

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

ПРОБИРОВАНИЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ  
И ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА КАМНЕЙ

Лабораторный практикум  
для студентов специальности  
1-52 02 01 «Технология и оборудование  
ювелирного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области приборостроения*

Минск  
БНТУ  
2019

УДК 549.08:671.15

ББК 26.31:22.37

П78

Составитель

*Д. А. Степаненко*

Рецензенты:

контролер 1-й категории отдела контроля и режима  
Государственного хранилища ценностей Министерства финансов  
Республики Беларусь *П. Е. Осипов*;  
ст. преподаватель кафедры динамической геологии  
Белорусского государственного университета *С. А. Юдаев*

**Пробирование** драгоценных металлов и экспертная оценка камней:  
П78 лабораторный практикум для студентов специальности 1-52 02 01  
«Технология и оборудование ювелирного производства» / сост. :  
Д. А. Степаненко. – Минск: БНТУ, 2019. – 100 с.  
ISBN 978-985-550-929-6.

Лабораторный практикум предназначен для изучения дисциплины «Основы геммологии» студентами специальности 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства»; содержит семь лабораторных работ, в которых обозначены цель работы, инструменты и принадлежности, используемые при ее выполнении; кратко изложены теория, порядок выполнения работы, даны вопросы для самопроверки и список рекомендуемой литературы.

Может быть полезен студентам других специальностей, изучающих геммологию, минералогию и кристаллографию.

УДК 549.08:671.15

ББК 26.31:22.37

ISBN 978-985-550-929-6

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВЕСА ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ МЕТОДОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ .....	4
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ В ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЯХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИСКОПА .....	12
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕОХРОИЗМА В ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЯХ .....	39
Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА .....	45
Лабораторная работа № 5 ОЦЕНКА ЧИСТОТЫ И СТОИМОСТИ БРИЛЛИАНТОВ .....	64
Лабораторная работа № 6 ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КАК ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ ПРИЗНАК ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ .....	73
Лабораторная работа № 7 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ .....	86
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	100

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВЕСА ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ МЕТОДОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ

**Цель работы** – получение практических навыков определения удельного веса драгоценных камней с помощью метода гидростатического взвешивания и идентификации драгоценных камней по удельному весу.

#### Инструменты и принадлежности

1. Весы электронные с точностью не менее 0,01 кар.
2. Вода дистиллированная.
3. Набор образцов драгоценных камней.
4. Сосуд для воды.
5. Чашка для камня с подвесом.
6. Пинцет.
7. Салфетки.

#### Общие сведения

Одна из важнейших диагностических характеристик драгоценных камней – удельный вес, значение которого для каждого из видов драгоценных камней заключено в довольно узком диапазоне.

Под **удельным весом** материала понимают отношение веса определенного объема  $V$  данного материала к весу такого же объема химически чистой воды при температуре  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (при этой температуре вода имеет наибольшую плотность):

$$SG = \rho g V / \rho_{\text{в}} g V = \rho / \rho_{\text{в}}$$

где  $\rho$  – плотность исследуемого материала;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды.

Обозначение SG означает Specific Gravity (удельный вес).

Плотность воды при температуре  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rho_{\text{в}} = 1\text{ г/см}^3$ , поэтому удельный вес численно равен плотности материала, выраженной в  $\text{г/см}^3$ . В отличие от плотности удельный вес – безразмерная величина.

Одним из методов определения удельного веса является метод гидростатического взвешивания, основанный на *законе Архимеда* (на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной этим телом жидкости):

$$F_{\text{А}} = \rho_{\text{ж}} g V,$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;

$V$  – объем погруженной в жидкость части тела.

Другими словами, вес погруженного в жидкость тела уменьшается на величину, равную весу вытесненной им жидкости:

$$P_{\text{ж}} = P_{\text{в}} - F_{\text{А}},$$

где  $P_{\text{ж}}$  – вес тела в жидкости;

$P_{\text{в}}$  – вес тела в воздухе.

Выталкивающая сила может быть определена как разность веса тела в воздухе и жидкости:

$$F_{\text{А}} = P_{\text{в}} - P_{\text{ж}}.$$

Удельный вес при известной выталкивающей силе в воде можно определить по формуле

$$SG = P_{\text{в}} / F_{\text{А}} = P_{\text{в}} / (P_{\text{в}} - P_{\text{ж}}).$$

Таким образом, для определения удельного веса камня достаточно определить его вес в воздухе и воде. Для определения веса камня в воде могут быть использованы рычажные или электронные весы. В случае использования рычажных весов (см. рис. 1.1) над чашей весов располагается стойка 1 с сосудом 2, заполненным водой, а камень крепится с помощью подвеса 3 к коромыслу весов и полностью погружается в воду.

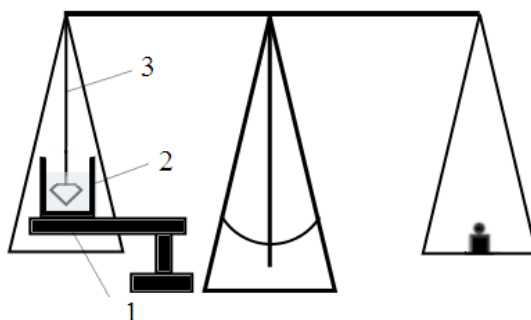


Рис. 1.1. Схема гидростатического взвешивания с помощью рычажных весов

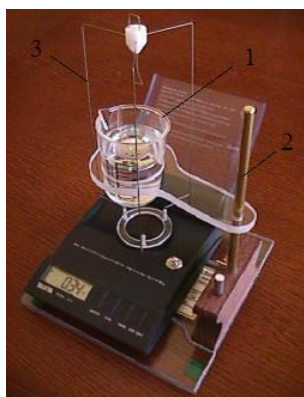
Подвес обычно представляет собой нить с закрепленной на ее свободном конце чашкой для камня. При этом чашка должна полностью погружаться в воду, а нить должна быть как можно более тонкой. Нить должна смачиваться водой, но не должна пропитываться ею. Можно использовать обезжиренный волос или очень тонкую проволочку с диаметром, например, 0,05 мм. Перед помещением камня в чашку весы должны быть уравновешены, чтобы скомпенсировать действие на них веса чашки и приложенной к ней выталкивающей силы.

В случае использования одночашечных электронных весов (см. рис. 1.2, *a*) сосуд *1* с водой закрепляется на стойке *2*, а камень подвешивается на специальном проволочном каркасе *3*, который устанавливается на платформу весов.

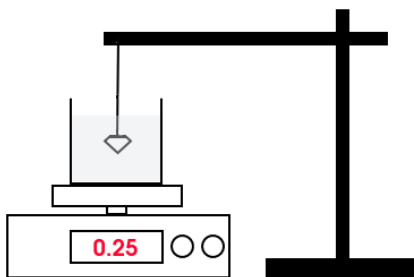
Также возможно использование схемы, в которой сосуд с водой устанавливается на платформу весов, а камень подвешивается на стойке (см. рис. 1.2, *б*).

Весы включаются при установленном на платформе сосуде перед погружением камня в воду, в результате чего в весах с автоматической установкой нуля вес сосуда с водой будет приниматься за нуль. Показания весов после погружения камня в воду будут представлять собой массу воды, вытесненной камнем, так как на платформу весов будет действовать сила, равная по величине и противоположная по направлению выталкивающей силе, действующей на камень. Можно обойтись и без использования стойки, удерживая подвес камня пальцами рук или пинцетом.

В лабораторной работе используется схема, приведенная на рис. 1.2, б.



а



б

Рис. 1.2. Схемы гидростатического взвешивания с помощью электронных весов

Помимо гидростатического взвешивания, удельный вес может определяться с помощью пикнометра и тяжелых жидкостей.

**Пикнометр** представляет собой стеклянную колбу с притертой пробкой, в которой выполнен капиллярный канал (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Пикнометр

Для расчета удельного веса камня вначале определяют вес камня в воздухе  $P_1$  и вес сухого пикнометра  $P_2$ .

Затем пикнометр заполняется дистиллированной водой и при его закрывании пробкой избыток воды вытесняется через капилляр. Внешняя часть пикнометра просушивается с помощью салфетки, при этом удаляется избыток воды с верхней части пробки без удаления воды из капилляра.

Затем определяют вес пикнометра с водой  $P_3$ . Из пикнометра извлекают пробку и помещают в воду камень. При закрывании пробкой пикнометра с погруженным в воду камнем часть воды снова вытесняется через капилляр. Пикнометр просушивают и определяют его вес  $P_4$  при нахождении внутри воды и камня. Начальный вес воды в пикнометре можно определить как  $P_5 = P_3 - P_2$ , а вес воды после погружения камня как  $P_6 = P_4 - P_2 - P_1$ . Удельный вес камня рассчитывается по формуле

$$SG = P_1 / (P_5 - P_6).$$

Определение удельного веса с помощью тяжелых жидкостей основано на исследовании плавучести камня в жидкости с высоким удельным весом. Если удельный вес камня выше удельного веса жидкости, то камень тонет, а если удельный вес камня ниже удельного веса жидкости, то он плавает на поверхности.

В случае равенства удельных весов камень находится в положении безразличного равновесия: он может плавать в жидкости на любом уровне.

В качестве тяжелых жидкостей используют *жидкость Клеричи* (смесь малоната и формата таллия), йодистый метилен (метиленйодид, диодметан,  $\text{CH}_2\text{I}_2$ ) и бромформ (трибромметан,  $\text{CHBr}_3$ ). Жидкость Клеричи имеет при комнатной температуре удельный вес около 4,25 и может быть разбавлена до более низкого удельного веса водой. Жидкость может быть снова сделана концентрированной путем осторожного нагревания над пламенем газовой горелки. Недостатком жидкости Клеричи является ее ядовитость, связанная с содержанием таллия. Удельный вес смеси жидкости Клеричи с водой линейным образом связан с ее показателем преломления, поэтому можно рассчитывать удельный вес по показателю преломления, измеренному с помощью рефрактометра.



**Йодистый метилен** имеет при комнатной температуре удельный вес около 3,32 и может быть разбавлен бензолом (быстрое разбавление) или бромформом (медленное разбавление). Растворяя в йодистом метиле йод или йодоформ, можно повысить его удельный вес до 3,6, однако при этом он становится непрозрачным и очень вязким. Йодистый метилен разлагается на свету с выделением йода, поэтому его необходимо хранить в темном месте.

**Бромформ** при комнатной температуре имеет удельный вес около 2,88 и может быть разбавлен спиртом или бензолом. Разлагается на свету и в присутствии воздуха. Относится к классу высокоопасных веществ. Большинство тяжелых жидкостей токсичны, поэтому следует избегать их попадания на кожу, а работу с ними можно проводить только в хорошо вентилируемых помещениях. Тяжелые жидкости нельзя использовать с пористыми камнями (опал, бирюза) или камнями, имеющими поверхностные дефекты или трещины. Удельный вес разбавленных тяжелых жидкостей можно определять с помощью пикнометра.

Нетоксичной тяжелой жидкостью является водный раствор **поливольфрамата натрия**  $3\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Насыщенный раствор имеет удельный вес около 3,10. Нетоксичен также водный раствор **метавольфрамата лития** с удельным весом насыщенного раствора около 2,95.

Поливольфрамаат натрия и метавольфрамаат лития удобны тем, что устойчивы к внешним воздействиям и позволяют получать растворы любого требуемого удельного веса путем добавления или испарения воды.

### Порядок выполнения работы

1. С помощью электронных весов определить массу исследуемых образцов камней с точностью не менее 0,01 кар. Точность весов влияет на ошибку измерений, которая уменьшается с ростом массы камня. При точности 0,01 кар ошибка измерений для камней с массой менее 0,4 кар будет превышать 20 %. Результаты занести в табл. 1.1.

2. Заполнить сосуд для воды дистиллированной водой. Уровень воды в сосуде должен быть достаточным для полного погружения чашки с камнем.

3. Погрузить чашку для камня в сосуд с водой. На погруженной в сосуд чашке не должно быть пузырьков воздуха. При наличии пузырьков их необходимо удалить с помощью подручных средств, например, иглы, или путем потряхивания.

4. Установить сосуд с водой с погруженной в него чашкой для камня на платформу весов.

5. Закрепить нить подвеса чашки для камня на верхней крышке весов. Длина свободной части нити должна быть такова, чтобы чашка для камня оставалась полностью погруженной в воду, не касаясь при этом дна сосуда. При недостаточной длине свободной части нити (неполном погружении чашки) под сосуд с водой можно установить подставку. Горизонтальное положение сосуда на платформе весов необходимо отрегулировать таким образом, чтобы чашка с камнем не касалась стенок сосуда.

6. Включить весы. На весах должны установиться нулевые показания.

7. С помощью пинцета осторожно бросить камень в чашку, не касаясь пинцетом воды (это приведет к уменьшению массы воды в сосуде). Камень и пинцет должны быть сухими (в противном случае произойдет увеличение массы воды в сосуде). При необходимости камень и пинцет нужно протереть салфеткой. На погруженном в воду камне не должно быть пузырьков воздуха: для этого камень желательно обезжирить, при наличии пузырьков необходимо произвести повторные измерения. Для разрушения пузырьков и уменьшения поверхностного натяжения в воду можно добавить каплю поверхностно-активного вещества.

8. Записать в табл. 1.1 показания весов (массу вытесненной камнем воды).

9. Выключить весы.

10. Открепить нить подвеса и снять сосуд с погруженной в него чашкой с платформы весов.

11. С помощью пинцета извлечь из сосуда чашку с камнем. Слить воду из чашки в сосуд и извлечь камень пинцетом.

12. Протереть салфеткой пинцет и камень.

13. Рассчитать удельный вес камня и записать его в табл. 1.1.

14. Пользуясь таблицей удельного веса и внешними признаками образца (цвет, особенности структуры), попытаться идентифици-

ровать исследуемый камень. Результаты идентификации записать в табл. 1.1.

15. Пункты 3–14 повторить для всех исследуемых образцов.

*Таблица 1.1*

### **Результаты измерений**

Порядковый номер образца	Масса образца, кар	Масса вытесненной воды, г	Удельный вес	Результаты идентификации образца

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие сведения об удельном весе и методах его определения.
3. Схема гидростатического взвешивания.
4. Результаты измерений (табл. 1.1).
5. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Понятие удельного веса.
2. Закон Архимеда и его использование для определения удельного веса.
3. Схемы гидростатического взвешивания.
4. Определение удельного веса с помощью пикнометра.
5. Определение удельного веса с помощью тяжелых жидкостей.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ В ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЯХ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРИСКОПА

**Цель работы** – получение практических навыков выявления двулучепреломляющих драгоценных камней с помощью полярископа.

#### Инструменты и принадлежности

1. Полярископ.
2. Набор образцов драгоценных камней.
3. Пинцет.
4. Коноскопическая линза.
5. Волновая фазовая пластинка.

#### Общие сведения

Явление двулучепреломления наиболее сильно выражено в исландском шпате (прозрачная крупнокристаллическая разновидность кальцита), и там же оно было впервые обнаружено. Если рассматривать через кристалл (а точнее, спайный выкол) исландского шпата линию, изображение или текст, то происходит их удвоение (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Двулучепреломление в кристалле исландского шпата

Удвоение связано с тем, что лучи света, испытывая преломление в кристалле, разделяются на две части: обыкновенный и необыкновенный лучи, которые имеют различный показатель преломления и распространяются под разными углами. Обыкновенный луч имеет показатель преломления, не изменяющийся при вращении кристалла, и подчиняется закону преломления Снеллиуса.

Показатель преломления необыкновенного луча изменяется при вращении кристалла, поэтому распространение необыкновенного луча не может быть описано законом Снеллиуса.

Обыкновенный и необыкновенный лучи являются линейно-поляризованными с взаимно перпендикулярными направлениями поляризации. В этом можно убедиться, наблюдая созданное кристаллом исландского шпата двойное изображение через поляризационный фильтр: при вращении фильтра происходит попеременное выделение одного из изображений, для которого направление поляризации луча совпадает с направлением поляризации фильтра (рис. 2.2).

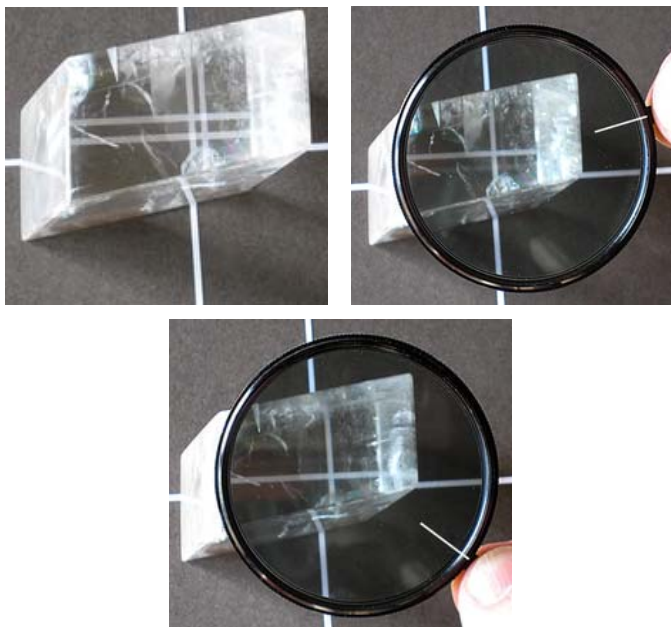


Рис. 2.2. Двулучепреломление в кристалле исландского шпата при наблюдении через поляризационный фильтр

Двулучепреломление в исландском шпате, по-видимому, было известно еще викингам. Для навигации в пасмурную погоду и в сумерках они использовали так называемые солнечные камни, которые, по мнению ряда исследователей, были кристаллами исландского шпата. Это подтверждается археологическими находками, обнаруженными на кораблях викингов.

Для использования кристалла исландского шпата в качестве навигационного прибора на одну из его граней наносилась темная непрозрачная метка, удвоенное изображение которой рассматривалось через противоположную грань. В общем случае изображения имеют различную интенсивность, однако поворачивая кристалл, можно найти положение, в котором интенсивности изображений уравниваются. В этом положении длинное ребро кристалла будет указывать на солнце.

Возможность навигации с помощью описанного способа связана с наличием у солнечного света линейной поляризации, которая вызвана рассеянием света на молекулах воздуха и частично сохраняется даже при прохождении света через облака. Существует также гипотеза, что солнечным камнем викингов являлся *иолит* – разновидность минерала кордиерита, обладающая сильным плеохроизмом (изменением цвета в зависимости от поляризации и направления проходящего через него света; см. лабораторную работу № 3).

В ограненных камнях с сильным двулучепреломлением (титанит, оливин, циркон, эпидот) ребра основания удваиваются при рассматривании через площадку коронки: этот эффект легко обнаруживается с помощью лупы (рис. 2.3).

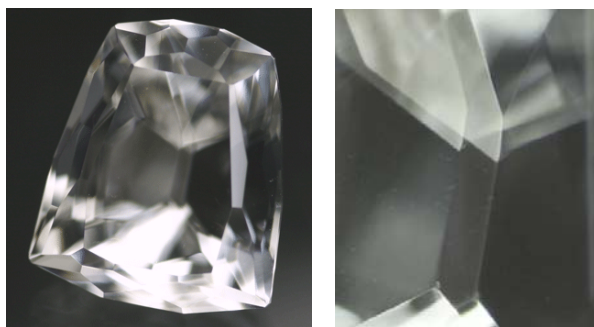


Рис. 2.3. Кажущееся удвоение ребер в ограненном колеманите

Удвоение ребер – это один из простейших признаков, позволяющих отличить синтетический форстерит, использующийся в качестве имитации танзанита, от танзанита: танзанит имеет двулучепреломление (разность показателей преломления для лучей разной поляризации) 0,008–0,013 и не демонстрирует сильного удвоения ребер, а форстерит имеет двулучепреломление 0,033–0,038 и демонстрирует сильное удвоение ребер. Форстерит  $Mg_2SiO_4$  является крайним членом ряда форстерит-фаялит  $Mg_2SiO_4-(Fe^{2+})_2SiO_4$ , промежуточные члены которого обычно называют оливином.

Двулучепреломление не наблюдается в изотропных материалах (например, стекле и пластмассах) и кристаллах кубической сингонии. Кристаллы всех остальных сингоний являются двулучепреломляющими.

В изотропных материалах и кубических кристаллах может наблюдаться *аномальное двулучепреломление*, связанное с наличием внутренних напряжений, под действием которых оптически изотропный материал становится локально анизотропным.

Эффект зависимости показателя преломления от напряжений называется *фотоупругостью* и используется для визуального наблюдения распределения напряжений в оптически прозрачных телах, а также моделирования напряженно-деформированного состояния сложных конструкций на моделях, изготовленных из оптически прозрачных материалов. Аномальное двулучепреломление может наблюдаться в таких кубических кристаллах, как алмаз (рис. 2.4), минералы группы граната и синтетическая шпинель.

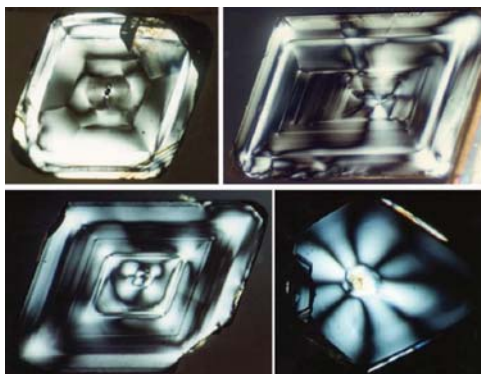


Рис. 2.4. Аномальное двулучепреломление в кристаллах алмаза

У кристаллов тетрагональной, гексагональной и тригональной сингоний существует направление, называемое **оптической осью** кристалла и совпадающее с направлением оси симметрии высшего порядка. Для этого направления лучи, распространяющиеся вдоль него, не испытывают двулучепреломления. Такие кристаллы называют **одноосными**. В кристаллах орторомбической, моноклинной и триклинной сингоний существуют две оптические оси, и такие кристаллы называют **двуосными**.

Для определения показателей преломления и направлений поляризации лучей, проходящих через двулучепреломляющие кристаллы, удобно использовать **оптическую индикатрису**. Оптическая индикатриса одноосного кристалла представляет собой эллипсоид вращения, круговые сечения которого перпендикулярны оптической оси кристалла (рис. 2.5).

