

Ю. Л. ОРЛОВ

**СИНГЕНЕТИЧЕСКИЕ И ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ  
В КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА**

С 1953 по 1956 год включительно мы исследовали алмазы из россыпных месторождений Урала и различных районов Сибири. Для сравнения изучались алмазы из месторождений Южной Африки, Бразилии, Индии и Австралии, имеющиеся в Минералогическом музее им. А. Е. Ферсмана АН СССР.

Большое внимание было уделено исследованию включений в кристаллах алмаза. Из большого количества кристаллов алмазов из уральских и сибирских россыпей были отобраны образцы с разнообразными включениями, которые исследовались различными методами, позволяющими точно диагностировать включенный минерал. Производился рентгеноструктурный анализ<sup>1</sup>, затем извлеченные из алмаза путем раздробления последнего минералы исследовались в иммерсионных препаратах под микроскопом, после чего производился спектральный анализ включений. Для точной диагностики включений в алмазах из африканских месторождений из количества более 2500 алмазов отобраны 35 кристаллов, которые были раздроблены, а изъятые из них включения изучены под микроскопом в иммерсионных препаратах.

Основными сингенетическими минералами, захватывающимися при кристаллизации, являются оливин, гранат и хромшпинелид<sup>2</sup>.

**Включения оливина.** Оливины встречаются в алмазах в виде изометричных или в различной степени удлинённых и уплощённых кристалликов с хорошо выраженными гранями, а также в виде параллельных, колечкатообразных и причудливых по форме сростков (рис. 1). Мелкие прозрачные включения оливина напоминают скопление пузырьков газа. Иногда наблюдаются единичные включения оливина, но нередко в одном кристалле алмаза встречается по 10—15 различного размера кристалликов этого минерала. Включенные зерна оливина чаще всего совершенно бесцветны, редко едва заметно зеленоваты. Часто на поверхности их наблюдаются черные округлые и неправильной формы пятна (рис. 1, б). Природа пятен не установлена; под микроскопом они выглядят совершенно

<sup>1</sup> Методика и частично результаты рентгеноструктурного исследования включений в кристаллах алмаза описаны С. И. Футергендлер (1956).

<sup>2</sup> Встречающиеся в алмазах включения более мелких кристалликов алмаза также сингенетичны; они интересны с точки зрения выяснения генезиса округлых форм кристаллов алмаза и будут рассмотрены после описания сингенетических включений иного состава, чем алмаз.

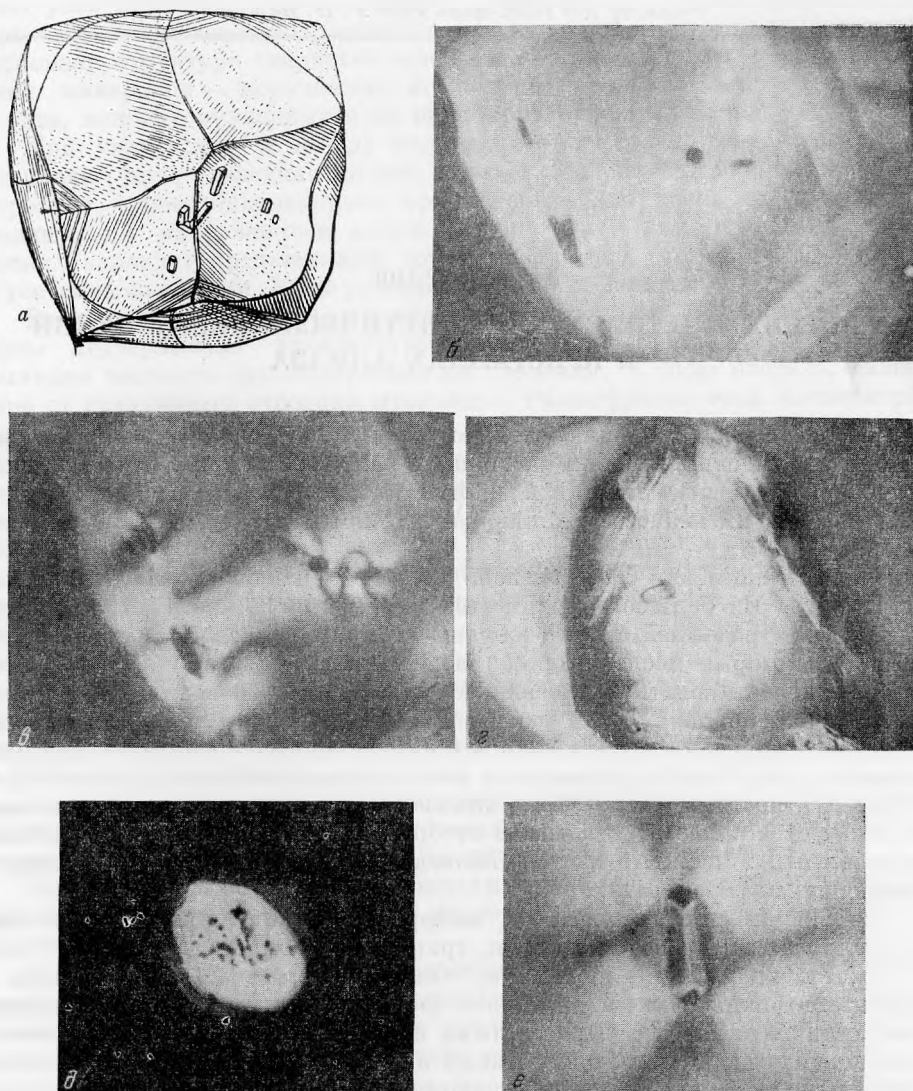


Рис. 1. Включения оливина в алмазе.

*a* — кристаллы оливина в алмазе (зарисовка); *б* — те же включения оливина (фото); *в* — узоры дву-  
 преломления в алмазе вокруг включений оливина, изображенных на рис. 1 *a* и *б*; *г* — кристаллы оли-  
 вина в алмазе (фото); *д* — черные пятна на грани уплощенного кристаллика оливина, извлеченного  
 из алмаза (фото); *е* — псевдотетрагональный облик кристалла оливина, включенного в алмаз. С ле-  
 вой стороны кристалла видны черные пятна. Четко выражен симметричный узор дву-  
 преломления в алмазе вокруг включения (фото)

черными и не просвечиваются. Пятна характерны только для включений оливина и могут быть одним из диагностических признаков этого минерала в алмазах. В поляризационном микроскопе, при скрещенных николях, оливины в алмазе обнаруживают высокие цвета интерференционной окраски, обычно отчетливо видимые на сером или темном фоне алмаза, проявляющего различные узоры двупреломления вокруг включения. При раздроблении алмаза кристаллики оливина легко освобождаются, причем в алмазе наблюдается отчетливый отпечаток граней оливина. В раздробленной массе алмаза зерна оливина хорошо заметны под микроскопом при скрещенных николях и могут быть без труда отобраны. Обычно при осторожном дроблении кристаллики оливина освобождаются от алмаза, сохраняя целиком свою форму, что дает возможность изучить их морфологически и в некоторых случаях, при хорошей огранке кристаллика, измерить его на гониометре.

