

**Подготовка микроскопа.** Для работы с коноскопом важное значение имеет тщательная настройка микроскопа. Опуская здесь обычные настройки и проверки, описание которых дано в руководствах по эксплуатации микроскопов, остановимся на двух процедурах, от выполнения которых зависит точность измерений: центрировке коноскопа и определении коноскопического угла объектива.

Для *центрировки коноскопа* выбирают зерна минерала с отчетливым погасанием в скрещенных николях при параллельном свете. Во всех четырех положениях погасания зерна (через каждые 90°) изогрира должна проходить через точку пересечения нитей окулярного креста или совпадать с нитью окулярного креста, если изогрира прямая (при использовании одноосного минерала). При несоблюдении этого условия производят центрировку с помощью регулировочных винтов на линзе Бертрана.

*Определение коноскопического угла объектива.* Следует иметь в виду, что нельзя доверять номинальному значению угловой апертуры, которая выгравирована на оправе объектива. Для объектива 60<sup>x</sup> она равна 0.85, что соответствует коноскопическому углу 116°. Проверка показывает, что действительный коноскопический угол может быть на 10°, а для объективов микроскопов старых выпусков на 20 и более градусов меньше номинала. Это расхождение объясняется особенностями конструкции объектива, из-за которых крайние лучи конического пучка лучей срезаются оправой объектива, действующей подобно диафрагме.

Для определения коноскопического угла  $\alpha$  нужно измерить диаметр  $D$  поля зрения коноскопа (в делениях шкалы окуляр-микрометра). Расчет  $\alpha$  производится по формуле

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{KD}{2}, \text{ где } K \text{ — константа Малляра.} \quad (6)$$

### Поиск сечений кристалла, пригодных для измерения угла оптических осей.

При поиске нужных кристаллов следует руководствоваться тремя основными правилами: 1) в поле зрения коноскопа не должны присутствовать оптические оси; 2) в стандартной позиции изогрира должна быть максимально симметричной; 3) оптические оси, находясь вне поля зрения, должны быть как можно ближе к его краю.

Сечения, в которых в поле зрения присутствуют оптические оси, непригодны для метода «засечек», так как в большинстве случаев в них невозможно совместить изогриру с метками  $M_{1-4}$ . Такие сечения легко определяются по постоянному нахождению в поле зрения одной или обеих ветвей изогриры при любом угле поворота столика.

Симметричность изогриры в стандартной позиции легко определяется визуально. Кроме того, ее можно оценить количественно по соотношению  $\omega_x / |\omega_{-x}|$ , которое в симметричных фигурах равно единице.

Для сечений, в которых оптические оси находятся вблизи края поля зрения, характерен узкий верхний конец изогриры. Исключение из этого правила — сечения  $\perp$  (ОБ— $N_m$ ) и  $\perp$  (ТБ— $N_m$ ), в которых изогрира, в случае близости оптических осей к краю поля зрения, расширена в верхней части (веерообразная изогрира).

Ниже приводится описание признаков, которыми следует руководствоваться при подборе подходящих сечений, с учетом величины угла оптических осей и типа сечений.

**Малые углы оптических осей (2 V = 0—30°).** Для этих углов следует искать сечения с двумя выходами оптических осей в расчете на прямое измерение по методу Малляра. И лишь в случае неудачи (например, из-за малого количества зерен минерала) нужно перейти к поиску подходящих косых сечений.

Для малых углов оптических осей характерны изогриры, похожие на изогриры, получаемые от одноосных кристаллов: прямые или слегка изогнутые балки, при вращении столика перемещающиеся параллельно нитям окулярного креста. Установка оп-

тических осей возможна только в позиции СПА или ЗСПА. Визуально по форме и другим внешним признакам сечения  $\perp$ ПОО и  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ) практически не отличимы. В стандартной позиции прямая изогрира совпадает с вертикальной нитью окулярного креста. В асимметричных сечениях тонкий верхний конец изогриры, оставаясь на нити, слегка отклонен от нее вправо или влево, в зависимости от позиции оптических осей (соответственно СПА и ЗСПА).

