УДК 548.4 : 549.21(919)

МИНЕРАЛОГИЯ

Член-корреспондент АН СССР Н.В. СОБОЛЕВ, Э.С. ЕФИМОВА,
Ю.Г. ЛАВРЕНТЬЕВ, академик В.С. СОБОЛЕВ

ПРЕОБЛАДАЮЩАЯ ИЗВЕСТКОВО-СИЛИКАТНАЯ АССОЦИАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ РОССЫПЕЙ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АВСТРАЛИИ

Алмазы, известные с 1851 г. в россыпях юго-восточной части Австралии, штат Новый Южный Уэльс, издавна привлекали внимание необычностью некоторых своих характеристик, отличающих их от алмазов других месторождений земного шара. В первую очередь, это их повышенная твердость, затрудняющая обработку, необычно утяжеленный изотопный состав углерода, а также две находки

Таблица 1

Химический состав включений клинопироксена

Компонент	АР-20*	АР-22	АР-23	АР-25	АР-27**	АС-2	АС-16	АС-10
SiO_2	54,9	54,3	54,1	54,0	54,4	55,4	55,3	54,8
TiO_2	0,42	0,46	0,39	0,43	0,39	0,16	0,34	0,40
Al_2O_3	5,33	6,11	3,88	4,94	4,81	2,74	2,73	6,79
Cr_2O_3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,09	<0,01	0,17	<0,01
FeO	4,39	2,23	3,62	2,94	3,71	0,52	3,15	4,51
MnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,02
MgO	12,1	13,9	13,7	14,0	13,4	15,9	14,3	10,3
CaO	20,3	20,6	21,6	22,4	21,9	23,5	21,5	19,0
Na_2O	2,86	2,03	1,73	1,22	1,57	0,93	1,77	3,22
K_2O	0,28	0,13	0,26	0,07	0,15	0,13	0,22	0,21
Сумма	100,58	99,76	99,28	100,00	100,42	99,28	99,52	99,25
Si	1,983	1,966	1,978	1,952	1,963	2,007	2,010	1,993
Al(IV)	0,017	0,034	0,022	0,048	0,037	–	–	0,007
Ti	0,011	0,012	0,011	0,012	0,011	0,004	0,009	0,010
Al(VI)	0,208	0,222	0,145	0,162	0,167	0,118	0,118	0,226
Cr	–	–	–	–	0,004	–	0,005	–
Fe	0,132	0,066	0,110	0,089	0,113	0,016	0,096	0,138
Mn	–	–	–	–	–	–	0,001	0,000
Mg	0,651	0,739	0,747	0,755	0,720	0,858	0,776	0,557
Ca	0,785	0,786	0,846	0,867	0,842	0,892	0,837	0,741
Na	0,200	0,140	0,123	0,085	0,108	0,065	0,127	0,227
K	0,013	0,004	0,013	0,004	0,009	0,006	0,010	0,010
Сумма	4,000	3,969	3,995	3,974	3,980	3,966	3,989	3,969
f	16,9	8,2	12,8	10,5	13,5	1,8	11,0	19,9
Ca/(Ca + Mg)	54,7	51,5	53,1	53,5	54,1	51,0	51,9	57,1
Ca/(Ca + Mg + + Fe)	50,1	49,4	49,7	50,7	50,4	50,5	49,0	51,6

*Сосуществует с коэситом.
** Сосуществует с кварцем.

включений коэсита [10], относящегося к особо редким включениям в природных алмазах. В отличие от многих россыпных месторождений алмазов необычным является и геологическое положение россыпей, находящихся в пределах складчатой области.

С целью оценки особенностей кристаллических включений просмотрено около 500 кристаллов алмазов из месторождения р. Бингара, район Инверелл, находящегося приблизительно в 600 км к северу от Сиднея. Это месторождение приурочено к галечникам, вероятно, плиоценового возраста [7], частично перекрытым базальтами. Галечник сложен преимущественно гранитной галькой.

Алмазы представлены кристаллами округлой формы, половина которых бесцветна, а половина характеризуется слабым желтоватым нацветом. Все кристаллы имеют скрытослоистое строение и почти все являются шпинелевыми двойниками, в разной степени искаженными. На поверхности кристаллов наблюдается микродвойниковая полосчатость и впадины неопределенных очертаний. Характерной особенностью является "леденцовый" характер поверхности, образовавшийся, вероятно, вследствие растворения.