Нередко изометричные или удлиненные кристаллики оливина в алмазах имеют псевдотетрагональный облик. Фотография одного из таких включений, находящегося в уральском алмазе, приведена на рис. 1, *e*.

Иногда встречаются кристаллики оливина, удлиненные не по оси  $C$ , а в направлении оси призмы  $(021)$ ; такие кристаллы оливина имеют косое погасание относительно оси удлинения, что следует иметь в виду при идентификации включений. Подобный случай уже описали для одного включения оливина в алмазе Митчелл и Гиардини (1953).

Приведем данные исследования характерного включения оливина, извлеченного из уральского алмаза (рис. 2). Включение имеет ясно выраженную кристаллическую форму. Гониометрическим измерением установлены грани  $(110)$ ,  $(010)$ ,  $(021)$  и  $(111)$ . Некоторые ребра кристаллика округлены и как бы оплавлены, что обычно наблюдается на кристалликах и других минералов, включенных в алмаз.

В результате рентгеноструктурных исследований<sup>1</sup> этого кристалла получены параметры решетки:  $a_0 = 5,983 \pm 0,010$  кХ;  $b_0 = 4,69 \pm 0,065$  кХ;  $c_0 = 10,230 \pm 0,034$  кХ, которые соответствуют эталонным значениям, приводимым в справочнике Штрунца (1957) для оливина и форстерита.

Показатели преломления минерала, определенные иммерсионным методом, оказались равными:  $N_g = 1,688 - 1,690$ ;  $N_p = 1,651 - 1,654$ ;  $N_g - N_p = 0,035 - 0,036$ ;  $2V$  около  $90^\circ$ .

Спектральным анализом установлены Si, Mg, Fe и следы Al.

Все приведенные выше данные позволяют считать включение оливином, близким к форстериту.

Колебания показателей преломления, определенных по многим зернам оливинов, извлеченных из различных кристаллов алмаза, наблюдались в следующих пределах:  $N_g = 1,688 - 1,698$  и  $N_p = 1,651 - 1,658$ .

Кроме Si, Mg, Fe и Al, в одном из оливинов из сибирского алмаза



Рис. 2. Кристаллик оливина из уральского алмаза (фото)

<sup>1</sup> Данные о параметрах решетки оливина, а также приводимые ниже для гранатов и хромшпинелида, извлеченных из алмаза, указываются по замерам С. И. Фуртергендлер.

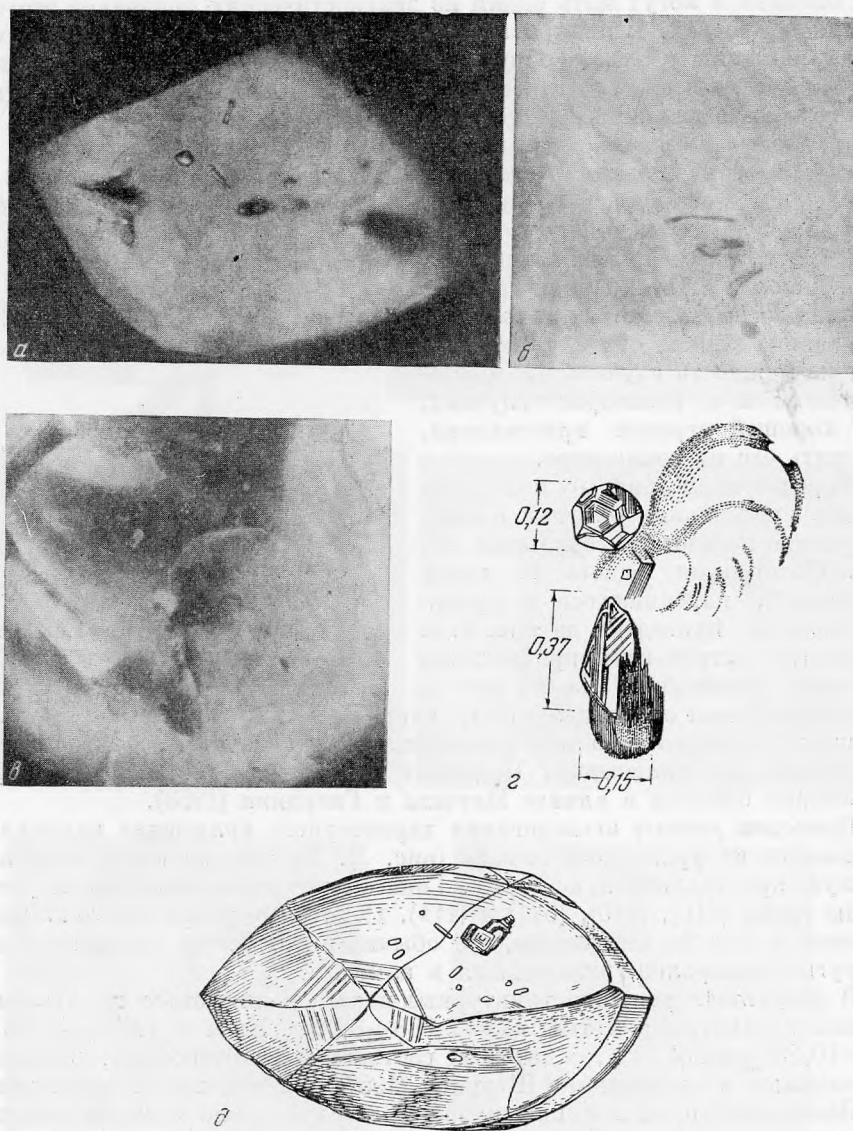


Рис. 3. Включения граната в алмазе.

а — кристаллики граната в алмазе (фото); б — неправильная удлиненная форма кристалликов граната, включенных в алмаз (фото); в — изометричный и удлиненный кристаллики граната в алмазе. Видны трещины вокруг включений, частично затемненные в связи с графитизацией (фото); г — те же включения граната (размеры указаны в миллиметрах, зарисовка); д — алмаз с включениями мелких кристалликов оливина и сравнительно крупного кристалла граната (зарисовка)

(россышь Колхозная, р. Вилюй) спектроскопически были установлены следы  $\text{Cr}$  и  $\text{Ni}$ .

