

© Компанейцев В. П.

Как определить коноскопический угол объектива микроскопа

Определение угла оптических осей и ориентировки оптической индикатрисы по методу «засечек» основано на измерении углов поворота столика, при которых изогрифа совмещается с метками, находящимися на краю поля зрения. Координаты этих меток зависят от коноскопического угла объектива. Если в расчете используются неверные значения коноскопического угла, то это приведет к систематическим погрешностям в определении угла оптических осей.

В статье [«Диаграммы для определения в коноскопе угла оптических осей кристаллов в косых симметричных сечениях»](#), на стр. 92 я сделал поспешный вывод о том, что *«нельзя доверять номинальному значению угловой апертуры, которая выгравирована на оправе объектива. ...Проверка показывает, что действительный коноскопический угол может быть на 10°, а для объективов старых микроскопов на 20 и более градусов меньше номинала»*. К этому ошибочному выводу я пришел после определения коноскопического угла объективов отечественных микроскопов 50-х годов выпуска, когда качество оптики было невысоким. Позже, после публикации статьи, я определил коноскопические углы двух объективов 60^x от микроскопов 70-х и 80-х годов выпуска. Они оказались равными 116 и 118°. Номинальное значение апертуры этих объективов равно 0,85 или в пересчете на коноскопический угол - 116°. Как видно из этих данных, коноскопический угол одного объектива соответствует номиналу, а второго отличается всего на 2°. Теперь приведенную выше цитату я заменил бы на следующую: *«Значению апертуры, выгравированному на оправе объектива, можно доверять. Но при этом помнить правило: доверяя, нужно проверять»*. Следуя этому правилу, рассмотрим 4 способа проверки значения коноскопического угла объектива. Предварительно, чтобы оценить пригодность способов, обсудим допустимые погрешности определения коноскопического угла.

Опытным путем было установлено, что погрешности в оценке углового радиуса поля зрения ρ_K на 1° влечет за собой ошибку в определении $2V$ по [методу «засечек»](#), колеблющуюся от 0,1 до 0,5° и лишь в редких случаях достигающуюся 1°. Принимаем последнюю величину как допустимую погрешность определения $2V$, привносимую неточным знанием величины коноскопического угла. Следовательно, погрешность определения ρ_K также должна находиться в пределах $\pm 1^\circ$.

Допустим, что мы определяем угол $2V$ в минерале со средним показателем преломления $n = 1,7$; объектив 60^x с апертурой $A = 0,85$ и коноскопическим углом $\alpha = 116^\circ$. Угловой радиус поля зрения коноскопа равен:

$$\sin \rho_K = A / n = 0,85 / 1,7 = 0,5; \rho_K = 30^\circ.$$

Допустимые отклонения углового радиуса поля зрения ρ_K приняты равными $30 \pm 1^\circ$.

Нужно найти значения коноскопического угла α объектива, которые соответствуют этим предельным значениям ρ_K .

$$\rho_K = 29^\circ; \sin(\alpha/2) = 1,7 \sin \rho_K = 0,824; \alpha/2 = 55,5^\circ; \alpha = 111^\circ.$$

$$\rho_K = 30^\circ; \sin(\alpha/2) = 1,7 \sin \rho_K = 0,85; \alpha/2 = 58^\circ; \alpha = 116^\circ.$$

$$\rho_K = 31^\circ; \sin(\alpha/2) = 1,7 \sin \rho_K = 0,876; \alpha/2 = 61^\circ; \alpha = 122^\circ.$$

Приведенный расчет показал, что погрешности определения коноскопического угла на 5 - 6° приведет к ошибке расчета углового радиуса поля зрения только ρ_K на 1°, что, в свою очередь, вызовет ошибку определения $2V$ не более, чем на 1°.

Таким образом, мы приходим к выводу, что погрешности способа определения коноскопического угла не должна превышать $\pm 5-6^\circ$.

Рассмотрим 4 способа определения коноскопического угла объектива.

1. Прямое определение конускопического угла объектива.

