

РЁНИТ В ЩЕЛОЧНЫХ БАЗАЛЬТАХ: ВКЛЮЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ФЕНОКРИСТАХ ОЛИВИНА

В.В. Шарыгин¹, К. Котай², Ч. Сабо², Т.Ю. Тимина¹, К. Тёрёк^{2,3}, Е. Вапник⁴, Д.В. Кузьмин^{1,5}

¹ *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

² *Lithosphere Fluid Research Lab, Department of Petrology and Geochemistry, Eötvös University, Pázmány Péter sétány 1/C, H-1117 Budapest, Hungary*

³ *Research Group for Environmental Physics and Geophysics of the Hungarian Academy of Sciences, Department of Geophysics, Eötvös University, Pázmány Péter sétány 1/C, H-1117 Budapest, Hungary*

⁴ *Department of Geological and Environmental Sciences, Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, 84105 Beer-Sheva, Israel*

⁵ *Geochemistry Division, Max Planck Institut für Chemie, Joh.-Joachim-Wed 27, 55128 Mainz, Germany*

Включения расплава, содержащие рёнит $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}\text{Ti}[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{20}]$, были изучены в фенокристах оливина щелочных базальтов из шести вулканических регионов мира: Удоканское плато, Северо-Минусинская впадина, хр. Цаган-Хуртей (Россия), Бакони-Балатон, Ноград-Гомор (Венгрия) и Махтеш Рамон (Израиль). В этих породах рёнитсодержащие включения расплава обычно сосуществуют с включениями без него, причем включения с рёнитом часто приурочены к центральным зонам фенокристов оливина. Согласно термобарогеохимическим данным, захват самых ранних включений с рёнитом происходил при $T > 1300^\circ\text{C}$ и $P > 3\text{—}5$ кбар. Этот минерал кристаллизовался в очень узком температурном интервале ($1180\text{—}1260^\circ\text{C}$) и $P < 0.5$ кбар. Петрографические и термометрические данные по рёнитсодержащим включениям указывают на следующую последовательность появления фаз: Al-шпинель \rightarrow рёнит \rightarrow клинопироксен \rightarrow апатит \rightarrow \pm амфибол, Fe-Ti-оксиды (ильменит или Ti-магнетит) \rightarrow стекло.

Большинство рёнитов, выявленных во включениях, характеризуются $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) > 0.5$ и, соответственно, относятся к магнезиальной разновидности $\text{Ca}_2\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+}\text{Ti}[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{20}]$. Обзор химических данных по рёниту из разных парагенезисов показывает, что нет существенной разницы между рёнитом из включений в оливине и минералом из базальтов (фенокрист, основная масса), из продуктов реакционного замещения, окаймляющих амфибол (керсутит) мегакристовой ассоциации, и из ксенолитов в щелочных базальтах. Микроструктурные особенности рёнита в целом объясняют редкость нахождения его в породах в качестве второстепенной или аксессуарной фазы. Этот минерал является промежуточным членом полисоматической серии шпинель—пироксен, при изменяющихся условиях кристаллизации он становится нестабильным, и вместо него образуются либо шпинель, либо клинопироксен, либо их ассоциация. В целом присутствие и химический состав рёнита могут быть использованы для грубой оценки температуры, давления и фугитивности кислорода при кристаллизации щелочных базальтов.

Рёнит, клинопироксен, шпинель, включения расплава, оливин, щелочные базальты.

RHÖNITE IN ALKALI BASALTS: SILICATE MELT INCLUSIONS IN OLIVINE PHENOCRYSTS

V.V. Sharygin, K. Kóthay, Cs. Szabó, T.Ju. Timina, K. Török, Ye. Vapnik, and D.V. Kuz'min

Silicate melt inclusions containing rhönite $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}\text{Ti}[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{20}]$ were studied in olivine phenocrysts from alkali basalts of six different volcanic regions: Udokan Plateau, North Minusa Depression, Tsagan-Khurtei Ridge (Russia), Bakony-Balaton Highland, Nógrád-Gömör Region (Hungary), and Makhtesh Ramon (Israel). Rhönite-bearing silicate melt inclusions are relatively common phenomena in alkali basalts and usually coexist with inclusions lacking rhönite. Inclusions with rhönite generally occur in the core of the olivine phenocrysts. According to heating experiments and CO_2 microthermometry, all the rhönite-bearing inclusions in core of the olivine phenocrysts were trapped as silicate melt at $T > 1300^\circ\text{C}$ and $P > 3\text{—}5$ kbar. Rhönite crystallized in a narrow temperature range ($1180\text{—}1260^\circ\text{C}$) and $P < 0.5$ kbar. The petrography and thermometry of rhönite-bearing silicate melt inclusions show a general crystallization sequence: Al-spinel \rightarrow rhönite \rightarrow clinopyroxene \rightarrow apatite \rightarrow \pm amphibole, Fe-Ti oxide (ilmenite or Ti-magnetite) \rightarrow glass.