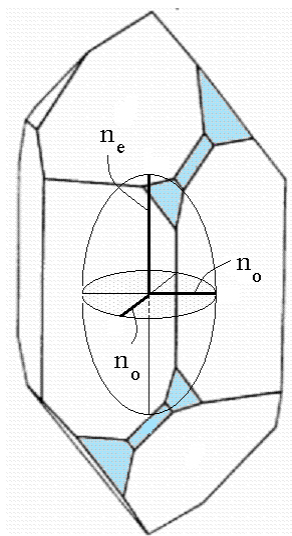


Рис. 2.5. Оптическая индикатриса кристалла кварца

Для определения показателей преломления необходимо провести сечение индикатрисы, проходящее через ее центр и перпендикулярное направлению падающего на кристалл луча. Это сечение в общем случае будет иметь вид эллипса, одна из полуосей которого, лежащая в экваториальной плоскости индикатрисы, будет всегда



иметь одинаковую длину  $n_o$  ( $n_o$ , индекс от англ. ordinary – обыкновенный), равную показателю преломления обыкновенного луча. Это означает, что при любом направлении падающего луча в результате преломления всегда будет возникать обыкновенный луч, подчиняющийся закону Снеллиуса.

Вторая полуось эллиптического сечения индикатрисы будет иметь длину в диапазоне от  $n_o$  до  $n_e$  ( $n_e$ , индекс от англ. extraordinary – необыкновенный), где  $n_e$  – длина полуоси индикатрисы, параллельной оптической оси кристалла. Длина этой полуоси будет соответствовать показателю преломления необыкновенного луча.

Направления поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей будут совпадать с направлениями полуосей эллиптического сечения индикатрисы. В частном случае, когда луч падает на кристалл в направлении оптической оси, эллиптическое сечение индикатрисы вырождается в круг с равными по величине полуосями. Это означает, что при падении луча в данном направлении необыкновенный луч не возникает, то есть отсутствует двулучепреломление.

В зависимости от соотношения величин  $n_o$  и  $n_e$  индикатриса может иметь вид вытянутого ( $n_o < n_e$ , рис. 2.5) или сплюснутого ( $n_o > n_e$ ) эллипсоида. Индикатриса в виде вытянутого эллипсоида характерна для *оптически положительных* одноосных кристаллов, для *оптически отрицательных* кристаллов характерна индикатриса в виде сплюснутого эллипсоида. Для запоминания вида индикатрисы положительных и отрицательных кристаллов можно использовать следующее мнемоническое правило: если считать, что оптическая ось кристалла направлена вертикально, то большая ось индикатрисы отрицательных кристаллов будет направлена горизонтально, так же как линия в знаке « $\rightarrow$ ».

В случае двуосных кристаллов оптическая индикатриса будет иметь вид эллипсоида, все три полуоси которого имеют различные длины, обозначаемые как  $n_g$  или  $n_\gamma$  (от франц. grand – большой),  $n_m$  или  $n_\beta$  (от франц. moyen – средний) и  $n_p$  или  $n_\alpha$  (от франц. petit – малый):  $n_\gamma > n_\beta > n_\alpha$ . Оптическая индикатриса двуосного кристалла имеет два круговых сечения с радиусом  $n_\beta$ , нормали к которым являются оптическими осями (обозначены как ОА) и образуют между собой угол  $2V$  (см. рис. 2.6).

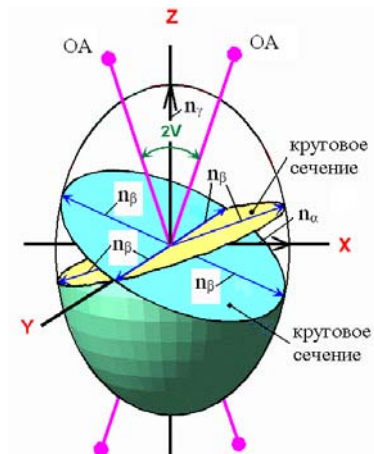


Рис. 2.6. Оптическая индикатриса двусосного кристалла

Оптические оси лежат в плоскости XZ, соответствующей полуосям индикатрисы  $n_\alpha$  и  $n_\gamma$ . Угол между оптическими осями всегда выбирается таким образом, чтобы он являлся острым, то есть в зависимости от соотношения полуосей индикатрисы биссектрисой этого угла может быть ось Z (оптически положительный кристалл, рис. 2.7, а) или ось X (оптически отрицательный кристалл, рис. 2.7, б).

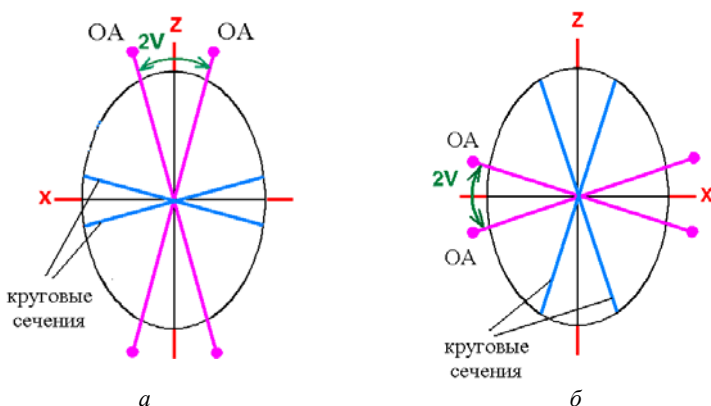


Рис. 2.7. Определение угла между оптическими осями:  
 а – для оптически положительного двусосного кристалла;  
 б – для оптически отрицательного двусосного кристалла

Для получения условий положительности и отрицательности кристалла в терминах его показателей преломления рассмотрим сечение индикатрисы плоскостью XZ. Координаты  $(x, z)$  точек, принадлежащих ограничивающему рассматриваемое сечение эллипсу, будут удовлетворять уравнению

$$\left(\frac{x}{n_\alpha}\right)^2 + \left(\frac{z}{n_\gamma}\right)^2 = 1. \quad (2.1)$$

В случае оптически положительного кристалла (см. рис. 2.7, а) угол, образуемый следом кругового сечения индикатрисы и осью X, будет равен углу  $V$ . С учетом этого координаты точки пересечения следа с эллипсом, ограничивающим рассматриваемое сечение индикатрисы, будут определяться выражениями

$$x = n_\beta \cos V, \quad z = n_\beta \sin V. \quad (2.2)$$

Подставляя выражения (2.2) в уравнение (2.1), после преобразований получим

$$\cos^2 V = \frac{n_\alpha^2 (n_\gamma^2 - n_\beta^2)}{n_\beta^2 (n_\gamma^2 - n_\alpha^2)}. \quad (2.3)$$

С учетом того, что величины  $n_\alpha$ ,  $n_\beta$  и  $n_\gamma$  очень незначительно различаются между собой, равенство (2.3) можно приближенно записать в виде

$$\cos^2 V \approx \frac{n_\gamma - n_\beta}{n_\gamma - n_\alpha}. \quad (2.4)$$

Для того чтобы угол  $2V$  был острым, необходимо, чтобы угол  $V$  был меньше  $45^\circ$ . С учетом выражения (2.4) это равносильно условию

$$\frac{n_\gamma - n_\beta}{n_\gamma - n_\alpha} > \frac{1}{2},$$

откуда вытекает условие положительности кристалла

$$n_{\beta} < (n_{\alpha} + n_{\gamma})/2.$$

Условие отрицательности кристалла имеет вид

$$n_{\beta} > (n_{\alpha} + n_{\gamma})/2.$$

В случае  $n_{\beta} = (n_{\alpha} + n_{\gamma})/2$  кристалл является двуосным без знака.

В кристаллах орторомбической сингонии оси оптической индикатрисы должны располагаться параллельно кристаллографическим осям  $a$ ,  $b$  и  $c$  (рис. 2.8,  $a$ , плоскость оптических осей заштрихована).

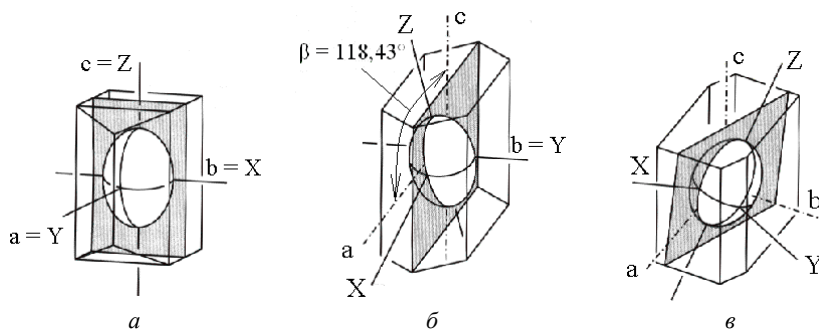


Рис. 2.8. Расположение оптической индикатрисы относительно кристаллографических осей для двуосных кристаллов различных сингоний:  $a$  – орторомбический кристалл (ставролит\*);  $b$  – моноклинный кристалл (гипс);  $v$  – триклинный кристалл (кианит)

*Примечание.* \* Согласно современным данным ставролит кристаллизуется в моноклинной сингонии с углом  $\beta$ , равным  $90,45^\circ$ .

В кристаллах моноклинной сингонии кристаллографическая ось  $b$ , перпендикулярная плоскости осей  $a$  и  $c$ , образующих между собой угол  $\beta$ , отличный от  $90^\circ$ , должна быть параллельна одной из осей индикатрисы (рис. 2.8,  $b$ ). В кристаллах триклинной сингонии индикатриса может располагаться относительно кристаллографических осей произвольным образом (рис. 2.8,  $v$ ).

В двuosном кристалле падающий луч в общем случае (при несовпадении направления его распространения с направлениями оптических осей) разделяется на быстрый  $f$  и медленный  $s$  лучи с взаимно перпендикулярными направлениями поляризации. Быстрому лучу соответствует показатель преломления  $n_f$ , удовлетворяющий условию  $n_a \leq n_f \leq n_b$  и равный длине малой полуоси эллиптического сечения индикатрисы, перпендикулярного направлению распространения луча  $\mathbf{k}$  (рис. 2.9).

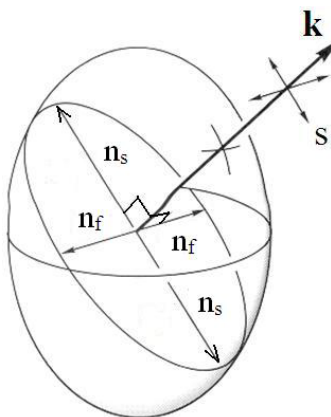


Рис. 2.9. Определение показателей преломления и направлений поляризации для двuosного кристалла

Медленному лучу соответствует показатель преломления  $n_s$ , удовлетворяющий условию  $n_b \leq n_s \leq n_\gamma$  и равный длине большой полуоси эллиптического сечения индикатрисы, перпендикулярного направлению распространения луча. Лучи называются быстрым и медленным, так как скорости их распространения обратно пропорциональны показателям преломления, то есть большему показателю преломления соответствует меньшая скорость распространения. Направления поляризации быстрого и медленного лучей параллельны направлениям соответствующих осей эллиптического сечения индикатрисы, перпендикулярного направлению падающего луча.

В лабораторной работе для исследования двулучепреломляющих драгоценных камней используется геммологический полярископ Fable (см. рис. 2.10).



Рис. 2.10. Геммологический полярископ

Полярископ состоит из установленных в корпусе 1 источника света, жестко закрепленного нижнего поляризационного фильтра (поляризатора) и закрепленного с возможностью вращения верхнего поляризационного фильтра (анализатора) 2. Между поляризатором и анализатором 2 помещается кювета 3 со стеклянным дном, в которую помещается исследуемый образец. Для установки кюветы 3 в боковой части корпуса 1 предусмотрена прорезь. Напряжение питания к источнику света подается от элемента питания 4, который устанавливается в нижней части корпуса 1 и закрепляется крышкой 5. В связи с тем, что в полярископе отсутствует выключатель, включе-

ние/выключение прибора производится путем поворота крышки 5. Перед началом исследования анализатор 2 поворачивается в положение скрещенных николей, то есть положение, в котором его плоскость поляризации перпендикулярна по отношению к плоскости поляризации поляризатора. В этом положении при отсутствии образца анализатор 2 пропускает минимальный световой поток, что соответствует темному полю зрения.

При 100 %-й эффективности поляризации в положении скрещенных николей свет будет полностью блокироваться анализатором, однако так как реальные поляризаторы не обладают 100 %-й эффективностью, анализатор в положении скрещенных николей будет пропускать незначительный по величине световой поток. Термин «скрещенные николи» связан с тем, что в старых приборах использовались не пленочные поляризаторы (поляроиды), а поляризаторы в виде призм Николя, изготавливаемых из исландского шпата.

Современные поляроиды представляют собой полимерную пленку из нитроцеллюлозы, содержащую микроскопические кристаллы герпатита (сульфата йодохирина, сернокислого йодохирина). Кристаллы ориентируются в одном и том же направлении путем растяжения пленки или приложения электрических или магнитных полей в процессе ее производства. В результате материал становится оптически анизотропным (двулучепреломляющим). При этом обыкновенный луч поглощается сильнее необыкновенного и практически полностью поглощается при толщине материала более 0,1 мм. В результате через материал проходит только линейно-поляризованный необыкновенный луч. В общем случае при вращении между скрещенными николями двулучепреломляющего камня камень будет периодически светлеть, при этом за полный оборот будет наблюдаться четыре просветления камня. Оптически изотропный аморфный (например, стекло) или макрокристаллический материал (кубические кристаллы) будет оставаться темным независимо от углового положения. Микрокристаллические и скрытокристаллические материалы (например, халцедон) являются оптически изотропными на макроскопическом уровне и оптически анизотропными на микроскопическом уровне. Так как микрокристаллы в таких материалах располагаются случайным образом, то при любом угловом положении образца будут находиться микрокристаллы, угловое положение которых соответствует максимальному пропусканию света через

анализатор. В связи с этим образцы из микро- и скрытокристаллических материалов будут оставаться светлыми независимо от углового положения.

В частном случае при ориентации оптической оси двулучепреломляющего камня в направлении, параллельном направлению распространения поляризованного света, камень будет вести себя как оптически изотропный. В связи с этим при обнаружении характерного для оптически изотропных камней поведения необходимо провести проверку на наличие двулучепреломления при другой ориентации камня относительно направления распространения света. Поведение двулучепреломляющего камня между скрещенными николями можно объяснить следующим образом.

Рассмотрим сечение оптической индикатрисы камня, перпендикулярное направлению распространения света. В случае совпадения направления распространения света с направлением оптической оси кристалла сечение индикатрисы будет иметь круговую форму. Это означает, что, независимо от углового положения этого сечения относительно направления поляризации света, свет будет проходить через кристалл в виде обыкновенного луча, сохраняя свое исходное направление поляризации. Так как это направление перпендикулярно направлению поляризации анализатора, свет не будет проходить через анализатор, и камень будет выглядеть темным независимо от своего углового положения. В случае несовпадения направления распространения света с направлением оптической оси кристалла сечение индикатрисы будет иметь эллиптическую форму. При совпадении направления одной из осей эллиптического сечения индикатрисы с направлением поляризации поляризатора свет будет проходить через кристалл, не изменяя своего направления поляризации, и будет блокироваться анализатором.

При совпадении направления поляризации с направлением оси, соответствующей обыкновенному лучу, свет будет проходить через кристалл в виде обыкновенного луча. Так как совпадение осей эллиптического сечения индикатрисы с направлением поляризации будет наблюдаться в четырех угловых положениях сечения, полному обороту камня будут соответствовать четыре погасания. В случае несовпадения направления поляризации с осями эллиптического сечения индикатрисы свет, проходя через кристалл, будет становиться эллиптически поляризованным, то есть вектор напряжен-



ности электрического поля световой волны будет описывать эллиптическую траекторию.

Пусть  $X$  и  $Y$  – направления осей эллиптического сечения индикатрисы,  $E_0$  – амплитуда напряженности поля линейно-поляризованного света, входящего в кристалл. Вектор  $E_0$  будет раскладываться на две составляющие  $E_{X0}$  и  $E_{Y0}$ , соответствующие обыкновенному и необыкновенному лучам, имеющим взаимно перпендикулярные направления линейной поляризации и распространяющимся в кристалле с разными скоростями (см. рис. 2.11).

Так как лучи распространяются с разной скоростью, то, пройдя через кристалл, они приобретут разность хода  $\delta$ , зависящую от толщины кристалла  $t$  и разности показателей преломления  $n_X$  и  $n_Y$ :

$$\delta = t \cdot (n_X - n_Y).$$

Взаимодействие двух смещенных по фазе линейно-поляризованных волн с взаимно перпендикулярными направлениями поляризации дает на анализаторе световую волну с напряженностью поля

$$E_A(t) = E_{X0} \cos(\omega t - \Delta\phi) + E_{Y0} \cos(\omega t) = E_{X0} \sin(\Delta\phi) \sin(\omega t) + (E_{X0} \cos(\Delta\phi) + E_{Y0}) \cos(\omega t), \quad (2.5)$$

где  $\Delta\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$  – фазовое смещение;

$\lambda$  – длина волны;

$\omega$  – круговая частота световой волны.

Скалярное умножение выражения (2.5) на  $E_{Y0}$  дает равенство

$$E_A(t) \cdot E_{Y0} = E_{Y0}^2 \cos(\omega t),$$

откуда

$$\cos(\omega t) = \frac{E_A(t) \cdot E_{Y0}}{E_{Y0}^2}. \quad (2.6)$$

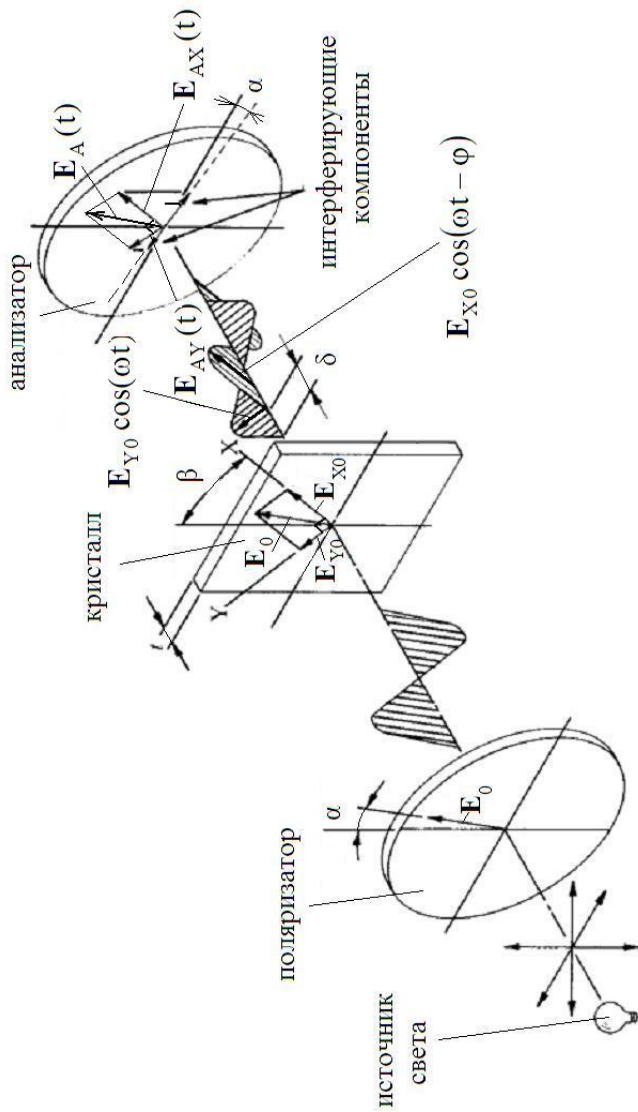


Рис. 2.11. Схема прохождения линейно-поляризованного света через кристалл в полярископе

При скалярном умножении выражения (2.5) на  $E_{X0}$  получается равенство

$$\begin{aligned} E_A(t) \cdot E_{X0} &= E_{X0}^2 \sin(\Delta\varphi) \sin(\omega t) + E_{X0}^2 \cos(\Delta\varphi) \cos(\omega t) = \\ &= E_{X0}^2 \sin(\Delta\varphi) \sin(\omega t) + \frac{E_{X0}^2}{E_{Y0}^2} \cos(\Delta\varphi) E_A(t) \cdot E_{Y0}, \end{aligned}$$

откуда

$$\sin(\omega t) = \frac{1}{E_{X0}^2} \csc(\Delta\varphi) E_A(t) \cdot E_{X0} - \frac{1}{E_{Y0}^2} \operatorname{ctg}(\Delta\varphi) E_A(t) \cdot E_{Y0}. \quad (2.7)$$

Подставляя выражения (2.6) и (2.7) в тождество  $\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$ , получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_{X0}^2} E_{AX}^2(t) + \frac{1}{E_{Y0}^2} E_{AY}^2(t) - \frac{2}{E_{X0} E_{Y0}} \cos(\Delta\varphi) E_{AX}(t) E_{AY}(t) - \\ - \sin^2(\Delta\varphi) = 0, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $E_{AX}(t) = \frac{1}{E_{X0}} E_A(t) \cdot E_{X0}$ ,  $E_{AY}(t) = \frac{1}{E_{Y0}} E_A(t) \cdot E_{Y0}$ .

Уравнение (2.8) представляет собой относительно компонент  $E_{AX}(t)$  и  $E_{AY}(t)$  уравнение кривой второго порядка. Анализируя коэффициенты этого уравнения, можно показать, что кривая является эллипсом.

Компоненты  $E_{AX}(t) \sin(\beta - \alpha)$  и  $E_{AY}(t) \cos(\beta - \alpha)$ , получаемые при проецировании векторов  $E_{AX}(t)$  и  $E_{AY}(t)$  на направление поляризации анализатора и подписанные на рис. 2.11 как интерферирующие компоненты, будут проходить через анализатор и интерферировать между собой. При этом среднее значение интенсивности света, проходящего через анализатор, будет оставаться отличным от нуля, что соответствует просветлению камня в промежуточных угловых положениях между положениями погасания.

Некоторые камни (например, коричневые и зеленые цирконы), содержащие примеси урана и тория, в результате воздействия радиации

становятся метамиктными, то есть происходит разрушение их кристаллической решетки, и камень становится аморфным. При отжиге метамиктные минералы могут снова переходить в кристаллическое состояние. При этом изменяются их плотность и показатель преломления.

Метамиктные и нормальные (кристаллические) цирконы известны, соответственно, как «низкие» и «высокие» цирконы, что связано с более высокими значениями плотности и показателя преломления у нормальных цирконов. Метамиктные камни при исследовании с помощью полярископа будут вести себя как оптически изотропные, хотя нормальный циркон относится к тетрагональной сингонии и является двулучепреломляющим. Также встречается метамиктный титанит. Огранке также подвергается метамиктный эканит, однако его использование в ювелирном деле ограничено радиоактивностью, связанной с наличием в кристаллической решетке тория в качестве существенного компонента.

