

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

УДК 549.211; 549.621.14; 552.48; 323.6

В.К. ГАРАНИН, С.В. ДИГОНСКИЙ, Г.П. КУДРЯВЦЕВА

МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА В АСПЕКТЕ ЕГО СИНТЕЗА.

Статья 2. Гипотезы генезиса алмаза в метеоритах, метаморфических породах и кимберлитах¹

На основе экспериментальных исследований и теоретических расчетов показано, что синтез алмаза и графита из метана осуществляется без применения высоких давлений и практически при одних и тех же температурах, однако мгновенный нагрев метана приводит к росту алмаза, а пиролиз метана — к образованию графита. На основе этого предложены гипотезы происхождения алмазов в метеоритах, метаморфических и кимберлитовых породах и на конкретных примерах показано, что эти гипотезы имеют реальную геологическую основу, могут объяснить многие вопросы генезиса алмаза и быть полезными при поиске месторождений алмаза.

Происхождение алмазов в метеоритах

Любые гипотезы образования алмаза в метеоритах путем превращения графита при сверхвысоком давлении никак не объясняют появление самого графита. В то же время метеориты, моментально раскаляющиеся до белого свечения при входе в плотные слои атмосферы, дают весьма наглядное представление о мгновенном нагреве вещества.

Из описания алмазосодержащих каменных метеоритов следует, что алмаз образует парагенетические сростки с графитом, равномерно распределенные по объему метеоритов и расположенные между зернами силикатов. Отмечается, что алмаз и графит составляют 95–98%, а органическое вещество уреилитов, представленное углеводородами парафинового ряда, — 2–5% от общего содержания углеродистого вещества [4, 5]. Кроме того, уреилиты, в отличие от других типов ахондритов, характеризуются повышенными количествами водорода и метана, которые отмечены как в минералах, так и в межзерновом пространстве [19].

Можно допустить, что углеродистое вещество уреилитов изначально было представлено абиогенными предельными углеводородами. При повышении температуры метеорита, как и при искусственном синтезе, часть парафиновых углеводородов нагревается мгновенно с образованием алмаза, а другая часть — медленно, подвергаясь пиролизу с образованием графита.

Сходные условия алмазообразования можно обнаружить в нодуле железного метеорита Каньон-Дьябло, также содержащего алмазы, графит и предельные углеводороды (рис. 1). Однако состав и

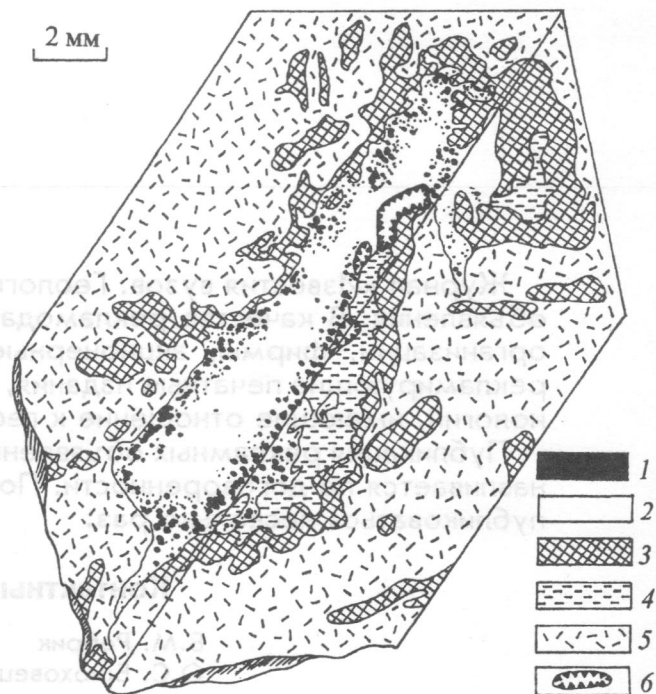


Рис. 1. Зерна алмаза в троилит-графитовом нодуле метеорита Каньон-Дьябло [5]: 1 — алмаз; 2 — смесь: троилит + графит + алмаз; 3 — когенит; 4 — шрейберзит; 5 — камасит; 6 — пустотки

¹ Статья 1, № 1, 2006.

распределение углеродистого вещества в железном метеорите, в отличие от уреилитов, характеризуется двумя особенностями: 1) ничтожное (несколько сотых долей процента) содержание остаточных предельных углеводов, по сравнению с уреилитами. 2) специфическое расположение в нодуле кристаллов алмаза, основная масса которых сосредоточена на периферии нодуля непосредственно на границе с металлической фазой.

Эти факты, как и парагенезис алмаза с графитом, логично объяснить газофазным образованием алмаза и графита за счет параллельно протекающих процессов мгновенного нагрева и пиролиза предельных углеводов.