Визуально в просмотренных алмазах были зафиксированы в основном бесцветные включения различной морфологии. Лишь в трех кристаллах отмечены

темные включения рудного минерала. Доступная для детальных исследований включений коллекция алмазов содержала 15 кристаллов с бесцветными включениями и лишь один со светло-зелеными. Во включениях из трех алмазов установлено по две фазы, а в тринадцати образцах – по одной фазе, образующей в ряде случаев несколько изолированных включений. Химический состав минералов, извлеченных из алмазов, изучался с помощью рентгеновского микроанализатора JXA-5A по методике, описанной Ю.Г. Лаврентьевым с сотрудниками [2]. Диагностика коэсита, с последующей проверкой оптическими методами, осуществлялась непосредственно в процессе микроанализа одновременно с установлением аналогии с составом кварцевого эталона. Цвет люминесценции, возникающей под действием пучка электронов и наблюдаемой с помощью оптического микроскопа непосредственно в ходе микрозондового изучения минералов, позволяет довольно просто отличить коэсит с ярко-голубым свечением от кварца, катодолюминесценция которого имеет розовую или серо-желтую окраску. Характеристика минералов, включенных в алмазы, приводится в соответствии с их распространенностью.

Клинопироксены являются наиболее распространенными включениями. Они обнаружены в 8 алмазах, т.е в половине изученных образцов. Это почти бесцветные с едва заметным зеленоватым оттенком кристаллы, чаще всего неопределенной формы с большим количеством мельчайших граней, придающих им оплавленный облик. Встречены также призматические, таблитчатые и кубооктаэдрические индивиды.

По особенностям состава (табл. 1) все изученные пироксены относятся к омфацитам с относительно невысоким переменным содержанием Na-компонента (от 6,5 до 22,7 мол.%), повышенной кальциевостью и переменной железистостью, достигающей 19,9 мол.%. Во всех образцах отмечена устойчивая примесь K_2O. Наиболее близок к составу чистого диопсида пироксен образца АС-2, причем именно в нем зафиксирована самая низкая примесь FeO по сравнению со всеми известными пироксенами глубинных ксенолитов и включений в алмазах [9] – его железистость существенно более низкая (1,8 мол.%), чем у пироксенов ультраосновных пород. В широком ряду переменных по содержанию Al и Na составов клинопироксенов, сосуществующих с алмазами в вебстеритах, пироксенитах, эклогитах и гроспидитах (рис. 1), изученные пироксены занимают обособленное положение и группируются вблизи точек составов клинопироксенов из пироксенитов [5].

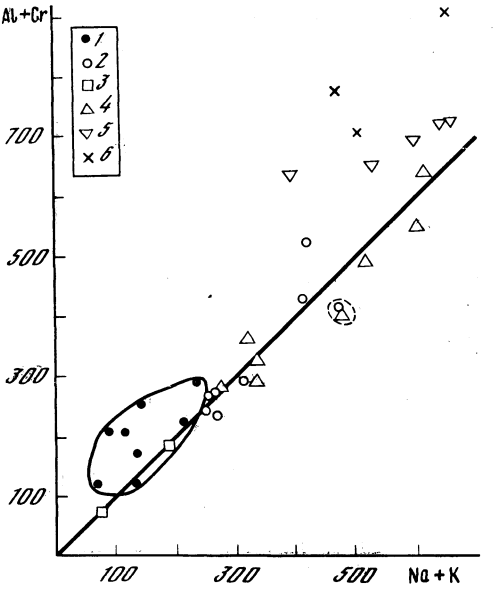
Коэсит установлен в 6 образцах. Это водяно-прозрачные, бесцветные кристаллы, иногда бесформенные сростки. В единичных случаях коэсит имеет призматический и таблитчатый облик. На гранях некоторых кристаллов наблюдается тончайшая штриховка. Размер самых крупных включений достигал 400 мкм.