Камни с аномальным двулучепреломлением могут быть ошибочно диагностированы как двулучепреломляющие. Чтобы избежать этого, можно использовать следующий прием.

Камень поворачивается между скрещенными николями в наиболее светлое положение, а затем анализатор быстро поворачивают на угол  $90^\circ$ . Если камень становится значительно светлее, это означает, что в нем наблюдается аномальное двулучепреломление. В случае двулучепреломляющих камней яркость остается примерно одинаковой.

Имея поляризационный фильтр, можно наблюдать двулучепреломление в камнях с учетом того, что жидкокристаллические мониторы (например, экраны компьютеров и некоторых мобильных телефонов) являются источниками линейно-поляризованного света. Для этого достаточно расположить фильтр относительно монитора таким образом, чтобы он пропускал минимум света, и вращать камень между фильтром и экраном.

Полярископ, снабженный дополнительным приспособлением, называемым коноскопической линзой, может быть использован для определения оптического характера камней (одноосные или двуосные). Коноскопическая линза представляет собой сферическую линзу, которая помещается между поляризатором и анализатором полярископа, и формирует интерференционную картину, называемую *коноскопической фигурой*. Вид коноскопической фигуры зависит от оптического характера камня (см. рис. 2.12).

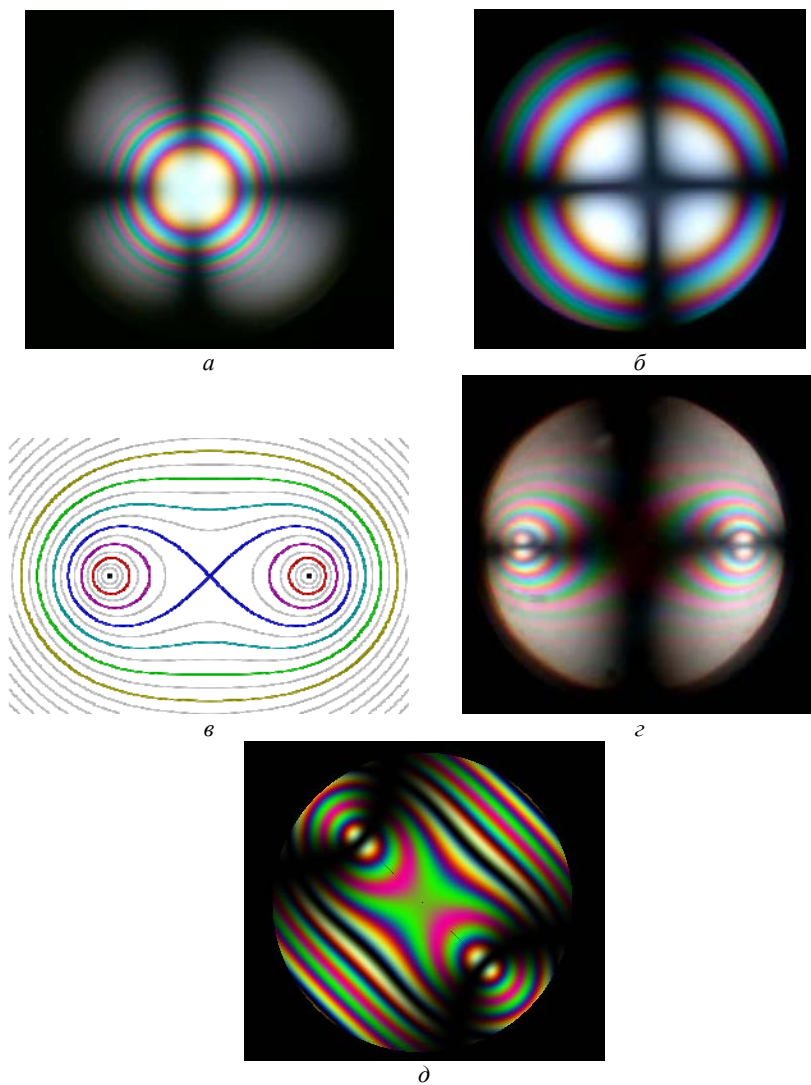


Рис. 2.12. Коноскопические фигуры для различных камней:  
*a* – для кварца в направлении оптической оси; *б* – для берилла в направлении оптической оси; *в* – схематическое изображение изохром для двуосного кристалла;  
*г* – для двуосного кристалла в направлении биссектрисы острого угла, угол поворота кристалла  $0^\circ$ ; *д* – для двуосного кристалла в направлении биссектрисы острого угла, угол поворота кристалла  $45^\circ$

В кварце в направлении, параллельном оптической оси, наблюдается коноскопическая фигура типа «бычий глаз» (рис. 2.12, а). Она состоит из круглых цветных интерференционных колец (*изохром*) и темного креста, ветви которого не доходят до центра колец. В других одноосных камнях ветви креста сходятся в центре интерференционных колец (см. рис. 2.12, б), что позволяет однозначно идентифицировать кварц по его коноскопической фигуре.

Крест в действительности состоит из двух *L*-образных кривых, называемых *изогирами*. Центр креста называется *мелатопом* и указывает на положение оптической оси. В случае двуосных кристаллов изохромы представляют собой овалы Кассини, которые имеют форму овалов или восьмеркообразных кривых (рис. 2.12, в). Восьмеркообразные овалы Кассини могут быть самопересекающимися (частный случай, известный как лемниската Бернулли) и распадаться на две изолированные замкнутые кривые.

У двуосных кристаллов на изогирах располагаются два мелатопа, указывающих на положение оптических осей и являющихся фокусами изохром. При угле поворота кристалла  $0^\circ$  изогиры имеют вид креста (см. рис. 2.12, з), а при угле поворота  $45^\circ$  они распадаются на две гиперболы. При этом изохромы поворачиваются вместе с кристаллом на угол  $45^\circ$  (см. рис. 2.12, д). При большом угле  $2V$  между оптическими осями одновременно видна только одна из двух изогир.

Для наблюдения коноскопических фигур в образцах типа больших плоскопараллельных пластин может быть использована лазерная указка (рис. 2.13).

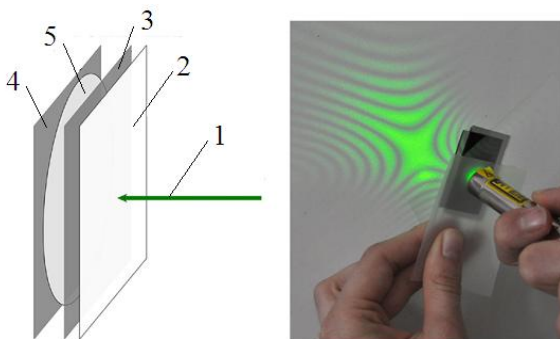


Рис. 2.13. Наблюдение коноскопических фигур с помощью лазерной указки

Излучение *1* лазерной указки направляется через рассеиватель *2* на скрещенные поляризатор *3* и анализатор *4*, между которыми помещен образец *5*. Изображение коноскопической фигуры наблюдается на расположенном за анализатором *4* экране. В качестве рассеивателя может быть использован лист белой бумаги.

В некоторых случаях (например, при исследовании с помощью полярископа сферических кабошонов) коноскопическая фигура может наблюдаться без использования коноскопической линзы; роль линзы играет в этом случае сам кабошон (рис. 2.14).

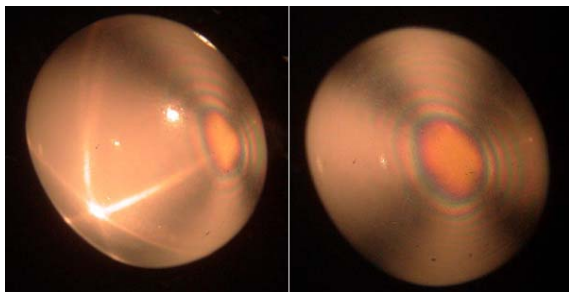


Рис. 2.14. Коноскопическая фигура в кабошоне из розового кварца с эффектом астеризма

Идеальным направлением для наблюдения коноскопической фигуры является направление оптической оси кристалла. Для отыскания этого направления можно использовать два приема. Первый из них состоит в рассматривании камня во всевозможных направлениях между скрещенными николями: направление, в котором на поверхности камня будет наблюдаться небольшая цветовая вспышка, является направлением оптической оси. Другой прием основан на том факте, что при вращении камня вокруг оптической оси между скрещенными николями он будет оставаться темным независимо от углового положения.

Если одна из граней ограненного камня выполнена примерно перпендикулярно направлению оптической оси, то коноскопическую фигуру можно наблюдать без применения коноскопической линзы, поместив на грань камня каплю контактной жидкости для рефрактометра, обладающей высоким показателем преломления  $n = 1,81$  (см. рис. 2.15).

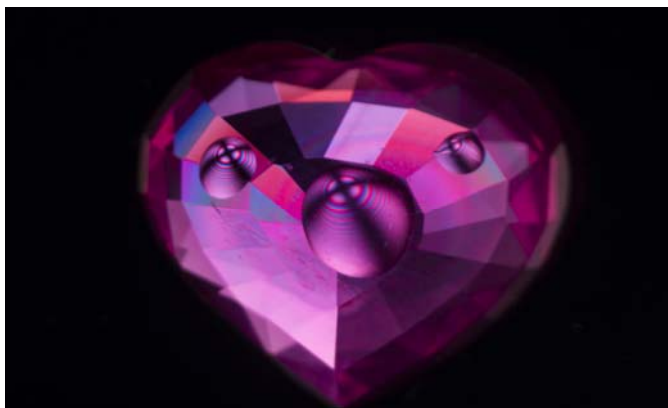


Рис. 2.15. Коноскопические фигуры в каплях контактной жидкости на поверхности рубина

Капля будет выполнять в этом случае роль линзы. Так как коноскопическая фигура в случае использования капли имеет малый размер, то ее приходится наблюдать через лупу.

Для определения оптического знака камня может быть использована **волновая фазовая пластинка**.

Фазовые пластинки представляют собой плоскопараллельные пластинки, вырезанные параллельно оптической оси из двулучепреломляющего материала, в качестве которого обычно используют гипс, слюду или кварц. Толщина волновой фазовой пластинки выбирается таким образом, чтобы для желто-зеленого света с длиной волны  $\lambda = 550$  нм между обыкновенным и необыкновенным лучами при прохождении через пластинку создавалась разность хода, равная одной длине волны. В этом случае анализатор полностью поглощает желто-зеленый свет, а поле зрения или изотропный материал, помещенный между поляризатором и анализатором, становятся пурпурными (смесь красного и синего цветов в равных пропорциях), так как пурпурный цвет является дополнительным по отношению к зеленому. Для определения оптического знака одноосных камней волновая фазовая пластинка вводится в полярископ непосредственно над или под камнем под углом  $45^\circ$  по отношению к направлению поляризации анализатора (см. рис. 2.16).



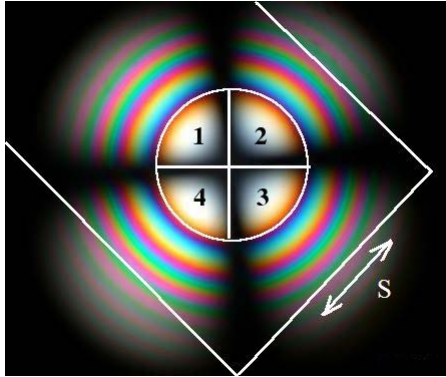


Рис. 2.16. Определение оптического знака одноосных камней

Направление поляризации медленного луча для фазовой пластинки обозначено буквой  $s$ . Характер изменения цветов, наблюдаемого в квадрантах 1–4 при введении фазовой пластинки, зависит от оптического знака камня. В частности, для оптически отрицательных камней квадранты 1 и 3 приобретают синий цвет, а квадранты 2 и 4 – желто-оранжевый. Для оптически положительных камней наблюдается противоположная картина. Изогиры в обоих случаях имеют пурпурный цвет.

В качестве дешевых фазовых пластинок могут быть использованы кусочки целлофана, в который заворачивают цветы. Направление рулона соответствует направлению поляризации быстрого луча.

Кварц и киноварь обладают эффектом **вращения плоскости поляризации**, который может наблюдаться с помощью полярископа и состоит в повороте плоскости поляризации линейно-поляризованного света при его прохождении вдоль оптической оси кристалла. Вращение плоскости поляризации может быть объяснено тем, что световая волна, линейно-поляризованная под углом  $\theta$ , может быть представлена в виде суммы двух световых волн с правой и левой круговыми поляризациями, имеющих фазовое смещение  $2\theta$  друг относительно друга:

$$\begin{aligned}
 E(t) &= E_R(t) + E_L(t) = E_0 \exp(j\omega t) + E_0 \exp(-j\omega t) \cdot \exp(j \cdot 2\theta) = \\
 &= E_0 \exp(j\theta) (\exp(j(\omega t - \theta)) + \exp(-j(\omega t - \theta))) = \\
 &= 2E_0 \exp(j\theta) \cos(\omega t - \theta),
 \end{aligned}$$

где  $E(t)$  – вектор напряженности поля линейно-поляризованной световой волны,  $E_R(t)$  – вектор напряженности поля световой волны с правой круговой поляризацией,  $E_L(t)$  – вектор напряженности поля световой волны с левой круговой поляризацией.

Здесь использовано комплексное представление вектора напряженности электрического поля световой волны, то есть для результирующего вектора компоненты по осям  $x$  и  $y$  будут определяться следующим образом:

$$E_x(t) = \operatorname{Re}(2E_0 \exp(j\theta) \cos(\omega t - \theta)) = 2E_0 \cos(\theta) \cos(\omega t - \theta),$$

$$E_y(t) = \operatorname{Im}(2E_0 \exp(j\theta) \cos(\omega t - \theta)) = 2E_0 \sin(\theta) \cos(\omega t - \theta).$$

Так как  $E_y/E_x = \operatorname{tg}(\theta)$ , то результирующая волна будет линейно-поляризованной под углом  $\theta$ .

Так как волны с правой и левой круговой поляризацией имеют разные показатели преломления  $n_R$  и  $n_L$ , то при их прохождении через кристалл толщиной  $t$  между ними будет возникать фазовое смещение, определяемое выражением

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi t(n_R - n_L)}{\lambda}.$$

Возникновение дополнительного фазового смещения равносильно повороту плоскости поляризации результирующей линейно-поляризованной волны на угол  $\Delta\varphi/2$ .

Вращение плоскости поляризации кристаллами кварца и киновари объясняется *хиральностью* их структуры. Под хиральным объектом понимают объект, зеркальное изображение которого не может быть совмещено с исходным объектом путем параллельных переносов и поворотов. Примером хирального объекта является рука: правая рука является зеркальным изображением левой, при этом правая и левая руки не могут быть совмещены. Сам термин «хиральность» происходит от греческого слова χεῖρ – рука. Кварц существует в природе в виде правой и левой форм, которые являются хиральными (см. рис. 2.17).

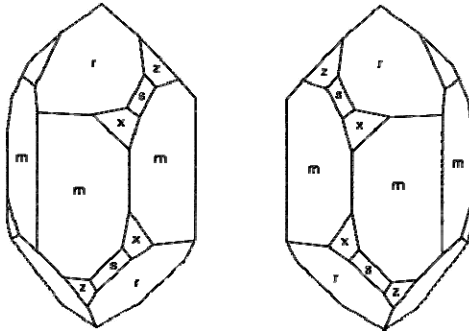


Рис. 2.17. Правая и левая формы кварца

Если из правого и левого кристаллов кварца вырезать пластинки равной толщины, перпендикулярные оптической оси, то они будут поворачивать плоскость поляризации на равную величину в противоположных направлениях, так как у одного из кристаллов  $n_{R1} > n_{L1}$ , а у другого  $n_{R2} < n_{L2}$ , при этом  $|n_{R1} - n_{L1}| = |n_{R2} - n_{L2}|$ .

Хиральность проявляется и в структуре кристаллической решетки кварца, в которой кремнийкислородные тетраэдры располагаются по винтовой линии (рис. 2.18, а).

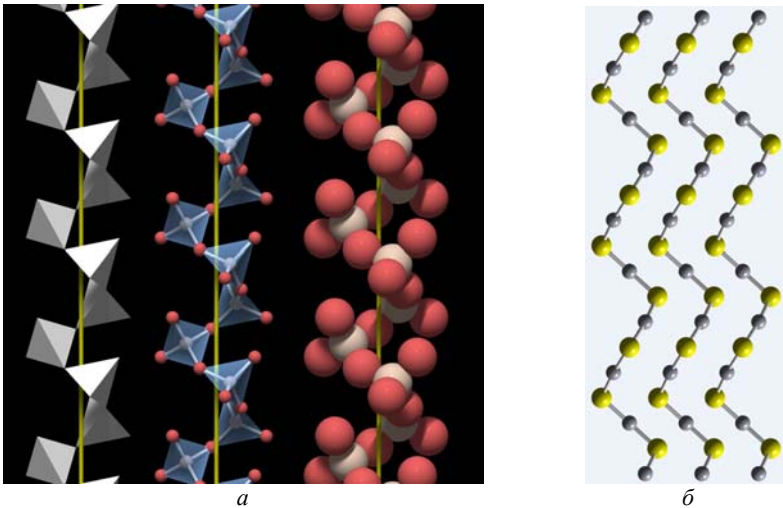


Рис. 2.18. Структура кристаллической решетки минералов, вращающих плоскость поляризации:  
а – кварц; б – киноварь

В зависимости от направления закручивания винтовой линии получаются правая и левая формы кварца. Винтовой структурой также обладает кристаллическая решетка киновари  $\text{HgS}$  (см. рис. 2.18, б).

Явление вращения плоскости поляризации кварцем открыл в 1812 г. французский физик Жан Батист Био. Он установил, что плоскопараллельные диски равной толщины, вырезанные из правого и левого кристаллов кварца, при их рассматривании между повернутыми друг относительно друга поляризатором и анализатором окрашиваются в разные цвета. Окрашивание возникает из-за того, что угол поворота плоскости поляризации кристаллом кварца зависит от длины волны. Это явление называется *дисперсией оптического вращения*.

Цвет, видимый при определенной ориентации анализатора, представляет собой цвет с длиной волны, для которой угол поворота плоскости поляризации соответствует направлению пропускания света анализатором. Цвета дисков различаются, так как они вращают плоскость поляризации в противоположных направлениях. Свет, который проходит через оба диска, не имеет цвета, так как углы поворота плоскости поляризации, создаваемые дисками, взаимно компенсируются. В случае прохождения линейно-поляризованного света через неравнотолщинную пластинку кварца окраска света, наблюдаемого через анализатор, будет изменяться по поверхности пластинки. При этом изохромы (линии, соответствующие одинаковой длине волны света) будут представлять собой линии равной толщины пластинки. Пластинка из кварца, вырезанная перпендикулярно оптической оси, при наблюдении между скрещенными николями будет выглядеть светлой независимо от углового положения, так как в результате вращения плоскости поляризации свет, прошедший через пластинку, будет иметь компоненту поляризации, параллельную направлению пропускания света анализатором.

### **Порядок выполнения работы**

1. Поворотом нижней крышки включить источник света полярископа.
2. Путем вращения анализатора установить анализатор и поляризатор в положение скрещенных николей, соответствующее минимальному пропусканию светового потока.

3. Поместить исследуемый камень в кювету и установить ее в боковую прорезь корпуса полярископа. Камень должен занимать устойчивое положение: например, огранный камень лучше класть на площадку коронки.

4. Вращать кювету вокруг оси, наблюдая изменение интенсивности проходящего через камень света.

5. Если камень в исследуемом положении ведет себя как оптически изотропный, то есть интенсивность проходящего через него света не меняется в зависимости от углового положения, то следует повторить пункты 3–4 в другом положении камня (например, поместив его на одну из боковых граней).

6. Сделать выводы о наличии или отсутствии у исследуемого камня двулучепреломления. Результаты занести в табл. 2.1.

7. Пункты 3–6 повторить для всех исследуемых образцов.

8. Уточнить у преподавателя наименования камней и, пользуясь справочной литературой, внести в таблицу сведения о сингонии исследуемых камней. Проанализировать связь между сингонией и наличием или отсутствием двулучепреломления.

9. Для выданных преподавателем образцов с помощью коноскопической линзы и волновой фазовой пластинки определить оптический характер и знак. Результаты занести в табл. 2.2.

*Таблица 2.1*

### **Результаты исследования наличия двулучепреломления**

Порядковый номер образца	Наименование камня	Наличие или отсутствие двулучепреломления	Сингония

*Таблица 2.2*

### **Результаты исследования оптического характера и знака**

Порядковый номер образца	Наименование камня	Оптический характер	Оптический знак

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения о двулучепреломлении.
3. Схема конструкции полярископа.
4. Результаты эксперимента (табл. 2.1 и 2.2).
5. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Сущность явления двулучепреломления. Обыкновенный и необыкновенный лучи и их поляризация.
2. Связь двулучепреломления с симметрией кристаллов.
3. Одноосные кристаллы и их оптическая индикатриса. Определение показателей преломления и направлений поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей с помощью оптической индикатрисы.
4. Положительные и отрицательные одноосные кристаллы.
5. Двуосные кристаллы и их оптическая индикатриса. Расположение оптической индикатрисы двуосных кристаллов относительно кристаллографических осей.
6. Условия положительности и отрицательности двуосных кристаллов.
7. Конструкция и принцип действия полярископа.
8. Методика исследования двулучепреломления с помощью полярископа. Поведение оптически изотропных, микрокристаллических и двулучепреломляющих материалов.
9. Причины изменения интенсивности света, проходящего через камень, помещенный между скрещенными николями полярископа.
10. Коноскопические фигуры и способы их наблюдения.
11. Вращение плоскости поляризации и дисперсия оптического вращения.

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕОХРОИЗМА В ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЯХ

**Цель работы** – получение практических навыков выявления плеохроизма в драгоценных камнях.

#### Инструменты и принадлежности

1. Дихроскоп.
2. Набор образцов драгоценных камней.
3. Пинцет.

#### Общие сведения

**Плеохроизмом** называют изменение цвета цветных двулучепреломляющих камней в зависимости от направления поляризации проходящего через них света. Оптически одноосные камни (минералы гексагональной, тригональной и тетрагональной сингоний) могут иметь два цвета, соответствующие обыкновенному (поляризованному в плоскости, перпендикулярной оптической оси) и необыкновенному (поляризованному в плоскости, проходящей через оптическую ось) лучам. Такое явление называют **дихроизмом**.

Оптически двуосные камни (минералы орторомбической, моноклинной и триклинной сингоний) могут иметь три цвета: такое явление называют **трихроизмом**.

