

УДК 552.11:548.4

РАСПЛАВНЫЕ И ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КСЕНОЛИТЕ АНОРТОЗИТА ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ, ЯКУТИЯ

© 2002 г. А. А. Томиленко, член-корреспондент РАН В. С. Шацкий,
С. В. Ковязин, Ю. И. Овчинников

Поступило 12.07.2002 г.

Проблема происхождения анортозитов всегда привлекала внимание исследователей, неоднократно обсуждалась в литературе и по-прежнему является актуальной [1–4]. Особый интерес вызывает происхождение докембрийских автономных анортозитов. Это связано в первую очередь с тем, что, по мнению многих исследователей, образование анортозитов такого типа является характерной чертой ранней стадии развития Земли. Несмотря на длительную историю изучения этих пород, вопрос об их генезисе по-прежнему вызывает острую дискуссию.

В данном сообщении приводятся первые результаты микроскопического, микротермометрического, криометрического, КР-спектроскопического и микрозондового изучения расплавных и флюидных включений в минералах ксенолита анортозита из кимберлитовой трубки Удачная, Якутия, которая, согласно тектонической схеме О.М. Розена и др. [5], расположена в пределах Мархинского гранулит-зеленокаменного террейна.

Для оптических исследований расплавных и флюидных включений в проходящем свете использованы плоскопараллельные полированные с двух сторон пластинки толщиной 100–150 мкм. Микротермометрические исследования проводились в микротермокамере и криокамере конструкции Н.Ю. Осоргина и А.А. Томиленко [6, 7]. Микро-КР-анализ выполнен на одноканальном КР-спектрометре “RAMANOR U-1000” фирмы “Jobin Yvon” с использованием аргонового лазера. Химический состав минералов и расплавных включений определяли на электронном микрозонде “Camebax-micro” в стандартных условиях.

Основная масса ксенолита сложена гипидиоморфными зернами плагиоклаза (>85 об.%), в интерстициях между которыми расположены зерна ортопироксена, клинопироксена и амфибола. Содержание темноцветных минералов менее 15%.

Амфибол присутствует в незначительных количествах и встречается в основном в виде самостоятельных ксеноморфных зерен. Отмечены редкие случаи частичного замещения ортопироксена по краям зерен вторичным амфиболом. Кроме того, в плагиоклазе были обнаружены включения октаэдрических кристаллов шпинели. Встречаются они как в виде отдельных кристаллов, так и группы кристаллов. На основании микроструктурных соотношений между минералами в изученном ксенолите можно предположить следующий порядок кристаллизации минералов: плагиоклаз – шпинель – ортопироксен – клинопироксен – амфибол.

Химический состав ксенолита (обр. Уд-90/4), полученный РФА, следующий, мас. %: SiO₂ 48.0; TiO₂ 0.22; Al₂O₃ 22.4; Fe₂O₃ 5.0; MnO 0.13; MgO 6.8; CaO 15.0; Na₂O 1.33; K₂O 0.2; п.п. 0.78; сумма 99.86. По своим минералого-петрохимическим особенностям он отвечает анортозитовой ассоциации. Особенности химического состава минералов ксенолита иллюстрируют микрозондовые анализы, приведенные в табл. 1. Следует подчеркнуть, что все изученные зерна плагиоклаза, ортопироксена, клинопироксена и амфибола однородны по составу. Сравнение химических составов минералов изученного ксенолита с опубликованными данными по докембрийским анортозитовым массивам автономного типа Анабарского щита, расположенных в северной части Котуйкан-Монхоолинской зоны (Северный, Центральный и Восточный массивы) и в Маганской зоне (Маганский, Амбардахский и Коялахский массивы) [8], показало наряду со сходством и существенные отличия. Составы плагиоклазов (An₈₀) в целом близки составам наиболее основных плагиоклазов из анабарских анортозитовых массивов. В то же время составы ортопироксенов и клинопироксенов достаточно сильно отличаются в первую очередь по повышенному содержанию Al₂O₃ от ортопироксенов и клинопироксенов из анабарских анортозитов (ортопироксены – 4.9 и 2.12 мас.% и клинопироксены – 6.7 и 3.63 мас.% соответственно). Для амфиболов также характерно более высокое содержание Al₂O₃ по сравнению с амфиболами из анабарских анор-

