

## Экспериментальное изучение взаимодействия амфиболита с растворами NaCl при 800–900°C, 5–7 кбар

Л. И. Ходоревская

Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

[lilia@iem.ac.ru](mailto:lilia@iem.ac.ru), тел.: 8 (916)-651 2553

*Ключевые слова: амфибол, изоморфизм, растворы NaCl, расплав.*

**Ссылка:** Ходоревская, Л. И. (2011), Экспериментальное изучение взаимодействия амфиболита с растворами NaCl при 800–900°C, 5–7 кбар, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6097, doi:10.2205/2011NZ000227.

Инфильтрационный привнос щелочей, кремнезема и вынос оснований при процессах гранитизации приводит к последовательному преобразованию вмещающих пород. В метабазитах магматические плагиоклазы (лабрадоры и битовниты) – замещаются андезином, олигоклазом, калишпатом и кварцем. Темноцветные минералы – клино- и ортопироксены, гранаты – с нарастанием степени гранитизации полностью исчезают, замещаясь роговой обманкой и биотитом. Амфибол – единственный темноцветный минерал метабазитов, который отмечается во всем разрезе – от практически неизменных пород до теневых скиалитов амфиболитов в гранитоидах. Это связано с тем, что в амфиболе широко проявляется изо- и гетеровалентный изоморфизм, что приводит к его устойчивости при смене флюидного режима и при изменении Т–Р параметров. Полевые исследования показывают, что по мере нарастания процесса гранитизации метабазитов в амфиболах возрастает суммарное содержание щелочей, отношение K/Na, в минералах увеличивается  $X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + MgO)$ . Амфиболы с наиболее высоким  $X_{Fe}$  наблюдаются в тыловых зонах колонок гранитизации. Именно эти зоны представляют собой наиболее измененные (дебазифицированные и калишпатизированные) вмещающие породы. В этих же зонах отмечается самая высокая мольная доля хлоридов солей вплоть до значений  $X_{NaCl} = 0.3$  [Ходоревская, 2005], либо  $X_{NaCl} = 0.30–0.35$ ,  $X_{KCl} = 0.20–0.15$  [Кориковский и. Аранович, 2010]. В высокотемпературных (800–900°C) метасоматических жилах, представляющих собой области переотложения Ca, Mg, Fe, выносимых из зон фильтрации флюидов через метабазиты, также наблюдаются амфиболы с вариациями  $X_{Fe} = 0.5–0.7$  [Ходоревская и др., 2010]. Высокая железистость амфиболов не может возникать в результате воздействия высоких Т–Р параметров на породы. Экспериментальные исследования показали [Helz, 1973; Wolf and Wyllie, 1994; и др.], что при частичном плавлении метабазитов в интервале температур 750–900°C и давлений 5–10 кбар железистость амфиболов невысока ( $X_{Fe} \approx 0.2–0.5$ ). Поэтому образование высокожелезистых минералов, вероятно, может являться следствием взаимодействия минерала с высокосолеными флюидами. Для проверки подобного предположения были проведены эксперименты по взаимодействию амфиболитов с флюидной фазой, представленной H<sub>2</sub>O–NaCl при  $X_{NaCl}$ , меняющейся от 0 до 0.5. Результаты исследования представлены в данной работе.

### Техника и методика экспериментов

Опыты проводились при 800–900°C и давлении 5 кбар на установке высокого газового давления с внутренним нагревом по закалочной методике. Исходным материалом служил тонкоизмельченный амфиболит (Amph) из мафической дайки раннепротерозойского комплекса Становой раннедокембрийской области. Основные составляющие амфиболита представлены плагиоклазом (An<sub>46</sub>) – 25–30 мас. % и амфиболом  $\approx 70$  мас. %. Состав плагиоклаза: SiO<sub>2</sub> – 56.61, TiO<sub>2</sub> – 0.04, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 26.51, CaO – 9.46, Na<sub>2</sub>O – 6.40, K<sub>2</sub>O – 0.08, сумма – 99.10 масс. %. Состав амфибола: SiO<sub>2</sub> – 40.80, TiO<sub>2</sub> – 2.17, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11.47, FeO – 17.22, MnO – 0.19, MgO – 9.57, CaO – 11.25, Na<sub>2</sub>O – 2.62, K<sub>2</sub>O – 1.46, Cl – 0.80, H<sub>2</sub>O – потери при прокаливании -1.8, сумма – 99.35 масс. %.