Явление плеохроизма объясняется тем, что спектр поглощения проходящего через кристалл света зависит от направления поляризации. Например, для рубина (см. рис. 3.1) необыкновенный луч с поляризацией, параллельной оптической оси ( $E\parallel c$ ), имеет более слабое поглощение в желтой части спектра (565–590 нм), а обыкновенный луч с поляризацией, перпендикулярной оптической оси ( $E\perp c$ ), имеет более слабое поглощение в фиолетовой части спектра (380–440 нм).

В результате этого цвет рубина, соответствующий обыкновенному лучу, оказывается глубоким лилово-красным, а цвет, соответствующий необыкновенному лучу, становится бледным желтовато-красным.

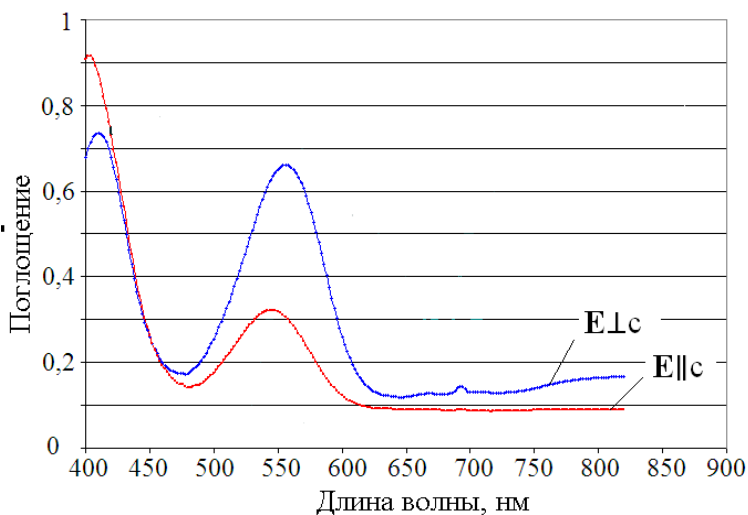


Рис. 3.1. Спектры поглощения поляризованного света в кристалле рубина

У сапфира цвет, соответствующий обыкновенному лучу, является глубоким синим, а цвет, соответствующий необыкновенному лучу, оказывается желтовато-синим. Отмеченные особенности цвета рубина и сапфира следует учитывать при огранке, располагая площадку перпендикулярно оптической оси (параллельно граням базального пинакоида). В этом случае ограненный камень будет иметь более глубокий и привлекательный цвет.

Исследование дихроизма может быть использовано в качестве косвенного признака для выявления рубинов и сапфиров, синтезированных методом Вернейля. Особенность метода Вернейля состоит в том, что после выращивания булы ее раскалывают вдоль оптической оси с целью снятия внутренних напряжений. При этом с точки зрения удобства огранки и размера получаемого камня в большинстве случаев площадку располагают при огранке параллельно плоскости раскола, то есть параллельно оптической оси, в то время как у природных камней площадку располагают перпендикулярно оптической оси. В результате этого у синтетических камней при прохождении света через площадку будет наблюдаться дихроизм, а у природных камней дихроизм в этом направлении наблюдаться не будет.



Плеохроизм проявляется и при рассматривании камня в обычном (неполяризованном) свете при изменении ориентации камня относительно направления взгляда. Это можно объяснить тем, что при рассматривании камня в направлении оптической оси весь проходящий через камень свет будет ослабляться в соответствии со спектром поглощения обыкновенного луча, а при рассматривании камня в направлении, перпендикулярном оптической оси, 50 % проходящего через камень света будет ослабляться в соответствии со спектром поглощения обыкновенного луча, а остальные 50 % – в соответствии со спектром поглощения необыкновенного луча.

Для исследования плеохроизма в драгоценных камнях пользуются специальным геммологическим прибором – **дихроскопом** (рис. 3.2).

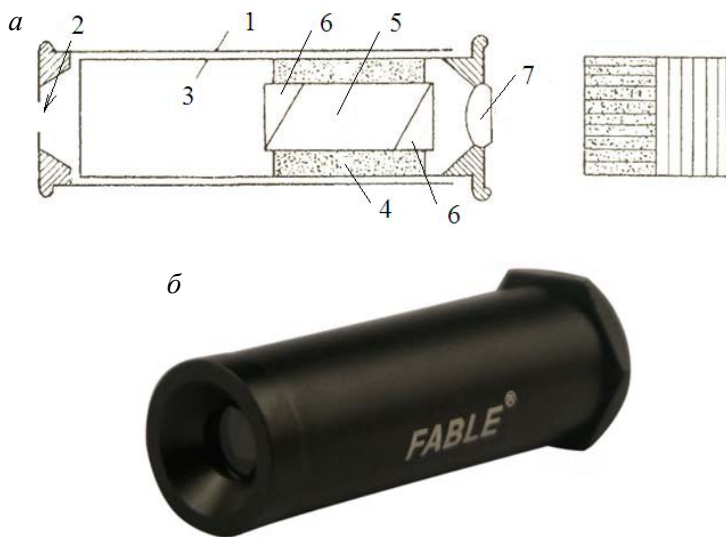


Рис. 3.2. Дихроскоп:  
*а* – схема конструкции; *б* – фотография

Дихроскоп состоит из трубки 1 с прямоугольным окном 2 и металлической трубки 3, в которой с помощью пробковой оправы 4 закреплена кальцитовая призма 5, создающая удвоенное изображение окна вследствие наличия у кальцита сильного двулучепре-

ломления. К кальцитовой призме приклеиваются две стеклянные призмы *b*, служащие для того, чтобы свет распространялся вдоль оси трубки. Удвоенное изображение окна с камнем (правая часть рис. 3.2, *a*) рассматривается с помощью окуляра 7. При этом изображения имеют взаимно перпендикулярные направления поляризации света и вследствие этого при наличии у камня плеохроизма будут иметь различный цвет. Одновременное наблюдение двух изображений упрощает сравнение цветов. Камень располагают перед окном дихроскопа, слегка касаясь его, а за камнем помещают источник яркого белого света. Исследование цвета ограненного камня с помощью дихроскопа производят в пяти направлениях (рис. 3.3): через площадку (1), через грани коронки в двух различных направлениях (2, 3) и через рундист в двух различных направлениях (4, 5).

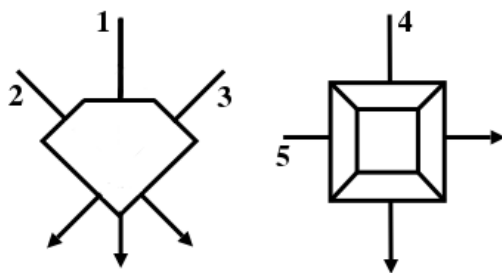


Рис. 3.3. Схема исследования плеохроизма в ограненном камне

Если все цвета оказываются одинаковыми, то камень оптически изотропен. Если наблюдается два цвета (дихроизм), то камень в большинстве случаев является одноосным (у некоторых двуосных камней, обладающих трихроизмом, два из трех цветов отличаются только интенсивностью и могут быть трудноразличимыми – такие камни могут быть диагностированы как дихроичные, хотя в действительности являются трихроичными). При наблюдении трех цветов (трихроизм) камень является двуосным. Некоторые камни, например, иолит, могут быть бесцветными для одного из направлений поляризации.

В табл. 3.1 приведен список камней, обладающих сильным плеохроизмом, с указанием цветов.

## Список камней, обладающих сильным плеохроизмом

Наименование камня	Цвета
Александрит – разновидность хризоберилла	темно-красный – оранжевый – темно-зеленый
Танзанит – разновидность цоизита	синий – пурпурный – зеленовато-желтый
Кунцит – разновидность сподумена	бесцветный – розовый – фиолетовый
Гидденит – разновидность сподумена	желто-зеленый – зеленый – сине-зеленый
Иолит – разновидность кордиерита	бесцветный (желтоватый) – бледно-синий – темный (фиолетово)-синий
Андалузит	желтый – оливково-зеленый – красно-коричневый
Аксинит	оливково-зеленый – красно-коричневый (фиолетовый) – желто-коричневый (у оранжевых (коричневых) камней)
Кианит	бесцветный (бледно-синий) – (зеленовато)-синий ((фиолетово)-синий) – темно-синий
Корнерупин	зеленый – желтый – красновато-коричневый (у зеленых камней)
Энстатит	розовато-красный (коричневый) – желтый – зеленый (у коричневых камней); желто-зеленый – зеленый (у зеленых камней)
Силлиманит	желтовато-зеленый – темно-зеленый – синий (у зеленых камней)
Сингалит	зеленый – светло-коричневый – темно-коричневый
Титанит	бесцветный – зеленовато-желтый – коричневатый (желтый) (у зеленых камней); бесцветный – желтый – красновато-оранжевый (у оранжевых (коричневых) камней); бесцветный – желто-зеленый – коричневато-оранжевый (у желтых камней)

Плеохроизм также можно наблюдать с помощью более простых способов: например, используя поляризационные фильтры или линейно-поляризованный свет жидкокристаллических мониторов.

При этом необходимо учитывать тот факт, что угол поляризации света, создаваемого экранами компьютеров, составляет  $45^\circ$  или  $135^\circ$ . Поэтому при расположении оптической оси кристалла параллельно плоскости экрана цвета, соответствующие обычному и необычному лучам, будут наблюдаться при углах поворота кристалла  $45^\circ$  и  $135^\circ$ .

### Порядок выполнения работы

1. Держа исследуемый камень с помощью пинцета, расположить его напротив источника яркого света.
2. Взяв в свободную руку дихроскоп, поднести камень к окну дихроскопа и зафиксировать цвета, наблюдаемые в удвоенном изображении окна.
3. Пункты 1–2 повторить для различных положений камня (см. рис. 3.3).
4. Сделать выводы о наличии или отсутствии у исследуемого камня плеохроизма. Результаты занести в таблицу (табл. 3.2).
5. Пункты 1–4 повторить для всех исследуемых образцов.
6. Уточнить у преподавателя наименования камней и, пользуясь справочной литературой, внести в таблицу сведения о сингонии исследуемых камней. Проанализировать связь между сингонией и наличием или отсутствием плеохроизма.

*Таблица 3.2*

### Результаты эксперимента

Порядковый номер образца	Наименование камня	Наличие или отсутствие плеохроизма	Сингония

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения о плеохроизме.
3. Результаты эксперимента (табл. 3.2).
4. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Сущность явления плеохроизма. Зависимость спектра поглощения от поляризации. Учет плеохроизма при обработке драгоценных камней.
2. Связь плеохроизма с симметрией кристаллов.
3. Конструкция и принцип действия дихроскопа. Методика исследования камней с помощью дихроскопа.
4. Примеры камней с сильным плеохроизмом.

## Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА

**Цель работы** – получение практических навыков определения показателя преломления драгоценных камней и идентификации драгоценных камней по показателю преломления.

#### Инструменты и принадлежности

1. Рефрактометр.
2. Контактная жидкость для рефрактометра.
3. Поляризационный фильтр.
4. Набор образцов драгоценных камней.

#### Общие сведения

Показатель преломления – одна из важнейших диагностических характеристик драгоценных камней. Под **показателем преломления** среды понимают отношение скорости света в вакууме  $c_0$  к скорости света  $c$  в среде:

$$n = c_0/c.$$

Для определения показателя преломления драгоценных камней обычно используют рефрактометр, принцип действия которого основан на явлении полного внутреннего отражения.

Сущность явления *полного внутреннего отражения* состоит в том, что лучи света, распространяющиеся из оптически более плотной среды (то есть среды с бóльшим показателем преломления  $n_1$ ) в менее плотную среду (с меньшим показателем преломления  $n_2$ ) при угле падения, превышающем критический угол, перестают проходить во вторую среду (рис. 4.1).

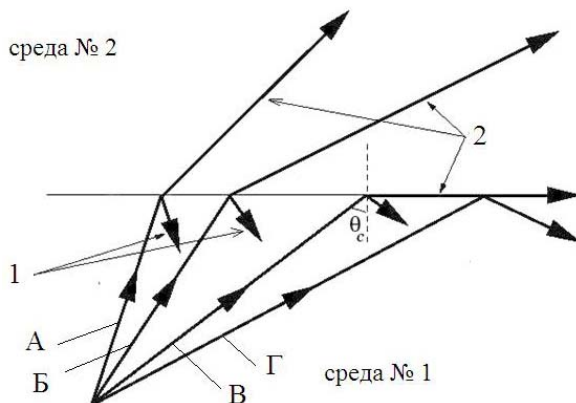


Рис. 4.1. Явление полного внутреннего отражения

Первые два луча А и Б, для которых угол падения меньше критического, частично отражаются обратно в среду № 1 (отраженные лучи 1) и частично проходят в результате преломления в среду № 2 (преломленные лучи 2). При этом согласно закону преломления Снеллиуса

$$\sin(\theta_1)/\sin(\theta_2) = n_2/n_1,$$

где  $\theta_1$  – угол падения;

$\theta_2$  – угол преломления.

Для третьего луча В, угол падения которого равен критическому углу, то есть  $\theta_1 = \theta_c$ , преломленный луч распространяется вдоль границы раздела сред, то есть  $\theta_2 = \pi/2$ . Это позволяет определить величину критического угла:

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1).$$

Четвертый луч Г, для которого  $\theta_1 > \theta_c$ , полностью отражается обратно в среду № 1, то есть испытывает полное внутреннее отражение.

Основным элементом конструкции рефрактометра (рис. 4.2) является призма, полуцилиндр или полусфера 1 из стекла с высоким показателем преломления (около 1,9).

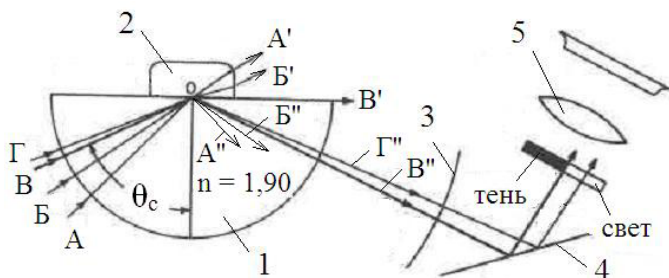


Рис. 4.2. Схема конструкции рефрактометра

Полированная поверхность исследуемого образца 2 помещается на плоскую полированную поверхность полуцилиндра. Для обеспечения надежного контакта между ними помещают тонкий слой контактной жидкости, показатель преломления которой должен быть выше показателя преломления образца и меньше показателя преломления материала полуцилиндра: например, жидкость с  $n = 1,81$ , поставляемая в комплекте с рефрактометрами, позволяет измерять показатель преломления до 1,81.

Лучи А и Б, угол падения которых меньше критического, частично проходят в исследуемый образец в виде преломленных лучей А' и Б', а луч Г, угол падения которого выше критического, испытывает полное внутреннее отражение. Угол падения луча В равен критическому углу, и после преломления он распространяется вдоль контактной площадки образца (луч В'). Отраженные лучи А''–Г'' попадают на шкалу 3, и так как для лучей с углом падения выше критического коэффициент отражения равен 100 %, а для лучей с углом падения ниже критического он резко снижается, то часть шкалы, освещаемая лучами, испытавшими полное внутреннее отражение, выглядит светлой, а остальная часть шкалы – затененной. Мнимое изображение шкалы, создаваемое с помощью зеркала 4, наблюдается через окуляр 5.

В качестве контактной жидкости при исследовании образцов с невысокими показателями преломления можно использовать монобромнафталин ( $C_{10}H_7Br$ ,  $n = 1,66$ ), насыщенный водный раствор тетраiodомеркура́та калия (жидкость Туле,  $K_2[HgI_4]$ ,  $n = 1,72$ ), диiodметан ( $CH_2I_2$ ,  $n = 1,74$ ) и диiodметан с серой ( $n = 1,79$ ). Стандартная контактная жидкость с  $n = 1,81$  представляет собой смесь диiodметана, тетраiodэтилена и серы. Контактные жидкости токсичны, и при работе с ними следует соблюдать меры предосторожности.

При использовании белого света определить точное положение границы затененной области на шкале рефрактометра сложно, так как показатель преломления зависит от длины волны (это явление называют *дисперсией*) и граница затененной области будет выглядеть как узкий спектр. Для получения четкой границы затененной области необходимо использовать монохроматический свет: например, желтый свет, излучаемый парами натрия (дублет с длинами волн 589 и 589,6 нм; показатель преломления, соответствующий такому свету, обозначают  $n_D$ , так как указанный дублет соответствует фраунгоферовой линии D<sup>1</sup>).

Для получения натрового света вещество, содержащее натрий (например, сода или поваренная соль) добавляется в пламя газовой горелки Бунзена. Также возможно использование спиртовки. При этом вещество, содержащее натрий, добавляется непосредственно в спирт или используется для пропитки фитиля. Недостатком является малая яркость света спиртовки. Показатели преломления, указываемые в геммологических таблицах, соответствуют натровому свету, поэтому следует пользоваться именно этим типом освещения.

Белым светом можно пользоваться в том случае, если между источником света и окном рефрактометра или на окуляре рефрактометра установлен желтый светофильтр. Ширина спектра, наблюдаемого на шкале рефрактометра при использовании белого света, может быть использована для количественной оценки дисперсии (разности между показателями преломления  $n_G$  и  $n_B$ , соответствующими фраунгоферовым линиям В и G с длинами волн 686,7 нм и 430,8 нм). Для этого рефрактометр калибруется по трем камням

---

<sup>1</sup> Фраунгоферовы линии – темные линии в спектре Солнца, возникающие в результате поглощения света Солнца холодным околосолнечным веществом. Обозначаются буквами латинского алфавита. Линия D соответствует натрию.



с примерно постоянной величиной дисперсии. Дисперсия может быть важным диагностическим показателем. Например, кварц и скаполит имеют перекрывающиеся диапазоны изменения основных геммологических свойств, таких как удельный вес, показатель преломления и двулучепреломление, и различаются лишь оптическим знаком (который может быть сложен для определения) и дисперсией. Дисперсией также различаются некоторые близкие по свойствам редкие драгоценные камни, такие как тааффеит и мусгравит.

Для камней, обладающих двулучепреломлением, на шкале рефрактометра будут наблюдаться две области затенения, соответствующие для одноосных кристаллов обыкновенному и необыкновенному лучам, а для двуосных кристаллов – быстрому и медленному лучам (рис. 4.3; показания составляют 1,653 и 1,690 и снимаются с точностью 0,001 путем интерполяции). Внизу шкалы также наблюдается слабая граница света и тени, соответствующая показателю преломления контактной жидкости (1,81).



Рис. 4.3. Вид шкалы рефрактометра для двулучепреломляющего камня

При исследовании одноосных камней в зависимости от ориентации оптической оси относительно столика рефрактометра при вращении камня могут наблюдаться три различных варианта изменения показателя преломления (см. рис. 4.4).

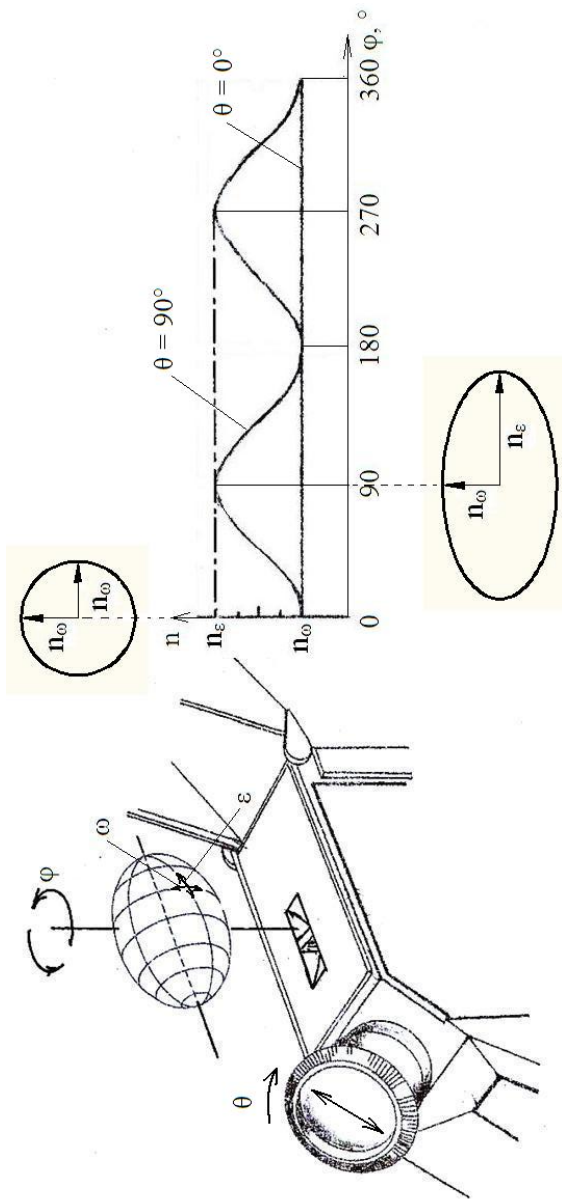


Рис. 4.4, а. Изменение показателя преломления одноосного оптически положительного камня как функция угла поворота  $\varphi$  в случае расположения оптической оси камня в плоскости столика рефрактометра

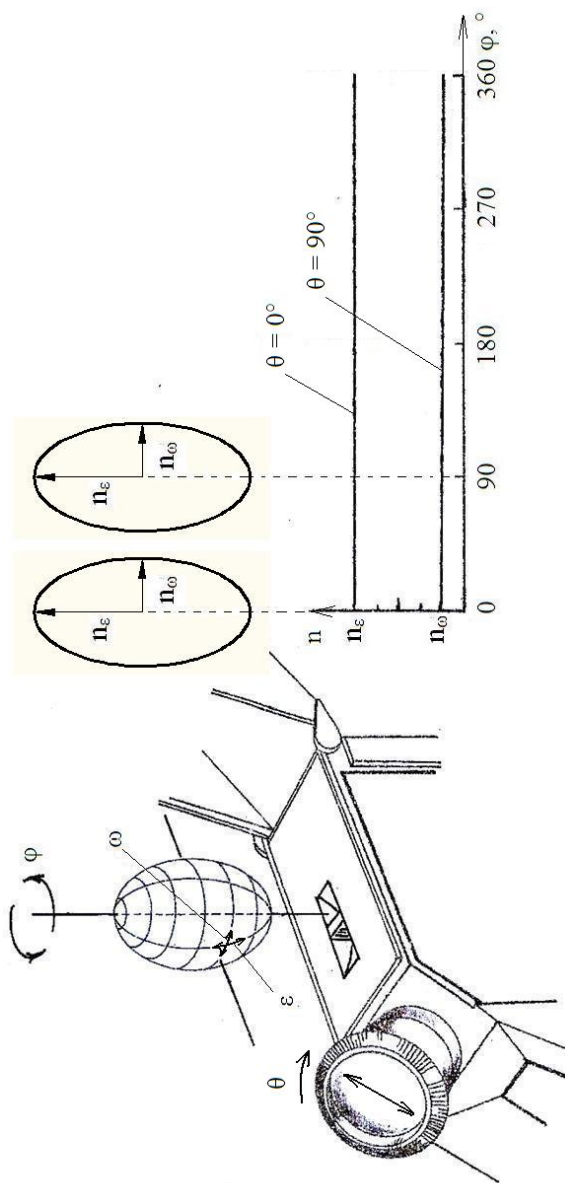


Рис. 4.4, б. Изменение показателя преломления одноосного оптически положительного камня как функция угла поворота  $\varphi$  в случае расположения оптической оси камня перпендикулярно плоскости столика рефрактометра

