

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ, ГОРНЫХ ПОРОД И РУД

УДК 535.525.2

© В. П. КОМПАНЕЙЦЕВ

ДИАГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ В КОНОСКОПЕ УГЛА ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ КРИСТАЛЛОВ В КОСЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ

*V. P. KOMPANEYTSEV. DIAGRAMS TO MEASURE IN CONOSCOPE THE ANGLE
BETWEEN OPTICAL AXES IN OBLIQUE SYMMETRICAL CROSS-SECTIONS*

The new method to determine the angle between optic axes ($2V$) in the conoscope is displayed as applicable to oblique cross-sections of crystals, where optic axes are outside of the conoscope field of view. The techniques involve measurements of the table rotation angles needed to make isogyres coincident with points in the conoscope view field (markers), which coordinates are known. The angle between optic axes may be analytically calculated, according to these angles and coordinates, by formulas deduced from the isogyre equation. There are diagrams compiled for the quick definition of the $2V$ angle by angles of the isogyre coincidence with markers. Preference of the new techniques, as compared with the Mallar's method, is the possibility to measure the larger angles $2V$ (more than 50 — 60°).

Коноскопический метод исследования кристаллов основан на наблюдении и анализе интерференционных фигур, получаемых при прохождении сходящегося пучка света через кристаллическую пластинку, расположенную между поляризатором и анализатором. Он дает ценную информацию о свойствах кристалла, таких как количество оптических осей и угол между ними, оптический знак, дисперсия оптических осей.

Несмотря на значительные успехи в моделировании и интерпретации интерференционных картин, достигнутые в последние десятилетия, теория и практика коноскопического метода исследования кристаллов застыли на уровне начала прошлого века. Набор коноскопических средств измерения угла оптических осей ($2V$) крайне скуден и ограничен двумя ориентированными сечениями: перпендикулярными острой биссектрисе (метод Малляра) и оптической оси — приблизительная оценка $2V$ по кривизне изогирь, сравнимая с эталонной диаграммой Ф. Е. Райта (Wright, 1911).

Метод Малляра наряду с достоинствами (простота и малые затраты времени на производство измерений) имеет один существенный недостаток — невозможность измерения $2V$ более 45 — 50° (Елисеев, 1956). Этот недостаток усугубляется еще и тем обстоятельством, что большинство наиболее распространенных породообразующих минералов (полевые шпаты, пироксены и амфиболы) имеет углы оптических осей, превышающие указанную предельную величину. В связи с этим метод получил ограниченное применение в практике минералого-петрографических исследований.

Классификация сечений двuosных кристаллов. Оптическая индикатриса двuosных кристаллов имеет три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии, на пересечении которых находятся оси индикатрисы N_g , N_m и N_p (рис. 1): 1) плоскость опти-

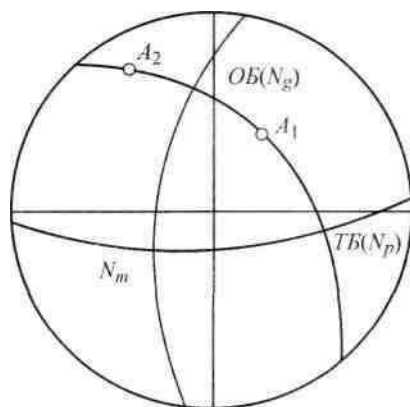


Рис. 1. Плоскости симметрии оптической индикатрисы двусосного положительного кристалла (стереографическая проекция).

Fig. 1. Symmetry planes of optical indicatrix of a two-axes positive crystal (stereographic projection).

ческих осей (ПОО), проходящую через оптические оси A_1 и A_2 , острую (ОБ) и тупую (ТБ) биссектрисы угла оптических осей; 2) плоскость ОБ— N_m и 3) плоскость ТБ— N_m . Относительно плоскостей симметрии оптической индикатрисы выделены следующие группы сечений кристаллов:

1. *Симметричные сечения*, перпендикулярные плоскостям симметрии оптической индикатрисы. Допустимое отклонение от перпендикулярности — до $5\text{--}10^\circ$. Такое отклонение не оказывает существенного влияния на результат измерения $2V$.

2. *Умеренно асимметричные сечения*, в которых плоскость симметрии наклонена относительно оптической оси микроскопа на угол от $5\text{--}10$ до 20° . В этих сечениях ошибки измерения $2V$ могут превышать допустимые пределы, но при использовании специальных приемов расчета они могут быть сведены к минимуму.