The majority of rhönites from melt inclusions have $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) > 0.5$ and belong to Mg-rich species $\text{Ca}_2\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+}\text{Ti}[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{20}]$. There are no significant differences in chemistry among rhönites from olivine-hosted silicate melt inclusions from phenocryst, from groundmass of alkali basalts, and from alteration products of kaersutitic amphibole mega/xenocrysts and of kaersutite in deep-seated xenoliths in alkali basalts. The rare occurrence of rhönite as essential constituents in rocks may be explained from its microstructural peculiarities. This mineral is an intermediate member of the polysomatic spinel-pyroxene series. Possibly, the structural feature of rhönite does explain why it is an unstable mineral under changing crystallization conditions. In general, the presence and chemistry of rhönite can be used for the rough estimation of temperature, pressure, and oxygen fugacity during the crystallization of alkali basalts.

Rhönite, clinopyroxene, spinel, silicate melt inclusions, olivine phenocryst, alkali basalts

ВВЕДЕНИЕ

Рёнит, очень редкий Ti-содержащий алюмосиликат, относится к группе энigmatита. Его упрощенная формула — $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4\text{Fe}^{3+}\text{Ti}[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{20}]$ [Kunzmann, 1999]. Относительно часто этот минерал встречается в породах основного—среднего состава (щелочные базальты, фонолиты, тефриты, нефелиновые сиениты), в которых он может ассоциировать с оливином, плагиоклазом, клинопироксеном, фельшпатоидами и шпинелью [Olsson, 1983; Johnston, Stout, 1985; Seghedi et al., 1995; Kogarko et al., 2005; Grapes, Keller, 2010; и др.].

Первые детальные описания для рёнита были сделаны в начале XX в.: нефелиновые базальты, Шарнрхаузен, Рён, Германия [Soellner, 1907], и Пай де Сент Сандо, Аверон, Франция [Lacroix, 1909]. С тех пор рёнит был обнаружен во многих географических районах мира и в различных геологических обстановках, но более часто он встречается в щелочных базальтах как минерал основной массы и как продукт реакционного замещения амфибола (мега/ксенокристи, глубинные ультраосновные и основные ксенолиты). Обобщенные данные по происхождению и проявлениям рёнита приведены в табл. 1. В последнее время все более частыми стали находки этого минерала в качестве дочерней фазы расплавных включений в фенокристаллах оливина щелочных и субщелочных базальтов и их кумулятивных ксенолитах [Ananiev, Okrugin; 1991; Кузьмин и др., 1999; Головин и др., 2000; Kóthay et al., 2003, 2005; Jannot et al., 2005; Тимина и др., 2006; Zajacz et al., 2007; Головин, Шарыгин, 2007; Vapnik et al., 2007], причем породообразующий или акцессорный рёнит обычно отсутствует в этих породах. Настоящая работа представляет собой обобщение всех данных по рёниту (включая новые результаты) из расплавных включений в фенокристаллах оливина из щелочных базальтов шести вулканических регионов мира, а именно России, Венгрии и Израиля.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фенокристы оливина, содержащие расплавные, флюидные и кристаллические включения, тщательно отбирались как из двуполированных шлифов пород, так из дробленых фракций пород. Экспериментальные исследования индивидуальных включений расплава проводились в Институте геологии и минералогии (ИГМ) СО РАН с использованием высокотемпературной (до 1600°C) камеры конструкции Соболева и Слуцкого [Соболев, Слуцкий, 1984] с инертной аргоновой средой и визуальным наблюдением. Данный метод позволил оценить температуры гомогенизации включений расплава и интервалы плавления конкретных дочерних фаз (Al-шпинель, рёнит, клинопироксен). Кроме того, в ИГМ СО РАН проводились эксперименты без визуального контроля с использованием термокамеры конструкции Петрушина и др. [Петрушин и др., 2003]. Для этой цели чистые (без фрагментов основной массы) зерна оливина (30—100 штук) с включениями расплава помещались в алундовую капсулу с графитовой крышкой и прогревались в среде аргона до температуры, которая задавалась исходя из результатов экспериментов с визуальным контролем. После 20—30-минутной выдержки при выбранной температуре зерна подвергались резкому охлаждению. Криометрические исследования газовой фазы расплавных включений и сосуществующих флюидных включений проводились на криокамере FLUID INC-USGS в лаборатории литосферных флюидов, Университет Этвеша, Будапешт, Венгрия, и в ИГМ СО РАН.