**Средние углы оптических осей ( $2V=30—60^\circ$ ).** Измерение средних углов, как и малых, возможно по способу Малляра. Но при этом нужно иметь в виду, что вероятность появления в поле зрения коноскопа двух оптических осей резко падает при увеличении угла между ними. Например, при угловом диаметре поля зрения коноскопа, равном  $60^\circ$ , для  $2V=30^\circ$  она равна 5 %, а для  $2V=55^\circ$  всего лишь 0.4 %. В последнем случае нужно просмотреть в среднем 250 зерен минерала, чтобы найти подходящее для измерения  $2V$ , что практически нереально из-за больших затрат времени и возможной нехватки количества зерен в шлифе.

Как и для малых углов, установка оптических осей возможна только в позиции СПА или ЗСПА. В случае близости выходов оптических осей к краю поля зрения в сечениях  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ) верхний конец изогриры имеет веерообразную форму. При предельно допустимом наклоне плоскости симметрии в стандартной позиции верхний конец изогриры может отклоняться от вертикальной нити окулярного креста по краю поля зрения на угол до  $10^\circ$  (сечения  $\perp$ ПОО) и до  $40^\circ$  [сечения  $\perp$ (ОБ— $N_m$ )].

**Большие углы оптических осей ( $2V=60—90^\circ$ ).** Изогриры для этой группы кристаллов в сечениях, перпендикулярных ПОО, пригодных для измерения  $2V$ , имеют вид креста, центр которого находится на вертикальной нити, ниже окулярного перекрестия или же при наличии асимметрии он сдвинут вправо от нее (СПА), либо влево (ЗСПА). Для оценки пригодности сечения для измерения  $2V$ , необходимо определить положение центра креста. Сделать это затруднительно, так как крест очень широкий. Рекомендуется слегка повернуть столик и самое узкое место образовавшейся перемычки распадающегося креста считать центром. Расстояние от центра креста до вертикальной нити не должно быть более половины видимого радиуса поля зрения. Если центр креста будет ближе к горизонтальной нити, чем к вертикальной, то необходимо изменить позицию оптических осей, повернув столик на  $90^\circ$  и производить измерение, как для сечения  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ).

В сечениях  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ) кристаллы с большим  $2V$ , если оптические оси находятся за пределами поля зрения, дают широкую веерообразную изогриру, совпадающую с вертикальной нитью. Сильное расширение ее верхнего конца свидетельствует о близости оптических осей и является признаком, благоприятным для измерения  $2V$ . При низком положении оптических осей возможно появление в поле зрения широкого креста, с центром, расположенным выше горизонтальной нити. Это отличительный признак сечений  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ) от сечений  $\perp$ ПОО. Кроме того, они различаются по поведению ветвей изогриры при распаде креста при вращении столика по часовой стрелке: в сечениях  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ) они расходятся в направлениях СЗ—ЮВ, в сечениях  $\perp$ ПОО — СВ—ЮЗ.

**Установка выбранного кристалла в стандартную или зеркально-стандартную позицию.** Из четырех позиций погасания кристалла (в проходящем свете) выбирают одну из тех, при которой изогрира смещается по оси  $X$  вправо при повороте столика по часовой стрелке. Изогрира в этой позиции должна пересекать центр поля зрения (рис. 3).

**Снятие отсчета по лимбу столика в исходной (стандартной) позиции.** Самый быстрый, но не безупречный по точности способ — совмещение средней линии изогриры с окулярным перекрестием. Снятие отсчета по лимбу столика производится с точностью до  $0,1^\circ$ . Процесс повторяется 5—7 раз, а при необходимости и большее число раз, пока не будет достигнуто стабильное среднее значение отсчета  $N_0$ . Способ применим, если изогрира тонкая и отчетливая.

