

УДК 550.4+553.491

## РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ КИСЛОГО СОСТАВА В ОЛИВИНЕ ИЗ ПЕРИДОТИТОВ ДОВЫРЕНСКОЙ ИНТРУЗИИ

© 2002 г. Э. Г. Конников, С. В. Ковязин

Представлено академиком А.А. Маракушевым 13.02.2002 г.

Поступило 04.03.2002 г.

Первые пока еще малочисленные исследования расплавных включений в интрузивных мафит-ультрамафитовых комплексах [1] показали, что в отличие от базальтов их состав может существенно отличаться от состава магмы, родоначальной для этих интрузий. Подобные аномальные включения были обнаружены нами в оливине из пород расслоенной Довыренской дунит-троктолит-габбровой интрузии, образованной в связи с мидконтинентальным рифтогенезом в неопротерозойских структурах Северного Прибайкалья [2–5]. В плагиоклазе они обнаружены ранее [6], но наиболее разнообразен их состав в оливине. Здесь выделяются следующие виды расплавных включений: 1) стекла кислого состава с усадочным пузырьком; 2) то же, частично и полностью раскристаллизованные; 3) фемические и 4) мономинеральные включения.

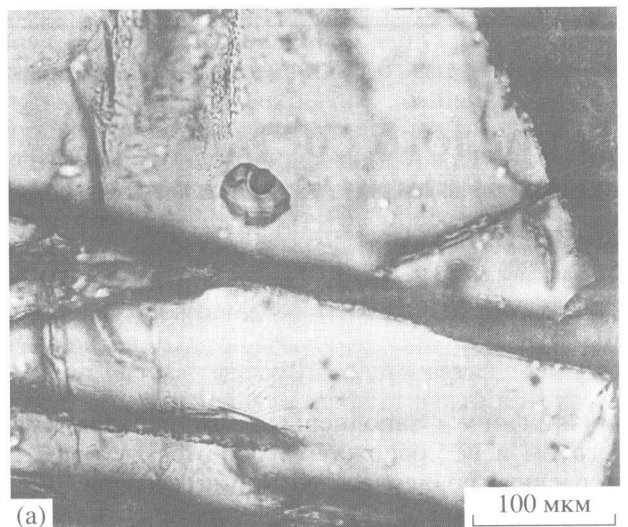
Кислые стекла наиболее характерны для приподошвенных силлов, подстилающих дунит-троктолитовую расслоенную серию в этом массиве, хотя изредка отмечаются и в верхах троктолитовой зоны, по размерам достигают 50–60 мкм и имеют отрицательные кристаллографические очертания оливина (рис. 1а). Стекла бесцветные, после прогрева приобретают коричневатый оттенок. По составу они близки к щелочным трахилипаритам (табл. 1), но отличаются от них крайней бедностью СаО (0.07–0.34 мас. %) и повышенным содержанием MgO (до 4.77 мас. %). Концентрация щелочных оксидов в них достигает 10 мас. % при переменных соотношениях Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O. В некоторых стеклах присутствует кристаллическая фаза.

Раскристаллизованные включения тоже крупного размера (50–120 мкм), анало-

гичной формы, заполнены полиминеральным агрегатом и не содержат газовой фазы (рис. 1б). Последняя появлялась только при нагревании и частичном плавлении кристаллических фаз. Опыты по нагреванию включений проводили на кафедре полезных ископаемых МГУ и в Институте минералогии СО РАН (Новосибирск). В первом случае партия из 500 зерен оливина, в которых были известны расплавные включения, помещалась на 7 мин в силитовую печь, предварительно разогретую до 1280°C, после чего оливины закаливались в воде. В ИМ СО РАН грелись индивидуальные включения в Pt-печи в атмосфере нейтрального газа. Плавление твердых фаз и появление газового пузыря во включениях начинались при  $T = 1000\text{--}1100^\circ\text{C}$ , а полное плавление наступало в интервале  $T = 1260\text{--}1325^\circ\text{C}$ . Однако гомогенизации расплава с растворением газового пузыря не достигалось даже при более высокой температуре. Прогретые таким образом включения анализировались на электронном зонде. Как показывают эти анализы (табл. 1), полученные в результате нагревания стекла в большинстве своем имеют также кислый трахилипаритовый и трахидацитовый состав, сходный с составом природных стекловатых включений, отличаясь от последних большим количеством FeO и в некоторых случаях меньшим SiO<sub>2</sub> (до 65 мас. %). Весьма вероятно, что эти различия связаны с растворением стенок вакуоли при термических экспериментах, хотя заметных изменений размеров включений в процессе нагревания не замечено.