Химический состав породообразующих минералов и включений расплава был в основном проанализирован на микрозонде Camebax-Micro 50X в ИГМ СО РАН. Параметры съемки: $V = 20$ кВ, $I = 15$ — 30 нА, размер микрозондового пучка 2—3 мкм, время анализа для каждого элемента 10 с. Ошибка в определении главных элементов составляла менее 1—2 отн. %. Часть анализов была выполнена на сканирующем электронном микроскопе AMRAY 1830 I/T6 type ($V = 15$ кВ, $I = 1$ — 2 нА, размер пучка 2—7 мкм, время анализа 100 с) в Университете Этвеша, Венгрия. Во всех случаях в качестве стандартов использовались природные минералы и синтетические соединения, наиболее близкие по составу к определяемой фазе.

ЩЕЛОЧНЫЕ БАЗАЛЬТЫ ИЗУЧЕННЫХ РЕГИОНОВ

Рёнит был обнаружен в фенокристаллах оливина щелочных базальтов из шести вулканических полей России, Венгрии и Израиля. Эти вулканические регионы имеют разный возраст и несколько отличаются по геодинамическим обстановкам (табл. 2).

Вулканическое поле Удоканского плато (UPVF) расположено в северо-восточной части Байкальской рифтовой системы (Забайкалье, Россия) и относится к позднекайнозойскому этапу магматической активности [Ступак, 1987; Рассказов и др., 1997, 2000]. Вулканическое поле хр. Цаган-Хуртей (TKRVF) располагается в центральной части Монголо-Забайкальской провинции щелочных гранитов и бимодальных базальт-комендитовых вулканических серий (Забайкалье, Россия). Его формирование связано с позднеэоценовым этапом рифтообразования в этой провинции [Литвиновский и др., 2001]. Вулканическое поле Северо-Минусинской впадины (NMDVF) расположено в северо-западной части Сибирского крато-

Таблица 1.