Гранат извлечен из 2 образцов. В одном алмазе он представлен единичным небольшим (~ 170 мкм) кристаллом призматического облика с едва заметным желтоватым оттенком. Наиболее хорошо развиты грани вертикального пояса. Грани в большинстве зеркально гладкие, но на некоторых наблюдается параллельная штриховка. Из другого алмаза извлечено несколько кристаллов неопределенной формы, кремового цвета. Размер самого крупного из них 200 мкм. По особенностям состава гранаты относятся к типичным гроссулярам (табл. 2), содержащим повышенную примесь альмандин-пиропового компонента, что характерно для гроссуляров из гроспидитов [1]. Установлена также повышенная примесь TiO_2 и Na_2O, а также незначительная примесь Cr_2O_3.

Оливины образцов АС-11 и АС-17 (см. табл. 2) относятся к типичным форстеритам и характеризуются присутствием примеси NiO – 0,31 и 0,34 мас.%.

Как отмечено выше, в 3 алмазах установлено по две фазы в виде включений: гроссуляр + коэсит (обр. АР-21), омфацит + коэсит (обр. АР-20) и омфацит + кварц (обр. АР-27). По всей вероятности, при такой значительной роли коэсита во многих

Рис. 1. Связь содержания Na + K и Al + Cr (на 6000 атомов кислорода) в клинопироксенах, преимущественно сосуществующих с алмазами в эклогитовом типе парагенезисов: *1* – из алмазов россыпей Юго-Восточной Австралии (см. табл. 1); *2* – из алмазов разных месторождений [3, 9, 11]; *3* – из алмазоносных пироксенитов [5]; 4 – из алмазоносных эклогитов [9, 11]; *5* – из алмазоносных дистеновых эклогитов [4]; *6* – из гроспидитов (без алмазов) из трубки "Загадочная" [9]; штриховой линией обведены составы пироксенов из алмаза и эклогита обр. М-46 [9]



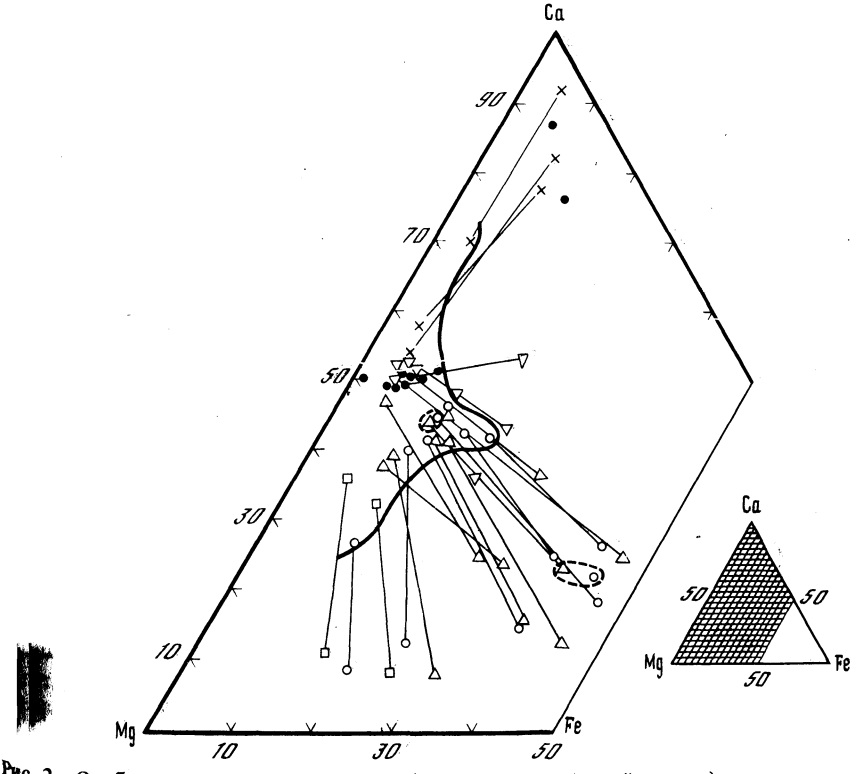


Рис. 2. Особенности состава гранатов (вправо от сплошной линии) и пироксенов (влево от линии), сосуществующих с алмазами в эклогитовом типе парагенезисов. Соединены точки составов сосуществующих гранатов и пироксенов. Условные обозн. те же, что и на рис. 1