Включения граната. Гранаты в алмазах иногда встречаются в виде изометричных кристаллов с хорошо выраженными отдельными гранями, но чаще в виде удлиненных, неправильных по очертанию кристалликов, напоминающих по внешнему виду пережатые кашлевидные зерна и гантелеобразные формы (рис. 3). Характерно наличие штриховки на кристалликах граната в связи со ступенчато-пластинчатым

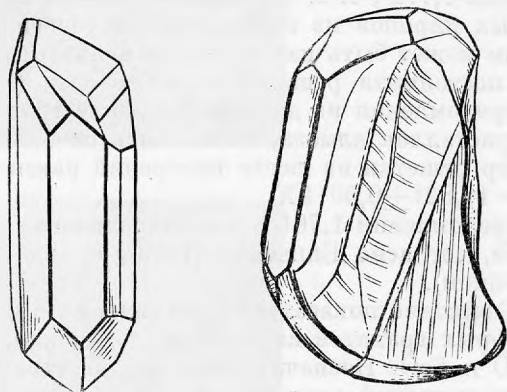


Рис. 4. Уплощенный кристаллик граната, извлеченный из алмаза (зарисовка)

строением некоторых граней. Гранаты, так же как и оливины, встречаются единичными кристалликами, а иногда в виде многочисленных, различных по размеру зерен, рассеянных внутри кристалла алмаза. При скрещенных николях, в поляризованном свете, гранаты в алмазе остаются темными, но алмаз обычно сильно двупреломляет сам вокруг включения и это иногда маскирует изотропность граната. При раздроблении алмаза гранаты легко освобождаются, и нередко удается извлечь целые кристаллики, которые легко отбираются из бесцветной алмазной крошки вследствие их окраски. Находящиеся в алмазе гранаты иногда кажутся бесцветными, но чаще обнаруживают цветной рефлекс золотисто-желтого, оранжевого, розовато-фиолетового и лилового тона. После извлечения гранатов из алмаза путем раздробления последнего окраска их становится хорошо заметной.

На рис. 4 приведена зарисовка одного кристаллика граната, извлеченного из сибирского алмаза. Гранат густо окрашен в буровато-желтый цвет и обладает очень сильным блеском. Форма кристаллика — ромбодекаэдр, удлиненный по  $L_1$  и уплощенный по  $L_2$ . Некоторые грани зеркально-гладкие, на других имеется штриховка. Наряду с острыми ребрами имеются округлые, как бы оплавленные. Постоянная решетки граната  $a = 11,508 \pm 0,035$  кХ. Показатель преломления, определенный в специально подобранных жидкостях, — 1,772 (средний между 1,7708 и 1,7732). Спектральным анализом установлены  $\text{Mg}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$  и  $\text{Si}$ . Эти данные позволяют отнести гранат к пиральспитовому ряду. Пользуясь диаграммой для определения состава гранатов, предложенной группой авторов (Михеев и др., 1956), можно состав исследованного граната приблизительно выразить следующим соотношением отдельных компонентов (с точностью 3—5%): пироп — 37%, альмандин + спесартина — 53% и гроссуляра + андрадита — 10%.

Как видно, в гранате преобладает алмандиновая составляющая. Согласно данным Н. Н. Сарсадских и М. А. Гневушева (Бобриевич и др., 1957), исследовавших пиропы из сибирских кимберлитов, показатели преломления пироба растут с повышением интенсивности окраски от 1,733—1,735 до 1,764 — 1,767. Максимальный показатель преломления — 1,767 устанавливается у пиробов, интенсивно окрашенных в темно-красный и оранжевый цвет.

Гранат, извлеченный из алмаза и изображенный на рис. 4, имеет показатель преломления 1,772, т. е. значительно более высокий, чем у интенсивно окрашенных пиробов из кимберлита, и, очевидно, по своему составу и свойствам может быть назван магнизальным алмандином, чему соответствует и постоянная решетка этого граната ( $11,508 \pm 0,035$  кХ).

Показатели преломления из десяти замеров у гранатов, извлеченных из различных кристаллов алмаза, колебались от 1,761 до 1,780. Минимальный параметр решетки из шести измерений равен  $11,489 \pm 0,009$  кХ, максимальный —  $11,821 \pm 0,09$  кХ.

Показатель преломления 1,761 имеют окрашенные в желтоватый цвет гранаты, которые, согласно Винчеллу (1949), можно считать родолитом (железистым пиробом).

Относительно высокие показатели преломления и большие параметры решетки у некоторых гранатов из алмазов, возможно, обусловлены обогащением их СаО и FeO. Незначительные количества материала не позволили сделать химический анализ гранатов из алмаза, пришлось ограничиться лишь качественным спектральным анализом, результаты которого приведены выше.

**Включения хромшпинелида.** Хромшпинелид встречается в алмазах несколько чаще, чем оливин и гранат, — иногда в виде рассеянных включений по 10—20 шт. в одном кристалле алмаза, чаще — в виде единичных зерен. Размер кристалликов хромшпинелида колеблется в широких пределах — от 1 мм до мельчайших зерен, едва заметных при большом увеличении под микроскопом. Кристаллографическая форма включений, как правило, выражена неясно, и уловить сходство с октаэдром часто совершенно не удается. Наблюдаются уплощенные по  $L_3$  и удлиненные по  $L_2$  остросеребряные октаэдры с дополнительными ребрами на вершинах, но чаще — сложно деформированные октаэдрические кристаллики с притупленными вершинами и ребрами или же гантелеобразные, каплевидные и зерна более сложной формы, как и у гранатов (рис. 5).

При раздроблении кристалла алмаза хромшпинелиды, находящиеся внутри, обычно не освобождаются от алмаза в связи с тесным срастанием плоскостей (111) хромшпинелида с плоскостями (111) алмаза. Грани некоторых кристалликов хромшпинелида, так же как и включений граната, имеют ступенчато-пластинчатое строение, в связи с чем в некоторых случаях выглядят заштрихованными. Наблюдаются изометричные мелкие зернышки, похожие на шарики.

При наблюдении в бинокулярную лупу при сильном освещении иногда кромки кристалликов хромшпинелида в различной степени просвечивают коричневатым и буровато-вишневым цветом.

Для детального исследования включений хромшпинелида было раздроблено несколько алмазов. Рентгеноструктурными исследованиями одного из осколков уральского алмаза с находящимся внутри темным кристалликом была установлена принадлежность включения к кубической сингонии и замерена постоянная его решетки, которая оказалась равной  $8,270 \pm 0,009$  кХ.



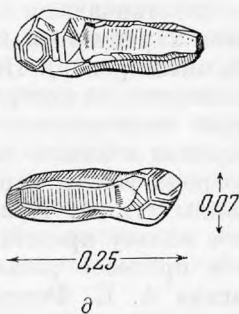
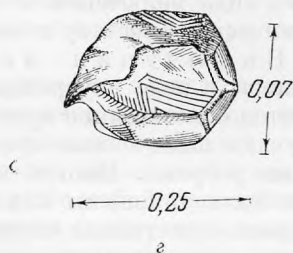
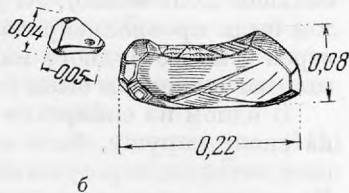


Рис. 5. Включения хромшпинелида в алмазе.

*a* — уплощенный кристаллик хромшпинелида, включенный в алмаз (фото); *б* — тот же кристаллик хромшпинелида. Рядом — включение оливина (размеры в миллиметрах, зарисовка); *в* — изометричный кристаллик хромшпинелида в алмазе (фото); *г* — то же включение (размеры в миллиметрах, зарисовка); *д* — удлиненный кристаллик хромшпинелида, извлеченный из алмаза (размеры в миллиметрах, зарисовка); *е* — сложная форма кристаллика хромшпинелида, извлеченного из алмаза (зарисовка)

Для выяснения химического состава включения вначале был сделан спектральный анализ чистой алмазной крошки раздробленного кристалла, который выявил присутствие следующих элементов: С (основа), Si (небольшое количество), Al (мало), Mg (присутствует), Fe и Ca (следы). Затем были проанализированы два осколка этого же алмаза с включениями зерен темного рудного минерала, в результате чего дополнительно к указанным элементам были отчетливо установлены линии Fe, Cr и Ni.