Сводные данные по генезису и проявлениям рёнита

Ассоциация	Генезис	Проявление, регион	Литература	
Миаскитовые щелочные и субщелочные породы основного—среднего состава (щелочные базальты, фонолиты, тефриты и др.)	Фенокрист, микрофенокрист или минерал основной массы	Германия	[Soellner, 1907; Ficke, 1961; Rondorf, 1989; Kunzmann, 1989; Bonaccorsi et al., 1990; Grapes, Keller, 2010]	
		Центр. Франция	[Lacroix, 1909; Grünhagen, Seck, 1972; Velde, 1971; Magonthier, Velde, 1976]	
		Сахалин, Россия	[Yagi, 1953]	
		Гренландия	[Brooks et al., 1979; Jones, 1984]	
		Тринидад	[Fodor, Hanan, 2000]	
		Техас, США	[Cameron et al., 1970]	
		Вост. Австрия	[Heritsch, 1986; 1987; Heritsch, Ettinger, 1998]	
		Гавайи, США	[Johnston, Stout, 1985]	
		Юж. Швеция	[Olsson, 1983]	
		Плюм Исландии	[Prestvik et al., 1999]	
		Зап. Румыния	[Downes et al., 1995; Seghedi et al., 1995]	
		Венгрия	[Nédli, Tóth, 2003]	
		Польша	[Ladenberger et al., 2006]	
		Антарктида	[Kyle, Price, 1975; Wysoczanski, 1993]	
		Кабо Верде	[Kogarko et al., 2005; De Ignacio et al., 2010]	
		Камерун	[Nono et al., 1994]	
		Дочерняя фаза включений расплава в оливине	Камчатка, Россия	[Ananiev, Okrugin, 1991]
			Хакасия, Забайкалье, Россия	[Литасов, 1992; Кузьмин и др., 1999; Головин и др., 2000; Тимина и др., 2006]
			Венгрия	[Kóthay et al., 2003; 2005; 2007; Zajacz et al., 2007]
Юж. Израиль	[Vapnik et al., 2007]			
Макро/ксенокристы амфибола (керсутит) в базальтах	Продукт полного или частичного замещения керсутита	Япония	[Tomita, 1934; Monkawa et al., 2003]	
		Новая Зеландия	[Kyle, Price, 1975]	
		Центр. Франция	[Babkine et al., 1964; Magonthier, Velde, 1976]	
		Армения	[Гущин и др., 1991]	
		Камерун	[Nono et al., 1994]	
		Испания	[Gil-Crespo et al., 2010]	
		Италия	[Alletti et al., 2005; Lopez et al., 2006]	
Амфиболсодержащие и безамфиболовые глубинные ксенолиты в базальтах	Интерстиционная фаза или продукт замещения керсутита	Центр. Франция	[Babkine et al., 1964]	
		Айфель, Германия	[Shaw, Klügel, 2002]	
		Антарктида	[Gamble, Kyle; 1987; Grapes et al., 2003]	
		Венгрия—Словакия	[Hurai et al., 2007; Zajacz et al., 2007]	
		Канада	[Canil, Scarfe, 1989]	
		Австралия	[Roach, 2004; Friedrich, 2004]	
		Хакасия, Забайкалье, Россия	[Головин и др., 2002; Головин, Шарыгин, 2007; данные авторов]	
Алмазы в кимберлитах	Фаза включений в алмазе	Южная Африка	[Копылова и др., 1997]	
Метасоматические породы	Контакт базальт—кораллы	Остров Реюньон	[Havette et al., 1982]	
Пирометаморфические природные и техногенные породы (терриконы угольных шахт, места обжига древесного угля и др.)	Продукты высоко-Т обжига окаменелого дерева	Челябинский угольный бассейн, Россия	[Чесноков и др., 1994]	
	Фаза в базитовых пара-лавах		[Чесноков, 1997; Žáček et al., 2010]	
	Древесный уголь	Этна, Италия	[Clocchiatti, 1990]	
Синтетические продукты	Пирометаллургия		[Kronz et al., 1992; Piccardo et al., 2008]	
		Фаза тугоплавких включений в хондритах, лунные породы	Метеориты Алльенде, Ефремовка и др., лунные породы	[Floss et al., 2000; Funch, 1971; 1978; Mao, Bell, 1974; Simon et al., 1999; 2001; Warren et al., 2006; Treiman, 2008]
	Продукты экспериментов по плавлению базальтов, ксенолитов и метеоритов	—	[Boivin, 1980; Beckett et al., 1986; Kunzmann, 1989; Kunzmann et al., 1986; Litasov et al., 2000; Lofgren et al., 2006]	

Таблица 2. Расположение, возраст и минералогия изученных щелочных базальтов

Проявление	Порода	Возраст, млн л.	Фенокристы	Основная масса	Литература
Удоканское лавовое плато (UPVF), Забайкалье, Россия					
Влк. Правый Лурбун	Ол нефелинит	14	Ol + Cpx	Ol + Cpx + Mag + Ap + Ne + Lc + Phl + + Ilm + Cc + Kfs	[Литасов, 1992; Расказов и др., 1997, 2000]
Экструзия Ниж. Лурбун	»	14	»	»	
Поток Верх. Ингамакит	Базанит	2.5	Ol + Cpx + Pl	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Ilm + Kfs + + Ne + Lc	
Влк. Кислый Ключ	Гавайит	1.8	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Ilm + Kfs	
Хр. Цаган-Хуртей (TKRVF), Забайкалье, Россия					
Свита Цаган-Хунтей	Трахибазальт	212	Ol + Cpx + Pl	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Phl + + Ilm + Kfs	[Кузьмин и др., 1999; Литвиновский и др., 2001]
Северо-Минусинская впадина (NMDVF), Хакасия, Россия					
Тр. Белё	Базанит	79	Ol + Cpx + Pl	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Ilm + Kfs	[Брагин и др., 1999; Головин и др., 2000; Тимина и др., 2006]
Дайка Белё	»	79	»	»	
Тр. Тергеш	Гиалобазанит	77	Ol + Cpx	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Ilm + Gl	
Бакони-Балатон (BBHVF), Западная Венгрия					
Влк. Бадачони	Базанит	3.6	Ol + Cpx + Pl	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Phl + Ilm + + Kfs + Ne	[Balogh et al., 1986; Szabó et al., 1992; Embey-Isztin et al., 1993a,b; Kóthay et al., 2005, 2007]
Влк. Кабхеги	»	4.6	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Phl + Ilm + + Kfs + Sod + Anc	
Влк. Залахалап	»	2.9	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Ilm + Kfs + + Sod + Ne	
Влк. Хегиешты	Лс базанит	6	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Lc + Ilm + + Ne + Sod	
Ноград-Гомор (NGVF), Северная Венгрия — Южная Словакия					
Эрествени, Медвеш	Базанит	2.6	Ol + Cpx + Pl	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Kfs + Ne	[Balogh et al., 1986; Szabó et al., 1992; Embey-Isztin et al., 1993a,b; Kóthay et al., 2003]
Мадьярбана, Медвеш	»	2.6	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Phl + Ilm + + Kfs + Ne	
Тербелед (Тербелени)	»	2.6	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Phl + + Ilm + Kfs	
Печко	Гавайит	4.5	»	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Kfs	
Махтеш Рамон (MRVF), Южный Израиль					
Юж. Кварней Рамон	Базанит	110—125	Ol + Cpx + Pl	Ol + Cpx + Mag + Pl + Ap + Ne + Phl	[Lung, Steinitz, 1989; Eyal et al., 1996; Vapnik et al., 2007]
Влк. Арод	Баз. нефелинит	110—125	»	Ol + Cpx + Mag + Ap + Ne + Pl ± Phl ± ± Ilm + Anc	