Измерение конускопического угла этим способом возможно при условии, что в вашем распоряжении имеется старый микроскоп с прямым тубусом. Снимите его с микроскопа, для чего потребуется открутить винт, крепящий упорную планку, ограничивающую движение тубуса. Установите на тубус объектив 60^{\times} , включите линзу Бертрана и как подзорную трубу наведите его куда-нибудь, например, на окно. Вы увидите сильно уменьшенное изображение окна, геометрические контуры которого искажены. Это так называемая бочкообразная дисторсия, с которой борются проектировщики фотографических объективов. Для микроскопических объективов она не дефект, а желательное оптическое явление. Окуляры микроскопов обладают противоположной, подушкообразной дисторсией, которая компенсирует искажения, даваемые объективами.

Сущность способа заключается в измерении реального угла, образуемого между двумя крайними противоположными точками изображения, даваемого объективом.

Заметим, что предлагаемым способом можно определять конускопический угол не только «родных» для тубуса объективов, но и объективов других микроскопов, включая современные, но, конечно, при условии, что их посадочное гнездо подойдет к тубусу старого микроскопа..

В качестве объекта для наблюдения (экрана) можно выбрать стену комнаты, светлую и хорошо освещенную. Затем нужно подобрать место для установки тубуса. Самый удобный способ – закрепить его струбциной на фотографическом штативе. Но можно обойтись и без штатива. Например, поставить на стол табуретку, на нее стопку книг высотой, обеспечивающей удобство наблюдения, и на книги положить тубус.

Диаметр поля зрения (расстояние AB на рис. 1), охватываемого объективом, должен быть не менее 2-х метров. Чем больше AB , тем точнее результаты определения конускопического угла. Расстояние CD от передней линзы объектива до стены должно составлять примерно $0,3 AB$ (для объектива 60^{\times}).

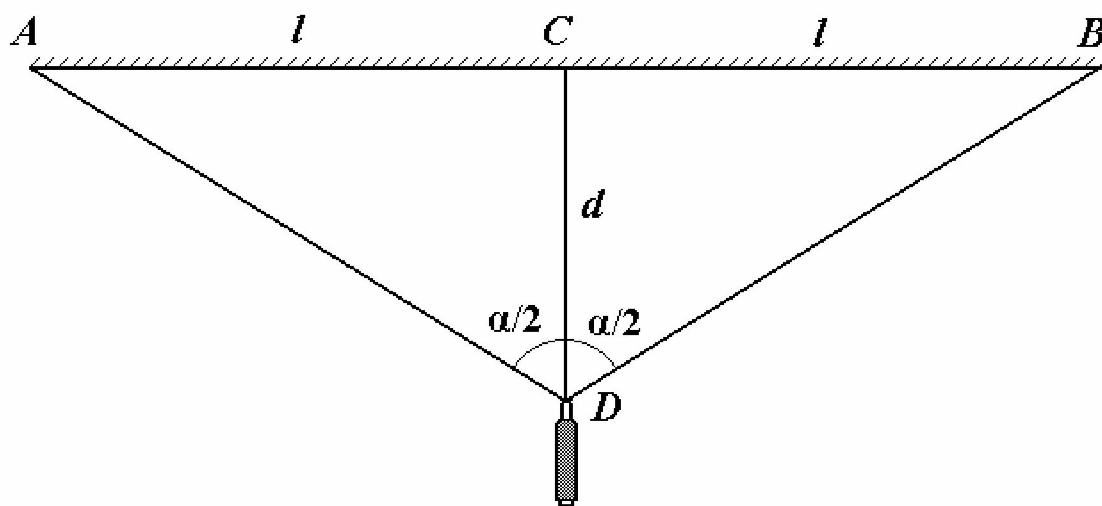


Рис. 1. Чертеж к определению конускопического угла объектива прямым способом.

AB – экран (стена); D – передняя линза объектива; A и B – метки на стене, расположенные на краю поля зрения; C – точка на стене, делящая расстояние AB пополам; l – половина расстояния между метками A и B ; d – расстояние от передней линзы объектива до стены; $\alpha/2$ – половина конускопического угла объектива.

Порядок измерения конускопического угла.

1. Ориентируем тубус перпендикулярно к стене и, вращая винт линзы Бертрана, наводим на резкость изображение стены.