Во-первых, более высокая теплопроводность железного метеорита, по сравнению с уреилитами, может обусловить интенсивный нагрев и полное превращение абиогенных углеводов, содержащихся в нодуле, в алмаз и графит.

Во-вторых, на границе с металлической фазой нагрев углеводов осуществляется интенсивнее, с более высокой скоростью, чем в центральной части нодуля, поэтому на периферии нодуля преобладает алмаз.

Происхождение алмазов в метаморфических породах

Концепции образования алмаза в метаморфических породах принципиально различаются по физико-химическим условиям кристаллизации этого минерала.

Сторонники концепции, рассматривающие кристаллизацию алмаза в условиях мантии, разделяются по взглядам на геологические условия формирования алмазосносных пород. Одни предполагают, что алмаз кристаллизовался в условиях мантии и выносился мантийными массами в верхние горизонты литосферы [20, 21]. Другие объясняют происхождение алмазов погружением метаморфических толщ при процессах субдукции в мантию, где достигаются необходимые сверхвысокие давления [27, 29].

Приверженцы концепции корового образования алмаза предполагают, что алмаз кристаллизовался в метаморфических породах из углеродсодержащего флюида при относительно низких температурах и давлениях [16]. Интерпретация нашей модели газофазного образования природного алмаза применительно к Кумдыкольскому месторождению в Казахстане базируется на сопоставлении геологического строения рудной зоны (рис. 2) с распределением и

особенностями углеродистого вещества в рудах разных типов [16].

Под рудной зоной Кумдыкольского месторождения понимается полоса пород с выдержанными содержаниями алмаза как по простиранию, так и на глубину. Рудная зона имеет протяженность 1300 м. Ее мощность с юго-запада на северо-восток увеличивается от 40—60 до 180—200 м. Особенности рудной зоны — наличие разломов и сильная трещиноватость пород.

Южная граница рудной зоны проводится по появлению в разрезе мигматитов, а северная часть граничит с зоной гранитных инъекций. Мощность полосы инъекционных гранитов изменяется по простиранию от 30 до 50 м. Количество и мощность инъекций увеличиваются по мере приближения к телу лейкократовых гранитов. Граница между инъекционной зоной и гранитным телом условная.

В породах рудной зоны Кумдыкольского месторождения, содержащих промышленные концентрации алмазов, по минеральному и химическому составу условно выделены пять типов руд, при этом особый интерес представляет распределение в рудах алмазов, графита и углеводов:

I. Гранат-биотитовые руды. Как правило, породы графитизированы.

II. Кварцевые руды с биотитом, амфиболом или пироксеном. Графитом обогащены отдельные полосы в породе, много рассеянного графита.