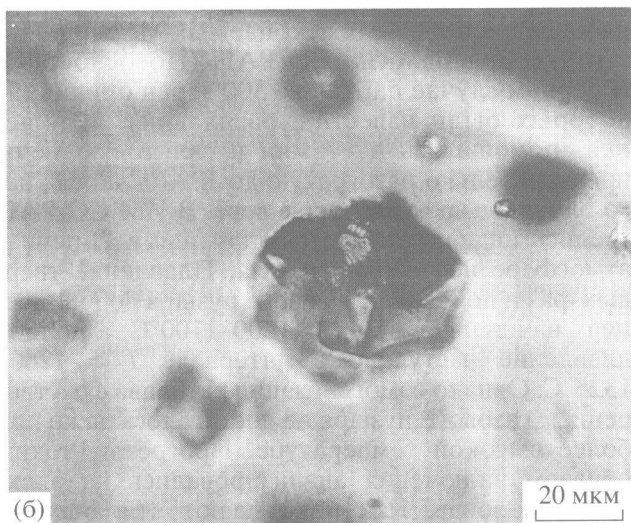
Наряду с кислыми в оливине встречены раскристаллизованные твердофазные включения, имеющие неправильные округлые очертания, полупрозрачные, размером до 60–70 мкм (рис. 1в), которые при нагревании плавятся в бурые стекла фемического состава. Такие фемические включения встречаются гораздо реже кислых и пока обнаружены только в трех образцах. В противоположность включениям кислого состава они богаты FeO, MgO, СаО, некоторые и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, но бедны щелочами, TiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub> (см. табл. 1), т.е. по составу комплементарны им. По стехиоме-

*Институт экспериментальной минералогии  
Российской Академии наук,  
Черноголовка Московской обл.  
Объединенный институт геологии,  
геофизики и минералогии  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск*



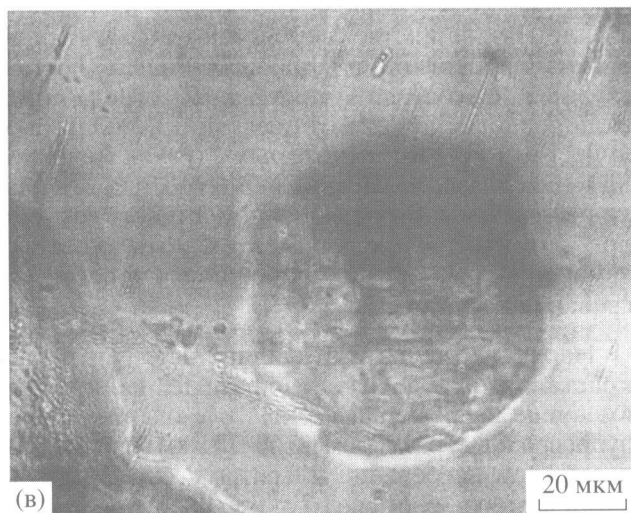
(a)

100 мкм



(б)

20 мкм



(в)

20 мкм

**Рис. 1.** Микрофотографии главных разновидностей расплавных включений в оливинах из ультраосновных пород Довыренского расслоенного массива: а – природные стекла с газовым пузырем; б – полиминеральные раскристаллизованные включения; в – фемические включения.