Таблица 1. Химический состав минералов и расплавно-го включения в клинопироксене из ксенолита анортозита (Уд-90/4), мас. %

Компонент	Плагиоклаз		Ортопироксен		Клинопироксен		Амфибол		Шпинель	Шпинель*	Расплавное включение**
	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край			
SiO ₂	47.4	47.2	52.5	52.8	49.6	50.1	40.6	40.9	0.06	0.07	58.1
TiO ₂	0.03	0.02	0.02	0.02	0.38	0.4	2.0	2.0	0.12	0.16	0.3
Al ₂ O ₃	33.3	33.4	4.6	4.9	6.7	6.4	16.5	15.9	58.4	58.2	19.0
FeO	0.08	0.08	16.3	15.3	7.2	7.0	10.8	10.5	23.5	23.3	3.05
MnO	0.0	0.0	0.33	0.28	0.12	0.19	0.1	0.09	0.14	0.15	0.08
Cr ₂ O ₃	0.0	0.0	0.08	0.09	0.18	0.19	0.19	0.15	2.25	1.77	0.0
MgO	0.06	0.05	25.1	25.6	13.3	13.3	13.8	13.6	14.5	15.4	2.54
CaO	16.1	16.4	0.52	0.81	20.9	21.4	10.7	11.0	0.19	0.36	6.7
Na ₂ O	2.19	2.24	0.04	0.07	0.69	0.66	2.96	2.77	0.1	0.03	3.02
K ₂ O	0.05	0.04	0.0	0.0	0.02	0.0	0.6	0.8	0.0	0.0	4.36
Сумма	99.21	99.43	99.49	99.87	99.09	99.64	98.25	97.71	99.26	99.44	97.15
Ca/(Ca + Na + K)	0.80	0.80									

* Ламели шпинели в клинопироксене.

** "Закаленное" стекло гомогенизированного ($T_{\text{гом}} = 1120$ °С) расплавно-го включения в клинопироксене.

тозитов (16.5 и 12.3 мас.% соответственно). Кроме того, в некоторых зернах клинопироксена наблюдаются структуры распада с пластинчатыми выделениями шпинели. Составы октаэдрических кристаллов шпинели в плагиоклазе и ламелей шпинели в клинопироксене идентичны и отвечают плеонасту (табл. 1). Ламели шпинели обычно концентрируются в центральной части зерен клинопироксена, хотя и имеются случаи распределения их по всему объему зерен клинопироксена. Повышенное содержание Al₂O₃ в ортопироксене по сравнению с ортопироксенами из анортозитовых массивов Анабарского щита свидетельствует о кристаллизации его в условиях более высокого давления [9].

При микроскопическом изучении пластинок в клинопироксене были обнаружены и изучены частично и полностью раскристаллизованные первичные расплавные включения и сопутствующие им флюидные включения (рис. 1а, 1б). В некоторых случаях наряду с нормальными расплавленными включениями – включениями "гомогенного захвата" – установлены также комбинированные расплавные включения – с исходно захваченными флюидными обособлениями аномально больших размеров, т.е. включения "гетерогенного захвата" [10]. Как правило, сопутствующие флюидные включения ассоциируют с комбинированными расплавленными включениями. Фазовый состав расплавленных включений в клинопироксене представлен несколькими кристаллическими фазами, остаточным стеклом (в частично раскристаллизованных включениях) и флюидной фазой, которая неред-