В одном из сибирских алмазов темное рудное включение, выходящее на сколе наружу, было исследовано З. М. Свердловым микроспектральным методом, в результате чего были зафиксированы линии Fe, Cr и Al. Микрхимическим анализом того же рудного минерала В. К. Коноплевым установлены Fe, Cr, Al и Ca. Постоянная решетки этого включения оказалась равной  $8,269 \pm 0,006$  кХ. Показатели преломления нескольких темных рудных зерен из различных кристаллов алмаза колеблются от 2,00 до 2,11.

Все приведенные данные подтверждают правильность отнесения подобного вида включений к группе хромшпинелида, и точнее, согласно их химическому составу и постоянной решетки, — к хромпикотиту.

**В к л ю ч е н и я а л м а з а.** Кроме оливина, граната и хромшпинелида, в виде внутренних сингенетических включений в алмазах встречаются более мелкие кристаллики самих алмазов. Во всех наблюдавшихся случаях включенные кристаллики алмаза имели форму октаэдров с острыми ребрами. Иногда наблюдались изометрические октаэдры, но чаще они были уплощены или более сложно деформированы. Обычно с одной стороны кристаллик включенного алмаза имел сложные неровные поверхности, напоминающие скол, а с другой стороны — ясно выраженную октаэдрическую форму.

В литературе имеются сведения о том, что в алмазах были встречены включения округлых кристаллов алмаза (Вильямс, 1932). Среди рассмотренных нами образцов включения алмазов всегда были представлены остросеребряными октаэдрами, иногда с пластинчатыми гранями, но ни разу не было встречено включение алмаза характерной для его кристаллов округлой формы (додекаэдроида или октаэдроида). Наблюдались случаи, когда часть включенного алмаза выходила на поверхность в каверне травления. При этом на вскрытой стороне включенного кристалла имелись элементы округлости, тогда как скрытая в алмазе часть представляла собой остросеребряный октаэдр. Такого рода факты, наряду с целым рядом других признаков, подробно указанных А. А. Кухаренко (1954) и Ю. Л. Орловым (1959), свидетельствуют в пользу представлений об образовании округлых кристаллов алмаза в процессе растворения плоскогранных кристаллов, как это предполагали А. Е. Ферсман и В. Гольдшмидт (1911).

В некоторых случаях на гранях внутреннего кристаллика алмаза наблюдается графитовая пленка, иногда целиком покрывающая все грани включенного октаэдра алмаза. Такого вида включения могут быть легко приняты за октаэдры рудных минералов (хромита или магнетита).

Не менее интересную группу минералов составляют эпигенетические включения в кристаллах алмаза, образующиеся различным образом. Из эпигенетических включений в алмазах установлены графит, серпентин, кварц и гидроокислы железа.

**В к л ю ч е н и я г р а ф и т а.** Графит является наиболее часто встречающимся включением в кристаллах алмаза. Характер проявления графита в алмазах разнообразен, но во всех отмеченных случаях он является эпигенетическим образованием, возникшим за счет полиморф-



ного превращения алмаза, вызванного различными причинами, на что указывал уже ранее А. А. Кухаренко при описании уральских алмазов.

Часто наблюдается графитизация алмаза по плоскостям (111) по стенкам трещин вблизи различных включений внутри его. Иногда развивается только одна округлая пластина графита в виде дискообразного ореола, окружающая какое-либо включение (рис. 6, а, б), причем нередко включение, расположенное в центре графитового диска, бывает очень незначительного размера и заметно лишь при большом увеличении.

Чаще графитизация алмаза вокруг включений по плоскостям (111) происходит в нескольких направлениях, в связи с чем графит образуется в виде розеток или лучистых форм вокруг включенного минерала (рис. 6, в, г). Нередко большие внутренние трещины в алмазе близ включения бывают зачернены вследствие неполной и неравномерной графитизации стенок, как, например, это видно на рис. 3, в, г.

Как уже отмечалось, более мелкие кристаллики алмаза, включенные в алмаз, часто бывают покрыты графитовой пленкой сплошь или частично. Таким образом, одной из причин, обуславливающих появление графита в алмазах, являются напряжения, возникающие в алмазе вокруг включений.

Вторая причина графитизации алмаза — напряжения, возникающие на плоскостях двойникового срастания. Часто на плоскости срастания шпинелевых двойников наблюдаются игловидные выделения графита.

Как предполагает А. А. Кухаренко, коричневая окраска кристаллов алмаза, которые (все без исключения) представляют собой полисинтетические микродвойниковые образования, обусловлена дисперсным выделением графита на бесчисленных плоскостях срастания отдельных микродвойниковых пластин. Такое предположение хорошо увязывается с зональным характером этой окраски и с изменением ее при освещении различными источниками света. При люминесцентном свете эти кристаллы становятся серыми (дымчатыми), а при освещении обычными электрическими лампами накаливания — розовыми, коричневыми, коричневатокрасноватыми с лиловым оттенком.

В некоторых случаях приходится наблюдать, как графитовые включения в виде «хлопьев» переполняют весь кристалл алмаза, отчего он становится серым или совершенно черным. При этом графитовые «хлопья» располагаются беспорядочно, а не закономерно — по зонам роста кристалла алмаза, как это могло бы быть в случае захвата графита при кристаллизации алмаза. Возможно, что в таких случаях графитизация алмаза происходит вследствие сложности мозаичной структуры кристалла, который, по существу, представляет собой агрегат отдельных кристаллических блоков.

По мнению Вильямса (1932), присутствие графита в алмазах указывает на неоднократное изменение условий в магматическом расплаве, что определило чередование кристаллизации из расплава алмаза и графита. Однако характер и морфологические особенности графитовых включений в алмазах свидетельствуют о том, что графит не захватывался из расплава при кристаллизации алмаза, а образовывался позднее, путем графитизации самого алмаза в результате различных внутренних напряжений, возникающих вокруг включений, на плоскостях двойникования и т. п. Этот процесс происходил, очевидно, еще при относительно высокой температуре (не ниже 900—1000°), способствовавшей процессу графитизации алмаза.