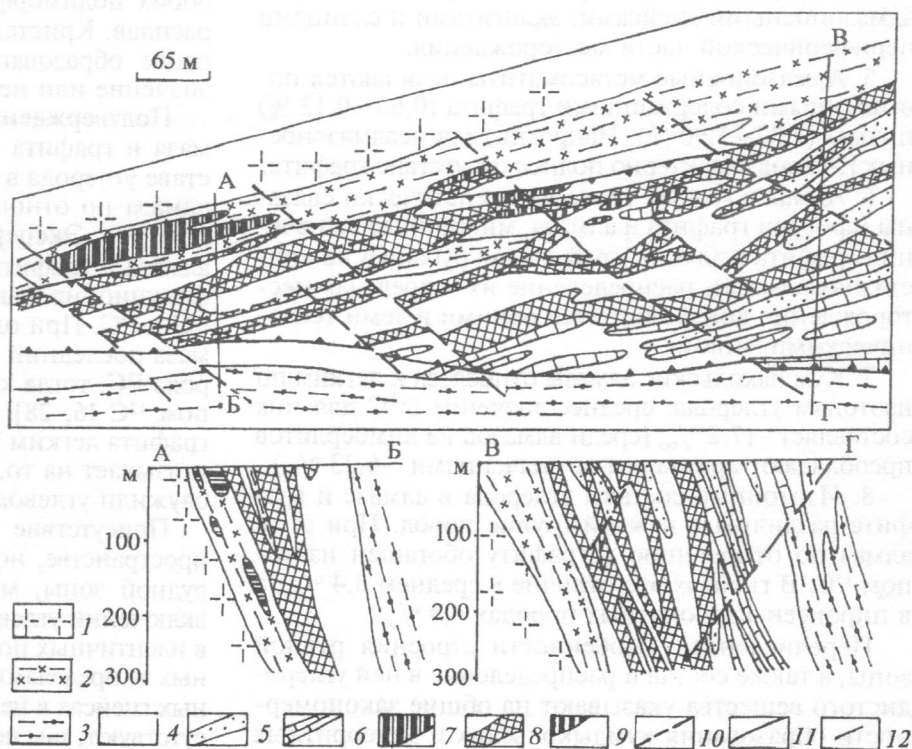


Рис. 2. Геологическое строение рудной зоны Кумдыкольского месторождения [16]: 1 — гранат-мусковитовые лейкократовые граниты; 2 — породы инъекционной зоны и гранитные инъекции в рудной зоне; 3 — мигматиты; 4 — гранат-биотитовые гнейсы и их метасоматически переработанные разновидности (I тип руд); 5 — биотит, пироксен и амфибол-кварцевые породы (II тип руд); 6 — флогопит-пироксен-карбонатные и другие карбонатные породы (III тип руд); 7 — пироксеновые и гранат-пироксеновые породы (IV тип руд); 8 — породы сложного минерального состава (V тип руд); 9 — эклогиты; 10 — разрывные нарушения; 11 — границы рудной зоны; 12 — линии разрезов

III. Флогопит-пироксен-карбонатные и другие карбонатные руды. Графит неравномерно концентрируется в отдельных участках.

IV. Пироксеновые и гранат-пироксеновые руды. Графит не характерен.

V. Руды сложного минерального состава. Породы, как правило, содержат графит.

Кроме того, отмечается ряд закономерностей, связанных с алмазосностью пород:

1. В пределах рудной зоны «алмазное» оруденение не имеет четких границ и наложено на все типы пород субстрата.

2. Алмазосные породы с промышленными содержаниями всегда представлены метасоматически переработанными разностями, исходный состав которых иногда не поддается определению.

3. Алмазы обнаружены не только в межзерновом пространстве, но и внутри практически всех породообразующих минералов — пироксене, флогопите, биотите, кварце, полевых шпатах, амфиболе, цирконе, хлорите, сериците, карбонате. Подавляющая часть алмазов тяготеет к зернам граната. В свою очередь гранаты и другие минералы, содержащие алмазные включения, по составу не отличаются от аналогичных породообразующих минералов без алмазов, распространенных за пределами рудной зоны.

4. В алмазосных породах рудной зоны отмечаются повышенные концентрации углекислоты, метана и других углеводородов по сравнению с неалмазосными гнейсами, эклогитами и сланцами периферической части месторождения.

5. Алмазосные метасоматиты отличаются повышенными содержаниями графита (0,65—0,12 %) и воды (2,32—1,90 %). Напротив, для неалмазосных гнейсов характерно полное отсутствие графита.

6. Алмаз и графит тесно парагенетически связаны (сростки графита и алмаза, микронные включения графита в алмазе, графитовая рубашка на кристаллах алмаза), распределение их в пределах месторождения контролируется одними и теми тектоническими зонами.

7. Кумдыкольские алмазы относятся к легким по изотопам углерода: среднее значение $\delta^{13}\text{C}$ для них составляет $-17,2\text{‰}$ (среди алмазов из кимберлитов преобладают кристаллы со значениями $-6,23\text{‰}$).

8. Изотопные составы углерода в алмазе и графите различны в каждой группе пород. При этом алмаз по отношению к графиту обогащен изотопом ^{13}C . В гнейсах это отличие в среднем $5,4\text{‰}$, а в пироксен-карбонатных породах $4,4\text{‰}$.

Перечисленные особенности строения рудной зоны, а также состав и распределение в ней углеродистого вещества указывают на общие закономерности образования кумдыкольских и метеоритных алмазов.

1. Как и в метеоритах, в алмазосных породах Кумдыкольского месторождения алмаз находится в тесной парагенетической связи с графитом. В неалмазосных гнейсах графит отсутствует.

2. Как и в метеоритах, в алмазосных метасоматитах отмечаются метан и другие углеводороды.

3. Если в нодуле железного метеорита Каньон-Дьябло преобладающее развитие алмаза по отношению к графиту наблюдается в периферийной части нодуля, непосредственно примыкающей к металлической фазе, то из всех алмазосных типов руд Кумдыкольского месторождения преобладающее развитие алмаза при полном отсутствии графита наблюдается в рудной зоне IV типа, непосредственно примыкающей к зоне лейкократовых гранитов (рис. 2).

Это означает, что в обоих случаях алмаз образуется там, где обеспечивается интенсивный нагрев с более высокой скоростью роста температуры. Разумеется, интенсивность нагрева алмазосных пород никак нельзя объяснить обычной теплопередачей от гранитного тела. Однако такой нагрев может быть связан с мощным «пропариванием» этих пород, например, ювенильным водородом, о чем косвенно свидетельствует метасоматическая переработка пород; столь глубокая, что их исходный состав иногда не поддается определению.

