

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clayton R. N. J.//Chem. Phys. 1961. V. 34. P. 724.
2. Clayton R. N., O'Neil J. R., Mayeda T.//J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 3057.
3. Friedman I., O'Neil J. K. Data of geochemistry. Sixth edition. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interests. Wash.: U. S. Government printing office, 1977. 40 p.
4. Northrop D. A., Clayton R. N.//J. Geol. 1966. V. 74. P. 174.
5. Донцова Е. И., Наумов Г. Б.//Геохимия. 1967. № 5. С. 553.
6. Федоров Ю. А. Геохимия солей, рассолов, органического вещества и углеводов верхнеюрских эвапоритовых отложений Северного Кавказа: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Ростов-на-Дону: РГУ, 1981. 24 с.
7. Fedorov Y. A.//Short abstracts of 4th working meeting Isotopes in nature. Leipzig, 1986. P. 22.
8. Дегенс Э. Геохимия осадочных образований. М.: Мир, 1967. 229 с.
9. Вебер Дж. Н.//Геохимия. 1965. № 6. С. 680.
10. Никаноров А. М., Федоров Ю. А., Исаев Н. В., Назаренко В. С.//Тез. докл. XI Все-союз. симпоз. по геохимии стабильных изотопов. М.: Изд. ГЕОХИ АН СССР, 1986. С. 255.
11. Никаноров А. М., Тарасов М. Г., Федоров Ю. А. Гидрохимия и формирование подземных вод и рассолов. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 243 с.
12. Селецкий Ю. Б.//Водные ресурсы. 1978. № 3. С. 148.

Гидрохимический институт
Госкомгидромета СССР,
Ростов-на-Дону

Поступила в редакцию
21.09.87

УДК 550.42 : 546.26—162

Э. М. ГАЛИМОВ, Н. В. СОБОЛЕВ, Э. С. ЕФИМОВА, Е. И. ШЕМАНИНА,
К. А. МАЛЬЦЕВ

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА АЛМАЗОВ, СОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ, ИЗ РОССЫПЕЙ СЕВЕРНОГО УРАЛА

Ранее нами были изучены алмазы из аллювиальных отложений Северного Урала [1]. При этом два из семи исследованных кристаллов оказались обогащенными легким изотопом углерода.

В связи с проблемой поисков коренных источников алмазов в областях, примыкающих к орогенным зонам, представляло интерес получить статистически значимую картину распределения изотопного состава углерода уральских алмазов. С этой целью был проведен изотопный анализ углерода 120 алмазов россыпей Северного Урала. При этом в соответствии с обоснованным нами ранее подходом [2] для анализа были выбраны в основном кристаллы, содержащие минеральные включения, что позволило исследовать для уральских алмазов зависимость изотопного состава углерода от типа парагенезиса кристаллических включений.

Изотопный состав углерода алмазов анализировали на масс-спектрометре «ВАРИАН-МАТ-230». Углерод алмаза переводили в углерод CO₂ путем окисления в атмосфере кислорода в присутствии окиси меди, нагреваемой до 800°С. Предварительно алмаз обрабатывали хромпиком и органическими растворителями с целью удаления с поверхности неалмазных форм углерода и загрязнений. Точность инструментального анализа $\pm 0,1\%$. Измеренные величины, как обычно, сообщаются в виде значений $\delta^{13}\text{C}$ в ‰ относительно стандарта PDB ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0,0112372$). Изотопный состав и другие свойства исследованных алмазов приведены в таблице.

Попадающая часть изученных кристаллов имеет додекаэдрический облик, характерный для уральских алмазов. Среди изученных алмазов имелись как окрашенные, так и бесцветные разновидности. Окраска чаще всего золотисто-желтая, зеленая, а также коричнево-дымчатая.