Навеска исходной породы (обычно 25–40 мг) помещалась в ампулу, заливался раствор, соотношение навеска/ раствор = 1/10. Ампулы заваривались и выдерживались в режиме опытов в течение 7 суток, а потом закачивались со скоростью 100° в минуту. Все эксперименты проводились в золотых ампулах с тем, чтобы избежать потерь железа в стенки ампул. Фугитивность кислорода  $f_{O_2}$  не контролировалась, принималось, что в опытах  $f_{O_2}$  близка к буферу Ni–NiO [Helz, 1976]. После

## ХОДОРЕВСКАЯ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АМФИБОЛИТА С РАСТВОРАМИ NaCl

опытов ампулы скрывались, составы минеральных фаз, расплавов и закалочных стекол, отмеченных в амфиболите, изучались методом локального рентгеноспектрального микроанализа с применением растрового электронного микроскопа «CamScan MV 2300», оснащенного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром с полупроводниковым Si(Li) детектором с программным обеспечением «INCA Energy». Изображения поверхности исследуемых образцов получены с применением детектора вторичных электронов.

### Результаты экспериментов

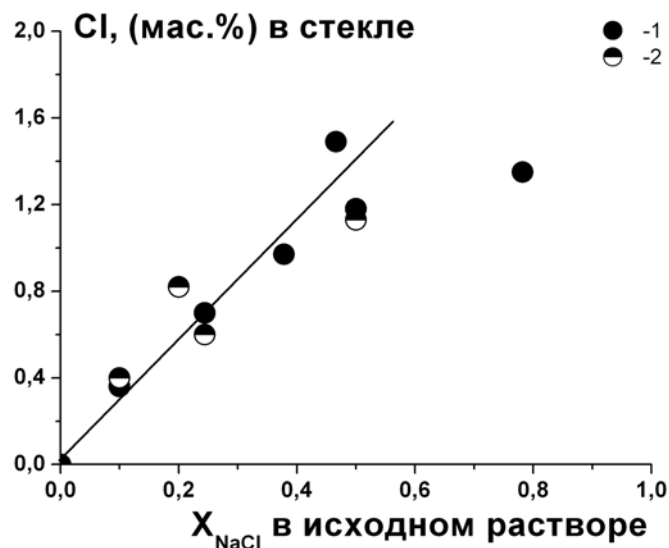
При 800–900°C, P=5 кбар взаимодействие амфиболита (Amph<sub>исх.</sub>) с H<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub>O–NaCl флюидами выражается как: Amph<sub>исх.</sub> + (H<sub>2</sub>O–NaCl) → Amf + Gl ± CPx ± Pl ± OFe + Fl.

Амфибол (Amf), основная минеральная фаза, сохраняется во всех опытах независимо от задаваемой концентрации NaCl в исходном флюиде. При 800°C помимо амфибола отмечался плагиоклаз несколько более основного состава, чем исходный (An<sub>46</sub> → An<sub>50-55</sub>). Редкие клинопироксены появлялись в результате взаимодействия амфиболита с чистой H<sub>2</sub>O и разбавленными (1–5 мас. % соли) растворами. Увеличение концентрации NaCl в исходном растворе приводит к расширению поля устойчивости амфибола, поэтому в высококонцентрированных растворах, рассолах и расплавах солей клинопироксен не образуется. Расплав (Gl), появляющийся при частичном плавлении амфиболита, образует цементирующую массу среди минералов, закалочная фаза (Fl), осаждаемая из раствора, легко определяется и анализируется, поскольку существует в виде шариков размером от 20 до 80–150 мкм.

В таблице приведены химические составы расплавов Gl и Fl (сумма оксидов – 100 мас.%), полученные при частичном плавлении амфиболита при 900°C, 5 кбар.

№ опыта	X <sub>NaCl</sub> во флюиде	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	Cl <sub>2</sub> O
C-14.	Без флюида	67.32	0.31	18.15	1.58	0.39	0.31	3.71	5.78	2.45	0.00
B-8	H <sub>2</sub> O	62.10	0.10	20.72	2.81	0.35	0.04	6.64	4.51	1.83	0.00
U-1, (Fl)	0.02	64.96	0.25	22.18	1.86	0.14	0.00	4.06	5.69	0.78	0.04
S-1, (Gl)	0.10	60.06	0.36	23.74	1.79	0.08	1.00	3.37	9.04	0.31	0.36
S-1, (Fl)	0.10	60.53	0.75	24.00	1.99	0.07	0.64	3.18	8.19	0.18	0.47
S-2, (Gl)	0.25	62.36	0.50	23.66	1.09	0.06	0.35	1.31	9.91	0.06	0.70
S-2, (Fl)	0.25	61.66	0.76	24.07	1.29	0.00	0.12	1.25	10.07	0.17	0.61
S-3, (Gl)	0.50	61.96	0.54	23.75	0.98	0.00	0.39	0.81	10.32	0.08	1.18
S-3, (Fl)	0.50	62.25	0.26	23.73	1.43	0.10	0.26	1.75	8.61	0.48	1.14