**Включения серпентина.** Включения серпентина в виде псевдоморфоз по кристалликам оливина встречены нами в нескольких

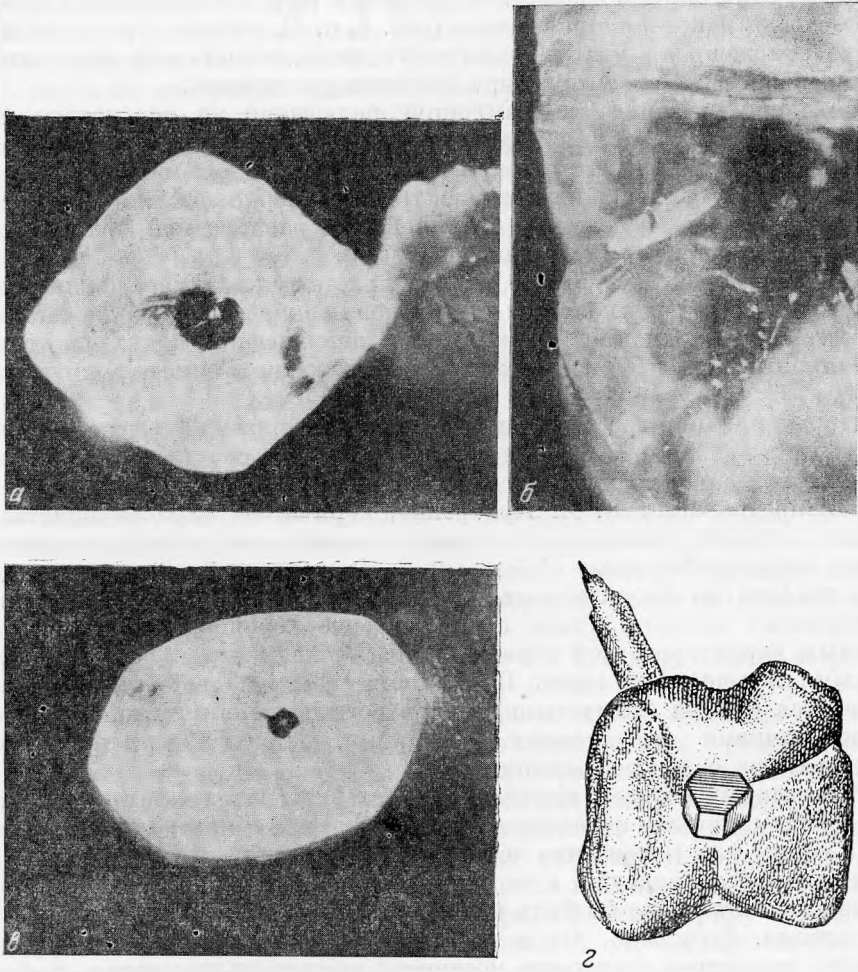


Рис. 6. Включения графита в алмазе.

*a* — диск графита вокруг прозрачного включения в алмазе (фото); *b* — диск графита вокруг включения мелкого кристаллика хромшпинелида (фото); *c* — развитие графита в виде лепестков по раковинчатым трещинам вокруг кристаллика хромшпинелида в алмазе (фото); *d* — то же, зарисовка

кристаллах африканских алмазов; в уральских и сибирских алмазах подобные включения не наблюдались. Очень интересен сам факт развития псевдоморфоз серпентина по оливину, включенному в алмаз, что ранее никем не отмечалось. На это следует обратить особое внимание в связи с указаниями на включения в алмазах хлорита, флогопита и биотита, которые, по всей вероятности, также являются вторичными минералами, развивающимися по гранатам. Очевидно, при метаморфизме алмазоносной породы летучие компоненты могли проникнуть в алмаз по микроскопическим трещинкам и изменить первоначальные включения оливина и граната. О возможности обнаружения незаметных при обычном просмотре трещин в кристаллах алмаза сказано несколько ниже, при описании включений оксидов железа.

На рис. 7 приведена зарисовка псевдоморфозы серпентина по хорошо выраженному кристаллику оливина. Серпентинизированные кристаллы оливина становятся мутновато-зеленоватыми, непрозрачными. Показатели преломления, замеренные у двух зерен серпентина из алмаза, оказались равными  $n_g = 1,570$  и  $n_p = 1,559 - 1,560$ .

**Включения кварца.** Среди уральских алмазов изредка встречаются кристаллы, в кавернах и каналах разъедания которых обнаружены небольшие количества кварца, прочно сросшегося с алмазом. В большинстве случаев кварц катаклазирован и вместе с ним наблюдаются мелкие чешуйки серицита. А. А. Кухаренко, ранее описавший эти включения в уральских алмазах, отмечал сходство этого вида поверхностных включений с цементом ордовичских конгломератов, развитых в пределах верховьев алмазоносных рек Урала, в которых известны находки алмаза.

Еще реже встречаются в каналах разъедания на поверхности алмаза приростки прозрачного, бесцветного и слабозеленоватого кварца. Внутренних включений кварца в алмазах Урала, Сибири и в изученных нами кристаллах из зарубежных месторождений не наблюдалось.

**Включения гидроокислов железа.** В алмазах из различных месторождений нередко трещины и каверны травления бывают забиты гидроокислами железа или сильно ожеженным глинистым материалом. Желтые и буро-красные гидроокислы железа иногда проникают глубоко внутрь алмаза по различного рода трещинам, в связи с чем алмаз или сrostок кристаллов алмаза кажется неравномерно окрашенным в желтый или красноватый цвет. В некоторых случаях совершенно красные гидроокислы заполняют трещинки по неровным поверхностям срастания двойниковых вrostков алмаза в алмаз и заполняют игольчатые и лучистые трещинки. Создается впечатление наличия игольчатых включений красного минерала, напоминающих волосовидные включения рутила в кварце из альпийских жил.

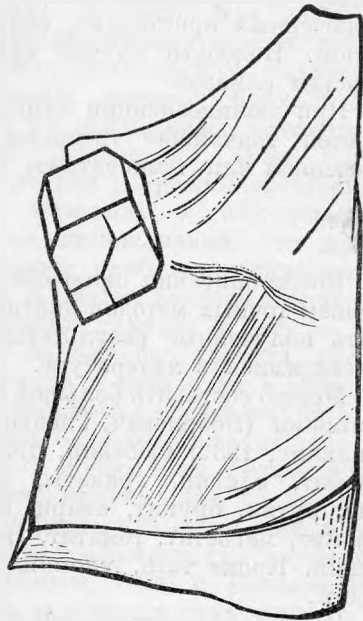


Рис. 7. Осколок алмаза с включением серпентина в виде псевдоморфозы по кристаллику оливина. Осколок получен после раздробления целого кристалла алмаза, с находящимися внутри него зелеными включениями (зарисовка)

В одном случае внутри уральского алмаза наблюдалось интересное включение хорошо ограненного кристаллика ярко-красного цвета. При исследовании алмаза в ультрафиолетовом свете, в котором он сильно люминесцировал синевато-голубым цветом, была обнаружена тончайшая трещинка, идущая от поверхности алмаза до включенного кристаллика. Стенки трещинки были очень слабо пигментированы окислами железа, и при обычном освещении трещинка была совершенно незаметна. Проникнув по трещинке, окислы интенсивно окрасили в красный цвет весь включенный кристаллик, оказавшийся, как показали исследования, оливином. Подобные случаи наблюдались также среди сибирских и африканских алмазов.

При люминесценции алмаза в ультрафиолете иногда легко обнаруживаются тончайшие трещинки, которые выделяются зеленовато-желтым свечением или темноватыми пятнами окислов, заполняющих трещинки.