3. *Асимметричные сечения*, в которых плоскость симметрии оптической индикатрисы наклонена под углом свыше 20° . Определение угла оптических осей в таких сечениях нежелательно, так как может привести к большим погрешностям результатов измерений.

По ориентации оптических осей необходимо особо выделить *косые сечения*, в которых оптические оси находятся за пределами поля зрения коноскопа. В них возможно определение $2V$ по методу, рассматриваемому в настоящей статье (при условии, что они относятся к симметричной или умеренно асимметричной группе).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ В КОСЫХ СЕЧЕНИЯХ

Задача и сущность метода «засечек». В косых сечениях прямое измерение угла $2V$ по методу Малляра невозможно, так как оптические оси находятся вне поля зрения коноскопа. Следовательно, требуется определить ориентацию оптических осей по тем характеристикам изогирь, которые могут быть измерены в поле зрения коноскопа. Эта задача сходна с определением координат недоступного объекта путем измерения углов с двух пунктов с известными координатами, решаемая в геодезии «способом засечек». В коноскопии аналогичная задача также может быть решена «засечками»: измерением углов поворота столика, при которых происходит совмещение изогирь с двумя точками в поле зрения коноскопа. Зная углы поворота и координаты точек, можно аналитическим путем рассчитать координаты оптических осей и таким образом определить величину угла между ними.

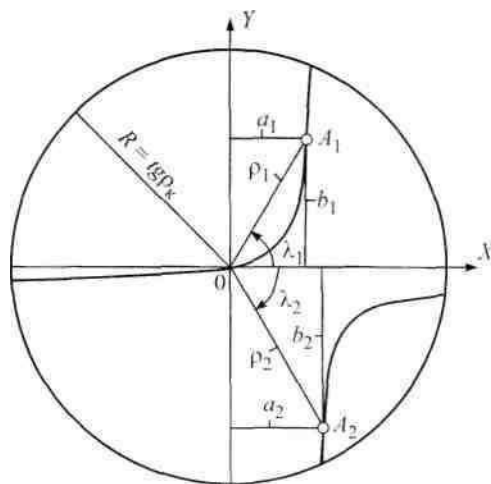


Рис. 2. Соотношение сферических и гномонических координат.

Fig. 2. Ratio of spherical and gnomonic coordinates.

Методика исследований. Интерференционная картина, наблюдаемая в коноскопе, как и все оптические явления, поддается описанию на языке математики в виде уравнений и формул. Это позволило создать математическую модель изогирь, в состав которой вошли: 1) формула расчета интенсивности белого света в любой точке поля зрения коноскопа, положенная в основу программы компьютерного воспроизведения изогирь (Компанейцев, 1995); 2) уравнение изогирь, описывающее связь координат точек изогирь с координатами оптических осей (Компанейцев, 2006); 3) обратные уравнения изогирь, используемые для расчета координат оптических осей и угла между ними по координатам точек изогирь, наблюдаемых в коноскопе.

По перечисленным уравнениям и формулам подготовлены компьютерные программы, с помощью которых были решены прямая задача — воспроизведение изогирь на экране монитора по известным координатам оптических осей — и обратная задача — расчет угла оптических осей по известным координатам точек изогирь. Полученные результаты контролировались измерением характеристик изогирь в коноскопе на реальных кристаллах, в которых на федоровском столике определялась ориентация оптических осей.

Используемые термины. Для предупреждения неясностей в изложении текста статьи ниже дается описание используемых терминов.

Гномоническая проекция может быть получена проектированием точек сферы (применительно к коноскопии — это воображаемая сферическая поверхность направлений световых колебаний в кристалле) из ее центра на касательную плоскость. Соотношение сферических и гномонических координат показано на рис. 2. Оси прямоугольных координат X и Y совпадают с нитями окулярного креста, ориентировка которых соответствует направлениям световых колебаний в николях. Полус сферических координат совмещен с центром O прямоугольных координат. За нулевой меридиан принята положительная полуось X . Ориентация каких-либо направлений, например оптических осей A_1 и A_2 , определяется их сферическими координатами: полярными углами ρ_1 , ρ_2 и долготами λ_1 и λ_2 . Отсчеты долготы от нулевого меридиана в направлении против часовой стрелки считаются положительными (от 0 до 180°), в противоположном направлении — отрицательными (от 0 до -180°). Расстояние от центра координат до какой-либо точки на гномонической проекции, например до выхода оптической оси A_1 равно тангенсу полярного угла: $OA_1 = \text{tg } \rho_1$. Пересчет сферических координат в гномонические прямоугольные координаты x и y производится по формулам: $x = \text{tg } \rho \cos \lambda$; $y = \text{tg } \rho \sin \lambda$.