Примечание. Ol — оливин; Cpx — клинопироксен; Pl — плагиоклаз; Mag — Ti-магнетит; Ap — апатит; Ilm — ильменит; Lc — лейцит; Ne — нефелин; Kfs — калишпат; Phl — флогопит; Cc — кальцит; Gl — стекло; Sod — содалит; Anc — анальцит; баз. — базанитовый.

на на стыке Салаирского сегмента и Алтае-Саянского складчатого пояса. Появление щелочных базальтов здесь связывается с кратковременным меловым этапом магматической активности, обусловленной рифтогенезом континентальной литосферы [Ащепков и др., 1995; Брагин и др., 1999]. Базальты поднятия Бакони-Балатон (BBHVF) локализируются в центре Паннонского бассейна (Зап. Венгрия), а вулканическое поле Ноград-Гомор располагается в северной части этого бассейна (Сев. Венгрия — Юж. Словакия). Развитие этих двух вулканических полей связывается с тектоническими процессами, сформировавшими неогеновый Паннонский бассейн [Szabó et al., 1992; Embey-Isztin et al., 1993a,b]. Базальты вулканического поля Махтеш Рамон (Южный Израиль) относятся к позднеюрскому-раннемеловому этапу дорифтового магматизма, который также был развит в Центральном Израиле (поле Самария-Галилея), Иордании, Ливане и Сирии [Garfunkel, 1991; Vapnik et al., 2007].

Предполагается, что исходные магмы пород щелочных базальтов изученных вулканических полей связаны с мантийным источником, по геохимическим характеристикам, близким к ОИВ. Состав изученных пород варьирует от оливиновых меланефелинитов до базанитов, гавайитов и трахибазальтов. Общее количество фенокристов (оливин \pm клинопироксен \pm плагиоклаз) обычно не превышает 15 об. %. Оливин (Fo_{87-63}) является главным фенокристом, тогда как клинопироксен и анортит находятся в подчиненных количествах. Основная масса состоит из оливина ($Fo_{<70-60}$), Ti-Al-клинопироксена, Ti-магнетита, плагиоклаза и/или фельшпатоида (нефелин, лейцит), апатита и иногда содержит флогопит, стекло, ильменит (см. табл. 2). Все изученные породы не содержат рёнит в виде фенокристов, микрофенокристов или фазы основной массы. Однако этот минерал все же иногда присутствует в этих породах, но только лишь в ассоциациях ксеногенного материала, захваченного магмой в процессе подъема на поверхность. В частности, он встречается в реакционных ассоциациях, которые частично или полностью замещают мега/ксенокристи керсутита (паргасита), а также как интерстиционная фаза в ультраосновных—основных ксенолитах [Головин и др., 2002; Головин, Шарыгин, 2007; Zajacz et al., 2007].