Таблица 2

Химический состав включений граната и оливина

Компонент	АР-21*	АР-36		АС-11	АР-17
SiO_2	39,0	39,3		41,0	41,5
TiO_2	1,79	1,44		< 0,01	–
Al_2O_3	20,0	21,0		< 0,01	–
Cr_2O_3	0,09	0,19		0,05	0,06
FeO	6,22	2,92		7,41	6,57
MnO	0,15	0,00		0,10	–
MgO	2,83	1,91		49,9	50,6
CaO	28,7	32,4		< 0,01	
Na_2O	0,30	0,22	NiO	0,31	0,34
Сумма	99,08	99,38		98,77	99,07
Si	2,986	2,978		1,006	1,011
Ti	0,103	0,082		–	–
Al	1,805	1,876			
Cr	0,005	0,011		0,001	–
Fe^{3+}	0,087	0,031	Fe	0,152	0,133
Fe^{2+}	0,311	0,154			
Mn	0,010	0,000		0,001	–
Mg	0,323	0,216		1,827	1,837
Ca	2,354	2,631		–	–
Na	0,044	0,032			
K	–	–	Ni	0,006	0,007
Сумма	8,028	8,011		2,993	2,988
F	55,2	46,2	Fo	91,9	92,9
Ca-комп.	77,0	87,0	*f*	7,7	6,76

*Сосуществует с коэситом.

кристаллах алмаза наличие кварца, сосуществующего с омфацитом в трещиноватом алмазе технического качества, можно рассматривать как результат вторичного изменения коэсита. Результаты анализов гранатов и пироксенов сопоставлены на рис. 2 с результатами изучения сосуществующих пар гранат + омфацит преимущественно из алмазосодержащих парагенезисов кимберлитов, причем среди многочисленных анализов отобраны составы, характеризующие весь возможный интервал. Наиболее сложным составом обладают глиноземистые пироксены из дистеновых эклогитов и гроспидитов, и точки состава сосуществующих гранатов по соотношению Ca, Mg и Fe в ряде случаев сближены с ними. Гранат, приближающийся по составу к чистому гроссуляру, сосуществует с пироксенами лишь в 3 изученных образцах гроспидитов без алмазов из трубки "Загадочная" [9]. Очевидно, что практически каждый из изученных пироксенов из австралийских алмазов может сосуществовать с гроссуляром, подтверждением чего являются общие особенности состава кальциевых пироксенов, а также зафиксированные пары гранат + коэсит и пироксен + коэсит.

Результаты изучения состава гранатов и пироксенов из австралийских алмазов, сосуществующих в отдельных образцах с коэситом, позволяют объединить их в парагенезис гроссуляр + пироксен + коэсит. Пониженная глиноземистость пироксенов и их устойчивые отличия от пироксенов гроспидитов позволяют исключить возможность сосуществования дистена с изученными минералами и назвать такую ассоциацию, впервые зафиксированную в природных условиях, "гроспит" от назва-

ний гроссуляр и пироксен, в отличие от гроспидита, содержащего дистен [1]. Как в гроспидитах, так и в гроспитах может присутствовать коэсит.

Проведенные дополнительно к [10] исследования изотопного состава углерода австралийских алмазов показали, что величина $\delta^{13}C$ для всей коллекции (с включениями и без включений), составляющей 44 образца, колеблется в интервале от −3,3 до +2,4 ‰, причем более 70% алмазов характеризуются положительным значением $\delta^{13}C$ [12]. Изотопный состав углерода алмазов с включениями охватывает несколько более узкий интервал: $\delta^{13}C$ от −3,3 до +1,5 ‰, наиболее изотопически легким в этой выборке оказался алмаз с включением оливина, $\delta^{13}C$ которого (−3,3 ‰) попадает в интервал, типичный для алмазов с включениями ультраосновного типа парагенезиса [10]. Особенности изотопного состава изученных алмазов с утяжеленным углеродом свидетельствуют об участии в алмазообразовании экзогенных карбонатов, содержащихся в погруженных в мантию вулканогенно-осадочных породах [8].

Учитывая более раннюю находку коэсита в австралийском алмазе, по данным Ю. Милледж [8], можно заключить, что в общей сложности в 17 кристаллах установлено 7 включений коэсита, а также одно включение кварца. Общее соотношение алмазов эклогитового и ультраосновного типа парагенезиса определяется как 88 и 12% соответственно. Роль коэситсодержащих парагенезисов здесь исключительно велика и составляет более 40%. Это на 2 порядка выше средней встречаемости коэсита среди включений в алмазах, что подтверждает уникальный характер изученной выборки алмазов.