\* \* \*

После описания включений в кристаллах алмаза, изученных с применением точных методов диагностики, представляет большой интерес сравнить полученные результаты с известными по этому вопросу данными, имеющимися в литературе.

Можно составить большой список минералов, указываемых различными авторами (Бобриевич, Гневушев и др., 1957; Спенсер, 1924; Сэттон, 1928; Вильямс, 1932; Гюбелин, 1953) в качестве включений в алмазах: алмаз, графит, оливин, гранаты, хромдиопсид, авгит, энстатит, циркон, топаз, рутил, брукит, кварц, биотит, флогопит, хлорит, пирит, ильменит, хромит, магнетит, гематит, гидроокислы железа, золото и медные соединения. Кроме того, упоминаются включения газовых пузырьков и жидкости.

Однако в опубликованных работах обычно не указывались константы включенных в алмаз минералов в доказательство правильности их определения; идентификация включений в большинстве случаев сделана визуально, по внешним признакам, на основании субъективных впечатлений. Часто не отмечалось, наблюдался ли минерал в виде сростка с алмазом или внутри его, что имеет большое значение.

Визуальное определение включений, основывающееся главным образом на внешней форме кристаллов и цвете минерала (без исследования их путем извлечения из алмаза и применения точных методов диагностики) приводит к ошибкам, которые создают путаницу в представлениях по данному вопросу.

Рассмотрим вероятность одновременной кристаллизации с алмазом и относительной распространенности в нем тех минералов, которые указываются в качестве включений (исключая графит и алмаз<sup>1</sup>).

**О л и в и н.** Оливин встречается внутри кристаллов алмаза, и сингенетичность его с алмазом не вызывает сомнения. Однако ранее этот минерал либо совершенно не указывали среди включений в алмазах (например, для уральских и сибирских алмазов до 1956 г.), либо считали только вероятным включением, как, например, об этом писали Сэттон (1928) и Вильямс (1932) в монографиях о южноафриканских алмазах. Причина этого заключалась в том, что кристаллики оливина в алмазах чаще всего, очевидно, принимали за циркон и другие минералы. Проведен-

<sup>1</sup> Сингенетичность включений алмаза в алмазе не вызывает сомнений; эпигенетический характер включений графита показан выше, при описании форм его проявления в алмазах.

ными исследованиями оливины с несомненностью установлены в уральских, сибирских, африканских и бразильских алмазах. Определенно можно говорить, на основании достаточно большого материала, что в уральских и сибирских алмазах оливин, наряду с гранатом и хромшпинелидом, является наиболее часто встречающимся включением. Аналогичное впечатление создается для африканских, бразильских и индийских алмазов, так как в кристаллах, которые мы исследовали, очевидно, находятся также наиболее обычные включения, оказавшиеся в различных случаях оливинами, гранатами и хромшпинелидами. Кроме того, основываясь на описании и морфологических особенностях видимых на фотографиях наиболее типичных включений, которые приводятся различными авторами, изучавшими алмазы из зарубежных месторождений, но не применявших точных методов диагностики, можно сделать вывод, что часто идентификация их сделана неправильно. Включения, отнесенные к циркону или другому минералу, в действительности являются оливинами, гранатами или хромшпинелидами. Это дает основание предполагать, что эти минералы также наиболее распространены в алмазах из африканских, бразильских и других месторождений<sup>1</sup>.

**Гранаты.** Одновременная кристаллизация граната и алмаза в магматическом расплаве доказывается фактом нахождения граната внутри кристаллов алмаза. Включение этого минерала в уральских и сибирских алмазах было установлено только после детальных исследований их с применением точных диагностических методов — рентгеноструктурного анализа и иммерсионных исследований. До этого прозрачные, бесцветные и слабо окрашенные гранаты в алмазах обычно принимались за другие минералы и идентифицировались как алмаз, циркон, пузырьки газа или отмечались как неизвестные минералы. Гранаты в африканских алмазах ранее указывались в качестве включений Сэттоном (1928) и Вильямсом (1932), но данных об их оптических свойствах и о постоянных решетках, никто не приводил, поэтому о составе гранатов определенно судить было невозможно. Сэттон в виде предположения указывал на гессонит, относя к нему включения «цвета корицы», но, судя по его описанию, он, вероятно, принимал за гранат хромшпинелид, форма которого в алмазах иногда напоминает ромбододекаэдр (см. рис. 3). Включение гессонита — железистой разновидности гроссуляра — маловероятно, так как при раздроблении африканских алмазов извлеченные из нескольких кристаллов зерна граната имели желтый цвет и показатель преломления 1,760—1,761, т. е. соответствующий железистому пиропу (родолиту), а в алмазах из других месторождений (Урала и Сибири) устанавливаются гранаты только шпательшитовой группы.

Как уже отмечалось при рассмотрении оливина, гранаты также являются наиболее распространенным включением в алмазах. Ранее они не указывались как часто встречаемые включения, так как их почти всегда неправильно относили к другим минералам.

**Хромдиоксид и другие пироксены.** При исследовании включений пироксены в алмазах нами не были встречены. Вильямс относил к хромдиоксиду изумрудно-зеленые включения, находящиеся внутри алмаза. Им же описаны сростки хромдиоксида с алмазом. Сэттон указывает в руднике Фоорспод одну находку алмаза с многочисленными зелеными включениями, которые он отнес к хромдиоксиду. Недавно подобное включение, но также без точных определений, было указано

<sup>1</sup> Широкая распространенность оливина в южноафриканских алмазах подтверждается в работах Митчелла и Гнардини (1953).

М. А. Гневушевым в работе «Алмазы Сибири». Очевидно, хромдиопсид встречается как включение в алмаз, но значительно реже, чем оливин, гранаты и хромшипелид.

Приведем выдержку из описания Сэттоном (1928) включений пироксенов в южноафриканских алмазах. «Определить их не всегда бывает легко ввиду того, что большинство включений, заключенных в трещиноватые поверхности, найдено было лишь после того, как кристаллы алмаза были обработаны плавиковой кислотой и когда оставалось небольшое количество их первоначального вещества (т. е. вещества включения. — Ю. О.). Хромовый диопсид определяется, однако, как грязное пятно в кристалле алмаза... Из других зеленых пироксенов возможны включения авгита и эпстатита» (стр. 42).

Как видно из этого описания, в некоторых случаях пироксены были встречены в виде сростков с алмазом, а не как внутренние включения. Каких-либо точных данных о свойствах пироксенов в алмазах никто не приводит. Необходимо произвести детальные исследования включений, относимых к пироксенам, чтобы считать их определенно установленными.

**Циркон.** Циркон, как минерал, встречаемый в виде включений в алмазах, указывается многими авторами. Однако в монографиях Сэттона и Вильямса об этом говорится недостаточно определенно. Сэттон пишет: «Есть основания предполагать, что циркон является включением, хотя и редким. Несколько зерен цвета корицы, конечно, могут оказаться цирконом, а не гранатом. Включения цвета меда могут оказаться цирконом или алмазом» (1928, стр. 41). Без приведения каких-либо констант, со ссылкой на предыдущих исследователей, о цирконе как о включении в алмазе упоминал и Вильямс (1932). Он приводит фотографии очень интересных включений, которые в поляризованном свете обнаруживают ясное двупреломление и высокие цвета интерференции, что и послужило основанием предположительно отнести эти включения к циркону<sup>1</sup>.