В пользу газофазного происхождения алмаза и графита в метаморфических породах свидетельствуют находки алмазов в графитовых рубашках, так как, по мнению ряда исследователей, «образование графита и алмаза происходит по одним и тем же химическим реакциям высвобождения самородного углерода и при прочих равных условиях преимущественно контролируется составом флюидной фазы. Источником вещества для формирования обоих полиморфов может являться флюид и/или расплав. Кристаллизация графита за счет вещества ранее образованного алмаза имеет подчиненное значение или не реализуется вообще» [14, с. 234].

Подтверждением газофазного образования алмаза и графита служит различие в изотопном составе углерода в алмазе и графите и обогащенность алмаза по отношению к графиту тяжелым изотопом ^{13}C . Эксперименты по газофазному синтезу алмаза и графита из метана показали возможность фракционирования стабильных изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C . При одновременном росте графита и алмаза последний обогащен тяжелым изотопом углерода ^{13}C , тогда как графит обогащен легким изотопом ^{12}C [6, 28]. В целом обогащенность алмаза и графита легким изотопом углерода ^{12}C несомненно указывает на то, что источником углерода алмазов служили углеводороды осадочных пород.

Присутствие алмаза не только в межзерновом пространстве, но и в породообразующих минералах рудной зоны, можно объяснить наличием микровключений углеводородов в этих минералах. Так как в идентичных по составу минералах, распространенных за пределами рудной зоны, как и в неалмазосных гнейсах в целом, углеводородные включения отсутствуют, там не встречаются ни алмазы, ни графит.

Таким образом, алмазосность метаморфических пород Кумдыкольского месторождения можно обосновать мгновенным нагревом микроскопических углеводородов при внедрении гранитов, сопровождавшемся «пропариванием» и метасоматической переработкой осадочных пород. При этом более высокая скорость нагрева в зоне контакта с

Значения теплот сгорания алмаза, графита и аморфного углерода, по данным различных авторов [32]

Источник	Теплота сгорания					
	алмаз		графит		аморфный углерод	
	кал/г	ккал/моль	кал/г	ккал/моль	кал/г	ккал/моль
1	7824	93,98	7797—7762	93,65—93,23	8080—8040	97,05—96,57
2	7869	94,52	7865—7830	94,47—94,05		
3	7678	92,22	7778	93,42	8080—7678	97,05—92,22
4	7763—7872	93,24—94,55	7773	93,36		
5	7852	94,31	7893	94,81	7854—8130	93,34—97,65
6			7883	94,68		
7					7912	95,03
8					7288	87,54
9					8072	96,96
10	7854	94,34				
11					7894	94,82
	7852	94,31	7893	94,81	8130	97,65

Примечание. 1 — P. Favre, J. Silbermann; 2 — W. Roth, H. Wallasch; 3 — T. Andrews; 4 — E. Petersen; 5 — M. Berthelot, A. Petit; 6 — P. Grassi; 7 — C. Despretz; 8 — P. Dulong; 9 — J. Thomson; 10 — J. Mellor; 11 — M. Mixer.

В [32] рекомендуются для термодинамических расчетов данные, соответствующие в таблице источнику 5. Если данные источников 5 и 3 при использовании в расчетах приводят к выводу о метастабильности алмаза при нормальных условиях, то данные источников 1, 2 и 4, наоборот, свидетельствуют о метастабильности графита. Очевидно, что столь «фундаментальные» выводы, основанные только на калориметрических измерениях теплот сгорания алмаза и графита, выглядят не очень убедительно. Но дело не только в этом.

Рассчитывая значение теплоты превращения графита в алмаз по рекомендованным в [32] данным (0,5 ккал/моль) и подставляя его в соответствующее уравнение, можно вслед за другими авторами [17, 30] вычислить, что давление превращения графита в алмаз при нормальной температуре составит $\approx 16000 \text{ кгс/см}^2$ ($1,6 \times 10^9 \text{ Па}$). Но таким же путем можно рассчитать давление превращения в алмаз при нормальной температуре и аморфного углерода, и даже кокса. При этом нет необходимости уточнять рентгеновскую плотность и значение энтропии этих веществ, так как по современным представлениям они тоже являются графитом, но имеют «мелкокристаллическую» структуру [12].

Теплота превращения аморфного углерода в алмаз, рассчитанная по таблице, составит 3,34 ккал/моль, откуда давление превращения в алмаз 80000 кгс/см^2 ($8 \times 10^9 \text{ Па}$).