Второй способ связан с наблюдением за темнотой в параллельном свете (можно с любым объективом). Установив кристалл в позицию погасания, вращают столик в

обе стороны до первых признаков просветления и снимают отсчеты в каждом положении. Повторив установку несколько раз, находят среднее из снятых отсчетов  $N_0$ .

**Совмещение изогриы с метками.** Самый простой и быстрый способ совмещения изогриы с меткой — совмещение по ее *средней линии* (см. врезку *б* на рис. 6, *А*). Однако, в случае, если изогриа приближается к метке под косым углом, «плашмя», точная установка на середину невозможна, так как она просматривается только с одной стороны (см. врезку *в* на рис. 6, *А*). Кроме того, средняя линия изогриы в большинстве сечений не совпадает с «нулевой» изогриой, что является дополнительным источником погрешностей определения угла  $2V$ . Способ совмещения по средней линии следует использовать лишь для быстрой и грубой оценки угла оптических осей.

Очень хорошие результаты дает *двусторонний способ* совмещения изогриы с меткой. Он заключается в снятии отсчета по лимбу столика в двух положениях: при подходе изогриы к метке, когда она касается ее внешней стороной, и при уходе изогриы, когда на метке оказывается ее внутренняя сторона. Для дальнейших расчетов нужно взять среднее из двух отсчетов. Этот способ пригоден даже для очень широких изогри, занимающих сектор поля зрения до  $90^\circ$  и, что особенно важно, при его использовании происходит совмещение «нулевой» изогриы с меткой.

Снятие отсчетов для всех меток производится многократно, не менее 5—7 раз с точностью до  $0,1^\circ$  (по нониусу), до получения устойчивого среднего значения  $N$ . Углы совмещения для каждой метки определяются по формулам  $\omega_1 = N_1 - N_0$ ;  $\omega_2 = N_2 - N_0$ ;  $\omega_x = N_x - N_0$ ;  $\omega_{-x} = N_{-x} - N_0$ .

**Расчет углового радиуса поля зрения коноскопа.** Для определения  $\rho_k$  необходимо, как это видно в формуле (2), оценить показатель преломления исследуемого кристалла, который можно найти в справочной литературе. В крайнем случае, если кристалл не диагностирован, достаточно определить его группу по В. Н. Лодочникову (1974) и для расчета взять среднее значение показателя преломления для группы.

**Определение угла оптических осей.** Предварительно по формулам (5) рассчитываются приведенные значения углов совмещения  $\omega_1'$  и  $\omega_x'$ , представляющие собой окончательные исходные данные для определения  $2V$ . Наиболее точный результат можно получить, если их ввести в компьютер для обработки по программе расчета  $2V$ . При отсутствии компьютера или необходимых программ угол оптических осей можно снять с диаграмм  $2V-\omega_1-\omega_x$ , используя приведенные значения углов  $\omega_1'$  и  $\omega_x'$ . Если действующий угловой радиус поля зрения  $\rho_k$  не совпадает с диаграммами ( $\rho_k = 25^\circ, 30^\circ$  и  $35^\circ$ ), следует прибегнуть к интерполяции.

**Ввод поправок на асимметрию.** Использование приведенных углов совмещений  $\omega_1'$  и  $\omega_x'$  не полностью снимает искажения в расчете  $2V$ , возникающих из-за наклона плоскости симметрии. Для их устранения методами регрессионного анализа были обработаны данные, полученные при компьютерном моделировании изогриы для 400 сечений при углах наклона плоскости симметрии от 0 до  $20^\circ$ . Расчет поправок  $\Delta 2V$  производится по уравнениям регрессии для стандартной позиции оптических осей (7) и для зеркально-стандартной позиции (8) с учетом коэффициентов, приведенных в табл. 3.

$$\Delta 2V = K_0 + K_1\omega_1 + K_2\omega_2 + K_3\omega_x + K_4\omega_{-x} + K_5 2V, \quad (7)$$

$$\Delta 2V = K_0 - K_1\omega_2 - K_2\omega_1 - K_3\omega_{-x} - K_4\omega_x + K_5 2V. \quad (8)$$