Изотопный состав и другие свойства уральских алмазов

№ образца	Характеристика алмазов		Включения	$\delta^{13}C$, ‰
	Цвет	Форма		
Уш-213	З	Д	Гр. Mn	-4,04
Ур-19	З	Д	Mn, Сф	-4,16
Уш-958	К	Д	Гр, Mn	-4,22
Уш-199	С-З	Д	Гр	-4,44
Уш-73	Б	Д	Mn	-4,50
Уш-16703	Б	О	Гр, Mn, Py	-4,66
Уш-32	Б	Д	Сф	-4,77
Уш-107	Ж	Д	Гр	-4,82
Уш-37	С-К	Д	Сф	-4,85
Уш-16679	Ж	Д	Гр, Mn	-4,85
Уш-207	Б	Д	Гр	-4,95
Уш-15453	Б	Д	Гр-Mn	-5,00
Уш-39	Б	Д	Py, Сф, Кв	-5,03
Уш-34	Б	Д	Гр, Mn	-5,08
Уш-80	З	Д-О	Гр, Сф	-5,15
Ас-676	Б	Д	Гр, Сф	-5,15
Уш-224	Б	Д	Сф	-5,18
Уш-949	Б	Д	Гр, Сф	-5,19
Уш-52	Б	Ок-Д	Гр, Mn	-5,31
Уш-9	С-З	Д	Гр, Mn	-5,39
Ур-24	З	Д	Гр, Mn	-5,41
Уш-16670	Б	Д	Гр	-5,46
Уш-2а	З	Д	Mn	-5,48
Уш-16666	З	Д	Сф	-5,54
Уш-204	Б	Д	Mn	-5,58
Уш-109	Б	Ок-Д	Сф	-5,60
Уш-195	С-З-Ж	Д	Гр	-5,68
Уш-67	К-Д	Д	Гр, Mn, Сф	-5,74
Ас-677	Б	Д	Сф	-5,75
Уш-178	Б	Д	Py	-5,76
Уш-852	Б	Д	Гр, Mn	-5,77
Уш-890	Б	Д	Гр	-5,79
Уш-16693	К-Д	Д	Гр	-5,80
Уш-161	Б	Д	Гр	-5,90
Уш-183	Б	Д	Гр, Сф	-5,95
Уш-16638	Б	Д	Mn, Кс	-6,00
Уш-172	З	Д	Гр, Mn	-6,03
Уш-210	З	Д	Гр, Mn	-6,17
Ас-680	З	Д	Гр, Сф	-6,19
Ас-659	Б	Д	Гр, Mn, Кс	-6,28
Уш-116	Ж	Д	Гр, Mn	-6,33
Уш-117	С-Д	Д	Mn	-6,40
Уш-12	С-Ж	Д	Гр	-6,42
Уш-130	Б	Ок-Д	Гр	-6,42
Уш-143	Б	—	Гр	-6,48
Ас-684	З	Д	Mn, Сф	-6,53
Уш-188	Ж	Д	Гр, Mn	-6,57
Ас-13	Б	Д	Кс	-6,60
Уш-31	Б	Д	Гр, Mn	-6,62
Уш-202	Б	Д	Гр, Mn	-6,62
Уш-215	Б	Д	Гр, Сф	-6,68
Уш-182	Б	Д	Гр	-6,68
Уш-65	Б	Д	Гр	-6,69
Уш-103	Б	Д	Гр, Кс	-6,70
Уш-179	Б	Д	Mn	-6,74
Уш-174	Б	Д	Ku	-6,77
Уш-36	Б	Д	Гр, Кс	-6,80
Уш-50	Б	Д	Гр, Сф	-6,80
Уш-75	Б	Д	Mn	-6,80
Уш-81	Б	Д	Гр	-6,91
Уш-77	Б	Д	Py	-7,10
Ур-49	Б	Д	Гр, Py, Сф	-7,15
Уш-144	Б	Д	Гр	-7,19
Уш-222	Б	Д	Гр	-7,20
Уш-38	Б	Д	Гр, Mn	-7,22
Уш-30	Б	Д	Гр	-7,32
Уш-60	З	Д	Гр	-7,50
Уш-94	З-Ж	Д	Гр	-7,70

(Таблица окончание)