три главных химических компонентов фемические включения подобны бронзитам и авгитам магматических пород [7]. От аналогичных порообразующих минералов в породах массива [5] они отличаются более высокой глиноземистостью, железистостью. Виртуальный клинопироксен диагностирован в одном из зерен оливина в троктолитах, где он сосуществует с липаритового состава расплавленным включением (обр. P4/2).

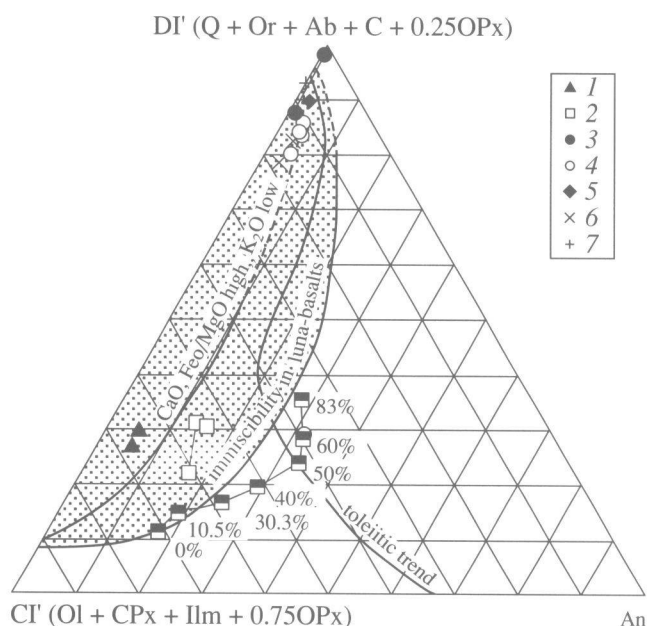
Мономинеральные включения очень широко распространены в оливинах Довыренского комплекса и представлены калишпатом, флогопитом и плагиоклазом, при этом два первых минерала найдены только в приподошвенных плагиоклазсодержащих перидотитах, в которых флогопит является порообразующим минералом, тогда как высокоосновный плагиоклаз (82–89% An) характерен для оливинов всей расслоенной серии. Примечательно, что калишпат – весьма редкий минерал в Довыренском массиве, содержащем 0.28 мас. %  $K_2O$  в расчетном средневзвешенном его составе. Тем не менее калишпат в качестве твердофазных включений присутствует не только в оливине, но и в плагиоклазе габбро, где он ассоциирует с клинопироксеном [6]. Флогопит по содержанию главных элементов близок к порообразующему флогопиту перидотитов, но резко беднее его  $TiO_2$  (0.05–0.12 мас. % против 3–4 мас. %).

Таким образом, все включения в оливине из ультраосновных пород расслоенной серии существенно отличны от Довыренской интрузии как по химическому, так и минеральному составу. Если принять во внимание средневзвешенный состав этого интрузива, то исходным для него был ультраосновной расплав, подобный пикритовому или коматиитовому [4]. Но если основываться на составе оливина в породах расслоенной серии (84 мол. % Fo), то он должен был кристаллизоваться в равновесии с расплавом высокомагнезильного андезитобазальта, содержащего ~54 мас. %  $SiO_2$  и 7.5 мас. % MgO (Арискин и др., в печати). Численное моделирование кристаллизации этих составов с помощью программы “КОМАГМАТ” не дает остаточной жидкости, сколько-нибудь близкой к составу наблюдаемых в оливине расплавных включений. Выше уже указывалось, что даже включения минералов, которые являются порообразующими в Довыренском массиве (пироксены, амфибол, флогопит), существенно от них отличаются более высокой железистостью и глиноземистостью. Поскольку Довыренская интрузия характеризуется низкobarической последовательностью выделения минеральных фаз из базитовой магмы (Ol → Pl → Crx → Orx ± Phg), то теоретически в качестве включений в оливине может быть только плагиоклаз. Жидкость кислото состава, а также пироксены, флогопит и тем более калишпат должны были присутствовать в