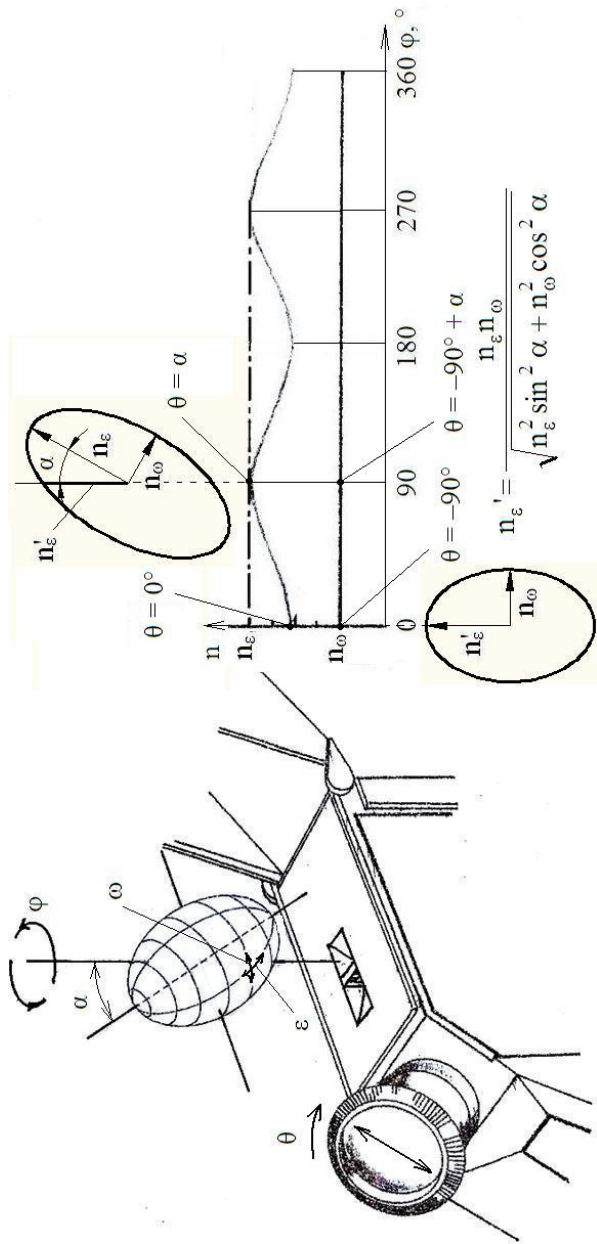


Рис. 4.4, в. Изменение показателя преломления одноосного оптически положительного камня как функция угла поворота  $\varphi$  в случае расположения оптической оси камня под произвольным углом  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

В *случае А* (рис. 4.4, а) оптическая ось камня располагается в плоскости столика рефрактометра, при этом при угле поворота камня  $\varphi = 0^\circ$  оптическая ось лежит в плоскости хода лучей. В *случае Б* (рис. 4.4, б) оптическая ось камня располагается перпендикулярно плоскости столика рефрактометра. В *случае В* (рис. 4.4, в) оптическая ось камня наклонена по отношению к плоскости столика рефрактометра под произвольным углом  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , при этом, как и в случае А, при угле поворота камня  $\varphi = 0^\circ$  оптическая ось лежит в плоскости хода лучей.

Представленные на рис. 4.4 зависимости могут быть объяснены с помощью оптической индикатрисы. Наблюдаемые с помощью рефрактометра значения показателя преломления соответствуют полуосям сечения индикатрисы, перпендикулярного длинной стороне призмы рефрактометра. Вид этого сечения для углов поворота  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  показан на рис. 4.4.

В *случае А* при угле поворота  $\varphi = 0^\circ$  сечение индикатрисы будет иметь форму круга с полуосями  $n_o$  и будут наблюдаться два одинаковых показателя преломления, соответствующих обыкновенному лучу. При угле поворота  $\varphi = 90^\circ$  сечение индикатрисы будет иметь форму эллипса с вертикальной полуосью  $n_o$  и горизонтальной полуосью  $n_e$  и будут наблюдаться два различных показателя преломления, соответствующих обыкновенному лучу с вертикальной поляризацией (угол поляризации  $\theta = 0^\circ$ ) и необыкновенному лучу с горизонтальной поляризацией (угол поляризации  $\theta = 90^\circ$ ).

Таким образом, верхний показатель преломления при изменении угла поворота камня от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  будет возрастать от  $n_o$  до  $n_e$  при постоянном угле поляризации  $\theta = 90^\circ$ , а нижний показатель преломления будет иметь постоянное значение  $n_o$  при постоянном угле поляризации  $\theta = 0^\circ$ . У оптически отрицательных камней постоянным будет оставаться верхний показатель преломления. Для наблюдения одного из двух показателей преломления на окуляр рефрактометра устанавливается поляризационный фильтр и его поворачивают таким образом, чтобы его направление поляризации совпало с направлением поляризации  $\theta$  луча, соответствующего данному показателю преломления. При угле поворота фильтра  $\theta = 0^\circ$  его направление поляризации располагается вертикально, что указано на рис. 4.4 стрелками.

В *случае Б* сечение индикатрисы, независимо от угла поворота, будет иметь форму эллипса с вертикальной полуосью  $n_e$  и горизонтальной полуосью  $n_o$  и будут наблюдаться два различных показателя преломления, соответствующих необыкновенному лучу с углом поляризации  $\theta = 0^\circ$  и обыкновенному лучу с углом поляризации  $\theta = 90^\circ$ . Оба показателя преломления и соответствующие им углы поляризации будут оставаться постоянными независимо от угла поворота камня.

В *случае В* при угле поворота  $\varphi = 0^\circ$  сечение индикатрисы будет иметь форму эллипса с вертикальной полуосью  $n_e'$  ( $n_o < n_e' < n_e$ ) и горизонтальной полуосью  $n_o$  и будут наблюдаться два различных показателя преломления, соответствующих лучам с углами поляризации  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = -90^\circ$ . При угле поворота  $\varphi = 90^\circ$  сечение индикатрисы будет иметь форму наклонного эллипса с большой полуосью  $n_e$  и малой полуосью  $n_o$  и будут наблюдаться два различных показателя преломления, соответствующих необыкновенному лучу с углом поляризации  $\theta = \alpha$  и обыкновенному лучу с углом поляризации  $\theta = -90^\circ + \alpha$ .

Таким образом, верхний показатель преломления при изменении угла поворота камня от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  будет возрастать от  $n_e'$  до  $n_e$  при возрастании угла поляризации от  $0^\circ$  до  $\alpha$ , а нижний показатель преломления будет иметь постоянное значение  $n_o$  при возрастании угла поляризации от  $-90^\circ$  до  $-90^\circ + \alpha$ .

В случае двуосных кристаллов существует три положения кристалла, в которых одно из показаний рефрактометра остается постоянным, а второе изменяется в зависимости от угла поворота камня. В этих положениях одна из осей индикатрисы X, Y или Z перпендикулярна контактной площадке камня (рис. 4.5, а).

В случае, когда контактной площадке перпендикулярна ось Z, а при угле поворота камня  $\varphi = 0^\circ$  ось Y располагается параллельно длинной стороне призмы рефрактометра, нижний показатель преломления при изменении угла поворота от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  будет возрастать от  $n_\alpha$  до  $n_\beta$  при постоянном угле поляризации  $\theta = 90^\circ$ , а верхний показатель преломления будет иметь постоянное значение  $n_\gamma$  при постоянном угле поляризации  $\theta = 0^\circ$ .

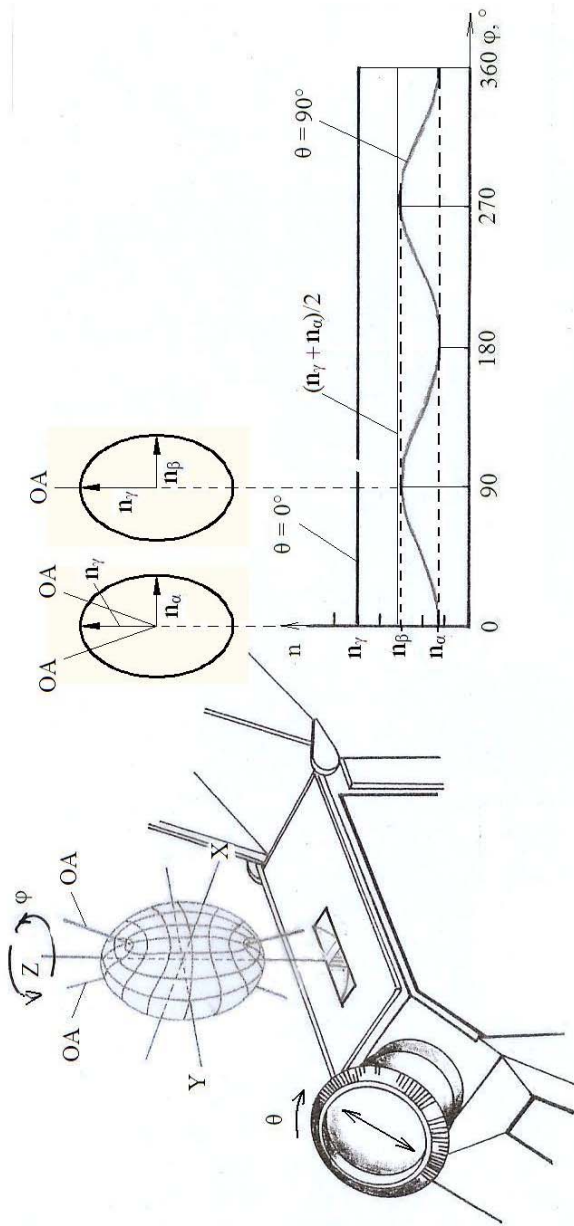


Рис. 4.5, а. Изменение показателя преломления двусного оптически положительного камня как функция угла поворота  $\theta$  в случае расположения оси Z индикатрисы перпендикулярно плоскости столика столика рефрактометра

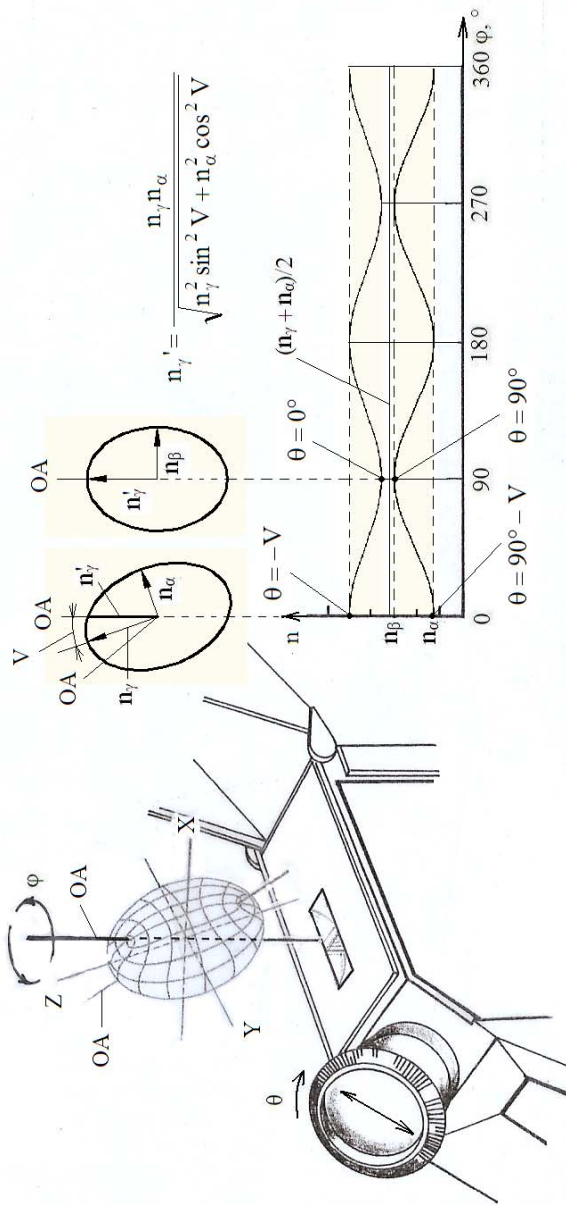


Рис. 4.5, б. Изменение показателя преломления двуосного оптически положительного камня как функция угла поворота  $\varphi$  в случае расположения оптической оси камня перпендикулярно плоскости столика рефрактометра



В случае произвольной ориентации контактной площадки оба показания рефрактометра будут изменяться. Например, в случае, когда одна из оптических осей перпендикулярна контактной площадке, а при угле поворота камня  $\varphi = 0^\circ$  ось Y располагается параллельно длинной стороне призмы рефрактометра (рис. 4.5, б), нижний показатель преломления при изменении угла поворота от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  будет возрастать от  $n_\alpha$  до  $n_\beta$  при возрастании угла поляризации от  $90^\circ - V$ , где  $V$  – половина угла между оптическими осями, до  $90^\circ$ , а верхний показатель преломления будет убывать от  $n_\gamma$  до  $n_\gamma'$  ( $n_\beta < n_\gamma' < n_\gamma$ ) при возрастании угла поляризации от  $-V$  до  $0^\circ$ .

В общем случае максимальное значение верхнего показателя преломления (показателя преломления медленного луча)  $\max(n_s)$  будет равно  $n_\gamma$ , а минимальное значение нижнего показателя преломления (показателя преломления быстрого луча)  $\min(n_f)$  будет равно  $n_\alpha$ . Величина  $n_\beta$  может быть равна либо минимальному значению показателя преломления медленного луча  $\min(n_s)$ , либо максимальному значению показателя преломления быстрого луча  $\max(n_f)$ . Из двух значений  $\min(n_s)$  и  $\max(n_f)$  за величину  $n_\beta$  принимается значение, для которого  $\theta \neq 0^\circ$ , например, на рис. 4.5, в это значение  $\max(n_f)$ , для которого  $\theta = 90^\circ$ . Величина  $n_\gamma - n_\alpha$  называется **двулучепреломлением** камня.

В лабораторной работе для определения показателя преломления драгоценных камней используется геммологический рефрактометр Fable (рис. 4.6).

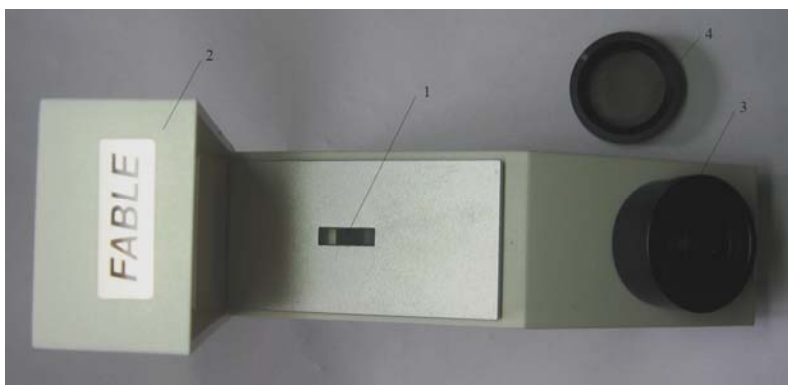


Рис. 4.6. Геммологический рефрактометр

На призму 1 рефрактометра помещается капля контактной жидкости, после чего на нее кладется исследуемый камень. Для минимизации влияния внешних источников света призма с камнем закрывается откидной крышкой 2. Рефрактометр имеет встроенный источник желтого света, который работает от элементов питания, устанавливаемых в нижней части прибора, или от сетевого адаптера. Включение источника света производится с помощью кнопки, расположенной на задней поверхности корпуса. Снятие показаний производится через окуляр 3 с установленным на нем поляризационным фильтром 4, на оправу которого нанесена метка, указывающая направление поляризации. **При работе с рефрактометром следует бережно обращаться с рабочей поверхностью измерительной призмы, так как прибор может прийти в негодность из-за механического повреждения призмы острыми ребрами и вершинами камней.**

На практике для измерения показателя преломления камень вращают на столике рефрактометра в пределах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $30^\circ$  или  $45^\circ$ , фиксируя показания для каждого из углов поворота. Для наблюдения одного из двух показателей преломления вращают поляризационный фильтр, установленный на окуляре рефрактометра. При этом нужно учитывать, что в случае наблюдения двух различных показателей преломления углы поляризации соответствующих им лучей различаются на  $90^\circ$ . Угол поворота фильтра  $\theta$  и значения показателя преломления заносят в таблицу, а затем записывают показатель преломления в виде диапазона и вычисляют величину двулучепреломления как разность верхней и нижней границ этого диапазона.

Приведем возможные ситуации.

1. На шкале наблюдается одно значение показателя преломления, не зависящее от угла поворота камня. В этом случае камень является оптически изотропным (аморфный материал или кристалл кубической сингонии).

2. На шкале наблюдаются два значения показателя преломления, не зависящие от угла поворота камня (рис. 4.4, б). В этом случае камень оптически одноосный с оптической осью, ориентированной перпендикулярно контактной площадке. Если большему показателю преломления соответствует угол поляризации  $\theta = 0^\circ$ , то камень является оптически положительным, а если большему показателю преломления соответствует угол поляризации  $\theta = 90^\circ$ , то камень является оптически отрицательным.

3. Один из показателей преломления  $n_1$  изменяется в зависимости от угла поворота камня, а второй показатель преломления  $n_2$  остается постоянным.

В этом случае возможны три варианта.

3.1. Каждому из показателей преломления соответствует постоянный угол поляризации, причем  $\min(n_1) = n_2$  (рис. 4.4, а) либо  $\max(n_1) = n_2$ . В случае  $\min(n_1) = n_2$ , то есть при постоянстве меньшего показателя преломления, камень будет являться одноосным оптически положительным, а в случае  $\max(n_1) = n_2$ , то есть при постоянстве большего показателя преломления, – одноосным оптически отрицательным. Оптическая ось камня ориентирована при этом параллельно контактной площадке.

3.2. Для каждого из показателей преломления угол поляризации соответствующего ему луча изменяется в зависимости от угла поворота камня (см. рис. 4.4, в). В этом случае камень оптически одноосный с оптической осью, ориентированной произвольным образом. При постоянстве меньшего показателя преломления камень будет являться оптически положительным, а при постоянстве большего показателя преломления – оптически отрицательным.

3.3. Каждому из показателей преломления соответствует постоянный угол поляризации, причем  $\min(n_1) \neq n_2$  и  $\max(n_1) \neq n_2$  (см. рис. 4.5, а). В этом случае камень является оптически двуосным с одной из осей индикатрисы ориентированной перпендикулярно контактной площадке. Оптический знак определяется путем сравнения величин  $n_\beta$  и  $(n_\alpha + n_\gamma)/2$ : в случае  $n_\beta < (n_\alpha + n_\gamma)/2$  камень оптически положителен, а в случае  $n_\beta > (n_\alpha + n_\gamma)/2$  – оптически отрицателен. В случае выполнения условий  $\max(n_1) > n_2$  и  $\min(n_1) < n_2$  (ось Y индикатрисы перпендикулярна контактной площадке) показатель преломления  $n_\beta$  равен постоянному показателю преломления  $n_2$ . В остальных случаях  $n_\beta = \min(n_1)$  при условии  $n_1 > n_2$  и  $n_\beta = \max(n_1)$  при условии  $n_1 < n_2$ .

4. Оба показателя преломления изменяются в зависимости от угла поворота камня (см. рис. 4.5, б). В этом случае камень является оптически двуосным с произвольной ориентацией осей индикатрисы. Оптический знак определяется путем сравнения величин  $n_\beta$  и  $(n_\alpha + n_\gamma)/2$ . Величина  $n_\beta$  определяется как одно из двух значений  $\min(n_s)$  или  $\max(n_\gamma)$ , для которого  $\theta \neq 0^\circ$ .

Для оценки показателя преломления камней, ограненных в виде кабошона, используется метод точечных измерений. Он позволяет оценить показатель преломления с точностью до 0,01. Шкала рефрактометра наблюдается с расстояния 25–30 см (это расстояние зависит от диаметра окуляра: чем меньше диаметр, тем меньше расстояние). Большое значение при измерениях имеет качество полировки поверхности: наиболее устойчиво положение камня, в котором вершина кабошона контактирует с призмой рефрактометра, однако при наличии на вершине дефектов необходимо держать камень руками в положении, в котором с призмой контактирует участок поверхности кабошона с наилучшим качеством полировки. На шкале должно быть видно имеющее форму овала изображение капли контактной жидкости, находящейся между кабошоном и призмой рефрактометра. При наклоне головы изображение капли перемещается по шкале и при этом меняется соотношение площадей затененной и светлой частей изображения.

Положение изображения, в котором это соотношение составляет 1 : 1, используется для снятия показаний: показатель преломления будет приблизительно соответствовать отметке шкалы, находящейся на границе затененной и светлой частей изображения капли (рис. 4.7, показание составляет 1,54).

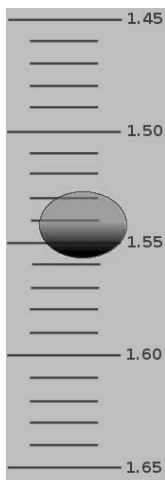


Рис. 4.7. Вид шкалы рефрактометра при снятии показаний методом точечных измерений

## Задание по работе

1. Ознакомиться с конструкцией и правилами эксплуатации рефрактометра.

2. С помощью рефрактометра определить показатели преломления, величину двулучепреломления и оптический характер выданных образцов драгоценных камней.

3. Пользуясь таблицей показателей преломления и внешними признаками выданных образцов (цвет, особенности структуры), попытаться идентифицировать исследуемые камни.

### Порядок выполнения работы

1. Нанести каплю контактной жидкости на рабочую поверхность измерительной призмы рефрактометра и положить без сильного нажима исследуемый образец плоской полированной поверхностью на призму. Крышка бутылочки с контактной жидкостью имеет специальную капельницу для нанесения капель на призму рефрактометра. Капля жидкости должна иметь очень малые размеры.