Формула Д.И. Менделеева [8, с. 31] показывает зависимость теплоты сгорания углеродистого вещества от содержания в нем углерода, водорода, кислорода и серы:

$$Q = 81[C] + 300[H] - 26([O] - [S]).$$

Пользуясь этой формулой, можно рассчитать теплоту сгорания, например, нефтяного кокса, имеющего состав (%): С 94,0; Н 2,7; О 2,1; S 0,8 [15]. Расчетная теплота сгорания нефтяного кокса со-

ставляет 8390 ккал/г или 100,77 ккал/моль. Следовательно, теплота превращения нефтяного кокса в алмаз составляет 6,46 ккал/моль, а давление превращения его в алмаз достигает значения $\approx 150000 \text{ кгс/см}^2$ ($1,5 \times 10^{10} \text{ Па}$).

Однако при синтезе алмаза из графита, кокса и аморфного углерода условия превращения в алмаз практически не отличаются, так что подобное термодинамическое обоснование барофильности алмаза трудно назвать безупречным. Это было понятно автору [33], рассуждавшему о сомнительной правомерности применения классических представлений полиморфизма к алмазу и графиту.

Почему же синтез алмаза из графита осуществляется именно в устройствах высокого давления?

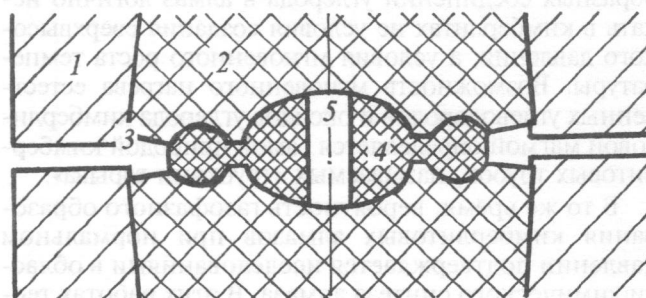


Рис. 3. Фрагмент устройства высокого давления типа «наковальни с лункой» [2]: 1 — уплотняющее стальное кольцо; 2 — твердосплавная матрица; 3 — клиновидный зазор; 4 — реакционный контейнер с уплотняющим кольцом; 5 — реакционный объем

На рис. 3 изображен фрагмент устройства высокого давления типа «наковальни». Реакционный контейнер устройства изготавливается из пирофиллита или литографского камня и имеет дополнительное уплотняющее кольцо. На матрицах имеются соответствующие кольца — тороиды, а также клиновидные зазоры в местах сочленения твердосплавных матриц со стальными поясами [2].

Значения теплот сгорания алмаза, графита и аморфного углерода, по данным различных авторов [32]

Источник	Теплота сгорания					
	алмаз		графит		аморфный углерод	
	ккал/г	ккал/моль	ккал/г	ккал/моль	ккал/г	ккал/моль
1	7824	93,98	7797—7762	93,65—93,23	8080—8040	97,05—96,57
2	7869	94,52	7865—7830	94,47—94,05		
3	7678	92,22	7778	93,42	8080—7678	97,05—92,22
4	7763—7872	93,24—94,55	7773	93,36		
5	7852	94,31	7893	94,81	7854—8130	93,34—97,65
6			7883	94,68		
7					7912	95,03
8					7288	87,54
9					8072	96,96
10	7854	94,34				
11					7894	94,82
	7852	94,31	7893	94,81	8130	97,65

Примечание. 1 — P. Favre, J. Silbermann; 2 — W. Roth, H. Wallasch; 3 — T. Andrews; 4 — E. Petersen; 5 — M. Berthelot, A. Petit; 6 — P. Grassi; 7 — C. Despretz; 8 — P. Dulong; 9 — J. Thomson; 10 — J. Mellor; 11 — M. Mixer.

В [32] рекомендуются для термодинамических расчетов данные, соответствующие в таблице источнику 5. Если данные источников 5 и 3 при использовании в расчетах приводят к выводу о метастабильности алмаза при нормальных условиях, то данные источников 1, 2 и 4, наоборот, свидетельствуют о метастабильности графита. Очевидно, что столь «фундаментальные» выводы, основанные только на калориметрических измерениях теплот сгорания алмаза и графита, выглядят не очень убедительно. Но дело не только в этом.

Рассчитывая значение теплоты превращения графита в алмаз по рекомендованным в [32] данным (0,5 ккал/моль) и подставляя его в соответствующее уравнение, можно вслед за другими авторами [17, 30] вычислить, что давление превращения графита в алмаз при нормальной температуре составит $\approx 16000 \text{ кгс/см}^2$ ($1,6 \times 10^9 \text{ Па}$). Но таким же путем можно рассчитать давление превращения в алмаз при нормальной температуре и аморфного углерода, и даже кокса. При этом нет необходимости уточнять рентгеновскую плотность и значение энтропии этих веществ, так как по современным представлениям они тоже являются графитом, но имеют «мелкокристаллическую» структуру [12].