**Пример определения  $2V$  методом «засечек».** В качестве примера рассмотрим определение угла оптических осей в косом умеренно асимметричном сечении минерала — клиноцоизита. Исходные данные: средний показатель преломления клиноцоизита  $n = 1.71$ ; коноскопический угол объектива  $\alpha = 106^\circ$ , углы совмещения изогриы с метками:  $\omega_1 = 2^\circ$ ,  $\omega_2 = -10.5^\circ$ ,  $\omega_x = 20.7^\circ$ ,  $\omega_{-x} = -16.3^\circ$ .

По формуле (2) рассчитываем  $\rho_k$ :  $\sin \rho_k = \sin (106^\circ/2)/1.71 = 0.467$ ;  $\rho_k = 28^\circ$ .

По формулам (5) находим приведенные значения  $\omega_1'$  и  $\omega_x'$ :  $\omega_1' = (2^\circ + 10.5^\circ)/2 = 6.3^\circ$ ;  $\omega_x' = (20.7^\circ + 16.3^\circ)/2 = 18.5^\circ$ .

Зная  $\omega_1'$  и  $\omega_x'$  с диаграмм (рис. 6, *А*, *Б*) снимаем углы оптических осей для  $\rho_k = 25^\circ$  и  $30^\circ$  и определяем тип сечения:  $2V_{25} = 63^\circ$ ;  $2V_{30} = 70^\circ$ , сечение  $\perp$ (ОБ— $N_m$ ).

## Коэффициенты уравнения регрессии для расчета поправок к углу оптических осей

## Coefficients of the regression equation to calculate corrections to the angle between optical axes

Сечение, позиция оптических осей	Коэффициент						Знак поправки
	$K_0$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	
⊥ПОО, СПА	7.7	-3.001	-2.536	0.231	0.026	-0.133	+
⊥ПОО, СПБ	47.0	1.128	1.366	-0.459	-0.991	-0.444	-
⊥ (ОБ— $N_m$ ), СПА	-0.2	-0.379	-1.120	0.226	0.689	-0.006	+

Примечание. 1. Если знак поправки оказался противоположным указанному в таблице, поправку не вводить. 2. Абсолютная величина поправки в сечениях ⊥ПОО не должна превышать для малых углов  $2V$  5—8°, средних углов — 8—12°, больших углов — 15—20°; в сечениях ⊥ (ОБ— $N_m$ ) соответственно не более 5—10°, 10—15° и 15—20°. После ввода поправок остаточные погрешности в расчете  $2V$ , связанные с асимметрией, не превышают  $\pm 1^\circ$ .

Используя интерполяцию, рассчитываем предварительное значение угла оптических осей:  $2V' = 2V_{25} + (2V_{30} - 2V_{25})(28^\circ - 25^\circ) / (30^\circ - 25^\circ) = 67^\circ$ .

По уравнению регрессии (7) рассчитываем поправку на асимметрию:  $\Delta 2V = -0.2 - 0.379 \cdot 2^\circ - 1.12 (-10.5^\circ) + 0.226 \cdot 20.7^\circ + 0.689 (-16.3^\circ) - 0.006 \cdot 67^\circ = 4^\circ$ .

Вводим поправку:  $2V = 2V' + \Delta 2V = 67^\circ + 4^\circ = 71^\circ$ .

**О погрешностях измерений  $2V$  в коноскопе.** Точность измерения видимого угла оптических осей  $2E$  по методу Малляра равна  $\pm 3^\circ$  (Татарский, 1965), что после пересчета в истинный угол соответствует  $\pm 2^\circ$  для малых углов и  $\pm 1^\circ$  для средних углов  $2V$ .

Погрешности измерения  $2V$  методом «засечек» складываются из случайных ошибок и ошибок, связанных с оценкой углового радиуса поля зрения коноскопа  $\rho_k$ .