Для получения малой капли можно использовать следующий прием. Необходимо коснуться капельницей корпуса рефрактометра возле призмы несколько раз подряд, пока размер возникающей при этом капли не станет достаточно малым. Следующим касанием капли наносится на призму.

**После работы с контактной жидкостью необходимо тщательно вымыть руки. Бутылочку с контактной жидкостью следует очень плотно закрыть.** Если жидкость не используется на протяжении длительного времени, то крышку бутылочки можно герметизировать воском. Перед употреблением контактную жидкость следует встряхивать. Недопустимо наличие в контактной жидкости осадка.

2. Включить источник света.

3. Закрыть крышку рефрактометра.

4. Зафиксировать показания рефрактометра и соответствующие им значения угла поляризации. Результат занести в табл. 4.1.

5. Открыть крышку рефрактометра и повернуть камень на угол  $30^\circ$ .

6. Пункты 3–5 повторять до тех пор, пока угол поворота камня не составит  $180^\circ$ .

7. Выключить источник света.

8. Занести диапазон изменения показателя преломления в табл. 4.2.

9. Рассчитать величину двулучепреломления и занести ее в табл. 4.2.

10. Определить оптический характер и знак камня и записать их в табл. 4.2.

11. Пункты 1–10 повторить для всех исследуемых образцов.

*Таблица 4.1*

**Зависимость показателя преломления  
от угла поворота**

Угол поворота $\varphi$ , °	0	30	60	90	120	150	180
Показатель преломления $n_1$							
Угол поляризации $\theta_1$ , °							
Показатель преломления $n_2$							
Угол поляризации $\theta_2$ , °							

*Таблица 4.2*

**Оптические свойства и результаты  
идентификации образцов**

Порядковый номер образца	Показатель преломления	Двулучепреломление	Оптический характер	Результаты идентификации образца

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие сведения о показателе преломления и методах его определения.
3. Результаты измерений (табл. 4.1 и 4.2).
4. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Понятие показателя преломления. Явление полного внутреннего отражения. Расчет критического угла.
2. Конструкция рефрактометра. Источники света и контактные жидкости для рефрактометров.
3. Изменение показателя преломления одноосного камня как функция угла поворота. Объяснение наблюдаемых зависимостей с помощью оптической индикатрисы.
4. Изменение показателя преломления двуосного камня как функция угла поворота. Объяснение наблюдаемых зависимостей с помощью оптической индикатрисы.
5. Методика определения показателя преломления и величины двулучепреломления.
6. Методика определения оптического характера и знака камня.
7. Метод точечных измерений.

## Лабораторная работа № 5

### ОЦЕНКА ЧИСТОТЫ И СТОИМОСТИ БРИЛЛИАНТОВ

**Цель работы** – получение практических навыков оценки чистоты и стоимости бриллиантов с использованием критериев стандарта ГОСТ Р 52913-2008 и прейскурантов расчетных цен.

#### Инструменты и принадлежности

1. Пинцет.
2. Образцы бриллиантов с указанием массы.
3. Лупа-триплет с увеличением 10×.

#### Общие сведения

В соответствии со стандартом ГОСТ Р 52913-2008 «Бриллианты. Классификация. Технические требования» выделяют 9 групп чистоты (1, 2, ..., 9) для мелких бриллиантов массой до 0,299 кар и 13 групп чистоты (1, 2, ..., 7, 7а, ..., 12) для средних и крупных бриллиантов массой от 0,3 кар и выше.

При определении группы чистоты учитываются размеры и степень проявления (видимости) внутренних и внешних дефектов, а также зона их расположения (центральная, средняя или периферийная).

Под **центральной зоной** понимают часть объема бриллианта, ограниченную контуром площадки при просмотре со стороны площадки перпендикулярно к плоскости рундиста.

Под **периферийной зоной** понимают часть объема бриллианта, ограниченную с внешней стороны контуром рундиста, а с внутренней – воображаемым многоугольником, стороны которого проходят через общие вершины верхних и нижних клиньев короны. У бриллиантов ступенчатой огранки под периферийной зоной понимают часть объема, просматриваемую через ярус короны, примыкающий к рундисту.

Под **средней зоной** понимают часть объема бриллианта, расположенную между центральной и периферийной зонами.

При описании **размеров дефектов** используются следующие термины:



1. **Мельчайший дефект** – дефект, не имеющий различного объема и имеющий вид точки или полоски. По степени проявления относится к с большим трудом видимым дефектам.

2. **Мелкий дефект** – дефект, не имеющий различного объема или имеющий с большим трудом различимый объем. По степени проявления относятся к с трудом видимым дефектам.

3. **Незначительный дефект** – дефект, имеющий трудно различимый объем. По степени проявления относится к видимым дефектам.

4. **Небольшой дефект** – дефект, имеющий различимый объем. По степени проявления относится к легко видимым дефектам.

5. **Большой дефект** – дефект, имеющий вид объемного объекта. По степени проявления относится к хорошо видимым дефектам.

6. **Очень большой дефект** – дефект, имеющий вид объемного объекта. По степени проявления относится к очень хорошо видимым дефектам.

**Степень проявления дефектов** характеризуется следующими терминами:

1. **С большим трудом видимые дефекты** – дефекты, которые очень трудно обнаружить при долгом и внимательном изучении бриллианта со всех сторон при 10-кратном увеличении.

2. **С трудом видимые дефекты** – дефекты, которые трудно обнаружить при долгом и внимательном изучении бриллианта со всех сторон при 10-кратном увеличении.

3. **Видимые дефекты** – дефекты, которые можно обнаружить при внимательном просмотре бриллианта со всех сторон при 10-кратном увеличении.

4. **Легко видимые дефекты** – дефекты, которые достаточно легко можно обнаружить при внимательном просмотре бриллианта со всех сторон при 10-кратном увеличении, в том числе едва видимые невооруженным глазом.

5. **Хорошо видимые дефекты** – дефекты, которые легко можно обнаружить при 10-кратном увеличении, в том числе можно заметить невооруженным глазом.

6. **Очень хорошо видимые дефекты** – дефекты, которые очень легко обнаружить при 10-кратном увеличении, в том числе легко можно заметить невооруженным глазом.

Для обозначения **типов дефектов** используют следующие термины:

- 1) **точка** – мельчайший дефект, не имеющий объема;
- 2) **полоска** – дефект в виде тонкой линии;
- 3) **включение** – дефект, имеющий вид объемного объекта, различного размера, формы и цвета, находящийся внутри бриллианта;
- 4) **трещина** – разрыв в бриллианте, полностью внутренний или выходящий на поверхность;
- 5) **облако** – туманная (белесая) область, образованная скоплением мельчайших дефектов.

Критерии классификации бриллиантов по группам чистоты приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

### Критерии классификации бриллиантов по группам чистоты

Характеристики групп чистоты бриллиантов			Группа чистоты бриллианта	
Центральная зона бриллианта	Средняя зона бриллианта	Периферийная зона бриллианта	До 0,299 кар	От 0,3 кар
1	2	3	4	5
Без внутренних и внешних дефектов			1	1
Один мельчайший дефект в виде светлой точки, различимый только при просмотре бриллианта со стороны павильона	–	–	2	2
–	Не более двух мельчайших дефектов в виде светлых точек		2	2
–	Один мельчайший дефект в виде полоски		2	2
Не более трех мелких дефектов в виде светлых включений	–	–	3	3
–	Не более двух мелких дефектов в виде темных включений		3	3
–	Не более двух мелких дефектов в виде полоски		3	3
Не более двух мелких дефектов в виде темных включений	–	–	3	4

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5
Не более 4 незначительных дефектов в виде светлых включений			3	4
Не более двух незначительных дефектов в виде полосок			3	4
Не более одного незначительного дефекта в виде полоски и трех незначительных дефектов в виде светлых включений			3	4
–	–	Один незначительный дефект в виде трещины	3	4
Один незначительный дефект в виде светлого облака	–	–	4	5
Один незначительный дефект в виде трещины	–	–	4	5
Не более трех незначительных дефектов в виде темных включений	–	–	4	5
Не более шести незначительных дефектов в виде светлых включений и полосок			4	5
–	Не более трех мелких дефектов в виде трещин		4	5
Не более восьми мелких рассеянных дефектов в виде светлых включений, полосок, трещин, прозрачных объемных включений			5	6
До пяти незначительных дефектов в виде темных включений			5	6
Один незначительный дефект в виде объемного темного включения			5	6
Не более восьми мелких рассеянных дефектов в виде светлых и темных включений, полосок, трещин, облаков, прозрачных объемных включений			5	7
Один небольшой дефект в виде темного включения			5	7
Не более двух небольших дефектов в виде темных включений			5	7a
Не более двух небольших дефектов в виде трещин			5	7a
Не более одного небольшого дефекта в виде облака в сочетании с небольшим темным включением			5	7a
Несколько мелких дефектов в виде трещин в сочетании с небольшим темным включением			5	7a
Многочисленные небольшие дефекты в виде различных включений и трещин			6	8
Одна большая трещина			6	8
Многочисленные большие дефекты в виде различных включений, трещин			6	9

1	2	3	4	5
Многочисленные большие дефекты в виде различных включе-			6	9
Многочисленные очень большие дефекты различного вида и прозрачные для просмотра не менее 60 % граней павильона бриллианта			7	10
Многочисленные очень большие дефекты различного вида и прозрачные для просмотра от 60 % до 30 % граней павильона бриллианта			8	11
Многочисленные очень большие дефекты различного вида и прозрачные для просмотра менее 30 % граней павильона бриллианта			9	12

Для оценки стоимости бриллиантов может использоваться прейскурант № 54-01-01-2011 «Расчетные цены на бриллианты», утвержденный приказом Минфина РФ от 19 апреля 2011 г. № 46н.

Прейскурант устанавливает цены в долларах на бриллианты круглые Кр-17 и Кр-57 группы огранки «А». Цены на бриллианты фантазийных форм и бриллианты групп огранки «Б», «В» и «Г» определяются путем умножения на поправочные коэффициенты (табл. 5.2). При определении группы огранки учитываются пропорции, симметрия и качество полировки бриллианта (прил. В к ГОСТ Р 52913-2008). При выполнении лабораторной работы используются образцы бриллиантов с круглой бриллиантовой огранкой Кр-57, огранкой «ашер» Аш-41, огранкой «изумруд» И-65 и огранкой «радиант» Ра-69 (обозначения форм огранки по приложению Б к ГОСТ Р 52913-2008). Огранка Аш-41 имеет 13 граней короны (площадка + 3 яруса по 4 грани), 4 грани рундиста и 24 грани павильона (5 ярусов по 4 грани + 4 грани, идущие от углов рундиста к углам нижнего 5-го яруса и срезающие ребра 1-го-4-го ярусов). Огранка И-65 имеет 25 граней короны (площадка + 3 яруса по 8 граней), 8 граней рундиста и 32 грани павильона (4 яруса по 8 граней). Огранка Ра-69 имеет 25 граней короны (площадка + 1 ярус из 16 граней + 1 ярус из 8 граней), 8 граней рундиста и 36 граней павильона (1 ярус из 8 граней + 28 клиньев).

Таблица 5.2

**Поправочные коэффициенты для определения стоимости  
бриллиантов фантазийной огранки**

Форма огранки	Масса, кар		
	до 0,29	0,30-0,99	1,00 и выше
Груша, овал, маркиз	0,70	0,65	0,65
Принцесса	0,60	0,55	0,65
Изумруд	0,55	0,50	0,60
Радиант	0,55	0,50	0,55
Сердце, угловатый	0,65	0,60	0,60
Багет, квадрат, бриллиант	0,55	0,50	0,50

В соответствии с ГОСТ Р 52913-2008 для мелких бриллиантов (кроме Кр-17) выделяют 7 групп цвета, приведенных в табл. 5.3. Для средних и крупных бриллиантов выделяют 17 групп цвета, приведенных в табл. 5.4.

Таблица 5.3

**Группы цвета мелких бриллиантов**

Характеристики групп цвета бриллиантов	Цвет бриллианта
Бесцветные высшие, бесцветные бриллианты	1
С незначительным оттенком бриллианты	2
С небольшим желтоватым, сиреневым, серым и едва уловимым коричневым оттенком бриллианты	3
С явно видимым желтым, лимонным, серым и со слабо уловимым коричневым оттенком бриллианты	4
Желтые – с желтым, лимонным цветом во всем бриллианте, а также желтые с незначительным коричневым оттенком бриллианты	5
С видимым коричневым оттенком и серые бриллианты	6
Коричневые и желто-коричневые, черные бриллианты	7

**Группы цвета средних и крупных бриллиантов**

Характеристики групп цвета бриллиантов	Цвет бриллианта
Бесцветные высшие, а также с голубоватым оттенком	1
Бесцветные бриллианты	2
С едва уловимым оттенком бриллианты	3
С незначительным оттенком бриллианты	4
С незначительным желтоватым, сиреневым и серым, а также с незначительным коричневым оттенком бриллианты	5
С видимым желтым и серым оттенком бриллианты	6
С видимым коричневым оттенком бриллианты	6-1
С ясно видимым желтым, лимонным и серым оттенком бриллианты	7
Очень слабо окрашенные желтые бриллианты	8-1
Слабо окрашенные желтые бриллианты	8-2
Легко окрашенные желтые бриллианты	8-3
Светло-желтые бриллианты	8-4
Желтые бриллианты	8-5
Слабо окрашенные коричневые бриллианты	9-1
Легко окрашенные коричневые бриллианты	9-2
Коричневые бриллианты	9-3
Темно-коричневые, черные бриллианты	9-4

**Задание по работе**

1. Установить виды и размер (степень проявления) дефектов в выданных образцах бриллиантов. Результаты занести в таблицу.
2. Зарисовать расположение дефектов в образцах.
3. Определить группу чистоты образцов. Результаты занести в таблицу.
4. Пользуясь таблицами из прейскуранта, оценить стоимость образцов. Результаты занести в таблицу.

## Порядок выполнения работы

1. Очистить исследуемые образцы. Все операции по перемещению камней осуществляются с помощью пинцета. Камень берут со стола с помощью пинцета из положения, в котором камень лежит площадкой на столе. При наличии на губках пинцета насечки она используется для удержания рундиста камня.

2. С помощью лупы произвести внимательный осмотр образцов со всех сторон. Оценить размеры и степень проявления дефектов, а также их количество и виды. Результаты занести в табл. 5.5 и зарисовать расположение дефектов на схеме.

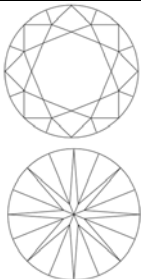
3. Пользуясь табл. 5.1, определить группу чистоты исследуемых образцов. Результаты занести в табл. 5.5.

4. Пользуясь табл. 5.3 и 5.4, определить группу цвета исследуемых образцов. Результаты занести в табл. 5.5.

5. Пользуясь таблицами прейскуранта № 54-01-01-2011, оценить стоимость исследуемых образцов. При оценке бриллиантов фантазийной огранки использовать поправочные коэффициенты из табл. 5.2. Результаты занести в табл. 5.5.

Таблица 5.5

## Результаты оценки бриллиантов

Порядковый номер образца	Виды и количество дефектов	Размеры (степень проявления) дефектов	Схема расположения дефектов	Группы чистоты и цвета образца	Оценочная стоимость образца, USD
					

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие сведения об оценке чистоты бриллиантов.
3. Результаты оценки (см. табл. 5.5).
4. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Группы чистоты бриллиантов и критерии их определения.
2. Размеры и степени проявления дефектов в бриллиантах.
3. Виды дефектов в бриллиантах.
4. Группы цвета бриллиантов.
5. Определение оценочной стоимости бриллиантов с помощью прейскурантов.



## Лабораторная работа № 6

# ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КАК ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ ПРИЗНАК ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

**Цель работы** – получение практических навыков исследования люминесценции в драгоценных камнях.

### Инструменты и принадлежности

1. Ультрафиолетовый светодиодный фонарик.
2. Лазерная указка с длиной волны 405 нм.
3. Набор образцов драгоценных камней.
4. Пинцет.

### Общие сведения

Под *люминесценцией* понимают нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения. В зависимости от источников энергии возбуждения различают следующие виды люминесценции, наблюдаемые в драгоценных камнях.

1. **Фотолюминесценция** – люминесценция под действием света (видимого или ультрафиолетового). Фотолюминесценцию можно разделить на два вида:

**флуоресценция** – фотолюминесценция со временем жизни  $10^{-9}$ – $10^{-6}$  с, наблюдаемая только в процессе воздействия на вещество возбуждающего света;

**фосфоресценция** – фотолюминесценция со временем жизни  $10^{-3}$ – $10$  с, которая может наблюдаться после прекращения воздействия на вещество возбуждающего света.

2. **Катодолюминесценция** – люминесценция под действием быстрых электронов («катодных лучей»).

3. **Радиолюминесценция** – люминесценция под действием ионизирующих излучений. Частным случаем является **рентгенолюминесценция**.

4. **Механолюминесценция** – люминесценция, возникающая при механических воздействиях на вещество. Включает в себя **трибо-**

*люминесценцию*, возникающую в результате трения или разрушения, и *пьезолюминесценцию*, возникающую при деформации вещества. Люминесценцию, возникающую при разрушении, иногда называют *фрактолюминесценцией*.

**5. Термолюминесценция** – люминесценция, возникающая при нагревании вещества.

Согласно легенде механолюминесценция была впервые обнаружена индейцами юте из штата Колорадо, которые использовали ее в своих ритуальных церемониях. Индейцы изготавливали из шкур бизона особые погремушки, заполненные кристаллами кварца. При потряхивании погремушки кристаллы кварца терлись и соударялись друг о друга, что приводило к появлению вспышек света, видимых через просвечивающую шкуру.

Английский философ и ученый Фрэнсис Бэкон наблюдал триболюминесценцию при раскалывании кристаллов сахара. Триболюминесценция наблюдается в кварце, сфалерите, флюорите, кальците, мусковите, минералах группы полевого шпата и некоторых образцах обыкновенного опала. Однако ее интенсивность изменяется от образца к образцу, поэтому ее нельзя рассматривать в качестве надежного диагностического признака. Вспышки света, возникающие при шлифовании и распиливании камней, могут быть как результатом нагрева, так и результатом триболюминесценции.

Катодолюминесценция и ее спектр – важные признаки при исследовании алмазов. Для исследования спектров катодолюминесценции может применяться электронный микроскоп, снабженный специальным оптическим детектором, состоящим из оптического волокна, монохроматора и фотоэлектронных умножителей.

Явление рентгенолюминесценции используется в алмазодобывающей промышленности для сепарации алмазов из вмещающей породы.

Интересный пример камней, демонстрирующих термолюминесценцию, – это алмазы типа IaB, практически не содержащие азотных центров типа А. При охлаждении в жидком азоте до температуры около 77 К, облучении лазером с длиной волны 325 нм и последующем нагревании до комнатной температуры такие алмазы демонстрируют голубую термолюминесценцию с интенсивностью от очень слабой до сильной и временем жизни до 2 с. Предполагаемая причина термолюминесценции – в высокой концентрации цент-

ров типа N3, обычно сопутствующих центрам типа А и В. При этом с увеличением концентрации центров типа А интенсивность люминесценции снижается, так как центры типа А известны как гасители люминесценции.

Причина фотолюминесценции обычно заключается в наличии в камне примесных ионов или атомов, называемых **активаторами**, хотя существуют минералы, которые способны к фотолюминесценции без введения в их состав активаторов: примеры – минералы свинца (например, англезит и церуссит; причина фотолюминесценции – ион  $Pb^{2+}$ ), минералы урана (причина фотолюминесценции – уранил-ион  $UO_2^{2+}$ ), минералы молибдена (например, повеллит и миметит; причина фотолюминесценции – молибдат-ион  $MoO_4^{2-}$ ) и минералы вольфрама (например, шеелит и штольцит; причина фотолюминесценции – вольфрамат-ион  $WO_4^{2-}$ ).

У одних и тех же камней в зависимости от вида активаторов могут наблюдаться различные цвета фотолюминесценции. Помимо активаторов, существуют **гасители фотолюминесценции**, примерами которых являются ионы  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  и  $Ni^{2+}$ . Например, интенсивность фотолюминесценции у природных рубинов и изумрудов обычно значительно ниже, чем у их синтетических аналогов, так как природные камни содержат по сравнению с синтетическими значительное количество ионов железа. В табл. 6.1 приведен перечень наиболее распространенных активаторов фотолюминесценции и камней, в которых они могут присутствовать.

Таблица 6.1

### Активаторы фотолюминесценции и содержащие их камни

Активатор фотолюминесценции	Камни, в которых присутствует активатор	Цвет фотолюминесценции	
		В коротковолновом ультрафиолете	В длинноволновом ультрафиолете
1	2	3	4
$S_2^-$	Содалит, в том числе гакманит	Желтовато-белый	Оранжевый
	Тугтупит	Оранжево-красный	Оранжевый
	Гаюин, в том числе лазурит	Красный	Оранжево-красный
	Афганит	Оранжевый	Желтый

Окончание табл. 6.1

1	2	3	4
$UO_2^{2+}$	Опал	Зеленый	Зеленый
N	Алмаз	–	Голубовато-белый
$Eu^{2+}$	Флюорит	Фиолетовый	Фиолетовый
	Данбурит	Голубой	Голубой
$Cr^{3+}$	Александрит – разновидность хризоберилла	Красный	Красный
	Рубин – разновидность корунда	Красный	Красный
	Синий сапфир – разновидность корунда	–	Слабый красный или розовый (иногда)
	Изумруд – разновидность берилла	–	Слабый красный или оранжево-красный
	Красная шпинель	Красный	Красный
	Земляничный гроссуляр (Мексика)	Красный	Красный
	Уваровит	–	Красный
	Пеццогаит	–	Красный
	Кианит	Красный	Красный
Органические вещества	Янтарь	Желтовато-белый	Голубовато-белый
$Mn^{2+}$	Гидденит – разновидность сподумена	Оранжевый	Оранжево-красный
	Кунцит – разновидность сподумена	Оранжевый	Оранжево-красный
	Скаполит	Оранжевый	Желтый
	Родохрозит	Красный	Красный
	Родонит	–	Красный
	Кальцит	–	Розовый
$TiO_6$	Бенитоит	Голубовато-белый	–

Камни, приобретающие красный цвет при рассматривании через фильтр Челси, всегда обладают флуоресцентными свойствами, так как ион хрома, наличие которого определяется с помощью фильтра Челси, является сильным активатором флуоресценции.

В синтетических алмазах, синтезированных методом HPHT, при исследовании флуоресценции часто наблюдается фигура в виде креста (рис. 6.1).

