

Н.В.СОБОЛЕВ, Э.М. ГАЛИМОВ, И.Н.ИВАНОВСКАЯ, Э.С.ЕФИМОВА

**ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА АЛМАЗОВ,  
СОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ***(Представлено академиком В.С. Соболевым 3 VIII 1979)*

Накопленный в последние годы фактический материал по изотопному составу углерода алмазов из кимберлитов и россыпей свидетельствует о широком диапазоне вариаций  $\delta^{13}\text{C}$ , составляющем по шкале PDB от +2,7 до  $-32,3\%$ <sup>(1,2)</sup>. В этот интервал попадают алмазы самой различной морфологии, окраски, причем среди исследованных россыпных алмазов наблюдается значительно больше кристаллов с облегченным углеродом, чем среди кимберлитовых. В то же время, наиболее легкий по изотопному составу углерода алмаз ( $\delta^{13}\text{C} = -32,3\%$ ) был обнаружен именно в кимберлитах, среди окрашенных алмазов трубки "Мир" <sup>(3)</sup>. Следует также особо отметить и находку аномально тяжелого алмаза с  $\delta^{13}\text{C} = +2,7\%$  в россыпях штата Новый Южный Уэльс, Австралия <sup>(4)</sup>. Однако абсолютное большинство алмазов кимберлитовых трубок по вариациям  $\delta^{13}\text{C}$  попадаете интервал между  $-8$  и  $-3\%$  и не выходит, как правило, за пределы  $-10$  и  $-2\%$ .

В этой связи особый интерес представляет попытка поисков связей колебаний изотопного состава алмазов с их генетическими особенностями, в частности с химическим составом среды, в которой они кристаллизовались. Исследования минералогии ксенолитов алмазоносных пород в кимберлитах и кристаллических включений в алмазах различных месторождений мира <sup>(5-7)</sup> позволили достоверно выделить два общих типа парагенезисов природных алмазов, независимо от того, встречены они в коренных месторождениях или в россыпях: ультраосновной и эклогитовый. Доказательством существования этих типов является закономерный характер ассоциаций сингенетических кристаллических включений и находки в кимберлитах уже достаточно многочисленных ксенолитов алмазоносных эклогитов и перидотитов <sup>(7,8)</sup>.

Ультраосновной тип выделяется по присутствию в алмазах включений оливина, хромита, энстатита, хромсодержащего пироба и диопсида. Поскольку диопсид (хромдиопсид) может присутствовать также и в магнезиальных эклогитах (без оливина), то для достоверного отнесения алмаза с включением диопсида к этому типу в нем обязательно также и наличие включений оливина.

Основанием для отнесения алмазов к эклогитовому типу парагенезиса является присутствие в виде включений желто-оранжевых гранатов, иногда вместе с травяно-зеленым омфацитом, либо дистеном, либо коэситом. В отдельных случаях могут быть выделены магнезиальные эклогиты (пироповые пироксениты) по совместному присутствию в алмазе пироба и хромдиопсида (без оливина).

Накопленные данные подтверждают выводы о детализации каждого из двух типов с выделением дунит-гарцбургитового, лерцолитового и верлитового парагенезисов для ультраосновного типа и различных эклогитов, включая дистеновые, корундовые и коэситовые — для эклогитового типа <sup>(7,9)</sup>.

Материалом для настоящей работы послужили алмазы из коренных месторождений и россыпей Якутии, Урала, Южной Африки, Ботсваны и Австралии. В общей сложности изотопный состав углерода определен для 92 алмазов, из которых 72 образца относятся к 7 кимберлитовым трубкам Якутии и Южной Африки: "Мир" (33), "Удачная" (21), "Айхал" (11), "Сытыканская" (1), "Орапа" (4), "Роберте Виктор" (1), "Финти" (1); 20 образцов — к россыпям: Якутия (16), Новый Южный Уэльс, Австралия (3), Урал (1). Абсолютное большинство изученных алмазов,