СОСУЩЕСТВУЮЩИЕ РЁНИТСОДЕРЖАЩИЕ РАСПЛАВНЫЕ И ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ФЕНОКРИСТАХ ОЛИВИНА

Рёнитсодержащие включения расплава обычно приурочены к центральным зонам фенокристов оливина. Иногда в пределах одного зерна присутствуют как включения с рёнитом, так и без него. Однако включения без рёнита обычно располагаются в краевых зонах оливина. Все включения расплава (как с рёнитом, так и без него) являются первичными по происхождению. Это либо одиночные включения, либо группы включений, которые иногда декорируют зоны роста минерала-хозяина. Форма включений: овальная, округлая, реже с негативной огранкой, размеры до 200 мкм (рис. 1—2). В качестве дочерних фаз во включениях расплава присутствуют рёнит, клинопироксен, Al-шпинель, Ti-магнетит, апатит, керсутит, реже — флогопит, ильменит, нефелин и полевые шпаты. Газовый пузырек обычно представлен CO_2 . В качестве ксеногенной фазы иногда присутствует Cr-шпинель. В некоторых случаях вокруг крупных (> 50 мкм) включений расплава выявляется гало из мелких (1—5 мкм) расплавных и флюидных включений, что подразумевает частичную разгерметизацию после их захвата (см. рис. 1—2). Включения расплава иногда сосуществуют с флюидными CO_2 -включениями, сульфидными включениями и одиночными кристаллитами Cr-шпинели. Некоторые включения иногда содержат глобулы сульфидов, которые образовались в результате отделения сульфидного расплава от силикатного расплава при высоких температурах (см. рис. 1—2). Однако временной и температурный интервал отделения сульфидного расплава не всегда однозначен. В случае сосуществования включений расплава с сульфидной глобулой и сульфидными включениями в пределах одного фенокриста оливина предполагается, что разделение исходного расплава на силикатную и сульфидную составляющие происходило до образования оливина и, соответственно, до захвата включения расплава минералом-хозяином, а сульфидная капля является ксеногенной фазой. В случае, когда индивидуальные сульфидные включения отсутствуют, возможен также вариант, когда сульфидный расплав отделялся от силикатной жидкости уже после захвата включения, и сульфидная капля является дочерней фазой.

Северо-Минусинская впадина (NMDVF), Хакасия, Россия.

Белё. Включения расплава с рёнитом очень редко встречаются в оливине базанита тр. Белё [Головин и др., 2000]. Помимо рёнита они содержат клинопироксен и апатит. Такие же включения были обнаружены в оливине базанитов дайки Белё (в 0.5 км на юг от главного тела). Их фазовый состав: стекло + рёнит + клинопироксен + сульфидная глобула + газовый пузырек \pm Al-шпинель (см. рис. 1). Петрография включений показывает, что рёнит является второй кристаллизующейся фазой после Al-шпинели. Флюидный пузырек в расплавных включениях гетерогенен при комнатной температуре и представлен практически чистой CO_2 . Гомогенизация в нем происходит в жидкость при температуре выше 20°C, что соответствует плотности 0.75 г/см³ при расчете на чистую CO_2 .

Тергеш. Многочисленные включения расплава были обнаружены в оливине гиалобазанита тр. Тергешская [Тимина и др., 2006]. Они иногда декорируют зоны роста минерала-хозяина и ассоциируют с кристаллитами Cr-шпинели и флюидными CO_2 включениями. Их фазовый состав: стекло + газовый пузырек \pm дочерние кристаллы \pm сульфидная глобула \pm ксеногенная Cr-шпинель. В некоторых включениях стекло тонкораскристаллизовано. Рёнит и клинопироксен являются основными дочерними фазами, тогда как апатит, ильменит и Ti-магнетит встречаются очень редко (см. рис. 1). Взаимоотношения между минералами в пределах включений свидетельствуют о том, что рёнит самая ранняя дочерняя фаза. Одиночные флюидные включения, сосуществующие с расплавными, содержат CO_2 с небольшой примесью других газов. Тройная точка соответствует температуре от -57.0 до -58.0°C, гомогенизация в жидкость происходит при +24°C, плотность — 0.7 г/см³.