ко находится в интерстициях между кристаллическими фазами. Размер включений от нескольких до 20 мкм. Располагаются они в зернах клинопироксена в виде азональных групп из 2–5 включений. Гомогенизация расплавленных включений происходит при температурах 1100–1120°С. Размер флюидных включений в клинопироксене обычно не превышает 15 мкм. При комнатной температуре все флюидные включения в клинопироксене однофазные. Криометрические исследования показали, что состав данных включений представлен жидкой СО₂. При охлаждении в криокамере происходит гетерогенизация включений с появлением газового пузырька. Замерзание жидкой углекислоты наступает ниже температуры тройной точки для СО₂, оттаивание происходит всегда при температуре порядка –56.6°С, т.е. мы имеем дело практически с чистой углекислотой. Гомогенизация включений в клинопироксене осуществляется в жидкую фазу СО₂ при температурах от –16 до –9°С, плотность (ρ) СО₂ равна 1.01–0.98 г/см³ [11]. КР-анализ флюидных включений и флюидных обособлений расплавленных включений в клинопироксене подтвердил их практически чисто углекислотный состав. Во флюидных обособлениях расплавленных включений каемок жидкой фазы воды или водного раствора обнаружено не было. Скорее всего, существенного накопления воды в расплавах, из которых кристаллизовались анортозиты, не было. В то же время в некоторых комбинированных включениях можно было наблюдать фазу сжиженной углекислоты, т.е. расплавы, даже богатые флюидами, были в основном "сухими".

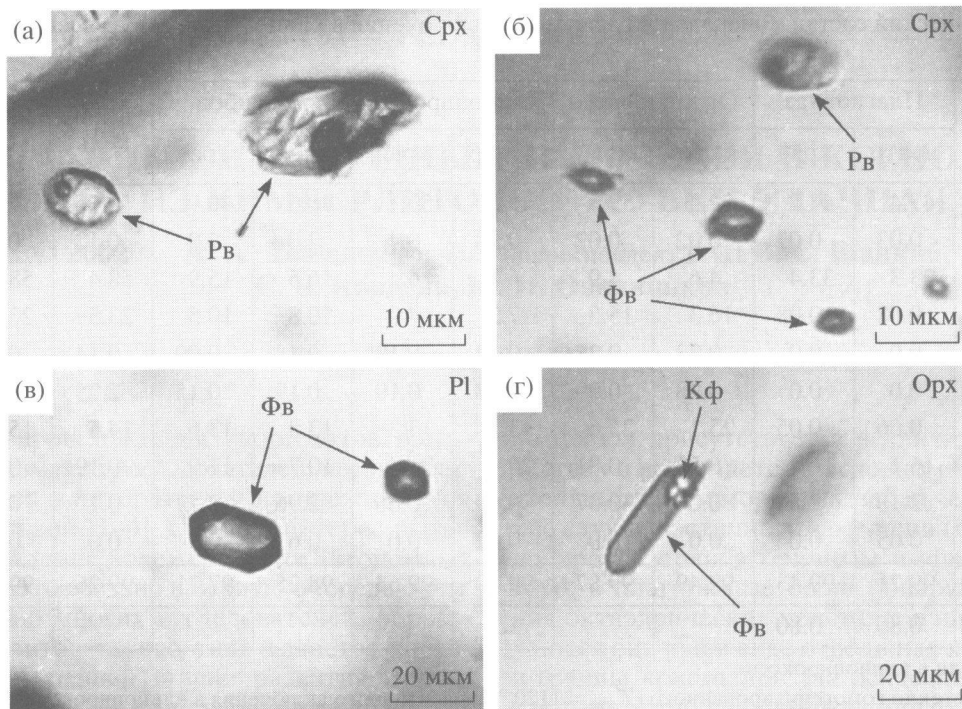


Рис. 1. Расплавные и флюидные включения в минералах ксенолита анортозита (Уд-90/4). а – непрогретые первичные расплавные включения (Рв) в клинопироксене (Срх); б – непрогретое первичное расплавное включение (Рв) и сопутствующие флюидные включения жидкой углекислоты (Фв) в клинопироксене; в – флюидные включения жидкой углекислоты (Фв) в плагиоклазе (Pl); г – флюидное включение жидкой углекислоты (Фв) с ксеногенными кристаллическими фазами (Кф) в ортопироксене (Орх).

Такие высокие плотности жидкой углекислоты свидетельствуют о высоком флюидном давлении в магматической системе при кристаллизации клинопироксена. При температурах около 1100–1120°C (температуры гомогенизации расплавных включений в клинопироксене) давление флюида составляет не менее 8.0 кбар – на пересечении соответствующих изотерм и изохор в системе CO_2 [12, 13]. Аналогичные оценки давления получены при использовании экспериментальных данных по растворимости чермакитового компонента в клинопироксене в ассоциации с анортитом, плагиоклазом, ортопироксеном и шпинелью в системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [14].