Теплота превращения аморфного углерода в алмаз, рассчитанная по таблице, составит 3,34 ккал/моль, откуда давление превращения в алмаз 80000 кгс/см^2 ($8 \times 10^9 \text{ Па}$).

Формула Д.И. Менделеева [8, с. 31] показывает зависимость теплоты сгорания углеродистого вещества от содержания в нем углерода, водорода, кислорода и серы:

$$Q = 81[C] + 300[H] - 26([O] - [S]).$$

Пользуясь этой формулой, можно рассчитать теплоту сгорания, например, нефтяного кокса, имеющего состав (%): С 94,0; Н 2,7; О 2,1; S 0,8 [15]. Расчетная теплота сгорания нефтяного кокса со-

ставит 8390 ккал/г или 100,77 ккал/моль. Следовательно, теплота превращения нефтяного кокса в алмаз составляет 6,46 ккал/моль, а давление превращения его в алмаз достигает значения $\approx 150000 \text{ кгс/см}^2$ ($1,5 \times 10^{10} \text{ Па}$).

Однако при синтезе алмаза из графита, кокса и аморфного углерода условия превращения в алмаз практически не отличаются, так что подобное термодинамическое обоснование барофильности алмаза трудно назвать безупречным. Это было понятно автору [33], рассуждавшему о сомнительной правомерности применения классических представлений полиморфизма к алмазу и графиту.

Почему же синтез алмаза из графита осуществляется именно в устройствах высокого давления?

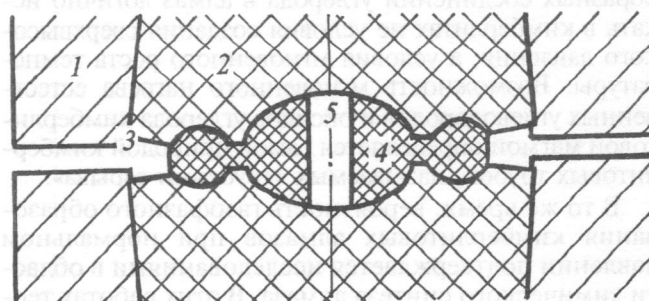


Рис. 3. Фрагмент устройства высокого давления типа «наковальни с лункой» [2]: 1 — уплотняющее стальное кольцо; 2 — твердосплавная матрица; 3 — клиновидный зазор; 4 — реакционный контейнер с уплотняющим кольцом; 5 — реакционный объем

На рис. 3 изображен фрагмент устройства высокого давления типа «наковальни». Реакционный контейнер устройства изготавливается из пирофиллита или литографского камня и имеет дополнительное уплотняющее кольцо. На матрицах имеются соответствующие кольца — тороиды, а также клиновидные зазоры в местах сочленения твердосплавных матриц со стальными поясами [2].

При осевом сжатии реакционной камеры материал уплотнения (пирофиллит), растекаясь, попадает в клиновидный зазор между пуансонами, что приводит к заклиниванию или упору самих пуансонов. Естественно, что после упора пуансонов дальнейшее увеличение давления в реакционной камере за счет усилия пресса становится невозможным.

Таким образом, давление, создаваемое усилием пресса, раскладывается на давление заклинивания пуансонов и давление обжатия исходной шихты:

$$P_{\text{пресса}} = P_{\text{упора}} + P_{\text{обжатия}}$$

При этом совершенно неясно, какая часть усилия пресса играет основную роль в синтезе алмаза из графита: давление на шихту или давление упора, приводящее к герметизации реакционной камеры и соответственно к возможности осуществления в ней газофазных химических процессов, на ведущую роль которых при образовании алмаза из графита указывал еще Г.Б. Бокий [1].

В качестве аналога можно привести технологический процесс, весьма далекий от синтеза алмаза. При производстве силикатного кирпича осуществляется его пропарка в специальных автоклавах при температуре 174°C и давлении 8×10^5 Па [13]. Вряд ли кто-нибудь из специалистов по строительным материалам будет утверждать, что для формирования структуры кирпича при обжиге необходимо высокое давление. По существующей технологии имеется необходимость нагрева изделий в герметичном объеме в атмосфере водяного пара при определенной температуре (174°C), при этом, согласно уравнению газового состояния, неизбежно возрастает давление, но параметром процесса никак не является.

Возможно, что основной параметр синтеза алмаза из графита — его мгновенный нагрев в герметичном объеме. Косвенно подтверждает такое предположение тот факт, что нагрев графита с высокой скоростью вне герметичного объема, например, мгновенный нагрев до температуры $\approx 3500^\circ\text{C}$ при сжигании в электрической дуге, приводит к образованию другой аллотропной модификации углерода — фуллерита [11].