№ образца	Характеристика алмазов		Включения	$\delta^{13}C, \text{‰}$
	Цвет	Форма		
Уш-19	Б	Ок-Д	Гр	-7,79
Уш-196	Б	Д	Сф	-7,80
Уш-925	К	Д	Мп	-7,91
Уш-79	Б	Д	Гр	-8,59
Уш-17	Б	Д	Гр	-8,64
Уш-108	Б	Д	Мп	-8,72
Ас-711	Ж	Д	Гр	-8,86
Уш-49	С-Ж-3	Д	Гр	-9,06
Уш-176	К	Д	Кс	-9,09
Уш-216	Б	Д	Гр, Мп, Сф	-9,27
Ас-653	Б	Д	Мп, Сф	-9,47
Уш-142	Б	Д	Гр, Сф	-9,51
Уш-63	З-Ж	Д	Гр	-9,82
Уш-43	Б	Д	Гр, Мп	-9,92
Уш-208	С-З	Д	Гр, Мп, Сф	-10,12
Уш-219	Б	Д	Гр, Сф	-10,77
Уш-181	Ср-К	Ок-Д	Гр	-11,39
Уш-1	С-З-Ж	Д	Гр, Мп	-11,83
Уш-91	З	Д	Мп, Кс	-12,20
Уш-40	Б	Д	Гр, Мп	-12,85
Уш-98	Б	Д	Гр, Ки	-16,95
Уш-165	Б	Д		-4,96
Ур-20	Б	Д		-5,70
Уш-76	Б	Д		-5,90
ПА-181	З-Ж	Д		-6,40
ПА-122	С-Д	О-Д		-7,00
Уш-5	Б	Д		-7,11
ПА-190	Б	Ок-Д		-7,3
Уш-55	Б	Д		-7,53
ПА-176	Б	Д		-7,6
Уш-138	Б	Д		-7,68
7010	Б	Ок		-7,70
Уш-24	Б	Д		-7,94
ПА-182	Б	О-Д		-8,70
Уш-56	Ю	Д		-8,77
ПА-183	Б	—		-15,3
Уш-155	Б	Д		-22,2
ПА-128	З-Ж	Д		-24,3
Уш-945	Б	ОК	Ол	-1,74
Уш-16	Б	Д	Ол	-2,10
Уш-16602	К	Д	Ол	-2,15
Уш-853	Б	Д	Рп	-2,22
Уш-906	Б	Д	Ол	-2,85
Уш-124	Б	Д	Хр	-3,20
Уш-16690	С-К	О	Хр	-3,66
Уш-175	Б	Д	Ол	-3,97
Уш-709	К	Д	Ол	-4,18
Уш-882	Б	Д	Ол	-4,19
Уш-855	Б	Д	Ол	-4,56
Уш-160	К	Д	Ол	-4,83
Уш-16629	С-К	Д	Ол	-4,90
Уш-893	К	Д	Ол	-5,00
16-76	Б	Ок-Д	Хр	-5,35
Уш-8	Б	Ок-Д	Ол	-5,39
Уш-85	З-Ж	Д	Рп	-5,44
Уш-16673	К	Д	Ол	-6,02
Уш-948	Б	Д	Хр	-6,15
Уш-161	Б	Д	Хр	-6,87
Уш-10	Б	Д	Ол	-7,84
Уш-4	Б	Ок-Д	Ол	-7,94

Примечание. Гр — гранат, Мп — моноклинный пироксен, Сф — сульфид, Ру — рутил, Кс — коэзит, Кв — кварц, Ки — кианит, Ол — оливин, Хр — хромит, Рп — ромбический пироксен; цвет: К-Д — коричнево-дымчатый, С-Ж — светло-желтый, С-Д — светло-дымчатый, Ср-К — сиренево-коричневый, З — зеленый, С-З — светло-зеленый, Ж — желтый, Б — бесцветный, К — коричневый, С-К — светло-коричневый, З-Ж — золотисто-желтый; форма алмазов: ОК — октаэдр, Д — додекаэдр, О — октаэдр, Ок-Д — кристалл переходной формы.