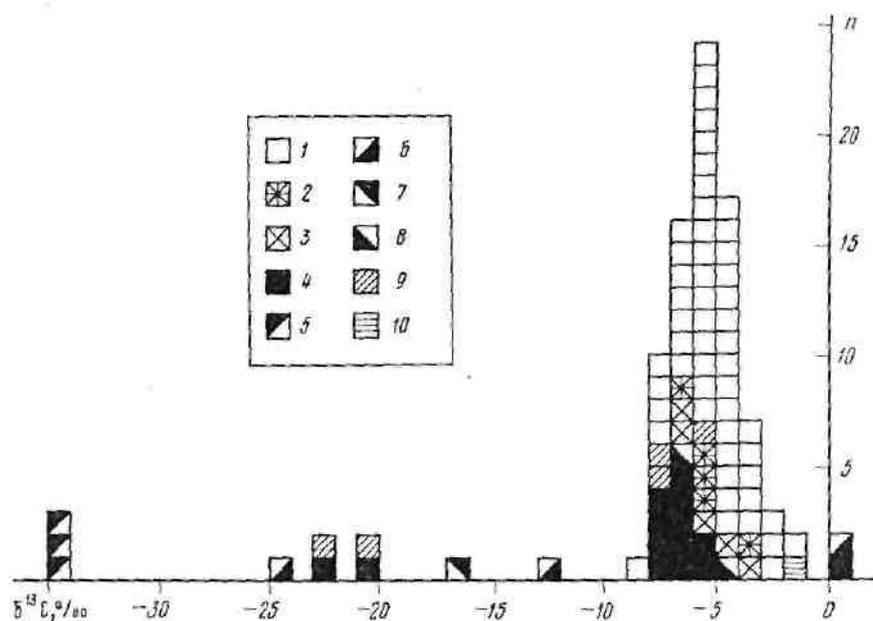


Рис. 1. Гистограмма распределения изотопного состава углерода алмазов, содержащих кристаллические включения. Ультраосновной тип парагенезиса: 1 - общий тип, неразделенный, 2 - гарцбургитовый парагенезис, 3 - лерцолитовый парагенезис; эклогитовый тип парагенезиса: 4 - магнезиально-железистые эклогиты, 5 - пироповый пироксенит (магнезиальный эклогит), 6 - коэситовый эклогит, 7 - дистеновый эклогит, 8 - алмазонасные эклогиты (двуминеральные); алмазы без включений: 9 - из кимберлитовых трубок, 10 - из россыпей

в частности из кимберлитовых трубок "Мир", "Удачная", "Айхал", "Сытыкан-ская", "Финш", представлены плоскогранными октаэдрами или их обломками.

Изотопный состав углерода алмазов определялся путем окисления алмазов в токе кислорода на окиси меди по методике и на системе, описанном в работе (10). Измерения относительного содержания изотопов углерода производились на масс-спектрометре типа "Varian" MAT-230 с точностью  $\pm 0,01\%$  ( $\pm 0,1 \%$ ). Результаты анализов приведены в величинах  $\delta^{13}\text{C}$  (‰).

Результаты определения изотопного состава алмазов представлены на рис. 1. Величины  $\delta^{13}\text{C}$  для всей выборки изученных алмазов колеблются в очень широких пределах: от  $+0,5$  до  $-34,4\%$ . Из 92 изученных алмазов 86 содержат сингенетические кристаллические включения, позволяющие достоверно судить о типе их парагенезиса. В ряде случаев исследованы алмазы с полиминеральными ассоциациями включений, содержащих от 2 до 4 минеральных фаз. В некоторых образцах присутствие полиминеральных ассоциаций включений делает возможной детализацию для ультраосновного типа парагенезиса с выделением гарцбургитового и лерцолитового парагенезисов. Основанием для обособления гарцбургитового парагенезиса является присутствие в алмазах хромового пироба бедного кальцием совместно с энстатитом (7). Такой парагенезис выделен для 5 образцов (рис. 1). В 5 случаях выделен лерцолитовый парагенезис по присутствию четырехминеральной ассоциации: оливин, пироп, энстатит, диопсид или, по меньшей мере, диопсид, оливин. Общей особенностью алмазов ультраосновного типа парагенезиса является узкий диапазон колебаний  $\delta^{13}\text{C}$ , от  $-2$  до  $-9\%$ , соответствующий преимущественному изотопному составу алмазов кимберлитов. Таким образом, среди изученных алмазов, относящихся к ультраосновному гапу парагенезиса, не оказалось изотопически легких образцов.

Совершенно иное соотношение изотопного состава углерода наблюдается для изученных алмазов эклогитового типа парагенезиса. Из 23 кристаллов аномальные значения изотопного состава углерода (облегченный и утяжеленный) зафиксированы в 10, что составляет около 50% всех исследованных образцов этого типа. Аномальные характеристики зафиксированы также для 3 алмазов, не содержащих включений, причем два из них взяты случайным образом из концентрата трубки "Орапа" (Ботсвана), а один - из россыпей Австралии.