Гномонические координаты x и y оптических осей A_1 и A_2 согласно этим формулам соответственно равны: $a_1 = \operatorname{tg} \rho_1 \cos \lambda_1$; $b_1 = \operatorname{tg} \rho_1 \sin \lambda_1$; $a_2 = \operatorname{tg} \rho_2 \cos \lambda_2$; $b_2 = \operatorname{tg} \rho_2 \sin \lambda_2$.

Гномоническое уравнение изогирь. Это уравнение описывает зависимость координат точек изогирь на плоскости гномонической проекции от координат оптических осей:

$$bx^3 + ay^3 - ax^2y - bxy^2 - cx^2 - cy^2 + 2(d-2)xy + 2bx + 2ay - 2c = 0, \quad (1)$$

где x, y — прямоугольные гномонические координаты точек изогирь; $a = a_1 + a_2$ — сумма гномонических абсцисс оптических осей; $b = b_1 + b_2$ — сумма гномонических ординат оптических осей; $c = a_1b_2 + a_2b_1$ — сумма смешанных (перекрестных) произведений гномонических координат оптических осей; $d = a_1a_2 + b_1b_2$ — сумма попарных произведений гномонических координат оптических осей.

Следует иметь в виду, что уравнение отображает изогирю как линию третьего порядка. Это так называемая «нулевая» изогиря, все точки которой теоретически имеют нулевую интенсивность света. В действительности же человеческий глаз воспринимает изогирю как некоторую плоскую геометрическую фигуру, внутри которой проходит «нулевая» изогиря.

Угловой радиус поля зрения коноскопа (ρ_k) — полярный угол края поля зрения коноскопа, зависящий от коноскопического угла α объектива и показателя преломления кристалла. Он рассчитывается по формуле

$$\sin \rho_k = (\sin \alpha / 2) / n, \quad (2)$$

где n — средний показатель преломления кристалла, равный $(n_g + n_m + n_b) / 3$.

Радиус поля зрения коноскопа R на гномонической проекции — линейная величина, равная тангенсу углового радиуса поля зрения:

$$R = \operatorname{tg} \rho_k. \quad (3)$$

Ближняя оптическая ось — оптическая ось A_1 с меньшим полярным углом, чем у другой *дальней оптической оси* A_2 (т. е. соблюдается неравенство $\rho_1 < \rho_2$).

Исходные позиции оптических осей. Для расчета углов поворота столика необходимы исходные позиции — своего рода реперы, от которых производятся отсчеты.

Стандартная позиция оптических осей — одно из четырех положений погасания кристалла (в параллельном свете), при котором ближняя оптическая ось A_1 находится либо на положительной полуоси Y , либо в 1-м квадранте (рис. 3, I, II) (нумерация квадрантов показана на рис. 4). При этом возможны два варианта нахождения дальней оптической оси A_2 : выше оси X (рис. 3, I, а, в; II, а, в) — *стандартная позиция А* (СПА) или ниже (рис. 3, I, б; II, б) — *стандартная позиция Б* (СПБ). В сечениях, перпендикулярных плоскостям симметрии, прямая изогиря совпадает с осью Y (ряд I). В асимметричных сечениях изогиря проходит через центр поля зрения из 1-го в 3-й квадрант (ряд II).

Зеркально-стандартная позиция (ЗСП) представляет собой зеркальное отражение стандартной позиции относительно вертикальной нити окулярного креста (ряд III). В этой позиции ближняя оптическая ось A_1 находится во 2-м квадранте, а изогиря, пересекая центр O , проходит из 2-го в 4-й квадрант. По нахождению дальней оптической оси здесь также можно выделить зеркально-стандартную позицию A (ЗСПА, рис. 3, III, а, в) и B (ЗСПБ, рис. 3, III, б). Повернув рис. 3 на 90° , можно убедиться в том, что при повороте столика на этот угол происходит смена позиций оптических осей по схемам: СПА \leftrightarrow ЗСПБ и СПБ \leftrightarrow ЗСПА.