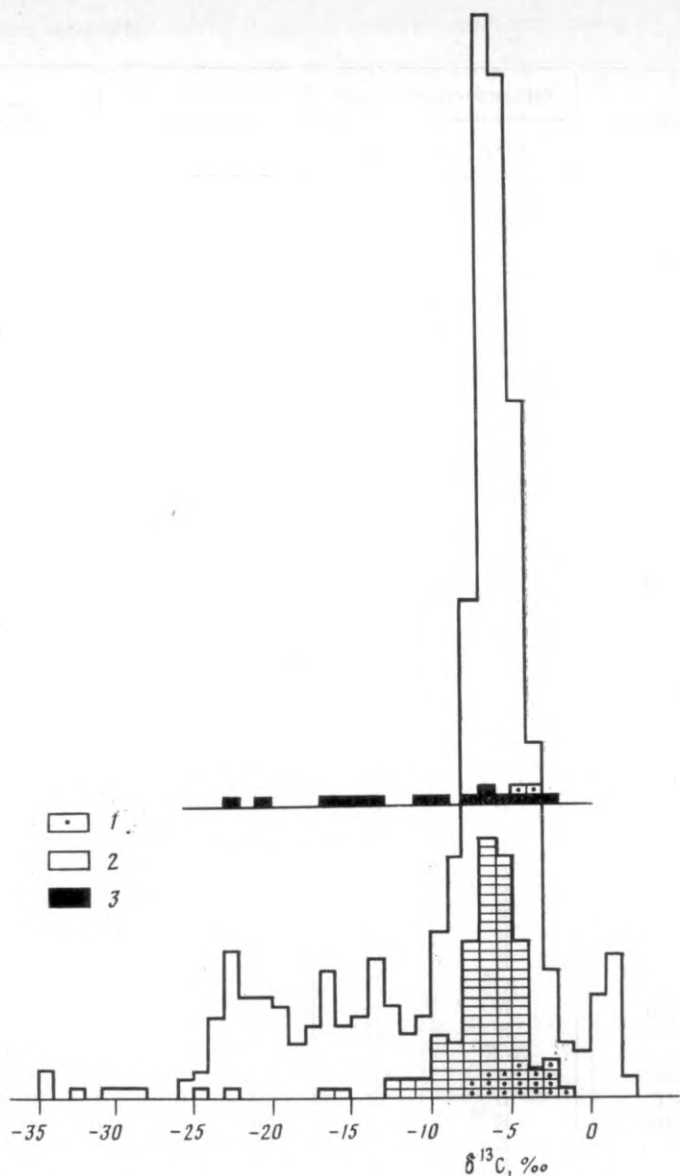


Рис. 1. Сопоставление распределения изотопных составов углерода уральских алмазов с распределением $\delta^{13}\text{C}$ некоторых других североευропейских алмазов и общим распределением $\delta^{13}\text{C}$, характеризующим совокупность изученных алмазов из кимберлитовых трубок и россыпей Советского Союза и других регионов по [4]

1 — уральские и североευропейские алмазы с включениями ультраосновного типа парагенезиса, 2 — уральские алмазы с включениями эклогитового типа и без включений, 3 — североευропейские алмазы без включений

Какая-либо связь изотопного состава углерода с окраской кристаллов отсутствует.

Большинство уральских алмазов содержат в качестве включений минералы, относящиеся к эклогитовому типу парагенезиса. К таким минералам мы относим [3] пироп-альмандиновый гранат, омфацит, дистен, коэсит, рутил, а также сульфиды с низким содержанием никеля. К ультраосновному типу, представленному в 25% кристаллов, относятся оливин, пироп, энстатит, хромдиоксид, хромит.

На рис. 1 приведена гистограмма $\delta^{13}\text{C}$ изученных алмазов уральских россыпей, включая данные, полученные в работах [1, 2]. Там же показан контур гистограммы изотопного состава алмазов из кимберлитовых трубок и россыпей Советского Союза и некоторых зарубежных место-

