к дробленным породам. М., Госгеолтехиздат, 1949.
- Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод. М., «Недра», 1965.
- Татарский В. Б. Иммерсионный метод на федоровском столике. «Зап. Всес. минерал. о-ва», 1968, вып. 5.
- Трегер В. Е. Оптическое определение породообразующих минералов. М., «Недра», 1968.
- Фекличев В. Г. Опыт применения «фокального экранирования» при иммерсионном определении показателя минералов. «Тр. ИМГРЭ», 1963, вып. 18.
- Фекличев В. Г. Универсальный теодолитно-иммерсионный метод. М., «Наука», 1967.
- Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы. М., Физматгиз, 1960.
- Черкасов Ю. А. Применение «фокального экранирования» при измерении показателей преломления иммерсионным методом. В сб.: «Современные методы минералогического исследования горных пород и минералов». М., Госгеолтехиздат, 1957.
- Черкасов Ю. А. Дисперсионное окрашивание минералов для целей количественного минералогического анализа. «Минерал. сырье», 1960, вып. 1.

- Черкасов Ю. А. Теодолитно-дисперсионный метод измерения показателей преломления. В сб.: «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения». М., Госгеолтехиздат, 1963.
- Черкасов Ю. А. Микроскопия в проходящем поляризованном свете (в видимой области спектра). В сб.: «Современные методы минералогических исследований», т. 1. М., «Недра», 1969.
- Черкасов Ю. А., Хрулева Т. А. Применение метода фазового контраста к измерению показателей преломления минералов. В сб.: «Новые методы в минералогии и петрографии и результаты их применения». М., Госгеолтехиздат, 1963.
- Четвериков С. Д. Методика кристаллооптических исследований шлифов. М., Госгеолтехиздат, 1949.
- Brown M., McCrone C. Dispersion staining. «The microscope», 1963, vol. 13, No. 11; 1963, vol. 14, No. 2.
- Radziewski O. E. Die Unterscheidung von mineralen durch optische Anfärbung im Grenzdunkelfeld. «Ber. Deutsch. keram. Ges.», 1962, Bd. 38, Nr. 9.
- Zernike F. A New Method for the Accurate Measurement of Phase Differences. «J. Opt. Soc. Am.», 1949, vol. 39.

Таблица  
показателей преломления ( $n_D$ ) иммерсионных жидкостей стандартного набора при 20°

№ жидкости	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Показатель преломления	1,408	1,412	1,416	1,420	1,425	1,430	1,435	1,440	1,445	1,450	1,455	1,460	1,464	1,468
№ жидкости	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Показатель преломления	1,471	1,474	1,477	1,480	1,483	1,486	1,489	1,492	1,495	1,498	1,501	1,504	1,507	1,510
№ жидкости	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Показатель преломления	1,513	1,516	1,519	1,522	1,525	1,528	1,531	1,534	1,537	1,540	1,543	1,546	1,549	1,552
№ жидкости	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Показатель преломления	1,555	1,558	1,561	1,564	1,567	1,570	1,573	1,576	1,579	1,582	1,585	1,588	1,591	1,594
№ жидкости	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Показатель преломления	1,597	1,600	1,603	1,606	1,609	1,612	1,615	1,618	1,621	1,624	1,627	1,630	1,634	1,638
№ жидкости	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
Показатель преломления	1,642	1,646	1,650	1,654	1,658	1,662	1,666	1,670	1,674	1,678	1,682	1,686	1,690	1,694
№ жидкости	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
Показатель преломления	1,698	1,702	1,706	1,710	1,714	1,718	1,722	1,726	1,730	1,734	1,737	1,754	1,767	1,780

Температурная поправка на 1° для жидкостей № 1—52=0,0004

» » » » » № 53—84=0,0005

» » » » » № 85—98=0,0006

С повышением температуры показатель преломления уменьшается.  
С понижением — увеличивается.

Определение показателей преломления жидкостей № 1—85 производилось  
с точностью  $\pm 0,001$ ; жидкостей № 86—98 — с точностью  $\pm 0,002$ .

Таблица

величин дисперсии жидкостей стандартного набора в значениях разности показателей преломления для различных длин волн

Показатель преломления $n_D(\lambda = 592 \text{ нм})$	Разность показателей преломления для светофильтров			
	красный $\lambda = 670 \text{ нм}$	желто-зеленый $\lambda = 563 \text{ нм}$	зеленый $\lambda = 527 \text{ нм}$	голубой $\lambda = 500 \text{ нм}$
1,400	-0,001	+0,001	+0,002	+0,004
1,420	-0,002	+0,002	+0,003	+0,005
1,440	-0,002	+0,002	+0,003	+0,006
1,460	-0,003	+0,002	+0,004	+0,008
1,480	-0,003	+0,002	+0,004	+0,009
1,500	-0,004	+0,003	+0,005	+0,010
1,520	-0,005	+0,003	+0,006	+0,011
1,540	-0,006	+0,003	+0,007	+0,012
1,560	-0,006	+0,003	+0,008	+0,013
1,580	-0,007	+0,004	+0,009	+0,014
1,600	-0,007	+0,004	+0,009	+0,015
1,620	-0,008	+0,004	+0,010	+0,016
1,640	-0,008	+0,005	+0,011	+0,017
1,660	-0,009	+0,005	+0,012	+0,018
1,680	-0,009	+0,006	+0,012	+0,020
1,700	-0,010	+0,006	+0,013	+0,021
1,720	-0,010	+0,006	+0,014	+0,022
1,740	-0,011	+0,007	+0,015	+0,023
1,760	-0,012	+0,007	+0,016	+0,025
1,780	-0,013	+0,007	+0,017	+0,029