2. Просим помощника, держащего вертикально линейку, постепенно перемещать ее слева направо вдоль стены. Как только край линейки появится в поле зрения, на уровне тубуса (по высоте) на стене отмечаем метку A .

3. То же самое выполняем, заводя линейку в поле зрения справа налево, и отмечаем метку B .

4. Мерной лентой или рулеткой измеряем расстояния между метками $AB = 2l$ и от объектива до стены $CD = d$.

5. Рассчитываем коноскопический угол α :

$$\operatorname{tg}(\alpha/2) = l/d. \quad (1)$$

Точность рассматриваемого способа высокая; погрешности определения коноскопического угла не превышают $\pm 1^\circ$.

Пример. Расстояние между метками A и B равно $2l = 247,3$ см, расстояние от объектива до стены $77,8$ см. Рассчитать коноскопический угол объектива.

$$l = 247,3 / 2 = 123,65 \text{ см.}$$

$$\operatorname{tg} \alpha/2 = 123,65 / 77,8 = 1,5893; \alpha/2 = 57,8^\circ; \alpha = 57,8 \times 2 = 115,6^\circ.$$

Расчет константы Малляра. Зная коноскопический угол объектива, можно определить константу Малляра. Для этого объектив устанавливают на тот микроскоп, которому он принадлежал.

Далее:

1. Включают линзы Лазо и Бертрана.

2. Если положение линзы Бертрана, при котором изогрира имеет максимальную резкость, известно, то устанавливают ее в это положение и, пропуская п.3, переходят к п. 4.

3. Наблюдая коноскопическую фигуру, устанавливают линзу Бертрана в положение максимальной резкости.

4. Используя окуляр-микрометр, измеряют диаметр D поля зрения изображения, даваемого объективом (не имеет значения включен или выключен анализатор, на столике микроскопа имеется шлиф или отсутствует).

5. Рассчитывают константу Малляра по формуле

$$K = \frac{D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (2)$$

где D – диаметр поля зрения в делениях шкалы окуляр-микрометра;

α – коноскопический угол объектива.

Пример. Коноскопический угол объектива 60° $\alpha = 115,6^\circ$. Диаметр поля зрения $D = 35$ делений шкалы окуляр-микрометра. Рассчитать константу Малляра.

$$\alpha/2 = 57,8^\circ;$$

$$K = 35 / (2 \sin 57,8^\circ) = 20,7.$$

2. Определение коноскопического угла объектива с известной константой Малляра.

Из формулы (2) следует, что зная константу Малляра и диаметр поля зрения коноскопа, можно решить обратную задачу – определить коноскопический угол объектива. Для этого достаточно с помощью окуляр-микрометра определить диаметр поля зрения D и рассчитать коноскопический угол по формуле

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{D}{2K}. \quad (3)$$

Пример. Исходные данные берем из предыдущего примера: $D = 35$, $K = 20,7$.

По формуле (3) рассчитываем коноскопический угол объектива:

$$\sin(\alpha/2) = 35 / (2 \times 20,7) = 0,8454; \alpha/2 = 57,7^\circ; \alpha = 115,4^\circ.$$

Этот способ очень простой, но он имеет ряд недостатков, связанных с погрешностями определения константы Малляра, которую определяют по изогире, получаемой от эталонного двуосного минерала: барита с постоянным $2V = 37,5^\circ$ или мусковита с $2V = 35 - 50^\circ$. Ветви изогир этих эталонных минералов при их максимальном расхождении занимают примерно $\frac{2}{3}$ диаметра поля зрения. Распространение значения константы Малляра на весь диаметр – это уже экстраполяция, при которой погрешности измерений только возрастают. Кроме того, нужно учитывать, что константа Малляра для малых, средних и больших коноскопических углов может заметно отличаться (Татарский, 1964). (См. также статью [«Градировка коноскопа поляризационного микроскопа»](#), где приведены конкретные значения константы для малых, средних и больших коноскопических углов). Константа Малляра по эталонным минералам определяется для средних коноскопических углов и потому ее распространение на большие углы неправомерно.

Дать оценку точности рассматриваемого способа невозможно, так как она зависит от погрешностей определения константы Малляра и особенностей ее вариации в зависимости от величины коноскопического угла.