Метки — точки в поле зрения коноскопа с известными координатами. В качестве меток можно использовать окулярное перекрестие (M_0), точки пересечения нитей окулярного креста с краем поля зрения (M_x, M_y, M_x и M_y) и точки на границе поля зрения (M_1, M_2, M_3, M_4), равноудаленные от нитей креста (рис. 4). В последних четырех мет-

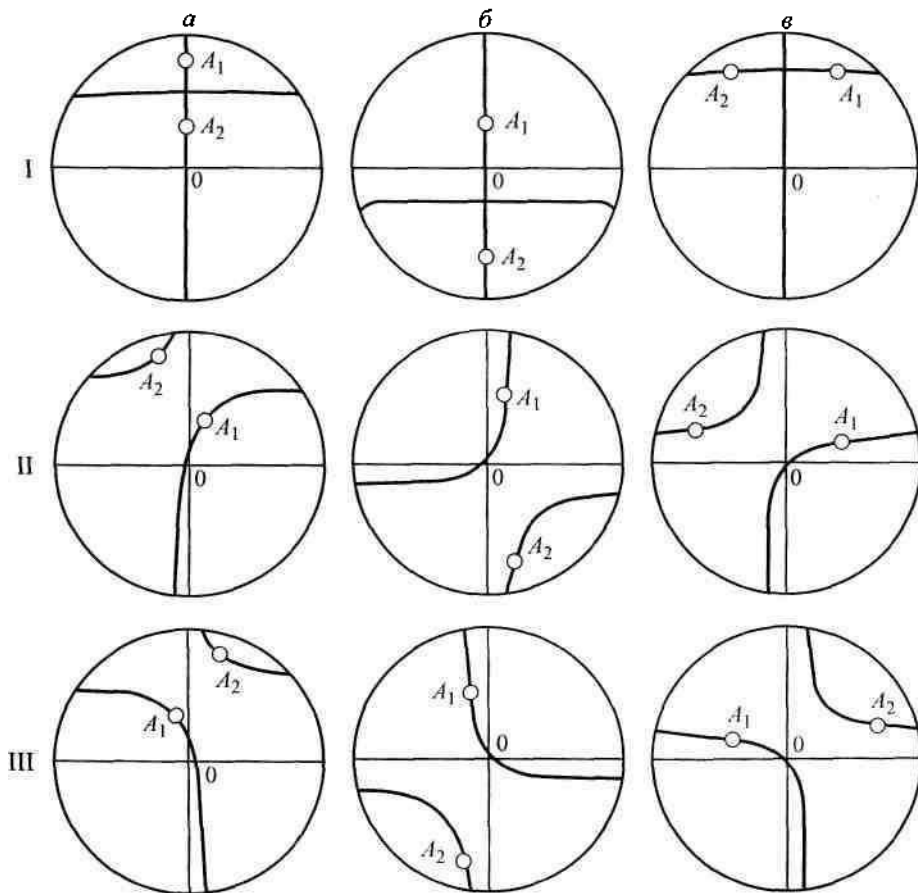


Рис. 3. Позиции оптических осей.

Ряд I — симметричные сечения; II — умеренно асимметричные сечения в стандартной позиции оптических осей; III — умеренно асимметричные сечения в зеркально-стандартной позиции.

Fig. 3. Positions of optical axes: join I — symmetric cross-sections; II — moderately asymmetric cross-sections in a standard position of optical axes; III — moderately asymmetric cross-sections in the mirror-standard image position.

ках нижние индексы указывают на номер квадранта, в которых они находятся. Чтобы обозначить их, нужно слегка приподнять объектив, повернув его на 45° и опустить, так чтобы винт-фиксатор оказался в специально предназначенном для этой цели гнезде в корпусе тубуса. Точки пересечения нитей окулярного креста с границей поля зрения в этом новом положении можно использовать в качестве меток M_{1-4} (см. рис. 6, А) на врезке рис. 6, А).

Углы поворота столика, отсчитанные от стандартной позиции, необходимые для совмещения изогиры с меткой, обозначаются буквой ω с соответствующим нижним индексом, например ω_2 для метки M_2 , ω_x для метки M_x .

Сферические и гномонические координаты меток M_1 и M_x приведены в табл. 1.

Полярный угол меток, расположенных на краю поля зрения, равен угловому радиусу поля зрения коноскопа r_k , зависящему, как это видно в формуле (2), от коноскопического угла объектива и показателя преломления кристалла. Он определяет величину радиуса поля зрения коноскопа R на гномонической проекции, рассчитываемую по формуле (3).