Сравнение химизма изученного ксенолита анортозита с особенностями состава “закаленных” стекол из гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене из этого же образца свидетельствует о четко проявленном обогащении остаточного расплава кремнеземом (SiO_2 до 58.1 мас.%), щелочами ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ до 7.38 мас.%), особенно калием (K_2O до 4.36 мас. %), на момент кристаллизации клинопироксена. Одновременно расплав обедняется оксидами железа, магния и кальция. Следует отметить, что по данным изучения “остаточных” стекол из непрогретых расплавных включений в клинопироксене сохраняются те же тенденции накопления кремнезема и понижения содержания

железа, магния и кальция (FeO 1.48; MgO 0.69; CaO 3.92 мас.%).

В плагиоклазе и ортопироксене обнаружены только однофазные включения жидкой CO_2 , аналогичные включениям в клинопироксене (рис. 1в, г). Размер включений от нескольких до 30 мкм. Температуры гомогенизации включений сжиженной CO_2 в плагиоклазе составляют интервал от –19 до –12°C ($\rho = 1.03\text{--}0.99 \text{ г/см}^3$), в ортопироксене от –16 до –9°C ($\rho = 1.01\text{--}0.98 \text{ г/см}^3$). Наиболее крупные флюидные включения всегда имеют признаки частичной разгерметизации и утечки части вещества (наличие ореола дочерних мельчайших флюидных включений). Поэтому оценки плотности содержащего эти включения являются минимальными значениями. Температура оттаивания твердой CO_2 также равна –56.6°C. По данным КР-анализа в составе флюидных включений в плагиоклазе и ортопироксене, так же как и во флюидных включениях в клинопироксене, присутствует практически чистая CO_2 .

Таким образом, обнаружение и изучение расплавных включений показало, что данная порода была образована в процессе кристаллизации высокоизвестковистого и высокоглиноземистого расплава при температуре выше 1100°C и флюидном давлении не менее 8.0 кбар. Исходные расплавы практически не содержали воды. Высокие темпе-

ратуры гомогенизации расплавных включений указывают на то, что анортозиты не могли образоваться при плавлении пород земной коры в условиях фации гранулитового метаморфизма [15]. Проведенные исследования позволили получить новые данные, подтверждающие магматическое происхождение анортозитов [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 00-05-65418).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simmons K.J., Hanson G.N.* // *Contribs. Mineral. and Petrol.* 1978. V.66. P.119–135.
2. *Богатилов О.А.* Анортозиты. М.: Наука. 1979. С. 232.
3. *Mitchell J.N., Scoates J.S., Frost C.D.* // *Contribs. Mineral. and Petrol.* 1995. V. 119. P. 166–180.
4. *Owens B.E., Dymek R.F.* // *J. Petrol.* 2001. V. 42. P. 1519–1546.
5. *Розен О.М., Журавлев Д.З., Суханов М.К. и др.* // *Геология и геофизика.* 2000. Т. 42. № 2. С. 163–180.
6. *Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А.* Микротермокамера. А. С. № 1562816 СССР // *Бюл. изобр.* 1990. № 17.
7. *Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А.* Криокамера. А. С. № 1592678 СССР // *Бюл. изобр.* 1990. № 34.
8. *Суханов М.К.* В кн.: Анортозиты Земли и Луны. М.: Наука, 1984. С. 61–86.
9. *Longhi J., Fram M.S., Auwera J.V. et al.* // *Amer. Miner.* 1993. V. 78. P. 1016–1030.
10. Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов / Под. ред. В.С. Соболева, В.П. Костюка. Новосибирск: Наука, 1975. С.256.
11. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. С. 720.
12. *Томиленко А.А., Чупин В.П.* Термобарогеохимия метаморфических комплексов. Новосибирск: Наука, 1983. С. 201.
13. *Долгов Ю.А., Бакуменко И.Т., Томиленко А.А. и др.* // *Геол. и геофиз.* 1984. Т. 25. № 12. С. 41–54.
14. *Herzberg C.T.* // *Geochim. et cosmochim. acta.* 1978. V. 42. P. 945–957.
15. *Розен О.М., Федоровский В.С.* Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры. М.: Науч. мир, 2001. С. 186.