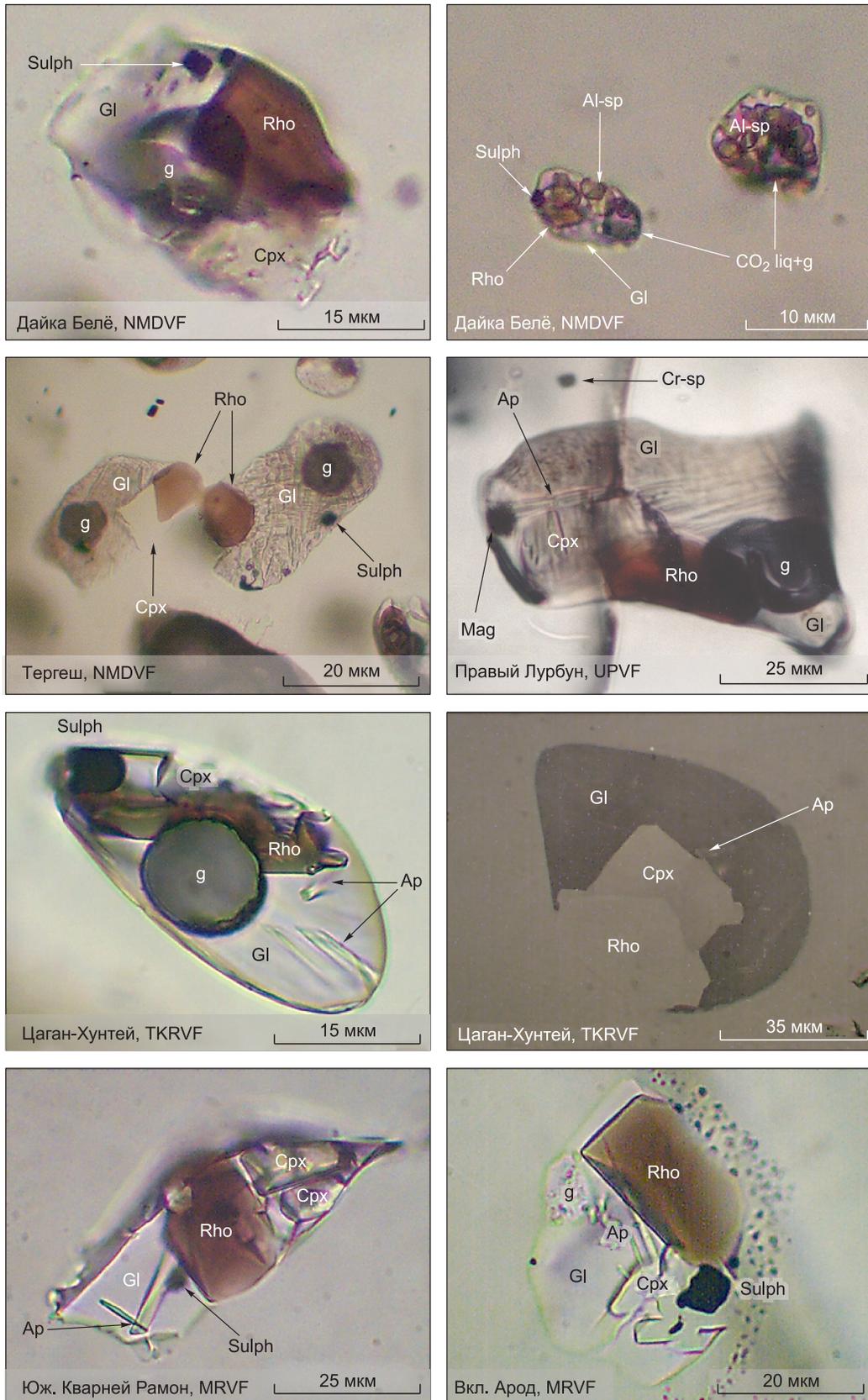


Рис. 1. Первичные включения расплава с рёнитом в фенокристах оливина щелочных базальтов (NMDVF, UPVF, TKRVF и MRVF).

Проходящий и отраженный свет. Символы и анализы приведены в табл. 2—4.