Совершенствование изотопных методов исследования минералов позволило в последние годы получить новые данные по возрасту ряда образцов из кимберлитовых трубок, включая даже алмазы, содержащие кристаллические включения. Эти результаты свидетельствуют об очень древнем возрасте некоторых объектов. Так, возраст отдельных алмазов из африканских кимберлитов мелового возраста оказался близким к 2,5 млрд. лет [15], а возраст ксенолитов эклогитов из этих же кимберлитов, определённый как Sm–Nd-методом по породе и отдельным минералам, так и Rb–Sr-методом, составляет 4,1–4,4 млрд. лет [14]. Такие эклогиты близки по составу к некоторым архейским базальтам, и независимое определение U–Pb-методом возраста цирконов, извлеченных из архейских песчаников Австралии, также привело к значению в 4,1 млрд. лет [13]. Указанный рубеж следует принять за возраст дифференциации верхней мантии, существенно отличающийся от ранее опубликованных данных.

Своеобразный характер известково-силикатной ассоциации изученных включений, соответствующий породам типа впервые выделенных гроспитов, свидетельствует о тесной исходной ассоциации вулканогенных и карбонатных пород. Если на протяжении ранней истории Земли, в архее, карбонаты, как, например, на Русской платформе, составляли лишь 0,4% от общего объема отложений, то в палеозое роль их существенно повысилась, почти на 2 порядка [6]. Доля вулканических пород, наоборот, понизилась. Задача установления возраста австралийских алмазов по включениям представляется в связи с этим весьма актуальной, так как только этим способом можно реально оценить время погружения пород коры в мантию в рассматриваемом регионе.

Таким образом, впервые в природных алмазах установлены включения гроссуляра, его ассоциация с коэситом и показано широкое распространение коэсита и пироксенов диопсид-омфацитового ряда в алмазах Юго-Восточной Австралии. Участие вулканогенно-карбонатного материала земной коры в алмазообразовании доказывается как аномально утяжеленным изотопным составом углерода алмазов, так и преобладанием своеобразной известково-силикатной ассоциации включений, а особо глубинный, мантийный характер образования алмазов однозначно подт-

верждается широким распространением включений коэсита – минерала, не известного в метаморфических породах земной коры.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность А. Жорису и Ж. Кастерану за предоставление коллекции алмазов для исследования, а также проф. Д.А. Брауну за содействие в организации исследований.

Институт геологии и геофизики
Сибирского отделения Академии наук СССР,
Новосибирск

Поступило
10 X 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бобриевич А.П., Смирнов Г.И., Соболев В.С.* – Геол. и геофиз., 1960, № 3. 2. *Лаврентьев Ю.Г. и др.* – Зав. лаб., 1974, т. 40, № 6. 3. *Орлов Ю.Л., Соболев Н.В.* – ДАН, 1980, т. 250, № 4. 4. *Пономаренко А.И., Соболев Н.В. и др.* – ДАН, 1976, т. 226, № 4. 5. *Пономаренко А.И., Специус З.В., Соболев Н.В.* – ДАН, 1980, т. 251, № 2. 6. *Ронов А.Б.* Осадочная оболочка земли. М.: Наука, 1980. 7. *Соболев В.С.* Геология месторождений алмазов Африки, Австралии, острова Борнео и Северной Америки. М.: Госгеолтехиздат, 1951. 8. *Соболев В.С., Соболев Н.В.* – ДАН, 1980, т. 250, № 3. 9. *Соболев Н.В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 10. *Соболев Н.В., Галимов Э.М. и др.* – ДАН, 1979, т. 249, № 5. 11. *Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Усова Л.В.* В кн.: Мантийные ксенолиты и проблема ультраосновных магм. Новосибирск: Наука, 1983. 12. *Соболев Н.В., Ивановская И.Н. и др.* В кн.: Всесоюзн. совещание по геохимии углерода. Тез. докл. М., 1981. 13. Episodes, 1983, vol. 1983, № 2, p. 29. 14. *Jagoutz E. et al.* 46 Annual Meeting Meteoritical Society. Mainz, Abstr., 1983. 15. *Kramers J.* – Earth Planet. Sci. Lett., 1979, vol. 42, № 1.