Случайные ошибки неизбежны при измерении углов совмещения изогрифы с метками, так как контуры изогрифы часто бывают расплывчатыми, нечеткими и повторение измерений дает разные результаты. Они легко выявляются статистическими методами и надежно оцениваются среднеквадратическим отклонением. Такая работа была выполнена на кристаллах, в которых предварительно на федоровском столике были замерены углы оптических осей. При этом выяснилось, что точность измерения  $2V$  в косых симметричных сечениях колеблется в зависимости от четкости контуров изогрифы от  $\pm 3$  до  $\pm 5^\circ$ .

Помимо четкости контуров изогрифы, на точность измерения  $2V$  влияет еще один фактор — показатель преломления кристалла, который, как это видно в формуле (2), учитывается при определении углового радиуса поля зрения коноскопа  $\rho_k$ . Расчеты показали, что ошибка в оценке  $\rho_k$  на  $1^\circ$  приводит к следующим погрешностям определения  $2V$ :

Угол оптических осей	Погрешность
Малые углы ( $2V = 0—30^\circ$ )	От 0 до $\pm 1^\circ$
Средние углы ( $2V = 30—60^\circ$ )	От $\pm 1$ до $\pm 2^\circ$
Большие углы ( $2V = 60—90^\circ$ )	От $\pm 2$ до $\pm 3^\circ$

Расчеты по формуле (2) показывают, что погрешность  $\rho_k = \pm 1^\circ$  может быть вызвана ошибкой в оценке показателя преломления кристалла, равной 0.050. Если минерал известен, то его показатель преломления можно взять из справочника. Даже для минералов переменного состава среднее значение показателя преломления не отличается от показателей преломления крайних членов изоморфного ряда более чем на 0.050. В случае исследования неизвестного минерала следует определить его группу по В. Н. Лодочникову (1974) и взять среднее значение показателя преломления для нее. Правильное определение группы достаточно для того, чтобы не допустить ошибку в расчете  $\rho_k$  более чем на  $1^\circ$ . Таким образом, погрешности в оценке показателя преломления кристалла не оказывают значительного влияния на точность измерения  $2V$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод «засечек» не является конкурентом метода Малляра, а лишь дополняет его. Они занимают разные «ниши»: первый метод рассчитан на косые сечения, в которых в поле зрения коноскопа отсутствуют оптические оси, для второго метода, напротив, присутствие оптических осей — обязательное условие.

Уступая методу Малляра в точности измерений, метод «засечек» обладает двумя преимуществами: возможностью измерения больших углов оптических осей и меньшими затратами времени на поиск симметричных и умеренно асимметричных сечений в связи с тем, что вероятность их встречи намного выше, чем вероятность появления в поле зрения двух оптических осей. Последнее преимущество особенно важно при исследовании минералов, представленных в шлифах немногочисленными зернами (акцессорные минералы).

Предлагаемый метод измерения  $2V$ , как и любые новые методические разработки, нужно рассматривать как предварительную версию, нуждающуюся в «обкатке». Автор будет благодарен тем читателям, которые пришлют свои замечания и предложения по совершенствованию метода, и готов ответить на интересующие их вопросы.

## Список литературы

- Елисеев Н. А.* Методы петрографических исследований. Л.: Изд-во ЛГУ. **1956.** 275 с.
- Компанейцев В. П.* Теория изогри. Прямая коноскопическая задача // Геология Казахстана. **1995.** № 2. С. 55—67.
- Компанейцев В. П.* Уравнение изогри для одноосных и двуосных кристаллов // Кристаллография. **2006.** Т. 51. № 4. С. 680—685.
- Лодочников В. Н.* Главнейшие породообразующие минералы. М: Недра, **1974.** 248 с.
- Татарский В. Б.* Кристаллооптика и иммерсионный метод. М: Недра, 1965. 306 с.
- Wright F. E.* The methods of petrographic-microscopic research. Carnegie Institution of Washington, **1911.** Publication no 158. 200 p.

Поступила в редакцию 5  
августа 2008 г.