Согласно предлагаемой модели газофазного образования природного алмаза, для превращения газобразных соединений углерода в алмаз при мгновенном росте температуры появляется такой критерий алмазообразования, как градиент температуры. Таким образом, и теоретическое обоснова-

ние барофильности алмаза, и синтез алмаза из графита в устройствах высокого давления являются в определенной степени случайным направлением в развитии представлений о генезисе алмаза.

Метод газофазного синтеза алмазов, описанный в [10], позволяет обосновать дискретность алмазообразования в кимберлитах [7], ведь в этом способе сначала из газовой фазы синтезируется множество мелких алмазов, а потом они наращиваются из той же газовой фазы до крупных монокристаллов.

Интерпретация модели газофазного образования алмаза применительно к кимберлитовым трубкам позволяет говорить о низкотемпературном характере кимберлитовой магмы (наличие алмаза при полном отсутствии графита указывает на температурный интервал 600—1000°C), что согласуется с данными [7] по кристаллизации основных минералов кимберлитов (флогопит, клинопироксен, перовскит, титаномагнетит, апатит).

Выводы

1. Превращение графита в алмаз определяется не только давлением и температурой, но также очень высокой скоростью нагрева.

2. Синтез алмаза и графита из газобразных углеводородов осуществляется при низком давлении и практически при одних и тех же температурах, но мгновенный нагрев углеводородов приводит к росту алмаза, а медленный нагрев — к пиролизу с образованием графита.

3. Парагенезис алмаза и графита в метеоритах определяется параллельно идущими процессами мгновенного нагрева и пиролиза абиогенных углеводородов.

4. Алмазоносность метаморфических пород можно обосновать шоковым нагревом углеводородов, связанным с «пропариванием» и метасоматической переработкой осадочных пород при внедрении интрузивов.

5. Образование кимберлитовых алмазов возможно при мгновенном нагреве углеводородов, при этом отсутствие в кимберлитах графита свидетельствует о низкотемпературном характере кимберлитовой магмы (600—1000°C).

6. Для образования алмаза из любых углеродсодержащих веществ необходим их мгновенный нагрев, предполагающий наличие градиента температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокий Г.Б., Волков А.И. К вопросу о механизме образования искусственных алмазов из графита в присутствии металлов // Кристаллография. 1969. Т. 14. В. 1. С. 65—71.
2. Бредли К. Применение техники высоких давлений при исследовании твердого тела. М.: Мир, 1972. 372 с.
3. Васильев В.Г., Ковальский В.В., Черский Н.В. Происхождение алмазов. М.: Недра, 1968. 262 с.
4. Довыкин Г.П. Углеродистое вещество метеоритов. М.: Наука, 1967. 272 с.
5. Довыкин Г.П. Алмазы в метеоритах. М.: Наука, 1970. 128 с.
6. Галимов Э.М., Прохоров В.С., Федосеев Д.В., Варнин В.П. Гетерогенные изотопные эффекты по углероду при синтезе алмаза и графита из газа // Геохимия. 1973. № 3. С. 416—425.
7. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Марфунин А.С., Михайличенко О.А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. М.: Изд-во МГУ, 1991. 245 с.
8. Гофман М.В. Прикладная химия твердого топлива. М.: Металлургиздат, 1963. 598 с.
9. Дигонский В.В., Дигонский С.В. Закономерности образования алмаза. СПб.: Недра, 1992. 224 с.