3. Определение коноскопического угла объектива по эталонному одноосному кристаллу.

Способ основан на существовании зависимости между наклоном оптической оси одноосного кристалла и величиной смещения изогир при повороте столика на определенный угол.

Понять сущность метода можно, прочитав статьи [«Градировка коноскопа поляризационного микроскопа»](#) и [«Дополнение к статье «Микроструктурный анализ без федоровского столика»](#). Поэтому, чтобы не повторяться, опускаю описание способа и отсылаю читателя к этим статьям. Но при этом необходимо иметь ввиду следующие отличия:

- а) вместо окуляр-микрометра используется обычный окуляр;
- б) точка пересечения горизонтальной нити окулярного креста с краем поля зрения рассматривается как аналог одного из делений окуляр-микрометра;
- в) буквенное обозначение угла поворота столика α заменено на ω .

Пример. Определить коноскопический угол объектива 60^x по следующим исходным данным:

угол наклона оптической оси в эталонном кристалле кварца, отсчитанный от оптической оси микроскопа, $\rho_A = 40^\circ$;

отсчет по лимбу столика в позиции погасания кристалла $N_0 = 153^\circ$;

отсчет по лимбу столика в позиции совмещения правой стороны изогир с меткой M (точкой пересечения горизонтальной нити окулярного креста с краем поля зрения) $N_M' = 197,6^\circ$;

отсчет по лимбу столика в позиции совмещения с меткой M левой стороны изогир $N_M'' = 212,0^\circ$.

Рассчитываем среднее значение отсчета по лимбу столика для метки M :

$$N_M = (N_M' + N_M'') / 2 = (197,6 + 212) / 2 = 204,8^\circ.$$

Определяем угол ω поворота столика, при котором изогир совмещается с меткой M :

$$\omega = N_M - N_0 = 204,8 - 153 = 51,8^\circ.$$

По формуле

$$\operatorname{tg} \rho_K = \operatorname{tg} \rho_A \sin \omega$$

рассчитываем угловой радиус поля зрения коноскопа ρ_K :

$$\operatorname{tg} \rho_K = \operatorname{tg} 40^\circ \sin 51,8^\circ = 0,6591; \rho_K = 33,4^\circ.$$

По формуле

$$\sin(\alpha / 2) = n \sin \rho_K,$$

где n – средний показатель преломления кварца, равный 1,549,

рассчитываем коноскопический угол объектива α :

$$\sin(\alpha / 2) = 1,549 \sin 33,4^\circ = 0,8527; \alpha / 2 = 58,5^\circ; \alpha = 117^\circ.$$

Точность рассматриваемого способа определения коноскопического угла объектива зависит от правильной настройки коноскопа и четкости изогиры, получаемой от эталонного кристалла. Если контуры изогиры достаточно резкие, можно определить коноскопический угол с погрешностью не более $\pm 3^\circ$.

4. Определение коноскопического угла объектива по одноосному кристаллу с произвольной ориентировкой оптической оси.

При построении диаграмм $2V$ - ω_1 - ω_3 я обратил внимание на то, что изолиния $2V = 0^\circ$ имеет вид прямой линии, ориентированной под углом 45° к осям координат. Это означает, что одноосные кристаллы при любом наклоне оптической оси на графике ω_1 - ω_3 дают точки, располагающиеся на одной линии. Было установлено также, что при различных угловых радиусах поля зрения ρ_K изолинии не совпадают между собой и образуют систему параллельных линий (рис. 2). Следовательно, зная углы совмещения ω_1 и ω_3 изогиры с метками M_1 и M_3 , можно определить угловой радиус поля зрения ρ_K и коноскопический угол объектива.

Выбираем зерно кварца с серой интерференционной окраской, дающие изогиру с достаточно резкими контурами, вращением столика устанавливаем его в позицию максимального погасания, в которой изогира совпадает с вертикальной нитью окулярного креста, а ее узкий конец находится вверху (рис. а на врезке рис. 2). По лимбу столика снимаем отсчет N_0 .