Своеобразный парагенезис пиропового пироксенита (магнезиального эклогита) зафиксирован в 3 образцах алмазного борта из трубки "Мир", оказавшихся изотопически наиболее легкими среди проанализированных алмазов (рис. 1). Отсутствие оливина и переменная, вплоть до повышенной, кальциевость гранатов (от 10,2 до 21,5% кальциевого компонента) позволяют отнести эти образцы к эклогитовому типу, несмотря на повышенную примесь хрома в гранатах и пироксенах. Ниже приведена характеристика 13 образцов алмазов, обогащенных облегченным или утяжеленным изотопом углерода.

Россыпные алмазы севера Якутии. Обр. 44/33, вес 26,0 мг, шпинелевый двойник, состоящий из двух октаэдрических кристаллов с занозистой штриховкой на ребрах. Бесцветный, прозрачный. На ребрах и вершинах кристалла отмечен слабый механический износ. Включение: пироп-альмандинный гранат.  $\delta^{13}\text{C} = -20,1\%$ .

Обр. 275/29, вес 18,8 мг, расколотый шпинелевый двойник, состоящий из двух ромбододекаэдрических кристаллов с занозистой штриховкой. Уплотнен по оси  $G_3$ . Бесцветный. Включения: пироп-альмандинный гранат, омфацил, коэсит<sup>(9)</sup>.  $\delta^{13}\text{C} = -24,5\%$ .

Обр. 116/32, вес 64,2 мг, циклический двойник, состоящий из 7 индивидов ромбододекаэдрического габитуса с занозистой, шестоватой и черепитчатой скульптурой, сильно трещиноватый, бесцветный. Поверхность изрезана шрамами, развивающимися по двойниковым швам. Из-за скульптуры и трещин - полупрозрачный. Включения: пироп-альмандинный гранат, омфацил, коэсит<sup>(9)</sup>.  $\delta^{13}\text{C} = -12,8\%$ .

Обр. 50<sub>2</sub>/33, вес 39,5 мг, поврежденный октаэдрический кристалл с полицентрически растущими гранями, ожелезнен, на поверхности наблюдаются небольшие шрамы. Включения: пироп-альмандинный гранат, омфацил.  $\delta^{13}\text{C} = -22,2\%$ .

Россыпи Урала. Обр. 98—76, вес 54,0 мг, целый, весьма совершенный додекаэдр с каплевидными холмиками и шагренью на поверхности. На некоторых гранях зеленые пятна пигментации, из-за которых, вероятно, алмаз кажется зеленоватым. Включения: пироп-альмандинный гранат, дистен.  $\delta^{13}\text{C} = -17,0\%$ .

Россыпи Восточной Австралии (штат Новый Южный Уэльс). Обр. А-1, вес 55,5 мг, шпинелевый двойник двух весьма прозрачных округлых кристаллов желтого цвета. Уплотнен по оси  $G_3$ . Вокруг выходов  $G_3$  располагаются каверны произвольных очертаний. Включения: коэсит.  $\delta^{13}\text{C} = +0,5\%$ .

Обр. А-2, вес 30,7 мг, бесцветный, прозрачный ромбододекаэдр, на округлой поверхности которого развита микродвойниковая полосчатость и шагрень, местами переходящая в мелкозанозистую и шестоватую штриховку. Включение: клинопироксен, по составу близкий к омфацилу.  $\delta^{13}\text{C} = +0,1\%$ .

Обр. А-6, вес 503 мг шпинелевый двойник двух ромбододекаэдрических кристаллов, на поверхности которых наблюдается мелкая шагрень. Кристалл заметно уплотнен по оси  $G_3$ . Цвет желтый. На вершинах алмаза виден очень слабый механический износ. Сам кристалл сильно трещиноват. Включений не содержит.  $\delta^{13}\text{C} = -1,5\%$ .

Трубка "Мир". Якутия. Три однотипных алмаза: МР-17 (вес 167,2 мг), МР-4 (вес 146,7 мг), МР-645 (вес 253,3 мг) представляют собой свинцово-серые поликристалльные сростки, состоящие из мельчайших кристалликов октаэдрической и переходной формы, среди которых наблюда-

лись светлые и темные разновидности. Включения: пироп, хромдиопсид (дополнительно сульфид для обр. МР-645).  $\delta^{13}\text{C}$ : МР-17 -34,2‰; МР-4 34,40 ‰; МР-645-34,1 и -34,4 ‰.

Трубка "Орапа", Ботсвана. Обр. Ор-6, вес 10,5 мг, плоский обломок, местами видна сноповидная штриховка, первоначальную форму определить нельзя. Алмаз чуть зеленоватый, прозрачный, кое-где наблюдаются графитовые лейсты. Включений не содержит.  $\delta^{13}\text{C} = -22,1$  ‰.