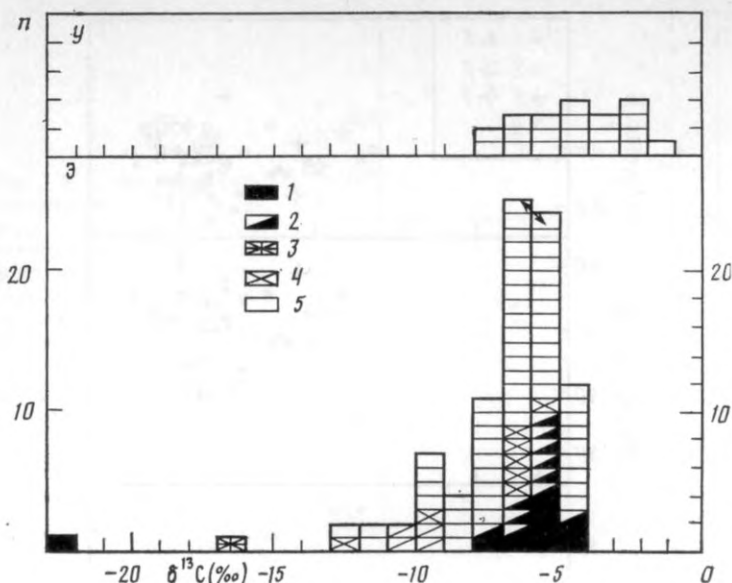


Рис. 2. Гистограммы изотопного состава уральских алмазов с включениями ультраосновного типа парагенезиса (У) и эклогитового типа (Э).

Для последних: 1 — включения сульфидов; 2 — гранат (либо омфацит) в парагенезисе с сульфидом; 3 — включения дистена; 4 — включения коэсита; 5 — включения граната, омфацита либо ассоциации гранат — омфацит

рождений, изученных в [4]. Несмотря на близость медиан распределения сравниваемых выборок, средний изотопный состав углерода 127 уральских алмазов (с включениями и без включений) составляет $-6,85 \pm 3,14\text{‰}$, что значительно отличается от среднего изотопного состава углерода коренных месторождений Якутии: трубок Мир, Удачная, Айхал, составляющего, по данным [4], от $-4,5$ до $-5,5\text{‰}$. Алмазы со средним изотопным составом, близким к -7‰ , отвечают области, переходной от группы α_2 к группе α_3 классификации [4]. Это находится в согласии с преобладающей распространенностью эклогитового типа парагенезиса включений в уральских алмазах, для которого (90 кристаллов) $\delta^{13}\text{C} = -7,08 \pm 2,69\text{‰}$.

В составе изученных уральских алмазов 8% изотопно-легких кристаллов ($\delta^{13}\text{C} < -10\text{‰}$). Это выше, чем доля изотопно-легких алмазов в кимберлитовых трубках Центральной Якутии (5%), но существенно меньше, чем содержание изотопно-легких алмазов в россыпях Северной Якутии (30—50% и выше) по данным [4].

Таким образом, уральские алмазы обладают характерным распределением изотопов углерода. Изученная совокупность алмазов отличается по этому признаку от алмазов других районов. В то же время сопоставление уральских алмазов с некоторыми другими североευропейскими алмазами [5] (рис. 1) в настоящей работе показывает сходство диапазонов вариаций их изотопного состава.

Среди изученных уральских алмазов 22 кристалла содержали включения оливина, хромита, энстатита и отнесены нами к ультраосновному типу парагенезиса. На рис. 1 они образуют на гистограмме компактную группу в ее правой части аналогично двум североευропейским кристаллам, содержащим включения хромита. На рис. 2 представлены соответственно гистограммы алмазов ультраосновного и эклогитового типов для уральских россыпей. При этом хорошо видно, что кристаллы ультраосновного типа с $\delta^{13}\text{C} = -4,58 \pm 1,86\text{‰}$ значительно отличаются по этому параметру от кристаллов эклогитового типа.