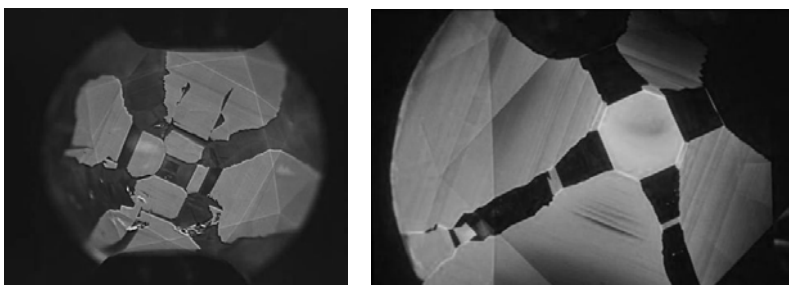


Рис. 6.1. Флуоресценция в синтетических алмазах

Международным институтом оценки и исследования алмазов IGDG разработан и внедрен в геммологическую практику прибор DiamondView, который позволяет наблюдать увеличенное флуоресцентное изображение алмаза в различных ориентациях на мониторе персонального компьютера (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Прибор DiamondView

Для наблюдения флуоресценции выпускаются специальные просмотровые боксы, снабженные источниками длинно- и коротковолнового ультрафиолетового излучения и защитным стеклом, предо-

храняющим глаза оператора от воздействия ультрафиолетового излучения (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Просмотровый бокс для наблюдения флуоресценции

Флуоресценция наблюдается на стандартизованных длинах волн 253,7 и 365,4 нм – линии спектра испускания ртути, используемой в ультрафиолетовых лампах. Использование других длин волн может привести к наблюдению флуоресцентной реакции, отличной от указанной в геммологических таблицах.

Исследование флуоресценции необходимо проводить в затененном помещении, избегая света от источников, спектр излучения которых может содержать ультрафиолетовую составляющую (например, солнца и люминесцентных ламп).

В некоторых случаях может быть полезным наблюдение флуоресценции с помощью микроскопа, особенно в тех случаях, когда хромофоры и активаторы флуоресценции имеют зональное распределение по объему камня.

Флуоресценция во многих случаях позволяет эффективно отличать синтетические камни от природных: например, синтетические шпинели демонстрируют при флуоресценции цвета, не характерные для природных. Флуоресценция также может служить индикатором облагораживания камня

У большинства минералов и драгоценных камней флуоресценция наблюдается только при воздействии достаточно интенсивного

ультрафиолетового излучения: например, излучения ультрафиолетовой лампы или ультрафиолетовых светодиодов. Вместе с тем слабое по интенсивности ультрафиолетовое излучение содержится в обычном дневном свете, и в некоторых редких случаях его интенсивность оказывается достаточной для возбуждения флуоресценции. Это явление называется флуоресценцией в дневном свете. Классическим примером драгоценных камней, демонстрирующих флуоресценцию в дневном свете, являются рубины с высоким содержанием хрома: на солнечном свету их цвет становится более насыщенным, так как ультрафиолетовая составляющая солнечного света вызывает испускание камнем красного флуоресцентного излучения.

Флуоресценция в дневном свете также наблюдается у некоторых алмазов. Например, бриллиант Тавернье массой 56,07 кар демонстрирует ложный александритовый эффект: его основной цвет меняется со светло-коричневого (оранжевого) в свете лампы накаливания на светло-розовый (пурпурный) в дневном свете. Причина этого явления – в сильной голубой флуоресценции, возникающей в бриллианте под действием длинноволнового ультрафиолетового излучения.

Существует также разновидность алмазов, известная как «зеленый передатчик», или «шартрёз» (Chartreuse – название марки ликера желто-зеленого цвета). Их цвет меняется с желтовато-коричневого при свете лампы накаливания на желтовато-зеленый или зеленовато-желтый в дневном свете. Причиной изменения цвета у таких алмазов является сильная зеленая флуоресценция в ультрафиолетовом излучении.

Зеленые флюориты из рудника Роджерли (Rogerley mine, Великобритания) демонстрируют сильную голубую флуоресценцию в длинноволновом ультрафиолетовом излучении, а также флуоресценцию в дневном свете. Возможной причиной флуоресценции у флюоритов из рудника Роджерли считают примеси редкоземельных элементов, в частности, иттрия и лантана.

Флуоресценция в дневном свете также наблюдается у натечного опала (гиалита) из Центральной Мексики. Он практически бесцветен при свете лампы накаливания и желто-зеленым при дневном свете. В коротковолновом и длинноволновом ультрафиолетовом излучении дает яркую зеленую флуоресценцию. Причина флуоресценции – уранил-ион  $UO_2^{2+}$ .

Эффект флуоресценции в дневном свете также наблюдается в голубом янтаре из Доминиканской Республики и Индонезии. Голубой янтарь имеет основной цвет от желтого до оранжево-красного, а поверхностный зеленовато-голубой цвет возникает в результате флуоресценции под действием ультрафиолетовой составляющей дневного света.

Причина флуоресценции – ароматический углеводород перилен, обнаруженный в составе янтара. Спектр пропускания света голубым янтарем характеризуется монотонным возрастанием коэффициента пропускания в диапазоне длин волн от 450 до 760 нм с длиной волны среза 450 нм и длиной волны на уровне пропускания 50 % 530 нм. В связи с этим возбуждающее флуоресценцию ультрафиолетовое излучение с длиной волны менее 450 нм не может проникать в янтарь и возбуждает флуоресценцию только на его поверхности. Спектр флуоресценции имеет три пика на длинах волн 450, 485 и 500 нм. Составляющие флуоресцентного излучения с длинами волн 485 и 500 нм могут проникать на незначительную глубину внутрь янтара. Интенсивность флуоресценции очень мала по сравнению с интенсивностями отраженного и проходящего света с длинами волн, соответствующими основному цвету янтара. Малая интенсивность флуоресценции в сочетании с малой глубиной ее проникновения не позволяют флуоресценции изменить основной цвет янтара, то есть вызвать ложный александритовый эффект, как это происходит в случае бриллианта Тавернье. Поверхностный зеленовато-голубой цвет янтара наблюдается лишь при его рассматривании на черном фоне (экране), так как в этом случае снижается до минимума количество отраженного от экрана света, который при прохождении через камень подчеркивает его основной цвет. При наблюдении в обычных условиях, в частности на белом фоне, проявляется лишь основной цвет камня.

В качестве источников возбуждающего света для исследования фотолюминесценции могут использоваться ультрафиолетовые светодиоды и ртутные лампы. Ртутные лампы среднего давления представляют собой трубку 3 из чистого кварцевого стекла, заполненную аргоном с небольшим количеством ртути (см. рис. 6.4).



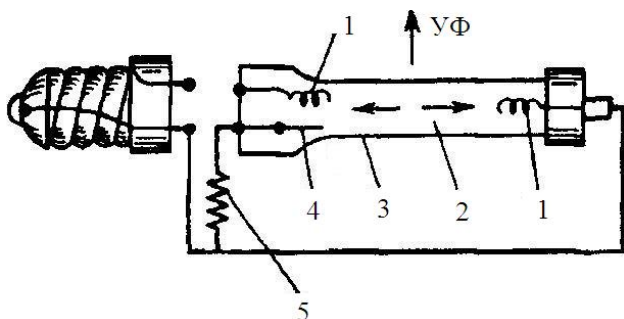


Рис. 6.4. Схема конструкции ртутной лампы

Кварцевое стекло применяется в связи с тем, что оно хорошо пропускает ультрафиолетовое излучение. На двух концах трубки находятся электроды *1*, один из которых дополнительно снабжается стартовым электродом *4*. При подаче напряжения между главным электродом и стартовым электродом между ними возникает тлеющий разряд, сопровождающийся ионизацией аргона. Ионизация приводит к снижению электрического сопротивления между главными электродами, что вызывает возникновение между ними электрической дуги *2*, тепловая энергия от которой вызывает испарение ртути. Лампа снабжается стартовым сопротивлением *5*.

Наиболее сильными линиями в ультрафиолетовой части спектра испускания ртути являются 253,7 и 365,4 нм. Первая из них попадает в так называемую область С ультрафиолетовой части спектра (коротковолновой ультрафиолет с длиной волны 230–280 нм), а вторая – в область А (длинноволновой ультрафиолет с длиной волны 315–400 нм). Ртутные лампы обладают высокой мощностью и благодаря этому позволяют получать интенсивную фотолюминесценцию.

Недостатками являются: наличие излучения в видимой части спектра, которое необходимо подавлять с помощью светофильтров; потенциальная опасность лампы для здоровья (мощное ультрафиолетовое излучение способно поражать зрение и вызывать ожоги, в связи с чем необходимо пользоваться индивидуальными средствами защиты). Ультрафиолетовые диоды имеют меньшую по сравнению с ртутными лампами мощность (до 10 Вт), но более безопасны и дают меньшее излучение в видимой части спектра. Они более компактны и имеют меньшее энергопотребление.

Фотолюминесценция также может наблюдаться с помощью фиолетовых лазерных указок с длиной волны 405 нм, близкой к верхней границе области А ультрафиолетовой части спектра. Лазерные диоды с длиной волны 405 нм используются для записи и считывания информации по технологии Blue-ray.

Некоторые драгоценные камни, инертные при использовании обычных источников ультрафиолетового излучения, дают флуоресценцию при воздействии лазерного излучения с длиной волны 405 нм. Например, хромсодержащие изумруды, хромсодержащие хризобериллы, хром-дравиты из Кении и Танзании, хромсодержащие «мятные» гроссуляры из Танзании, земляничные гроссуляры из Мексики и некоторые синие сапфиры (в частности, сапфиры из Кашмира) дают красную и розовую флуоресценцию.

Помимо флуоресценции, сопровождающейся испусканием излучения в видимой части спектра, существует явление инфракрасной флуоресценции, при котором минерал испускает невидимое инфракрасное излучение при поглощении видимого светового излучения, например, излучения мощной лампы накаливания. Это явление редко упоминается в геммологической и минералогической литературе, несмотря на то что оно было детально изучено еще в 1958 г.

При изучении около 200 000 образцов минералов, хранящихся в Национальном музее США, явление инфракрасной флуоресценции было обнаружено примерно в 1500 образцах, относящихся к 75 минеральным видам. Для наблюдения инфракрасной флуоресценции в общем случае необходим электронно-оптический преобразователь (ЭОП) – устройство для преобразования невидимого глазом изображения в видимое. Такие устройства используются, например, в приборах ночного видения. Основным элементом ЭОП является фотокатод *I* – электрод, при воздействии на который оптического излучения происходит формирование свободных электронов (внешний фотоэффект) (см. рис. 6.5).

Сформировавшиеся под действием оптического излучения электроны ускоряются электрическим полем и попадают на люминесцентный экран 2, который в результате катодолюминесценции преобразует поток электронов в видимое оптическое излучение. Недостатком ЭОП является то, что он требует громоздких источников высокого напряжения (10–15 кВ) для ускорения электронов.

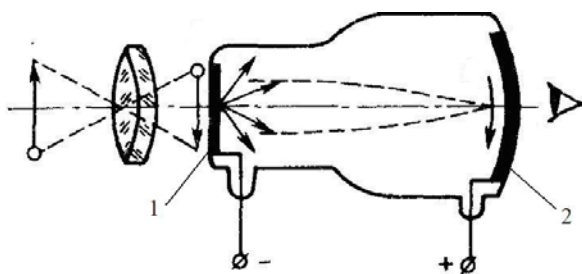


Рис. 6.5. Электронно-оптический преобразователь

Сейчас выпускается компактное устройство для смартфонов и планшетов под названием «Снуперскоп», позволяющее наблюдать за объектами в темноте и способное к регистрации инфракрасного излучения (рис. 6.6). Устройство крепится на корпусе смартфона с помощью постоянного магнита и выводит изображение на экран смартфона, пользуясь проводной или беспроводной передачей данных. Снуперскоп использует активный принцип обнаружения объектов: излучение 6 инфракрасных светоизлучающих диодов, установленных вокруг объектива, отражается от объекта и регистрируется ПЗС-матрицей, подобной используемой в цифровых фотоаппаратах, но обладающей высокой чувствительностью к инфракрасному излучению.



Рис. 6.6. Снуперскоп

Перед ПЗС-матрицей устанавливается светофильтр, пропускающий только инфракрасную часть спектра. ПЗС-матрица преобразует

инфракрасное изображение в электрические сигналы, которые используются для формирования видимого изображения на дисплее смартфона. Если отключить инфракрасные светоизлучающие диоды снуперскопа, то его можно будет применять для наблюдения собственного инфракрасного излучения объектов.

ПЗС-матрицы обычных цифровых фотоаппаратов также обладают чувствительностью к инфракрасному излучению, однако подобная чувствительность приводит к перенасыщению красного канала изображения, что вызывает цветовые искажения. В связи с этим все цифровые фотоаппараты содержат защитный фильтр, который, по крайней мере, частично блокирует инфракрасное излучение, попадающее на матрицу. Тем не менее остаточная чувствительность матрицы к инфракрасному излучению все равно сохраняется. Использование чувствительности ПЗС-матриц к инфракрасному излучению позволяет превращать цифровые фотоаппараты в инфракрасные камеры, удаляя защитный фильтр и устанавливая на объектив светофильтр, пропускающий только инфракрасную часть спектра. В некоторых случаях достаточной оказывается установка инфракрасного фильтра. Таким образом, цифровой фотоаппарат может быть использован для наблюдения инфракрасной флуоресценции минералов, если воспользоваться инфракрасным фильтром. Иногда инфракрасная флуоресценция проявляется при фотосъемке в обычном режиме и приводит к перенасыщению красного канала изображения.

С флуоресценцией тесно связано явление **тенебресценции (обратимого фотохромизма)**, наблюдаемое в таких минералах, как содалит (разновидность гакманит) и тугутпит.

Тенебресценция – это свойство некоторых минералов окрашиваться при воздействии света определенного спектрального состава, а затем обесцвечиваться при воздействии света другого спектрального состава. Свежедобытые гакманит и тугутпит имеют розовый или малиновый цвет, который исчезает при воздействии солнечного света. Первоначальная окраска может быть восстановлена путем хранения минерала в темноте или путем воздействия на него коротковолновым ультрафиолетовым излучением. Гакманит с подобным поведением известен на Кольском полуострове, в Гренландии и Канаде. Гакманит из Афганистана и Мьянмы имеет обратное поведение, то есть обесцвечивается при хранении в темноте и окрашивает-

ся на солнечном свете. Минералы, обладающие тенебресценцией, всегда проявляют флуоресцентные свойства.

### **Задание по работе**

Исследовать наличие и цвет флуоресценции в выданных образцах драгоценных камней. Результаты занести в таблицу.

### **Порядок выполнения работы**

1. С помощью ультрафиолетового светодиодного фонарика и лазерной указки исследовать наличие и цвет флуоресценции в выданных образцах. Результаты занести в табл. 6.2.

2. Пользуясь табл. 6.1, указать возможные активаторы флуоресценции в исследованных образцах. Результаты занести в табл. 6.2.

*Таблица 6.2*

### **Результаты эксперимента**

Порядковый номер образца	Наименование камня	Наличие и цвет флуоресценции	Активаторы флуоресценции

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения о люминесценции.
3. Результаты эксперимента (табл. 6.2).
4. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Виды люминесценции.
2. Источники ультрафиолетового излучения и приборы для исследования фотолюминесценции.
3. Активаторы и гасители фотолюминесценции и примеры камней, обладающих фотолюминесценцией.
4. Флуоресценция в дневном свете и примеры камней, в которых она наблюдается.
5. Инфракрасная флуоресценция и способы ее наблюдения.

## Лабораторная работа № 7

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

**Цель работы** – получение практических навыков исследования магнитных свойств драгоценных камней.

### Инструменты и принадлежности

1. Неодимовый постоянный магнит.
2. Поролон.
3. Набор образцов драгоценных камней.
4. Пинцет.

### Общие сведения

Драгоценные камни, окрашенные ионами переходных металлов (Fe, Mn, Cr, V, Cu, Ni, Co), редкоземельными элементами (Nd, Pr и Ce в природных камнях; Er, Ho и Eu в синтетических камнях), а также ураном (некоторые природные цирконы), обладают парамагнитными свойствами, то есть имеют относительную магнитную проницаемость, незначительно превышающую единицу,  $\mu_r \approx 1$ . Парамагнетики испытывают слабое притяжение к постоянному магниту. Степень выраженности парамагнитных свойств зависит от концентрации хромофорных ионов: камни с низкой концентрацией ионов обычно не демонстрируют магнитного отклика. Камни с идиохроматической окраской имеют более высокую концентрацию хромофорных ионов по сравнению с аллохроматическими камнями и поэтому демонстрируют более сильный магнитный отклик.

Примерами идиохроматических камней с сильно выраженными парамагнитными свойствами являются перидот, минералы группы граната (альмандин и спессартин), аксинит, родохрозит и родонит. На парамагнитные свойства также оказывает влияние валентность хромофорных ионов. Например, ион  $\text{Fe}^{2+}$  имеет более сильные парамагнитные свойства по сравнению с ионом  $\text{Fe}^{3+}$ , поэтому бериллы, окрашенные ионом  $\text{Fe}^{2+}$ : например, аквамарины демонстрируют более сильный магнитный отклик, чем бериллы, окрашенные ионом  $\text{Fe}^{3+}$  или ионом  $\text{Fe}^{3+}$  в сочетании с ионом  $\text{Fe}^{2+}$  (желтые и зеленые бериллы).

Ионы *железа* являются наиболее распространенными ионами, придающими драгоценным камням окраску и магнитные свойства. Ионы  $\text{Fe}^{2+}$  придают сильные магнитные свойства таким камням, как гранаты ряда альмандин-пироп, перидот (зеленая разновидность переходных членов ряда фаялит-форстерит  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$ , называемых оливином), синие турмалины (индиголиты) ряда эльбаит-шерл, зеленые турмалины (верделиты) ряда эльбаит-шерл, аксинит-(Fe). Ионы  $\text{Fe}^{3+}$  придают сильные магнитные свойства гранатам ряда андрадит-гроссуляр (гранаты «Мали»).

*Марганец* может содержаться в драгоценных камнях в виде ионов  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{4+}$ . Ионы  $\text{Mn}^{2+}$  придают сильные магнитные свойства гранатам ряда пироп-спессартин, родохрозиту, родониту, аксиниту-(Mn) и желтому эльбаиту. Ионы  $\text{Mn}^{3+}$  являются более сильным хромофором и обычно содержатся в драгоценных камнях в более низкой концентрации по сравнению с ионами  $\text{Mn}^{2+}$ . Поэтому камни, окрашенные ионами  $\text{Mn}^{3+}$ , обычно слабо магнитные или магнитно-инертные. Пример таких камней – розовые и красные эльбаиты (рубеллиты). Ионы  $\text{Mn}^{4+}$  придают сильные магнитные свойства непрозрачному черному псиломелану, который иногда обрабатывают в виде кабошонов.

*Хром* – второй по частоте проявления после железа хромофорный ион в драгоценных камнях. По сравнению с железом хром является более сильным хромофором: концентрация хрома, необходимая для придания цвета камню, может быть в 100 раз ниже необходимой для этого концентрации железа. В связи с малой концентрацией хрома в драгоценных камнях он редко обнаруживается с помощью постоянного магнита.

Магнитные свойства окрашенных хромом камней обычно связаны с наличием скрытых ионов железа или марганца, то есть ионов, придающих камню магнитные свойства, но не вносящих вклада в его цвет. Скрытые ионы железа придают магнитные свойства демантоиду, изумруды, зеленому жадеиту и хромовому диопсиду. Хромовый турмалин не содержит скрытых ионов железа и поэтому является магнитно-инертным.

Наличие хрома может быть выявлено с помощью магнита в синтетическом изумруде, синтетическом рубине и синтетической красной шпинели. В природных изумрудах, рубинах и красных шпинелях с насыщенным цветом также может наблюдаться слабый магнитный

отклик, вызванный наличием хрома. Хром также придает слабые магнитные свойства зеленому хромовому халцедону из Зимбабве (мторолиту) и сильные магнитные свойства уваровиту.

**Ванадий** обычно встречается в качестве хромофорного иона совместно с ионом хрома и редко обнаруживается с помощью постоянного магнита. Магнитные свойства в окрашенных ванадием камнях обычно вызваны скрытым ионом железа.

**Кобальт** – еще более сильный хромофор, чем хром. Он обычно встречается в синтетических камнях, таких как синтетическая синяя шпинель и синтетический синий кварц. Концентрация кобальта как в природных, так и в синтетических камнях обычно недостаточна для его обнаружения с помощью постоянного магнита. Исключения – синтетическая синяя шпинель, выращенная раствор-расплавным (флюсовым) методом, и редкая природная кобальтовая шпинель.

**Медь** придает камням магнитные свойства в зависимости от своей валентности. Так ион  $\text{Cu}^{1+}$ , встречающийся, например, в куприте, не придает камням магнитных свойств. Ион  $\text{Cu}^{2+}$ , встречающийся в бирюзе, азурите, малахите и хризоколле, придает им магнитные свойства.  $\text{Cu}^{2+}$  является хромофорным ионом для параиба-турмалинов и ларимара (разновидность пектолита из Доминиканской Республики), однако концентрация меди в этих камнях очень мала для ее обнаружения с помощью постоянного магнита.

**Никель** придает магнитные свойства хризопразу, хризопалу и гаспеиту (карбонат никеля).

**Редкоземельные элементы** обычно встречаются в качестве хромофорных ионов в синтетических камнях, таких как галлий-гадолинийевый гранат (ГГГ), иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ) и кубический диоксид циркония (фианит). ГГГ, даже при отсутствии цвета, демонстрирует сильный магнитный отклик, так как содержит **гадолиний** с сильно выраженными парамагнитными свойствами. Розовый фианит обладает сильными магнитными свойствами, так как содержит ионы **эрбия** и **гольмия**. В природных камнях редкоземельные ионы (в частности, церий) содержатся в бастнезите и паризите, однако ион церия обладает очень слабыми магнитными свойствами и магнитный отклик этих камней обычно вызван ионами **неодима** и **празеодима**.

**Уран** присутствует в природных цирконах всех цветов, однако наибольшая концентрация урана наблюдается в зеленых метамиктных



цирконах. В этих цирконах концентрация урана иногда оказывается достаточной для его обнаружения с помощью постоянного магнита.

На рис. 7.1 в виде гистограммы показаны значения магнитной восприимчивости  $\chi = \mu_r - 1$  для 20 различных камней.