Повернем окуляр на 45° . СВ и ЮЗ концы нити окулярного креста будем считать соответственно метками M_1 и M_3 . Вращением столика по часовой стрелке совмещаем с меткой M_1 сначала правую, а затем левую сторону изогиры (рис. б, в на врезке) и снимаем отсчеты по лимбу столика N_1' и N_1'' .

Вращением столика против часовой стрелки совмещаем с меткой M_1 сначала левую, а затем правую сторону изогиры (рис. г, д) и снимаем отсчеты по лимбу столика N_3' и N_3'' .

Рассчитываем средние значения отсчетов по лимбу N_1 и N_3 для меток M_1 и M_3 :

$$N_1 = (N_1' + N_1'') / 2; N_3 = (N_3' + N_3'') / 2.$$

Рассчитываем углы ω_1 и ω_3 совмещения изогиры с метками M_1 и M_3 :

$$\omega_1 = N_1 - N_0; \omega_3 = N_3 - N_0.$$

По полученным значениям ω_1 и ω_3 наносим на диаграмму ρ_K - ω_1 - ω_3 (рис.2) точку и по ее положению между изолиниями определяем ρ_K .

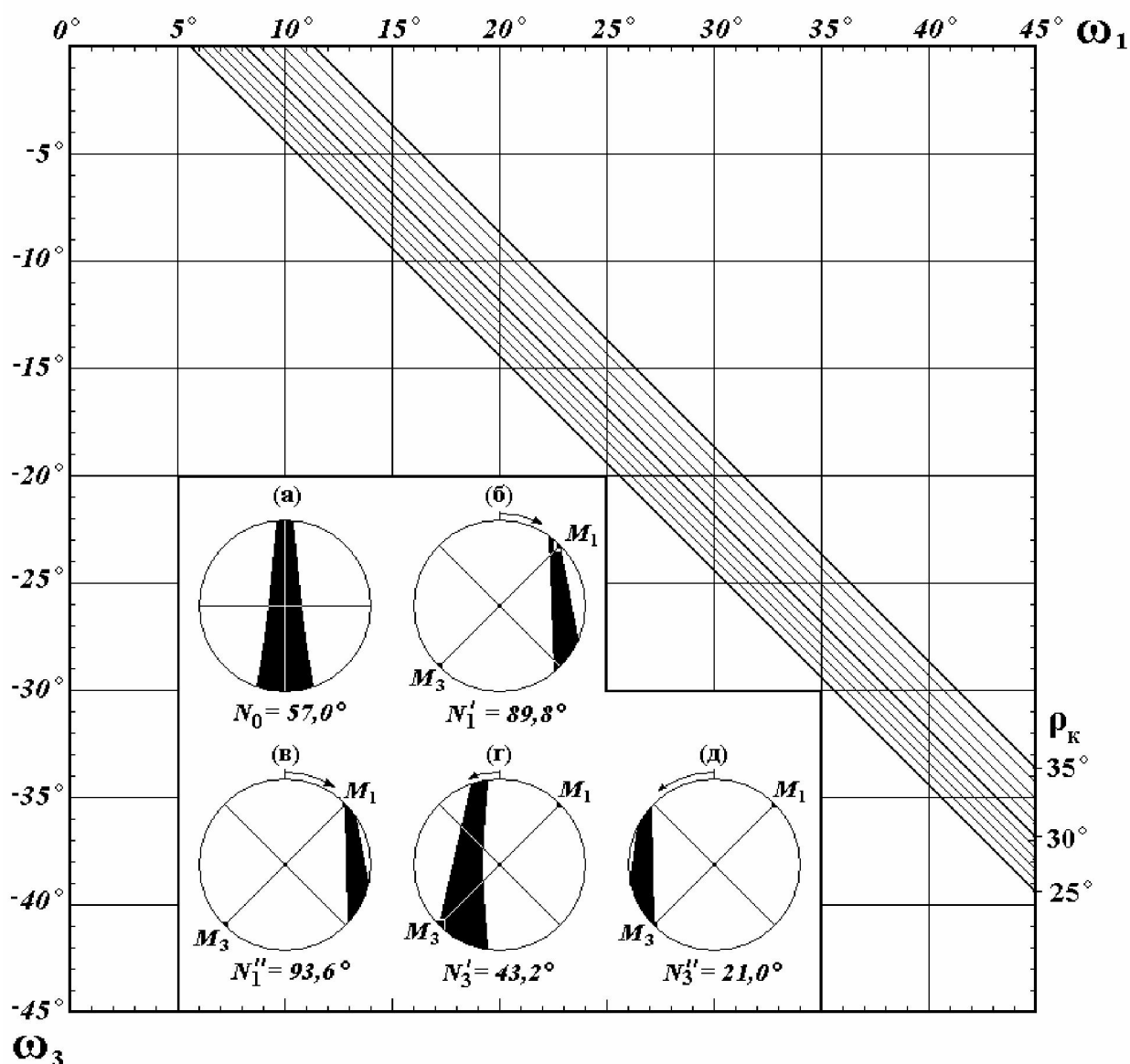


Рис. 2. Диаграмма ρ_K - ω_1 - ω_3 для определения коноскопического угла объектива ρ_K по углам ω_1 и ω_3 совмещения изогир одноосного кристалла с метками M_1 и M_3 .

Так как изолинии на диаграмме сильно сгущены, что затрудняет интерполяцию, для расчета ρ_K можно использовать следующую эмпирическую формулу:

$$\rho_K = \frac{\omega_1 + \omega_3 + 8.9}{0.576} \quad (4)$$

Рассчитываем коноскопический угол α по формуле

$$\sin(\alpha/2) = 1,549 \sin \rho_K. \quad (5)$$

Пример. Определить коноскопический угол объектива 60^\times по исходным данным, указанным на рис. 2.

Рассчитываем средние значения отсчетов по лимбу столика при совмещении изогир с метками M_1 и M_3 :

$$N_1 = (N'_1 + N''_1) / 2 = (89,8 + 93,6) / 2 = 91,7^\circ;$$

$$N_3 = (N'_3 + N''_3) / 2 = (43,2 + 21,0) / 2 = 32,1^\circ.$$

Рассчитываем углы совмещения изогир с метками M_1 и M_3 :

$$\omega_1 = N_1 - N_0 = 91,7 - 57,0 = 34,7^\circ;$$

$$\omega_3 = N_3 - N_0 = 32,1 - 57,0 = -24,9^\circ.$$

По формуле (4) определяем угловой радиус поля зрения коноскопа:

$$\rho_k = (34,7 - 24,9 + 8,9) / 0,576 = 32,5^\circ.$$

По формуле (5) определяем коноскопический угол объектива:

$$\sin(\alpha/2) = 1,549 \sin 32,5^\circ = 0,8323; \alpha/2 = 56,3^\circ; \alpha = 112,6^\circ.$$

Краткая оценка и рекомендации по выбору способа определения коноскопического угла объектива.

Для краткости названия способов будет определяться их номерами.

Способ 1.

Достоинство способа – высокая точность определения коноскопического угла ($\pm 1^\circ$).

Недостатки: требуется тубус от старого микроскопа; определение занимает относительно много времени, необходим помощник.

Способ 2.

Достоинства – способ очень простой, для определения коноскопического угла достаточно 5 минут.

Недостатки – нет уверенности в точности способа, так как она зависит от неизвестных погрешностей определения константы Малляра и равномерности распределения константы при различных коноскопических углах.

Способ 3.

Достоинства – достаточно высокая точность определения коноскопического угла ($\pm 3^\circ$).

Недостатки – для определения угла наклона оптической оси в эталонном кристалле кварца требуется федоровский столик.

Способ 4.

Достоинства – для определения коноскопического угла не требуются ни тубус от старого микроскопа, ни федоровский столик.

Недостаток – по точности определения коноскопического угла способ уступает способам 1 и 3, хотя она остается вполне удовлетворительной ($\pm 5^\circ$).

Рекомендации по использованию способов определения коноскопического угла.

1. Если в вашем распоряжении имеется старый микроскоп с прямым тубусом, используйте способ 1.
2. Если у вас нет старого микроскопа, но есть федоровский столик, используйте способ 3.
3. Если у вас нет ни старого микроскопа, ни федоровского столика, выберите способ 4.
4. Применение способа 2 нежелательно, так как он не дает гарантированной точности определения коноскопического угла.

12 октября 2011 г.