**Значение показателей преломления ( $n_D$ ) высокопреломляющих  
иммерсионных жидкостей**

№ флакона	$n_D^{20}$	№ флакона	$n_D^{20}$	№ флакона	$n_D^{20}$	№ флакона	$n_D^{20}$
1	1,743	13	1,841	25	1,925	36	2,020
2	1,749	14	1,848	26	1,932	37	2,030
3	1,760	15	1,855	27	1,939	38	2,040
4	1,773	16	1,862	28	1,946	39	2,050
5	1,785	17	1,869	29	1,953	40	2,060
6	1,792	18	1,876	30	1,960	41	2,070
7	1,799	19	1,883	31	1,970	42	2,080
8	1,806	20	1,890	32	1,980	43	2,090
9	1,813	21	1,879	33	1,990	44	2,100
10	1,820	22	1,904	34	2,000	45	2,120
11	1,827	23	1,911	35	2,010	46	2,140
12	1,834	24	1,913				

**Дисперсия показателей преломления высокопреломляющих  
иммерсионных жидкостей**

№ флакона	Длина волны, $\mu\text{м}$					
	656	620	589	555	520	486
7	1,787	1,795	1,799	1,806	1,817	1,831
12	1,821	1,829	1,834	1,843	1,856	1,873
16	1,848	1,857	1,862	1,872	1,885	1,903
20	1,876	1,884	1,890	1,901	1,913	1,933
25	1,910	1,918	1,925	1,936	1,950	1,975
30	1,942	1,952	1,960	1,972	1,987	2,010
33	1,971	1,981	1,990	2,003	2,018	2,050

## Разрезы для определения главных показателей преломления минералов

Характер минералов	Определяемый показатель преломления	Разрез зерна	Характер двупреломления	Коноскопическая фигура
Изотропные минералы	$n$	любое зерно	все сечения изотропны	—
Анизотропные минералы	одноосные	разрез, параллельный оптической оси	наивысшая интерференционная окраска	широкий размазанный крест, распадающийся при повороте столика на две ветви гиперболы
				широкий размазанный крест, распадающийся при повороте столика на две ветви гиперболы
	двуосные	разрез, параллельный плоскости оптических осей ( $\perp Nm$ )	наивысшая интерференционная окраска	широкий размазанный крест, распадающийся при повороте столика на две ветви гиперболы
	$n_m$	разрез, перпендикулярный оптической оси	изотропное сечение	ветвь гиперболы, изгибающаяся при повороте столика



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Общие сведения об иммерсионном методе</b> . . . . .	<b>5</b>
Принцип метода, его задачи и возможности . . . . .	5
История развития иммерсионного метода . . . . .	7
<b>Глава II. Аппаратура</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>Глава III. Иммерсионные среды</b> . . . . .	<b>20</b>
Иммерсионные жидкости . . . . .	20
Твердые иммерсионные среды (сплавы) . . . . .	24
Измерение показателей преломления иммерсионных сред . . . . .	25
<b>Глава IV. Иммерсионные препараты</b> . . . . .	<b>32</b>
Общие сведения . . . . .	32
Приготовление препаратов без закрепления зерен . . . . .	33
Приготовление препаратов с закреплением зерен . . . . .	34
Смена жидкости в препарате . . . . .	35
Приготовление препаратов при помощи твердых иммерсионных сред . . . . .	36
Приготовление иммерсионных препаратов из петрографических шлифов . . . . .	37
<b>Глава V. Способы сравнения показателей преломления минерала и иммерсионной среды</b> . . . . .	<b>38</b>
Способ Бекке . . . . .	38
Способы фокального экранирования . . . . .	46
1. Кольцевое экранирование . . . . .	46
2. Центральное экранирование (способ темного поля) . . . . .	48
3. Одностороннее экранирование . . . . .	51
Способ фазового контраста . . . . .	53
<b>Глава VI. Определение показателей преломления минералов</b> . . . . .	<b>58</b>
Определение показателей преломления изотропных минералов . . . . .	59
Определение показателей преломления анизотропных минералов . . . . .	65
1. Одноосные кристаллы . . . . .	65
2. Двuosные кристаллы . . . . .	69
Определение показателей преломления анизотропных минералов теодолитно-иммерсионным методом (метод вращающейся иглы) . . . . .	71
Интерпретация результатов измерения . . . . .	74
<b>Глава VII. Применение иммерсионного метода для других целей</b> . . . . .	<b>78</b>
Исследование спайности минералов . . . . .	78
Количественный минералогический анализ агрегатов в иммерсионных препаратах . . . . .	80
Основная литература по иммерсионному методу . . . . .	83
Приложения . . . . .	85

**Сахарова Марина Сергеевна,  
Черкасов Юрий Алексеевич**

**ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Тематический план 1970 г. № 168

Редактор *Н. В. Барина*

Обложка художника *М. М. Носовой*

Технический редактор *Г. И. Георгиева*

---

Сдано в набор 14/1 1970 г.	Подписано к печати 7/VIII 1970 г.	
Л-93546	Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Бумага тип. № 1
Физ. печ. л. 5,75	Уч.-изд. л. 5,17	Изд. № 755
Заказ 523	Тираж 2860 экз.	Цена 18 коп.

---

Издательство Московского университета. Москва, К-9, улица Герцена, 5/7  
Типография Изд-ва МГУ (филиал). Москва, проспект Маркса, 20