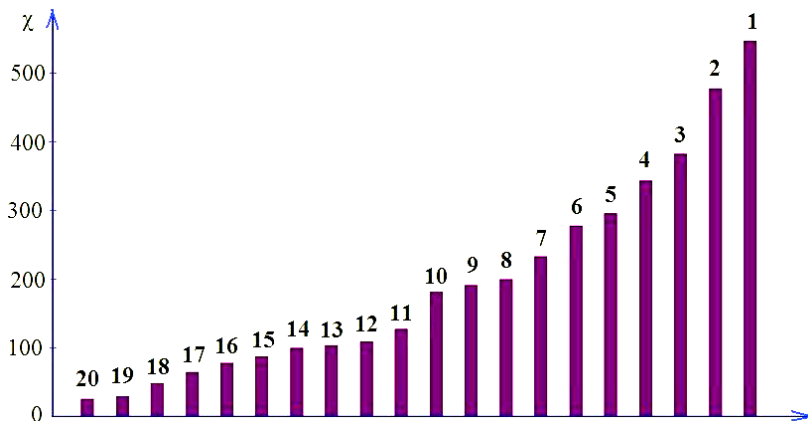


Рис. 7.1. Значения магнитной восприимчивости для различных парамагнитных камней

Указаны максимальные экспериментально наблюдавшиеся значения магнитной восприимчивости (здесь и далее приводятся значения  $\chi$ , умноженные на  $10^6$ ). Ниже указаны причины наличия магнитных свойств у перечисленных на рис. 7.1 камней и диапазон экспериментально наблюдавшихся значений магнитной восприимчивости:

желтый турмалин (эльбаит-лиддиокатит) **1** – перенос заряда  $Mn^{2+}-Ti^{4+}$ , ионы  $Mn^{2+}$ , ионы железа, < 20-443;

малахит **2** – ионы  $Cu^{2+}$ , 477;

азурит **3** – ионы  $Cu^{2+}$ , 382;

зеленый нефрит **4** –  $Cr^{3+}$  + скрытые ионы железа, 91-343;

хромовый диопсид **5** –  $Cr^{3+}$ ,  $V^{3+}$  + скрытые ионы железа, 56-296;

зеленая бирюза **6** – ионы  $Cu^{2+}$ , ионы железа, 35-278;

зеленый везувиян (идокраз) **7** – ионы железа, 217-233;

иолит **8** – ионы  $Fe^{2+}$ , перенос заряда  $Fe^{2+}-Fe^{3+}$ , 105-200;

черный звездчатый сапфир **9** – ионы  $Fe^{2+}$  и  $Ti^{4+}$ , 20-143;

синяя шпинель **10** – ионы  $Co^{2+}$ , ионы железа, 35-187 (редко 360);

хризоберилл **11** – ионы  $Cr^{3+}$ , ионы железа, 20-127;

рубин **12** – ионы  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{V}^{3+}$ , ионы железа, < 20-48 (иногда 78-113);  
желтый (благородный) ортоклаз **13** – ионы железа, 65-104;  
аквамарин **14** – ионы  $\text{Fe}^{2+}$ , перенос заряда  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$ , 20-100;  
изумруд **15** –  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{V}^{3+}$  + скрытые ионы железа;  
желтый/коричневый титанит **16** – ионы  $\text{Nd}^{3+}$ , ионы железа, 30-78;  
зеленый сподумен (гидденит) **17** – ионы  $\text{Cr}^{3+}$ , ионы железа, 65;  
содалит **18** – цветовые центры, < 0-48;  
орегонский солнечный камень (лабрадорит) с медной шиллеризацией **19** – включения меди, < 29;  
коричневато-зеленый андалузит **20** – перенос заряда  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{O-Ti}^{4+}$ , < 0-26.

Материалы с  $\chi < 0$  являются диамагнитными и испытывают слабое отталкивание от постоянного магнита.

Для исследования магнитных свойств драгоценных камней лучше всего использовать редкоземельные неодимовые магниты, обладающие большой коэрцитивной силой. Драгоценные камни с сильно выраженными магнитными свойствами, имеющие небольшую массу, могут притягиваться к постоянному магниту и удерживаться им. В качестве примера на рис. 7.2 показано удержание постоянным магнитом кристалла граната массой около 11,5 кар.



Рис. 7.2. Удержание кристалла граната неодимовым магнитом

Неодимовым магнитом удерживается большинство камней группы граната, за исключением цаворита, гранатов «Мали», гессонита, хромового пироба и пастельного пироба. Если природный прозрачный камень среднего размера (массой 1-4 кар) удерживается неодимовым магнитом, то этот камень с высокой вероятностью относится к группе гранатов. К числу синтетических прозрачных камней сред-

него размера, удерживаемых неодимовым магнитом, относятся ГГТ и алмаз, синтезированный методом НРНТ. Неодимовый магнит также удерживает некоторые редкие прозрачные природные камни среднего размера, такие как родохрозит, родонит, дунилит (торговое название разновидности оливина из Шри-Ланки), зосфорит ( $(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), пироксмангит (имеет химический состав и класс симметрии, одинаковые с родонитом, но отличается параметрами элементарной ячейки), сидерит ( $\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$ ), танталит (переходные члены ряда танталит-(Fe)-танталит-(Mn) ( $\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ )(Ta, Nb) $_2\text{O}_6$ ), триплит ( $(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{PO}_4)(\text{F}, \text{OH})$ ), трифилит ( $\text{LiFe}^{2+}\text{PO}_4$ ), вивианит ( $\text{Fe}^{2+}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) и ксенотим (ксенотим-(Y)  $\text{YPO}_4$  и ксенотим-(Yb) (Y, Yb, HREE) $\text{PO}_4$ , где HREE – тяжелые редкоземельные элементы (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y)).

Если руководствоваться только внешним видом и магнитными свойствами, то можно спутать между собой триплит и оранжевый спессартин, а также трифилит и гранат с александритовым эффектом. К числу редких прозрачных драгоценных камней, удерживаемых неодимовым магнитом, также относится ставролит ( $\text{Fe}^{2+}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{23}(\text{OH})$ ) – магнитом удерживаются камни с массой до 1 кар.

Камни с более слабыми магнитными свойствами могут перемещаться по опорной поверхности постоянным магнитом, расположенным на небольшом расстоянии от них. Камень должен иметь малый коэффициент трения по опорной поверхности. Например, удобно использовать в качестве опорной поверхности обложку глянцевого журнала. Неодимовым магнитом перемещаются следующие прозрачные виды и разновидности драгоценных камней: гранаты «Мали», перидот, синий турмалин (индиголит), зеленый турмалин (верделит), желтый марганцевый турмалин, розовый фианит, хромовый пироп, пастельный пироп, аксинит. Бледно окрашенные разновидности этих камней могут проявлять магнитные свойства только при использовании описываемого далее метода флотации.

Упомянутые выше пастельные пиропы имеют по сравнению с обычными пиропами более низкий показатель преломления (1,726–1,745) и более низкую магнитную восприимчивость (618–1236) и обычно менее насыщенный цвет, хотя встречаются красные пастельные пиропы, близкие по цвету к обычным. Пастельные пиропы близки по химическому составу к чистому пиропу и содержат 74–87 % пиропы. Хромовые пиропы имеют еще более низкую магнитную

восприимчивость (454–999) и показатель преломления, близкий к пастельным пиропам (1,733–1,746). Они имеют более насыщенный цвет по сравнению с обычными пиропами и красными пастельными пиропами. Причиной этого цвета является хром – концентрация оксида хрома составляет 4–8 %. Важным диагностическим признаком хромовых пиропов являются линии поглощения хрома, наблюдаемые с помощью спектроскопа. Для определения вида гранатов часто требуется химический анализ, однако этого можно избежать, пользуясь так называемой RIMS-диаграммой (RI – показатель преломления (Refractive Index), MS – магнитная восприимчивость (Magnetic Susceptibility)), на которой показатель преломления и магнитная восприимчивость камня изображаются в виде точки на плоскости MS-RI. Точки, соответствующие пиральспитам (гранаты, представляющие собой смесь пиропы Py, альмандин Al и спессартина Sp) и уграндитам (гранаты, представляющие собой смесь уваровита Uv, гроссуляра Gr и андрадита An) попадают на RIMS-диаграмме в две треугольные области (рис. 7.3).

Точки Go и Kp на диаграмме соответствуют голдманиту  $\text{Ca}_3(\text{V}^{3+}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_3$  и кноппингиту  $\text{Mg}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ .

Процентное содержание составляющих смеси определяется следующим образом.

1. Проводятся три отрезка, каждый из которых начинается в одной из вершин треугольника, проходит через точку (MS, RI), соответствующую измеренным значениям магнитной восприимчивости и показателя преломления, и заканчивается на стороне, соединяющей две другие вершины.

2. Для каждого из отрезков определяется процентное отношение длины дальнего сегмента к общей длине.

3. Полученные отношения представляют собой процентные содержания в смеси тех видов граната, которым соответствуют начальные точки отрезков.

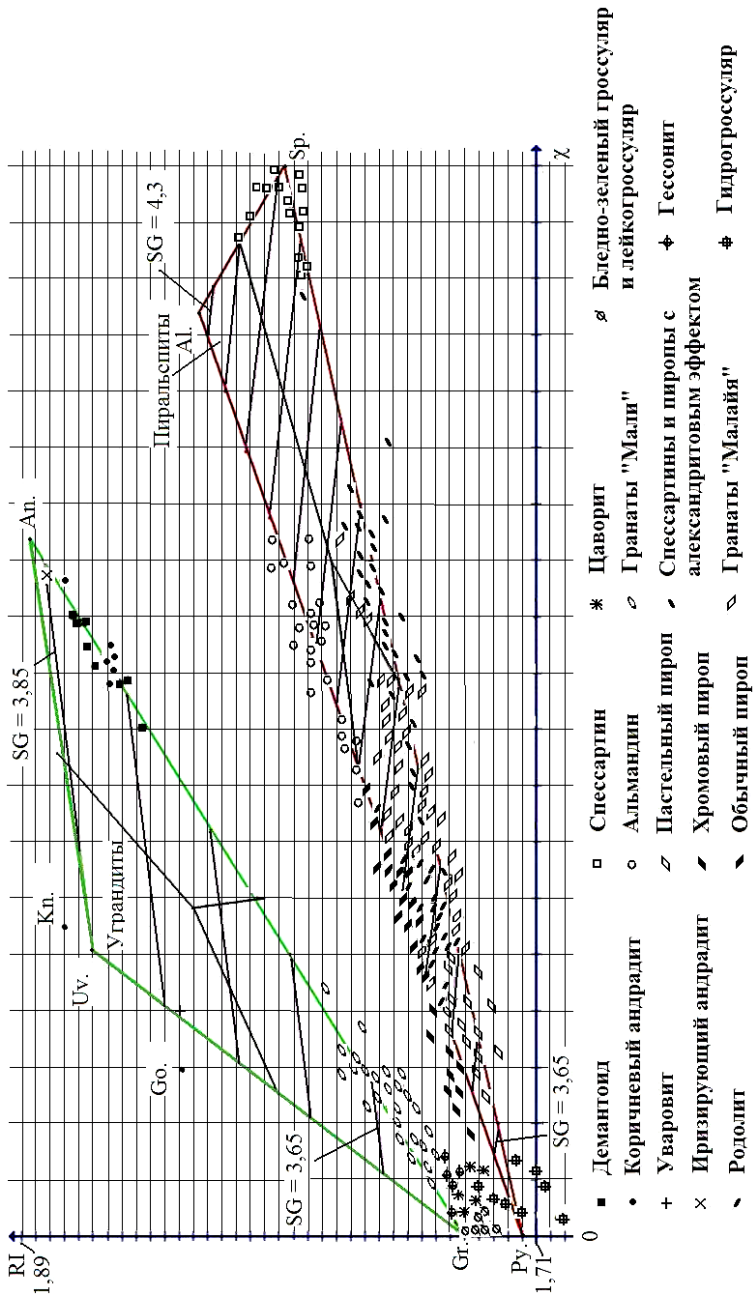


Рис. 7.3. RIMS-диаграмма для гранатов

Параллельные линии, пересекающие треугольники на RIMS-диаграмме, представляют собой изолинии удельного веса, проведенные с шагом 0,05.

При исследовании камней со слабо выраженными магнитными свойствами используют метод флотации или маятниковый метод. В первом случае камень помещают на плавающий на поверхности воды плотик из поролона, пенопласта или пробки. При наличии у камня магнитных свойств плотик с камнем будет перемещаться за постоянным магнитом, расположенным на небольшом расстоянии от него. При использовании маятникового метода камень подвешивается на очень тонкой проволочке или волосе, можно также поместить камень в тонкий полиэтиленовый пакетик. При приближении постоянного магнита к подвесу или пакету с камнем сбоку камень при наличии у него магнитных свойств будет отклоняться в сторону магнита и может захватываться им.

Неодимовый магнит при отсутствии других диагностических средств может быть использован для магнитной сепарации визуально схожих камней. Примеры приведены в табл. 7.1.

*Таблица 7.1*

### Примеры магнитной сепарации камней

Наименование камня и его магнитная реакция	Наименование визуально схожего камня и его магнитная реакция
1	2
Родолит удерживается	Фиолетовато-красный сапфир Инертный – умеренно магнитный
Хромовый пироп перемещается	Рубин Слабо магнитный – умеренно магнитный
Родолит удерживается	Аметист Инертный
Родолит удерживается	Фиолетовато-красная шпинель Слабо магнитная – умеренно магнитная
Родолит удерживается	Рубеллит Инертный – умеренно магнитный
Большинство красных гранатов удерживаются	Красная шпинель Слабо магнитная – умеренно магнитная
Большинство красных гранатов удерживаются	Красный циркон Инертный

Продолжение табл. 7.1

1	2
Оранжевый спессартин удерживается	ИАГ, фианит Инертный – слабо магнитный
Оранжевый спессартин удерживается	Оранжевый сапфир Слабо магнитный – умеренно магнитный
Оранжевый спессартин удерживается	Гессонит Умеренно магнитный – сильно магнитный
Демантоид удерживается	Все другие зеленые прозрачные камни Инертные – сильно магнитные
Гессонит Умеренно магнитный – сильно магнитный	Оранжевый дравит Инертный
Коричневый гранат «Мали» перемещается	Коричневый титанит Сильно магнитный
Цаворит Слабо магнитный – сильно магнитный	Хромовый турмалин Инертный
Альмандин удерживается	Фиолетовая шпинель Слабо магнитная – умеренно магнитная
Черный гранат (меланит) удерживается	Черный алмаз (карбонадо) Инертный
Природная шпинель (кроме бледных камней) Слабо магнитная – умеренно магнитная	Синтетическая шпинель (кроме некоторых зеленых камней) Инертная
Аквамарин Слабо магнитный – умеренно магнитный	Голубой топаз Инертный
Индиголит перемещается	Все другие синие камни любой прозрачности Инертные – умеренно магнитные
Верделит перемещается	Цаворит Слабо магнитный – сильно магнитный
Иолит Умеренно магнитный – сильно магнитный	Танзанит Инертный
Фиолетовый сапфир Слабо магнитный – умеренно магнитный	Аметист Инертный
Желтый полевоый шпат Слабо магнитный – умеренно магнитный	Цитрин Инертный
Перидот перемещается	Везувиан Сильно магнитный
Верделит Сильно магнитный – перемещается	Хромовый турмалин Инертный

1	2
Хромовый диопсид Слабо магнитный – сильно магнитный	Хромовый турмалин Инертный
Жадит/нефрит (зеленый или черный) Слабо магнитный – сильно магнитный	Окрашенный халцедон или синтетика Инертные
Бирюза Слабо магнитная – умеренно магнитная	Полимеры, одонтолит или окрашенный говлит Инертные
Желтый титанит Слабо магнитный – сильно магнитный	Желтый сфалерит Инертный
Оранжевый сапфир Слабо магнитный – умеренно магнитный	Оранжевый мексиканский огненный опал Инертный
Природный александрит слабо магнитный	Синтетический александрит Инертный
Танзанит Инертный	Фиолетовый ИАГ Слабо магнитный – умеренно магнитный
Танзанит Инертный	Синтетический синий форстерит Слабо магнитный
Природный алмаз Инертный	Имитации и синтетические алмазы Любая магнитная реакция исключает природный алмаз
Природные синие, оранжевые, желтые и зеленые сапфиры Слабо магнитные – умеренно магнитные	Синтетические синие, оранжевые, желтые и зеленые сапфиры Инертные
Природные синие шпинели Умеренно магнитные – сильно магнитные	Большинство синтетических синих шпинелей Инертные

Большинство стекол являются магнитно-инертными, за исключением синего кобальтового стекла, которое является слабо магнитным благодаря примесям железа и марганца, и розового стекла, окрашенного эрбием и гольмием и перемещаемого неодимовым магнитом.

В табл. 7.2 приведены данные о связи между степенью выраженности магнитных свойств и значениями магнитной восприимчивости.

Степень выраженности магнитных свойств является их качественной характеристикой, которая дается на основе визуального наблюдения силы взаимодействия неодимового магнита с камнем. Визуально наблюдаемый магнитный отклик камня будет зависеть от таких факторов, как масса камня и размер его площадки. Напри-



мер, камень малой массы может перемещаться неодимовым магнитом даже при магнитной восприимчивости  $< 350$ , а при большом размере площадки сильный магнитный отклик может наблюдаться у камней с магнитной восприимчивостью  $< 140$ . В связи с этим связи, указанные в табл. 7.2, приблизительны.

Таблица 7.2

**Связь между степенью выраженности магнитных свойств  
и магнитной восприимчивостью**

Степень выраженности магнитных свойств	Магнитная восприимчивость
Инертный (диамагнитный)	$< 0$
Слабо магнитный	$< 20-80$
Умеренно магнитный	$80-140$
Сильно магнитный	$140-350$
Перемещается	$350-1000$
Удерживается	$> 1000$

Магнитная сепарация может быть полезной в следующих случаях.

1. Сканирование лотов камней. Например, в лоте рубинов, красных шпинелей или красных цирконов могут быть легко выявлены красные гранаты, попавшие туда случайным образом или по злостному умыслу. Аналогичным образом в лоте демантоидов могут быть выявлены зеленое стекло, зеленый ИАГ или перидот, а в лоте оранжевых сапфиров – оранжевые спессартины.

2. Сепарация камней с высоким показателем преломления ( $n > 1,81$ ), который не может быть измерен рефрактометром. Например, красный циркон может быть визуально схожим с красным спессартином, а зеленый циркон – с демантоидом. Показатели преломления всех этих камней невозможно измерить рефрактометром, однако их можно различить с помощью магнитной сепарации. Магнитная сепарация также полезна для различения таких камней с высокими показателями преломления, как желтый титанит и желтый сфалерит, демантоид и зеленый ИАГ, природный циркон и его имитации (фианит и ИАГ).

Для количественной оценки магнитных свойств драгоценных камней могут использоваться так называемые весы Хувера (Hoover), которые могут быть созданы на основе точных электронных весов, снабженных механизмом плавного перемещения с закрепленным на нем неодимовым магнитом. Исследуемый камень устанавливается площадкой вверх на платформе весов и фиксируется на ней с помощью мастики, что позволяет избежать смещений камня под действием магнитных сил. Магнит приводится в контакт с площадкой камня, после чего весы устанавливаются на нуль. Затем магнит плавно поднимается вверх и фиксируется максимальное отрицательное показание весов. Это показание будет соответствовать потере веса камня в результате действия магнитной силы. Магнитная восприимчивость камня рассчитывается по формуле

$$\chi = \chi_s F / F_s,$$

где  $\chi_s$  – магнитная восприимчивость стандарта;

$F$  – потеря веса камня;

$F_s$  – потеря веса стандарта.

В качестве стандарта обычно используют медный купорос с магнитной восприимчивостью  $\chi_s = 170 \cdot 10^{-6}$ .

### **Задание по работе**

Определить степень выраженности магнитных свойств в выданных образцах драгоценных камней. Результаты занести в таблицу.

### **Порядок выполнения работы**

1. С помощью неодимового магнита, используя при необходимости метод флотации, определить степень выраженности магнитных свойств в выданных образцах драгоценных камней. Результаты занести в табл. 7.3.

2. Пользуясь литературными данными, указать причины наличия магнитных свойств в исследованных образцах. Результаты занести в табл. 7.3.

### Результаты эксперимента

Порядковый номер образца	Наименование камня	Степень выраженности магнитных свойств	Причины наличия магнитных свойств

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие сведения о магнитных свойствах драгоценных камней и методах их исследования.
3. Результаты эксперимента (табл. 7.3).
4. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Магнитные свойства парамагнетиков и диамагнетиков. Ионы, являющиеся источниками парамагнитных свойств у драгоценных камней.
2. Примеры драгоценных камней, удерживаемых и перемещаемых неодимовым магнитом.
3. Исследование магнитных свойств методом флотации и маятниковым методом.
4. Примеры магнитной сепарации драгоценных камней.
5. Количественная оценка магнитных свойств с помощью весов Хувера.
6. Определение химического состава гранатов по RIMS-диаграмме.

## Список рекомендуемой литературы

1. Андерсон, Б. Определение драгоценных камней / Б. Андерсон. – М. : Мир камня, 1996. – 456 с.
2. Корнилов, Н.И. Ювелирные камни / Н.И. Корнилов, Ю.П. Солодова. – М. : Недра, 1987. – 282 с.
3. Пагель-Тайзен, В. Оценка бриллиантов: качественная оценка цвета, чистоты, огранки и веса / В. Пагель-Тайзен. – М. : Типография АО «Символ», 1996. – 211 с.
4. Смит, Г. Драгоценные камни / Г. Смит. – М. : Мир, 1984. – 558 с.
5. Рид, П. Геммология / П. Рид. – М. : Мир, 2003. – 366 с.
6. Gem Identification with Magnetism [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gemstonemagnetism.com/index.html>.
7. Gems: their sources, descriptions and identification / Ed. by M. O'Donoghue. – Amsterdam : Elsevier, 2006. – 937 p.
8. Luminescence, fluorescence and phosphorescence of minerals [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fluomin.org/uk/accueil.php>.
9. Pečar, M. Conoscopic figure: a complex consequence of a not so simple phenomenon / M. Pečar, M. Čepič // European Journal of Physics. – 2015. – Vol. 36. – Article 015014.

Учебное издание

**ПРОБИРОВАНИЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ  
И ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА КАМНЕЙ**

Лабораторный практикум  
для студентов специальности  
1-52 02 01 «Технология и оборудование  
ювелирного производства»

Составитель  
**СТЕПАНЕНКО** Дмитрий Александрович

Редактор *Т. В. Мейкшане*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 03.04.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 4,55. Тираж 100. Заказ 922.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.