Оригинальные исследования были проведены на одном уральском алмазе А. А. Кухаренко. На основании изучения спектра поглощения в ультрафиолетовой области, полученного для цирконов, зажатых между двумя пластинками алмаза, и сравнения его со спектром поглощения в этой же области, полученным от алмаза с включениями, А. А. Кухаренко делает вывод, что включения являются цирконами. Впоследствии подобные исследования были проведены на сибирских алмазах Н. А. Бобковым, который не получил удовлетворительных результатов и критически отнесся к предложенной методике.

Как известно, ультраосновные изверженные породы по сравнению со всеми другими крайне бедны цирконом, и сам минерал циркон характерен для магм щелочного и кислого ряда. Однако проявление циркония не в рассеянном состоянии, а в виде самостоятельного минерала известно в породах основного и ультраосновного состава. Имеются сведения о присутствии циркона в сибирских трапшах; редкую аксессуарную вкрапленность циркона отмечал А. А. Кухаренко в габбро-диабазе западного склона Урала и в нерастворимом остатке ряда проб из пироксенитов и периодотитов массива Косвинского Камня. Известны порфириновые вкрапленности циркона в базальтах Германии (Ункель).

В самих кимберлитах цирконы в некоторых случаях в большом количестве встречаются в тяжелой фракции, что отмечал, например, Вильямс

<sup>1</sup> Судя по фотографиям, приводимой Вильямсом, включения, называемые им цирконом, в действительности являются оливинами.



(1932). Он указывает, что основная масса циркона в кимберлитах связана не с различными горными породами (гранитами, сиенитами, гнейсами и кристаллическими сланцами), которые прорваны кимберлитовыми трубками, а главным образом с цирконсодержащими пироксенитами — родственными кимберлитам породами, встречающимися в виде ксенолитов в кимберлитах. Но наряду с этим Вильямс отмечает, что в основной массе самого кимберлита циркон встречается исключительно редко.

В приводимых в литературе химических анализах кимберлитов (африканских, сибирских и др.)  $ZrO_2$  не отмечается.

В связи с отсутствием определений констант у включенных в алмаз минералов, относимых различными авторами к циркону, присутствие его в кристаллах алмаза следует считать совершенно недоказанным. Исходя из представлений о химизме перидотитового расплава, в котором происходит кристаллизация алмаза, одновременное образование циркона и алмаза мы считаем маловероятным.

Можно уверенно говорить, что за циркон чаще всего принимались кристаллики оливина псевдотетрагонального облика и реже — гранаты в виде несколько вытянутых по оси  $L_4$  ромбододекаэдрических кристаллов.

**Т о п а з.** В настоящее время генетическую связь алмазов с гипербазитовой магмой следует считать единственно определенной. Исходя из представлений об условиях кристаллизации алмаза, нахождение топаза в виде включения, образовавшегося одновременно с алмазом, по нашему мнению, невероятно. Очевидно, за топаз ошибочно был принят кристаллик оливина или граната.

**Р у т и л и б р у к и т.** Включение этих минералов в алмаз различные авторы указывают предположительно, поэтому считать рутил и брукит установленными включениями в алмазе нет оснований.

**К в а р ц.** Включение таблитчатого врослка кварца в бразильском алмазе было описано Колони (1923), который считал, что кварц сингенетичен алмазу, и на основании этого высказывал мысль о связи бразильских алмазов с кислыми породами. Позднее эти же включения исследовал Корренс (1931), доказавший, что все включения кварца в бразильских алмазах вторичны и связаны с трещинками. Совсем недавно это же мнение было высказано Брюэ (Bruet, 1955), который считает, что нахождение бразильских алмазов в гранитовых и других кислых породах следует признать недоказанным.

Как уже отмечалось, сростки кварца с алмазом найдены в россыпях Урала, но кварц является сохранившимися кусочками вторичной вмещающей породы, прочно припаянными к алмазу.

Болл (Ball, 1930), по данным Петцольда и Гопперта, сообщает о присутствии кварца в индийских алмазах.

Отметим тот факт, что включения и сростки алмаза с кварцем указываются при исследовании алмазов из месторождений таких областей, где известны вторичные коллекторы алмазов — конгломераты с кварцевым цементом и кварцитами. В южноафриканских алмазах, связанных с кимберлитами, как отмечает Вильямс, кварц не был найден.

Иногда включения прозрачных минералов в алмазе без всякого основания относят к кварцу (Гюбелин, 1953), что служит причиной неправильных суждений об условиях образования алмаза.

Судя по выявленной группе сингенетических с алмазом минералов, по химизму алмазоносного магматического расплава и температуре его кристаллизации, никаких предпосылок к появлению кварца из одного расплава с алмазом не имеется.

Хлорит, биотит и флогопит. Включение этих минералов в алмаз указывает Вильямс (1932) на основании данных Райта, Бауера и Спенсера. Все эти минералы содержат группу ОН и образуются в определенных условиях. Поэтому очень важно иметь несомненные доказательства их сингенетичности алмазу (что в некоторых случаях принимается без достаточных обоснований).

В связи с находками внутри алмаза серпентина в виде псевдоморфоз по оливину, как это указывалось выше, нам представляется вполне возможным аналогичное образование хлорита, биотита и флогопита путем более позднего разложения гранатов, включенных в алмаз. Это обычно наблюдается для гранатов в кимберлитах.

Пирит. Включение пирита в алмаз указал Сэттон (1928). Он пишет, что пирит — одно из случайных включений и встречен в виде сростка с алмазом. Вполне очевидно, что пирит является очень редким включением и генетическое взаимоотношение его с алмазом по имеющимся данным установить трудно.

Ильменит. Ильменит, как вероятное включение, указывают почти все авторы, исследовавшие включения в алмазах, однако ни одного убедительного доказательства, с приведением каких-либо констант, никто не приводит. Вполне понятно, что ильменит, встречающийся как один из основных минералов в кимберлитах вместе с пиропами, хромдиопсидами и оливинами и обладающий ясно выраженными типоморфными особенностями, свидетельствующими о тесной генетической связи с указанными минералами<sup>1</sup>, может считаться одним из наиболее вероятных включений. Многие авторы принимали за ильменит темные включения хромшпинелида в алмазах, чему способствовала искаженная форма включений, часто имеющих пластинчатый и таблитчатый облик.

Несмотря на достаточно большое количество исследованных рудных включений, в кристаллах алмаза нами ильменит не встречен. Можно сделать вывод, что из рудных минералов среди включений, безусловно, преобладает хромшпинелид; если же ильменит и встречается в алмазах, то это включение относительно редкое.

Хромит. Многие исследователи ранее указывали включение в алмаз хромита, за который принимали черные октаэдрические кристаллики внутри алмаза. Проведенные исследования показали, что из темных, непрозрачных или слабопросвечивающих по краям минералов в алмазах обычно присутствует хромшпинелид, близкий к хромпикотиту.