Из таблицы следует, что средний химический состав расплавов отвечает значениям: SiO<sub>2</sub> – 60–62 мас.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 23–25 %, Na<sub>2</sub>O – 8–11%, (CaO+MgO+FeO) < 10%. Расплавы кварц нормативные. По мере увеличения X<sub>NaCl</sub> во флюиде составы расплавов несколько обогащаются Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, обедняются CaO и K<sub>2</sub>O, остаются кварц нормативными. Нефелин нормативные расплавы образуются только при X<sub>NaCl</sub> > 0.5. Содержание хлора в расплаве возрастает от 0.4 до 1.5 мас.% с увеличением X<sub>NaCl</sub> во флюидной фазе от 0.1 до 0.47 (рис. 1).

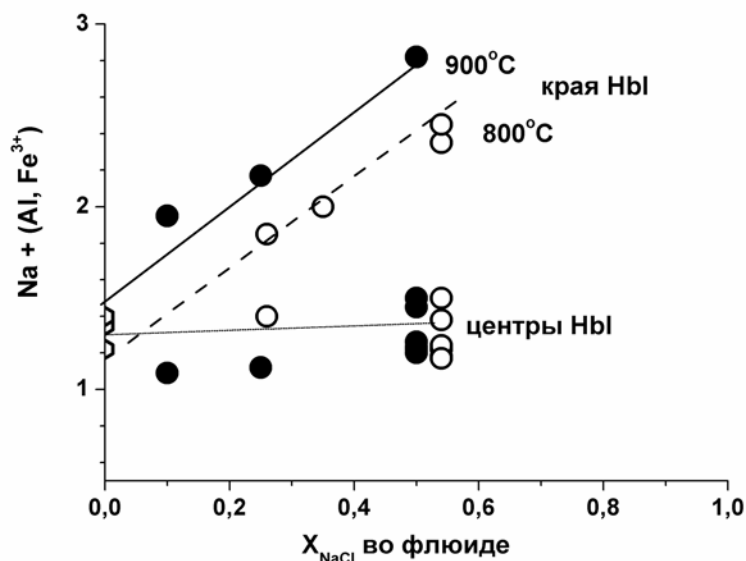


**Рис. 1.** Содержание Cl (мас.%) в зависимости от  $X_{\text{NaCl}}$  во флюиде: 1- в расплаве, полученном при частичном плавлении амфиболита; 2- в закалочных стеклах



**Рис. 2.** Амфиболы после опыта S-1. Центральная светлая – железистая часть минерала, краевая темная – магниальная

Исходный амфибол из амфиболита представлен паргаситом [Leake *et al.*, 1997]. После опытов амфиболы приобретают резкую неоднородность: иногда это зональные кристаллы, в которых от центра к краю зерен возрастает магниальность, т.е.,  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Mg}$ . В других случаях краевая магниальная часть амфиболов отщепляется от центральной, более железистой, дефрагментируется вплоть до очень мелких размеров (рис.2). Создается впечатление, что эти высокомагниальные ( $X_{\text{Fe}} = 0-0.1$ ) амфиболы постепенно растворяются. В опытах с высоким содержанием NaCl ( $X_{\text{NaCl}}=0.78$ ) амфиболов однородны, их состав от центра к краям зерен не меняется. Зональность амфиболов отмечалась в опытах с чистой  $\text{H}_2\text{O}$  и в растворах NaCl. Из реакции  $(\text{Mg,Fe})_{\text{Hb}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{Mg})_{\text{Hb}} + \text{Fe}(\text{Sol})$ , где  $\text{Fe}(\text{Sol})$  – комплексы Fe во флюиде, следует, что увеличение  $a_{\text{H}_2\text{O}}$  в растворах приводит к преимущественному выносу Fe относительно Mg из минерала. Быстрая закалка ампул приводила к тому, что выщелоченное из амфиболов  $\text{Fe}^{2+}$  оставалось во флюидной фазе. Увеличение времени закалывания ампулы приблизительно в два раза ( $50^\circ$  в минуту), способствовало кристаллизации из флюида железистых амфиболов (вплоть до  $X_{\text{Fe}}=0.9$ ).



