

деленных в породе; наличие пустых и алмазосных трубок, приуроченных к одному подводющему каналу; кристаллографическая и морфологическая специфичность алмазов в разных трубках; парагенез алмаза с муассанитом, пиропом и т. д. [12].

В данном случае нас интересует объяснение окраски алмазов и связи ее с изотопным составом углерода. Из существа механизма кавитации вытекает, что алмазы образуются из углеродсодержащего вещества газовых пузырьков. Газовую фазу кимберлитовой магмы составляет углекислота. В карбонатной форме она повсеместно присутствует в кимберлитах. А. П. Виноградов с сотрудниками [9] исследовали ее изотопный состав и установили величину  $\delta C^{13} = -0,68\%$ , что практически тождественно изотопному составу основной группы алмазов (изотопно-тяжелых;  $\delta C^{13} = -0,6\%$ ). Источником этой углекислоты служит концентрированная форма углерода мантии. Как мы показали ранее [10, 11], исходя из предположения о двух линиях эволюции углерода мантии, углерод в такой форме характеризуется величиной  $\delta C^{13} \approx -0,7\%$ . В отличие от рассеянной формы углерода, выносящегося в земную кору только в составе интрузий и имеющего по аналогии с каменными метеоритами  $\delta C^{13} = -2,2\%$ , углерод в концентрированной углистой форме более реакционноспособен и в процессе дегазации и выплавления мантии выносится в земную кору в виде газообразных соединений: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Вследствие этого не только алмазы, но и другие эндогенные минералы, генетически связанные с продуктами дегазации мантии, имеют изотопный состав углерода, близкий к  $\delta C^{13} = -0,7\%$ , например: карбонаты ( $\delta C^{13} = -0,6\%$  [7]), вулканическая CO<sub>2</sub> ( $\delta C^{13} = -0,8\%$  [29]), ювенильный метан ( $\delta C^{13} = -0,25 - 1,0\%$  [13]). В целом углерод земной коры, образовавшийся, как показал А. П. Виноградов [6], в подавляющей части за счет продуктов дегазации мантии, также тяжелый ( $\delta C^{13}_{\text{ср}} \approx -0,5\%$  [10]).

Принадлежность углерода алмазов и углекислоты кимберлитов к эндогенной форме подчеркивается еще и тем, что изотопный состав их заметно отличается от изотопного состава других распространенных в земной коре соединений углерода, например органического вещества ( $\delta C^{13} = -2,5\%$ ), нефти ( $\delta C^{13} = -2,9\%$ ), природного газа ( $\delta C^{13} = -4,1\%$ ), карбонатов ( $\delta C^{13} = +0,01\%$ ) и т. д.

Удивительная близость изотопного состава бесцветных алмазов из самых различных месторождений мира служит еще одним доказательством того, что исходный для этих алмазов углерод не связан с какими-либо локальными источниками, а имеет общую природу, т. е. это углерод эндогенной углекислоты мантии.

Образование алмазов за счет сжатия углекислоты в точках кавитации — основной, но не единственно возможный путь. Дело в том, что при схлопывании пузырька возникает отраженная от фокуса обратная ударная волна. Поэтому высокие давления и температуры образуются в ближайшей окрестности от точек схождения. Именно вследствие этого происходит упомянутое выщербливание поверхности металлических деталей, работающих в кавитирующей жидкости. Можно предположить, что при схлопывании пузырька вблизи поверхности какого-либо углеродистого материала, например графита, создаются  $P-T$ -условия, достаточные для полиморфного превращения графита в алмаз. Возможность непосредственной перестройки решетки графита в алмаз была доказана Л. Ф. Верещагиным с сотрудниками [5]. Конечно, вероятность создания подходящих  $P-T$ -условий на периферии пузырька значительно меньше, чем в точках кавитации, но все же часть алмазов, хотя и заведомо незначительная, может синтезироваться таким путем. Очевидно и другое — в общем случае энергии, передаваемая на поверхность твердого материала расходящейся ударной волной, составляет лишь незначительную часть энергии, выделяющейся в области схлопывания пузырька.

Графиты в зависимости от генезиса могут иметь различный изотопный состав. В графитоносных гнейсах и кристаллических сланцах докембрийского фундамента Швеции Гавелин [41] определил  $\delta C^{13}$  от  $-1,54$  до  $-3,19\%$  при средней величине  $\delta C^{13} = -2,45\%$ . Ландергрэн [45], исследовавший графиты, находящиеся в ассоциации с железистыми кварцитами и известняками, получил величины  $\delta C^{13}$  от  $-0,67$  до  $-1,12\%$ . Исключительное разнообразие изотопного состава углерода показали графиты из пород щелочно-ультраосновных массивов Кольского п-ова и Кузнецкого Алатау. Данные, полученные нами на материале, предоставленном И. А. Петерсилье, показывают, что диапазон вариаций  $\delta C^{13}$  составляет от  $-0,72$  до

Таблица 3

Изотопный состав некоторых исследованных графитов

| Образец   | Местоположение                      | $\delta C^{13}$ , % |
|---|-------------------------------------|---------------------|
| Карбоцер из натролитизированной полевошпат-нефелиновой жилы, зона рискорритов                 | Хибины, гора Кукивумчорр            | -2,56               |
| Графит с эгирином из эгирин-апатит-натролитовой жилы  | Хибины, гора Юкспор                 | -1,52               |
| Графит в пегматите  | Хибины, ущелье Гакмана              | -1,37               |
| Шунгит из мелкоплойчатого черного сульфидного сланца, вулканогенно-осадочная толща ( $Pt_2$ ) | Печенга, оз. Пороярве               | -2,89               |
| Углистый филлит, вулканогенно-осадочная толща ( $Pt_2$ )                                      | То же                               | -2,94               |
| Графит в мелкоконкреционном кианитовом сланце   | Центральные Кейвы, гора Тельш-Маток | -2,92               |
| Графит из сповидно-волокнутого кианитового сланца   | Центральные Кейвы, гора Шуурурта    | -4,70               |
| Рассеянный углерод из трахитоидного хибинита  | Хибины, хибинитовый карьер          | -1,93               |
| То же   | То же, из другого участка           | -1,98               |
| Графит из измененного уррита  | Кня-Шалтырский массив               | -1,40               |
| Графит из уррита  | » »                                 | -1,37               |
| Углеродистое вещество в метаморфизованном известняке ( $Сm_1$ )                               | » »                                 | -2,07               |
| Графит с нефелином из измененного уррита  | » »                                 | -1,54               |
| Графит с нефелином  | » »                                 | -1,37               |
| Графит в микроклине   | Сахарйокский массив                 | -0,76               |
| » »   | То же, из другого участка           | -0,72               |
| Графит в полевом шпате с нефелином и молибденитом   | Хибины, хребет Техтарвумчорр        | -1,43               |

$-4,70\%$  (табл. 3). Таким образом, в отличие от растворенной углекислоты графит и другой углеродистый материал, присутствующий в расплаве, имеет весьма пестрый изотопный состав.

Все изложенное относительно изотопного состава, природы окраски и механизма формирования алмазов позволяет сформулировать общее представление о происхождении окрашенных алмазов.

Алмазы, образующиеся из углерода  $CO_2$ -содержащих пузырьков под действием сферически сходящейся ударной волны, находятся в наиболее благоприятных условиях, с точки зрения их кристаллизации. При большом начальном давлении и радиусе кавитационных пузырьков энергия, концентрирующаяся в точках схождения, обеспечивает создание максимальных температур и давлений. Поэтому кристаллизация осуществля-