Обр. Ор-7, вес 5,1 мг, обломок округлого кристалла с блоковым строением граней, прозрачный, чуть зеленоватый. Включений не содержит.  $\delta^{13}\text{C} = -20,9$ ‰.

Как было отмечено в (2), изотопически легкие алмазы значительно более широко распространены среди "кристаллов россыпных месторождений, чем в кимберлитах. Новые данные, полученные по алмазам трубки "Премьер" (110 образцов) и "Дан Карл" (около 80 образцов), свидетельствуют о практическом отсутствии в этих трубках изотопически легких алмазов (11), за исключением одного бесцветного додекаэдра из трубки "Премьер" с  $\delta^{13}\text{C} = -18,6$ ‰. Три изотопически легких алмаза установлены в кимберлитах Лесото (12), в разных трубках.

В то же время, в некоторых кимберлитовых трубках с резким преобладанием алмазов с эклогитовым типом парагенезиса включений можно ожидать присутствия значительного количества изотопически легких алмазов. Это было проверено для трубки "Орапа", для которой известны изотопные данные для алмаза из алмазоносного эклогита ( $\delta^{13}\text{C} = -5,3$ ‰) и для случайно взятого алмаза из концентрата ( $\delta^{13}\text{C} = -19,0$ ‰) (13). Дополнительное исследование изотопного состава четырех алмазов из концентрата привело к установлению еще двух изотопически легких алмазов (рис. 1).

Таким образом, полученные результаты подтверждают мнение о разнообразии форм углерода, вовлекаемых в процесс алмазообразования (2). В то же время, впервые показана четкая приуроченность алмазов с облегченным и утяжеленным изотопным составом углерода к эклогитовому типу парагенезиса. Впервые для отдельно взятой кимберлитовой трубки ("Орапа") установлена значительная роль изотопически легких алмазов. Представляется важным проводить дальнейшие изотопные исследования для парагенетически охарактеризованных алмазов.

Авторы оставляют за собой право интерпретации и обсуждения полученных результатов в последующих публикациях.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность А. Жорису за предоставление алмазов из россыпей Восточной Австралии, Дж.Б. Хотуорну за образцы алмазов из кимберлитовой трубки "Орапа", Ботсвана, а также С.Ф. Махову за участие в масс-спектрометрических измерениях.

Институт геологии и геофизики  
Сибирского отделения Академии наук СССР, Новосибирск

Поступило  
18 IX 1979

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
Академии наук СССР, Москва

#### ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Э.М. Галимов, Ф.В. Каминский, И.Н. Ивановская, Геохимия, № 3, 340 (1978). <sup>2</sup> Э.М. Галимов, В сб.: VII Всесоюз. симп. по стабильным изотопам в геохимии. Тез. докл., 1978; стр. 13. <sup>3</sup> В.В. Ковальский, Э.М. Галимов, В.С. Прохоров, ДАН, т. 203, № 2 (1972). <sup>4</sup> F.E. Wickman, Geochim. et cosmochim. acta, v. 9, №3 (1956). <sup>5</sup> Н.В. Соболев, И.К. Кузнецова, ДАН, т. 166, № 1 (1966). <sup>6</sup> Н.О.А. Meyer, F.R. Boyd, Geochim. et cosmochim. acta, v. 36, № 11 (1972). <sup>7</sup> Н.В. Соболев Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии, Новосибирск, "Наука", 1974. <sup>8</sup> N.P. Pokhilenko, N. V. Soboler, Yu.G. Lavrentiev, Extended Abstracts 2nd Intern. Kimberlite Confer., Santa Fe, New Mexico, 1977. <sup>9</sup> Н.В. Соболев, Э.С. Ефимова и др., ДАН, т. 230, № 6, 1442 (1976). <sup>10</sup> Э.М. Галимов, Геохимия стабильных изотопов углерода, М., "Недра", 1968. <sup>11</sup> P. Deinas. В сб.: VII Всесоюз. симп. по стабильным изотопам в геохимии, Тез. докл., 1978, стр. 331. <sup>12</sup> S.R. Shee, The Mineral Chemistry of Xenoliths from the Orapa Kimberlite Pipe, Botswana, B.Sc. Thesis, Dept. of Geochem., Univ. Cape Town, 1978. <sup>13</sup> G.I. Smimov et al. Nature, v. 278, №57-5, 630 (1979).