Вследствие разнообразия форм выделения хромшпинелида в алмазе, ранее при визуальных определениях его, очевидно, во многих случаях относили к гранатам, гематиту, ильмениту и магнетиту. Поэтому о распространенности его в алмазах правильного представления не было.

Хромшпинелид встречается в алмазах с гранатом и оливином, иногда — все вместе в одном кристалле, и сингенетичность его с алмазом, так же как граната и оливина, не вызывает сомнений.

Гематит. Впервые включение гематита в алмазе было указано Когеном (Cohen, 1876). Однако автор только предполагал, что исследованные им рудные включения являются гематитом. Впоследствии в справочной литературе гематит указывался (и указывается до сих пор) уже как установленное включение в алмазе. Сэттон (1928), изучавший включение в южноафриканских алмазах, писал, что Коген «дал начало заблуждению, которое еще не уничтожено».

<sup>1</sup> Типоморфизм ильменита из кимберлитов заключается в обогащенности  $MgO$  и  $Fe_2O_3$  и повышенной магнитности, что отмечается для южноафриканских, а также для сибирских месторождений.

Учитывая, с одной стороны, низкий кислородный потенциал среды, в которой кристаллизуется алмаз, и, с другой стороны, термическую диссоциацию гематита, которая происходит при температуре приблизительно  $800-900^{\circ}$ , т. е. ниже вероятной температуры кристаллизации алмаза ( $1000-1500^{\circ}$ ), сингенетическое образование гематита и алмаза в магматическом расплаве следует считать невероятным. Очевидно, за гематит принимали просвечивающие по краям вишнево-красным цветом уплощенные включения хромшпинелида.

**Магнетит.** В 1924 г. Спенсер изучил включение в кристалле алмаза и отнес его к магнетиту. Сэттон (1928) и Вильямс (1932), основываясь на этих данных, считали включение магнетита весьма вероятным и указывали его в своих работах. Поскольку монографии Сэттона и Вильямса являлись одними из основных работ по алмазам, естественно, включение магнетита в алмазах всегда указывается и во всех последующих работах.

За магнетит легко могли быть приняты октаэдр хромшпинелида, а еще более вероятно — включения мелких октаэдров алмаза с графитизированными поверхностями. Из-за отсутствия точных данных, уверенности в правильности идентификации включений и отнесения их к магнетиту быть не может.

**Газовые пузырьки и жидкость.** Как правило, в литературе указывается включение в алмазах пузырьков газа и жидкости. Несмотря на многие тысячи кристаллов, просмотренных нами с целью исследования включений, — жидкости и газовых пузырьков с жидкостью или без нее встречено не было. Уместно привести высказывание Сэттона: «Включение, часто указываемое в руководствах, но не доказанное в природе, — это пузырьки двуокиси жидкого углерода в условиях огромного давления. Другой излюбленный миф представляет газ, сжатый до такой степени, что он делает алмаз почти опасным взрывчатым веществом» (1928, стр. 42).

Некоторые авторы (Гюбелин, 1953) считают включением газа белые, в виде облака, образования внутри кристаллов алмаза. Однако ничем не доказываются их газовая природа. Наличие газа и жидкости в кристаллах алмаза до сих пор достоверно не определено. При описании этого рода включений тщательная документация и доказательство газовой жидкой природы совершенно необходимы для того, чтобы считать это определенно установленным, что очень важно для интерпретации условий образования алмаза. Частые указания на присутствие газовых пузырьков могут быть объяснены тем, что изометричные, почти совершенно округлые мелкие включения прозрачных кристалликов оливина очень напоминают пузырьки газа. Это, в связи с указанием в литературе на газовой-жидкие включения, очевидно, нередко приводит к ошибкам, как это было, например, при описании различными минералогами уральских и сибирских алмазов.

**Гидроокислы железа и др.** Включения гидроокислов железа, медных окислов, а также сростки алмаза с золотом и различными другими минералами и веществами могут образоваться при метаморфизме вмещающих пород, первичных или вторичных, в аллювиальных отложениях и т. д. Наиболее обычными из включений этого типа являются включения гидроокислов железа.

При описании включений ранее многие авторы не обращали достаточного внимания на разделение сингенетических и эпигенетических включений в алмазах, что в некоторых случаях приводило к ошибочным представлениям об условиях их образования и о связи алмазов с различными породами.

Проведенными работами установлены основные, наиболее часто встречаемые в виде включений в алмазах минералы: оливин, гранаты и хромшпинелиды, образующиеся одновременно с алмазом и захватывающиеся им при кристаллизации, а также графит и серпентин, являющиеся эпигенетическими образованиями, развивающимися, соответственно, по алмазу и оливину, и, наконец, кварц и гидроокислы железа, проникающие в алмаз по трещинкам и различным каналам травления. (возникшим в эндогенных условиях).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- Бобревич А. П., Глевушев М. А., Кинд Н. В., Сарсадских Н. Н. и др. Алмазы Сибири. Госгеолтехиздат, 1957.
- Винчелл Л. Н. Оптическая минералогия. Изд-во иностр. лит-ры, 1949.
- Кухаренко А. А. Об округлых кристаллах алмаза.— Ученые записки ЛГУ имени А. А. Жданова. Кристаллография и кристаллохимия, 1954.
- Михеев В. И. и др. Изменение размеров ячейки гранатов в зависимости от состава.— Записки Всес. минер. об-ва, серия 2, ч. 85, вып. 4, 1956.
- Орлов Ю. Л. К вопросу о генезисе округлых форм кристаллов алмаза.— Труды Минер. музея АН СССР, вып. 9, 1959.
- Футергендлер С. И. Исследование включений в алмазах методом рентгеноструктурного анализа.— Записки Всес. минер. об-ва, серия 2, ч. 85, вып. 4, 1956.
- Ball Fg. S. H. Diamond sources other than kimberlite.— Congr. Intern. Miner., Mét., Geol. appl., 1930.
- Bruet Ed. Considerations sur le diamant et sa géologie.— Bull. Mus. nat. hist. natur., v. 27, № 4, 1955.
- Cohen E. Über Einschlüsse in Südafrikanischen Diamanten.— N. Jb. Miner., 1876.
- Colony R. An unusual quartz-diamond intergrowth.— Amer. J. Sci., Ser. V, № 29, 1923.
- Correns C. W. Über Diamanten mit Quarzenlagerungen.— Zs. Krist., Bd. LXXX, 1931.
- Fersmann A., Goldschmidt V. Der Diamant. Heidelberg, 1911.
- Gubelin S. J. Inclusions as a means of gemstone identification. Los Angeles, 1953.
- Mitchell R. S., Giardini A. A. Oriented olivine inclusions in diamond.— Amer. Miner., v. 38, № 1—2, 1953.
- Spencer L. J. An inclusion of magnetite in diamond.— Miner. Mag., № 107, 1924.
- Strunz H. Mineralogische Tabellen. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1957.
- Sutton J. R. Diamond (a descriptive treatise). London, 1928.
- Williams A. The genesis of the diamond. London, 1932.