**Таблица 1.** Состав расплавных включений в оливине из Довыренской дунит-троктолит-габбровой расслоенной интрузии (Северное Прибайкалье)

№ обр.	Порода	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	П.п.п.	Сумма
Природные стекла												
D58	Плагинепидотиты	72.3	0.02	13.62	1.7	0.04	4.77	0.18	4.63	3.35	He опр.	100.6
		68.0	0.03	13.22	1.87	He опр.	3.99	0.34	2.13	4.15	0.11	93.9
		72.66	0.14	14.42	0.65	0.12	0.1	0.07	3.45	4.4	0.07	96.1
		71.24	0.06	14.11	0.73	He опр.	0.01	0.15	2.77	5.46	0.17	94.7
1520	Троктолиты	70.24	0.16	12.28	1.64	0.08	2.25	He опр.	0.33	10.31	He опр.	97.3
		76.64	0.22	14.58	0.73	0.04	0.24	»	6.56	0.07	0.01	99.1
		74.53	0.14	12.62	1.53	0.04	1.98	0.16	5.86	0.07	0.05	97.0
Включения после термических экспериментов												
D58	Плагинепидотиты	71.9	0.24	13.35	3.15	0.18	3.31	0.58	4.52	2.54	0.19	100.0
		72.41	0.23	13.61	3.19	0.05	3.54	0.73	5.48	2.56	0.56	102.4
		72.14	0.52	12.82	3.77	He опр.	3.69	0.66	5.15	2.85	0.26	101.9
		68.92	0.17	11.46	3.69	0.07	5.29	0.77	3.22	2.97	0.88	97.4
		70.56	0.05	11.89	3.38	0.11	2.89	0.78	2.92	3.08	0.52	96.2
		71.6	0.27	12.11	3.32	He опр.	2.88	0.64	3.28	2.98	0.42	97.5
		70.95	0.08	11.63	3.11	0.15	2.95	0.63	3.97	3.22	0.7	97.4
		69.58	He опр.	13.7	3.05	He опр.	3.28	0.77	6.47	3.18	0.16	100.2
140	Дуниты	70.1	0.16	14.04	3.44	0.03	4.01	0.81	6.44	1.83	0.55	101.4
		65.33	0.04	12.9	5.22	He опр.	3.02	0.96	5.15	3.09	0.41	96.1
		65.61	0.06	13.04	5.12	0.05	3.15	0.97	4.12	3.04	0.67	95.8
840	Троктолиты	64.85	He опр.	11.85	6.14	0.1	4.71	0.66	4.7	2.88	0.52	96.4
		66.16	0.23	11.27	5.72	0.05	3.37	0.69	1.96	6.55	1.39	97.4
P4/2		69.43	0.1	11.75	5.14	0.17	4.35	0.79	2.56	5.6	0.44	100.3
P4/3		73.44	0.13	11.84	2.85	0.08	2.06	0.43	2.26	6.74	0.17	100.0
		72.35	0.11	11.75	3.18	0.15	2.18	0.37	2.1	6.78	0.41	99.4
Фемические включения												
D58	Плагинепидотиты	55.41	0.87	3.19	10.05	0.49	27.85	1.09	0.41	0.6	0.24	100.2
		52.41	0.09	3.85	10.97	0.4	32.36	0.69	0.43	0.7	0.25	102.2
		57.19	0.93	3.6	9.23	0.48	27.53	1.02	0.49	0.61	0.12	101.2
140	Дуниты	53.05	0.17	9.62	8.99	0.14	10.71	10.5	1.5	1.51	0.93	98.6
		52.55	0.25	9.22	9.21	0.17	10.74	10.3	1.78	1.46	0.83	96.5
		51.4	0.06	8.61	8.13	0.07	17.92	9.14	0.77	1.21	0.64	98.0
Мономинеральные включения												
D58	Плагинепидотиты	64.93	0.17	18.89	0.47	0.01	0.04	0.43	2.94	11.55	0.16	99.6
		64.33	0.06	18.87	0.42	He опр.	0.08	0.57	3.06	10.83	0.14	98.4
		43.38	0.11	13.33	5.9	0.1	21.19	1.04	0.94	4.03	0.16	90.2
		43.0	0.05	12.96	7.98	0.48	20.8	4.2	0.25	5.03	1.34	96.1
		38.7	0.12	13.97	6.53	He опр.	26.65	0.35	0.27	3.17	0.75	90.5
		840		46.0	He опр.	32.1	0.74	0.13	0.04	16.6	1.63	0.19
44.51	0.01			28.93	1.32	0.1	5.17	13.6	1.67	0.52	He опр.	95.8
47.4	He опр.			33.71	0.84	He опр.	He опр.	17.6	1.48	0.14	0.05	101.2
47.48	0.11			34.04	0.93	0.06	0.02	17.9	1.28	0.19	0.07	102.0
45.18	0.04			32.33	0.89	0.08	0.18	17.3	1.25	0.17	He опр.	97.4