**Рис. 3.** Соотношение  $X_{\text{NaCl}}$  во флюиде –  $(\text{Na} + \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+})$  в амфиболах. Черные и светлые кружки – указанные соотношения соответственно при 900 и 800°C

Другой широко распространенный тип изоморфного замещения в амфиболе  $\text{Ca} + (\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}) \rightarrow \text{Na} + (\text{Al}, \text{Fe}^{3+})$  (ф.ед.). На рис. 3 представлено соотношение сумм указанных катионов в центральных и краевых частях минерала при 800 и 900°C. Как следует из рис. 3, наблюдается прямая корреляция между содержанием NaCl во флюиде и содержанием  $\text{Na} + (\text{Al}, \text{Fe}^{3+})$  в краевых частях амфибола. Центральные части минерала сохраняют первоначальные значения указанных катионов вследствие относительной непродолжительности опытов. При 900°C значения  $(\text{Na} + (\text{Al}, \text{Fe}^{3+}))$  выше, чем при 800°C, что связано с более высоким выносом оснований  $\text{Ca} + (\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})$  из амфибола при более высоких температурах. Таким образом, результаты экспериментов показали:

1) При частичном плавлении амфиболитов с участием NaCl–H<sub>2</sub>O флюидов при 900°C, 5 кбар,  $X_{\text{NaCl}} < 0.5$  образуются кварц нормативные расплавы. Содержание хлора в таких расплавах возрастает от 0.4 до 1.5 мас.% с увеличением  $X_{\text{NaCl}}$  во флюидной фазе от 0.1 до 0.47.

2) При  $T = 800$  и  $900^\circ\text{C}$  во флюидах с высокой  $a_{\text{H}_2\text{O}}$  происходит преимущественный переход Fe относительно Mg из амфиболов в раствор. Это может быть вынос Fe из вмещающих пород и/или его переосаждение в виде Fe-содержащих минералов, в том числе и железистых амфиболов. С увеличением  $X_{\text{NaCl}}$  во флюидах вынос Fe из амфиболов (амфиболитов) сокращается.

3) Сумма катионов  $\text{Na} + (\text{Al}, \text{Fe}^{3+})$  (ф.ед.) в амфиболах прямо зависит от  $X_{\text{NaCl}}$  во флюидах, что, по предварительным данным позволяет проводить оценку  $X_{\text{NaCl}}$  во флюидной фазе по химическому составу амфибола.

*Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 09-05-00744*

### Литература

Кориковский, С. П., Л. Я. Аранович (2010), Чарнокитизация и эндербитизация основных гранулитов Лапландского гранулитового пояса (южная часть Кольского полуострова, район Порьей губы): I. Петрология и термобарометрия, *Петрология*, № 4, сс. 340–368.

Ходоревская, Л. И. (2005). Флюидный режим при гранитизации коронарных метагаббро в беломорском комплексе: реконструкция на основе ассоциаций с участием скаполита. *Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения*. Сс. 314–315.

Ходоревская, Л. И., А. М. Ковальский, В. Б. Поляков (2010), Метаморфизм и метасоматоз гранулитовой фации на примерах меланократовых жил в метаанортозитах Колвицкого массива, Кольский полуостров, *XI Всероссийское петрографическое совещание Магматизм и метаморфизм в истории Земли*. Екатеринбург, сс. 304–306.

Helz, R. T. (1973), Phase relations of basalts in their melting ranges at  $P = 5$  kb as a function of oxygen fugacity. Part I. Mafic phases. *J. Petrol.*, V. 14, pp. 249–302.

## ХОДОРЕВСКАЯ: ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АМФИБОЛИТА С РАСТВОРАМИ NaCl

Helz, R. T. (1976), Phase relations of basalts in their melting ranges at P = 5 kb. Part II. Melt compositions. *J. Petrol.*, V. 17, pp. 139–193.

Leake, B. E., A. R. Woolley, W. D. Birch, et al. (1997), Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Eur. J. Mineral.*, V. 9, pp. 623–651.

Wolf, M. B., P. J. Wyllie (1994), Dehydration-melting of amphibolite at 10 kb: the effect of temperature and time. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, V. 115, pp. 369–383.