Поскольку изученные алмазы эклогитового типа парагенезиса содержат в виде включений разнообразные ассоциации минералов, соот-

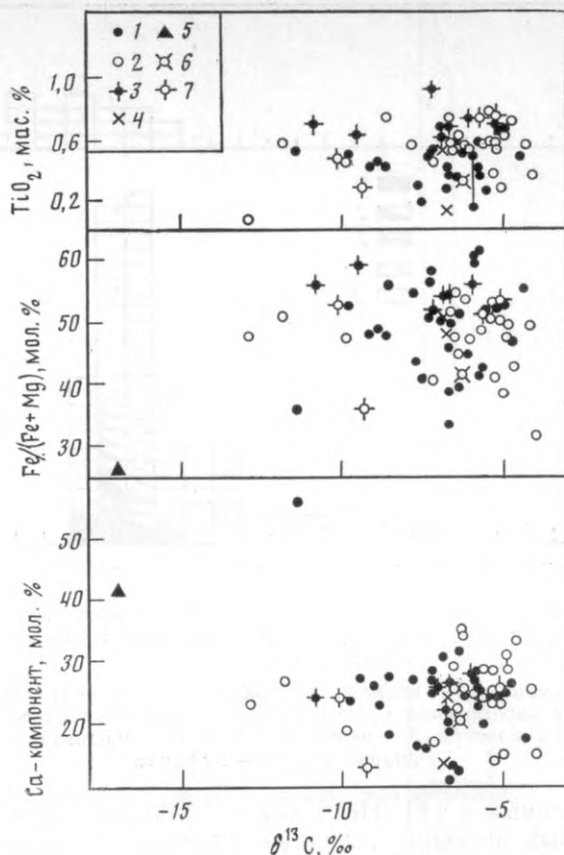


Рис. 3. Сопоставление изотопного состава уральских алмазов, относимых к эклогитовому типу парагенезиса, содержащих включения граната, с особенностями состава гранатов: кальциевостью, железистостью и содержанием примеси TiO_2 .

1 — индивидуальные включения граната; 2 — гранат — омфацил; 3 — гранат — сульфид; 4 — гранат — коэзит; 5 — гранат — дистен; 6 — гранат — омфацил — коэзит; 7 — гранат — омфацил — сульфид

ветствующие парагенезисам обычных, биминеральных эклогитов, дистеновых и коэзитовых эклогитов, представлялось целесообразным сопоставить как различные ассоциации включений, так и главные особенности состава гранатов и омфацитов с изотопным составом углерода алмазов. Более 60 (из 90 алмазов эклогитового типа) кристаллов содержат в виде включений пироп-альмандиновые гранаты переменного состава. Колебания кальциевости, железистости и содержания примеси TiO_2 этих гранатов сопоставлены на рис. 3 с $\delta^{13}C$ гранатсодержащих алмазов. Несмотря на особо повышенную кальциевость гранатов двух изотопно-легких алмазов, во всех остальных случаях различным значениям $\delta^{13}C$ соответствуют довольно широкие вариации в кальциевости гранатов, охватывающие практически весь интервал от 15 до 30–35 мол.%. Значения железистости и содержания примеси TiO_2 также не обнаруживают корреляции с $\delta^{13}C$ алмазов. По нашим данным, не устанавливаются те зависимости изотопного состава с особенностями химического состава включений, на которые указывали Динс и др. [6].

Аналогичные сопоставления сделаны и для состава омфацитов, для 35 образцов. Из рис. 4 следует, что сравниваемые величины так же, как и для случая с гранатами, не обнаруживают никакой корреляции. Обращаясь к рис. 2, отметим, что различие ассоциаций эклогитовых минералов в алмазах не связано с $\delta^{13}C$. Так, резко различающиеся значения $\delta^{13}C$ характерны для двух алмазов с включениями дистена, для семи алмазов с включениями коэзита и для 24 алмазов, содержащих в качестве одного из включений сульфид.

Рис. 4. Сопоставление изотопного состава углерода уральских алмазов, относимых к эклогитовому типу парагенезиса, содержащих включения омфацита, с особенностями состава омфацитов: железистостью, содержанием примеси Na_2O и MnO .