10. Дэй в и с Дж. Алмазный век грядет // Популярная механика. 2004. Июнь. С. 22–28.
11. Золотухин И.В. Фуллерит — новая форма углерода // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 2. С. 51–56.
12. Касаточкин В.И. Переходные формы углерода // Структурная химия углерода и углей. М.: Наука, 1969. С. 7–16.
13. Комар А.Г. Строительные материалы и изделия. М.: Высшая школа, 1971. 560 с.
14. Корсаков А.В., Шацкий В.С. Механизм образования алмазов в графитовых «рубашках» в метаморфических породах сверхвысоких давлений // Докл. РАН. 2004. Т. 399. № 2. С. 232–235.
15. Красюков А.Ф. Нефтяной кокс. М.: Химия, 1966. 172 с.
16. Лаврова Л.Д., Печников В.А., Плешаков А.М., Надеждина Е.Д., Шуколюков Ю.А. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Научный мир, 1999. 228 с.
17. Лейпунский О.И. Об искусственных алмазах // Успехи химии. 1939. Т. 8, № 10. С. 1519–1527.
18. Маракушев А.А. К проблеме флюидного режима образования алмазоносных пород // Геология рудных месторождений. 1981. Т. 203. № 4. С. 3–17.
19. Маракушев А.А., Безмен Н.И., Мальков Б.А. К проблеме генезиса алмазов // Минералог. журнал. 1980. Т. 2. № 5. С. 3–11.
20. Маракушев А.А., Перцев И.Н., Зотов И.А., Панях Н.А., Черенкова А.Ф. Некоторые петрологические аспекты генезиса алмаза // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37. № 2. С. 105–121.
21. Маракушев А.А., Сан Лонкан, Панях Н.А., Зотов И.А. Гетерогенная природа метаморфических комплексов Кокчетав (Казахстан) и Дабешаня (Китай) // Бюлл. МОИП. Отд. геологии. 1998. Т. 73. В. 3. С. 3–9.
22. Никольский И.Н.С. Флюидный режим эндогенного минералообразования. М.: Наука, 1987. 199 с.
23. Петров В.С. Генетическая связь алмазов с карбонатами кимберлитов // Вестн. МГУ. Серия биологии, почвоведения, геологии, геофизики. 1959. В. 2. С. 37–42.
24. Портнов А.М. Самоокисление мантийного флюида и генезис алмазов кимберлитов // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 4. С. 942–945.
25. Руденко А.П., Кулакова И.И. Условия образования кимберлитовых алмазов и проблема алмазоносности с точки зрения теории открытых каталитических систем // Геохимия. 1989. № 7. С. 961972.
26. Руденко А.П., Кулакова И.И., Скворцова В.Л. Химический синтез алмаза. Аспекты общей теории // Успехи химии. 1993. Т. 62. № 2. С. 99–117.
27. Соболев Н.В., Томиленко А.А., Шацкий В.С. Условия метаморфизма пород Зерендинской серии Кокчетавского массива // Геология и геофизика. 1985. № 4. С. 55–58.
28. Федосеев Д.В., Галимов Э.М., Варнин В.П., Прохоров В.С., Дерягин Б.В. Фракционирование изотопов углерода в процессе физико-химического синтеза алмаза // Докл. АН СССР. 1971. Т. 201. № 6. С. 1149–1151.
29. Шацкий В.С., Соболев Н.В. Некоторые аспекты генезиса алмазов в метаморфических породах // Докл. РАН. 1993. Т. 331. № 2. С. 217–219.
30. Verma R., Simon F. On the graphite — diamond equilibrium // Zeitschrift fur Electrochemie. 1955. V. 59. № 5. P. 333.
31. Bundy F.P., Strong H.M., Wentorf R.H. Methods and Mechanisms of Synthetic Diamond Growth // Chemistry and physics of carbon. 1973. V. 10. 213 p.
32. Mellor J.W. A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. London, 1946. V. 5. 765 p.
33. Rodewald H.I. Zur Genesis des Diamanten // Chimia. 1960. N 14. 83 p.

Московский государственный университет
Рецензент — А.А. Маракушев

УДК 553.8

О.В. ПАЛАЖЧЕНКО, Е.М. ВЕРИЧЕВ, В.К. ГАРАНИН, Г.П. КУДРЯВЦЕВА

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АЛМАЗА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИМ. В. ГРИБА АРХАНГЕЛЬСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ.

Статья 1. Морфология кристаллов алмаза

Изучена коллекция (700 кристаллов) из месторождения-трубки им. В. Гриба Архангельской алмазоносной провинции (ААП). Дано детальное описание морфологии кристаллов алмаза и их микроморфологических особенностей. Охарактеризованы различные формы роста — «карандашеобразные», «послойные», тангенциального и нормального роста; формы мягкого, повсеместного, и агрессивного, локального, растворения: скругление вершин, обратнопараллельные треугольники растворения; следы пластической и механической деформаций: параллельные полосы деформации, блоковое строение кристаллов. Установлено, что кристаллы алмаза из месторождения им. В. Гриба отличаются от кристаллов из месторождения им. М.В. Ломоносова высоким качеством сырья, наличием большего числа октаэдрических и октаэдро-ромбодекаэдрических кристаллов, повышенной долей бесцветных алмазов, слабым проявлением процессов растворения и деформации.

В настоящее время на территории ААП выделяют семь объектов с промышленной алмазоносностью, представленных месторождениями им. В. Гриба (одна трубка Верхотинского поля) и им. М.В. Ломоносова (шесть трубок Золотицкого поля). Породы этих месторождений сложены кимберлитами двух минеральных типов — I (трубка им. В. Гриба) и II (трубки Золотицкого поля) [3, 9].

Практически каждое кимберлитовое месторождение алмазов имеет определенный набор морфологических особенностей кристаллов. Алмазы из месторождения им. М.В. Ломоносова были детально изучены и описаны в работах А.И. Махина [10], З.В. Бартошинского [2]. Исследование алмаза из открытого в 1996 г. месторождения им. В. Гриба наиболее актуально в настоящее время для выявления