Примечание. Рентгеноспектральные анализы выполнялись в ИЭМ РАН, оператор А. Некрасов, и в Майнцском университете (Германия), операторы В. Schulz-Dobrick, N. Groschopf.



**Рис. 2.** Положение фигуративных точек составов феррических расплавных включений (1 и 2) и кислых стекол (3–7) на треугольной диаграмме Т.Н. Ирвайна [9]. Наполовину залитые квадраты – составы остаточной жидкости при различной степени кристаллизации (%) предполагаемого исходного расплава Довыренской интрузии. Крапом помечена область несмесимости, наблюдаемая в лунных базальтах.

магме уже при субликвидусной температуре, когда из нее начал кристаллизоваться оливин.

Наиболее вероятны две причины появления капель жидкости кислого состава и калишпата в базитовой магме во время начала ее кристаллизации: 1) плавление пород континентальной коры на пути движения расплава Довыренской интрузии и/или стенок интрузивной камеры; 2) метастабильная ликвация самой базитовой жидкости с образованием кислой и ультраосновной фракций.

Частичное плавление пород рамы в Довыренском массиве наблюдается. При этом образуются чарнокитоидного состава гранофиры [4], но в отличие от кислых стекол во включениях из оливина эти выплавки содержат больше CaO (~2 мас. %), значительно беднее их щелочами ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  не более 5 мас. %) и кремнеземом ( $\text{SiO}_2$  до 67 мас. %). Вероятность ассимиляции и последующего плавления пород сиалической коры этой интрузией допускалась нами и ранее [4, 5], учитывая необычно высокое изотопное отношение Sr в породах Довыренского плутона ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в среднем равно 0.712). Но для принятия такой версии происхождения кислых микровключений в оливине необходимо привести дополнительные доказательства и дальнейшие геохимические и изотопно-геохимические исследования. Они должны быть направлены на сравнительное изучение кис-

лых микровключений и кислых вулканитов в низах разреза сыннырской свиты, комагматичной Довыренской интрузии, которые тоже характеризуются трахитовой петрохимической специализацией.