Условные обозначения для ассоциации омфацита аналогичны таковым рис. 3

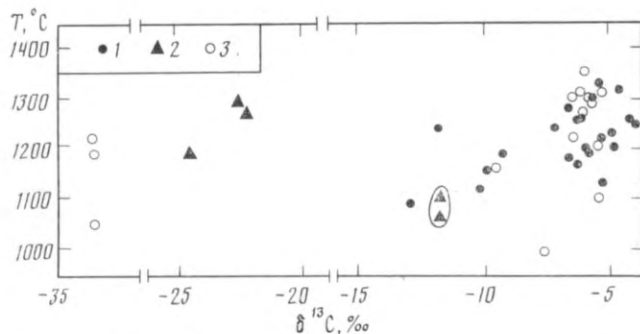
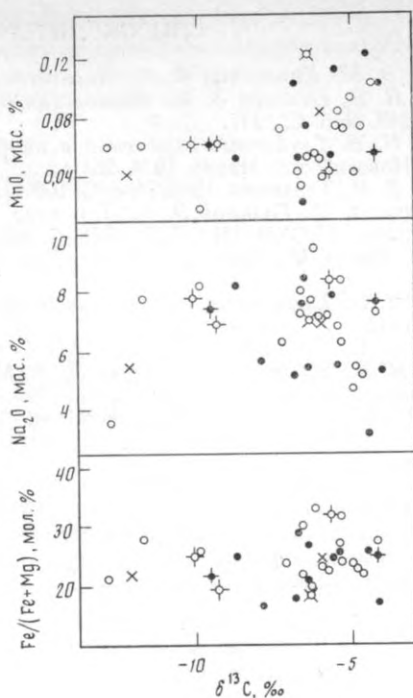


Рис. 5. Сопоставление изотопного состава углерода алмазов, относимых к эклогитовым типам парагенезиса, с данными по температурам равновесия граната и омфацита 1 — уральские алмазы, 2 — Эбелях, 3 — трубка Мир. Состав минеральных включений, по которым проводилась оценка температуры, приведен в [7—9]

На рисунке 5 сопоставлен изотопный состав углерода исследованных алмазов с оценками температур образования минеральных включений (по геотермометру Эллиса и Грина [10]). Для сравнения представлены также данные по алмазам трубки Мир и россыпи Эбелях. Для всей совокупности данных, взятых в целом, связи изотопного состава углерода с температурой не наблюдается. В некоторых случаях однотипные алмазы показывают различные температуры равновесия включений, например поликристаллические агрегаты из трубки Мир, аномально обогащенные легким изотопом. Для уральских алмазов намечается некоторый тренд к обеднению изотопом ^{13}C алмазов с уменьшением температуры.

Проведенное исследование позволило подтвердить обнаруженную нами ранее закономерную связь изотопного состава углерода алмазов с типом парагенезиса минеральных включений. Несмотря на широкое разнообразие состава гранатов, омфацитов, а также ассоциаций различных минералов внутри эклогитового типа, корреляций этих особенностей с изотопным составом алмазов выявить не удалось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галимов Э. М., Каминский Ф. В., Ивановская И. Н.//Геохимия. 1978. № 3. С. 340.
2. Соболев Н. В., Галимов Э. М., Ивановская И. Н., Ефимова Э. С.//Докл АН СССР. 1979. Т. 249. № 5. С. 1217.
3. Соболев Н. В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.
4. Галимов Э. М.//Геохимия. 1984. № 8. С. 1091.
5. Захарченко О. Д., Галимов Э. М.//Тез. докл. II Всесоюз. совещ. по геохимии углерода. М.: Изд. ГЕОХИ АН СССР, 1986. С. 115.
6. Deins P., Harris W., Gurney J. J.//Geochim. et cosmochim. acta. 1987. V. 51. № 5. P. 1227.
7. Соболев Н. В., Ефимова Э. С., Коптиль В. И. и др.//Докл. АН СССР. 1976. Т. 230. № 6. С. 1442.
8. Соболев В. С., Соболев Н. В.//Докл. АН СССР. 1980. Т. 250. № 3. С. 683.
9. Соболев Н. В., Ефимова Э. С., Усува Л. В.//Мантийные ксенолиты и проблема ультраосновных магм. Новосибирск: Наука, 1983. С. 4.
10. Ellis D. J., Green D. H.//Contribs Mineral. and Petrol. 1979. V. 71. P. 1322.

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

Институт геологии и геофизики
СО АН СССР, Новосибирск

Поступила в редакцию
05.04.88