Комплементарность составов кислых и феррических включений предполагает вероятность второго предположения о генезисе кислых включений. Отвечающие им фигуративные точки на диаграмме Т.Н. Ирвайна [9] хорошо укладываются в область несмесимости, обнаруженную в лунных базальтах [10] (рис. 2). Примечательно, что и средневзвешенный состав массива тоже ложится в эту область, оставаясь в ней до выпадения из расплава 20–25% оливина. Однако следует отметить, что лунные базальты отличаются от Довыренской интрузии по составу существенным образом, и в первую очередь низкой щелочностью и железистостью. Все достоверные случаи силикатно-силикатной несмесимости в земных породах связаны тоже с базальтоидами щелочного (преимущественно калиевого) ряда [11]. Очень интересные стекловатые включения высоко-К (5–8 мас. %  $\text{K}_2\text{O}$ ) липаритов обнаружены в продуктах горения угольных отвалов Челябинского бурогоугольного бассейна, названных “парабазальтами” [12]. Эти породы образуются при плавлении тонко измельченной смеси аргиллитов, известковистых сланцев, сидеритов и угольной пыли при  $T = 1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ . В ряде случаев кислые включения здесь, как и в Довыренской интрузии, ассоциируют с комплементарными им высоко-Fe (до 46 мас. % FeO), высоко-Ca (17 мас. % CaO), но низко-Si (до 31 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) включениями. Авторы происхождения этих включений увязывают с метастабильной ликвацией щелочнобазальтовой жидкости при  $f_{\text{O}_2} = 10^{-9}\text{--}10^{-12}$  атм. Появление гетерогенности в базальтовом расплаве при растворении в нем  $\text{H}_2$  экспериментально показано в [13]. Восстановительные условия кристаллизации были характерны как для лунных базальтов, для техногенных базальтов Челябинска, а также для никеленосных базит-гипербазитовых интрузий Норильска, в которых совсем недавно также обнаружены включения кислых природных стекол [14]. Исследования режима летучих Довыренского массива [15] показали, что в его флюидной фазе восстановленные газы ( $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ ) резко преобладали над окисленными ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ). Но окончательный выбор предпочтительного варианта генезиса аномальных включений в оливине Довыренского массива может быть сделан только после дальнейшего их изучения прецизионными изотопно-геохимическими методами.

Авторы выражают искреннюю признательность А.В. Соболеву за консультативную помощь по идентификации расплавных включений.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (гранты 99-05-04013, 99-05-64632, 02-05-64219).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Криволицкая Н.А., Соболев А.В., Арискин А.А.* Петрография на рубеже XXI века: Итоги и перспективы. Сыктывкар: Геопринт, 2000. Т. 3. С. 56–57.
2. *Гурулев С.А.* Геология и условия формирования Йоко-Довыренского габбро-перидотитового массива. М.: Наука, 1965. 122 с.
3. *Миронов Ю.В., Ионов Д.А., Кривоплясов Г.С. и др.* // ДАН. 1980. Т. 250. № 5. С. 1228–1235.
4. *Конников Э.Г.* Дифференцированные гипербазит-базитовые комплексы докембрия Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1986. 217 с.
5. *Кислов Е.В.* Йоко-Довыренский расслоенный массив / Под ред. Э.Г. Конникова. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ, 1998. 264 с.
6. *Маегов В.И.* // ДАН. 1995. Т. 345. № 3. С. 367–371.
7. *Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. М.: Мир, 1965. Т. 2. 405 с.
8. *Мануйлова М.М., Зарубин В.В.* Вулканогенные породы докембрия Северного Прибайкалья. Л.: Наука, 1981. 88 с.
9. *Irvine T.N.* Carnegie Institute Annual Report of Director Geophysical Laboratory 1974–1975. Wash. (D. C.), 1975. P. 484–492.
10. *Rodder E., Weiblen P.W.* // Geophys. Res. Lett. 1977. V. 4. P. 485–488.
11. *Рябов В.В.* Ликвация в природных стеклах (на примере траппов). Новосибирск: Наука, 1989. 233 с.
12. *Шарыгин В.В., Сокол Э.В., Нигматулина Е.Н. и др.* // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 896–915.
13. *Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Польской С.Ф. и др.* Эксперимент в решении актуальных задач в геологии. М.: Наука, 1986. С. 48–69.
14. *Криволицкая Н.А., Соболев А.В.* // ДАН. 2001. Т. 381. № 3. С. 393–398.
15. *Konnikov E.G., Meurer W.P., Neruchev S.S. et al.* // Miner. deposita. 2000. V. 35. № 6. P. 526–532.