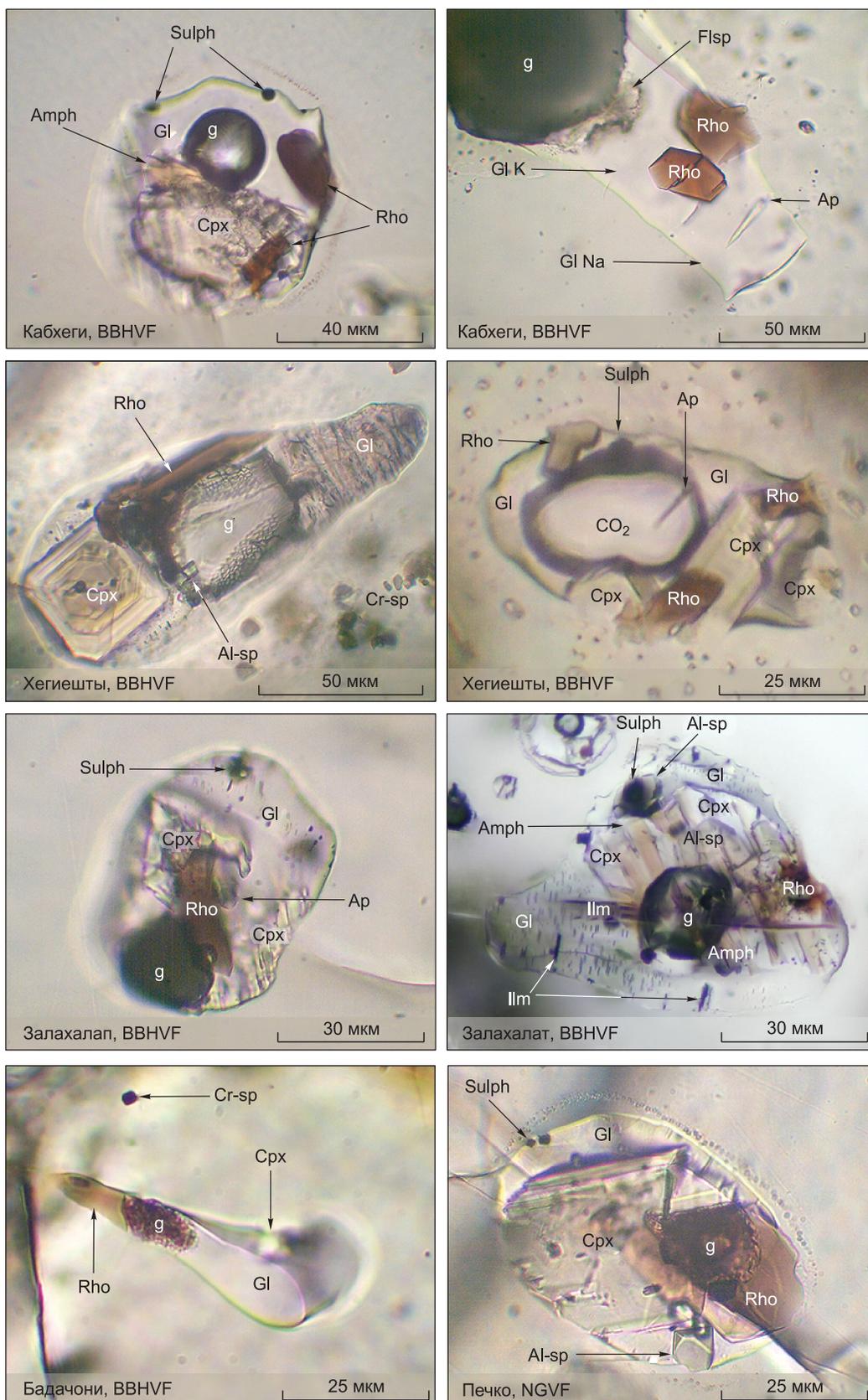


Рис. 2. Первичные включения расплава с рёнитом в фенокристах оливина щелочных базальтов (BBHVF и NGVF), проходящий свет.

Вокруг некоторых крупных включений существует гало очень мелких расплавных и флюидных включений, что свидетельствует о частичной разгерметизации после их захвата. Анализы приведены в табл. 5.

Удоканское лавовое плато (UPVF), Забайкалье, Россия.

Включения расплава с рёнитом иногда встречаются в оливине оливиновых меланефелинитов (влк. Правый Лурбун, экструзия Нижний Лурбун), базанитовых лавовых потоков (Верхний Ингамакит) и гавайитов (влк. Кислый Ключ). В оливиновых меланефелинитах включения расплава иногда сосуществуют с флюидными CO_2 включениями и индивидуальными кристаллитами Ст-шпинели. Их фазовый состав: стекло + газовый пузырек + дочерние минералы. Рёнит, Ti-Al-клинопироксен и апатит являются обычными дочерними фазами (см. рис. 1), тогда как Ti-магнетит, Ba-Ti-флогопит, нефелин и лейцит встречаются редко, и более характерны для основной массы. Петрография включений расплава свидетельствуют о том, что рёнит самая ранняя дочерняя фаза. В составе флюидной фазы расплавных включений, а также одиночных флюидных включений преобладает CO_2 . Тройная точка отвечает температуре от -56.6 до -58.0°C . Гомогенизация в жидкость происходит при $+21 \dots +22^\circ\text{C}$, что соответствует плотности 0.75 г/см^3 .

Бакони-Балатон (BBHVF), Западная Венгрия.

Включения расплава с рёнитом были обнаружены в фенокристах оливина базанитов и трахибазальтов из нескольких вулканов центральной части Паннонского бассейна. Следует отметить, что первые петрографические и термометрические данные для включений расплава этого региона были получены В.С. Соболевым с соавторами [Соболев и др., 1967].

Кабхеги. Рёнит является самой распространенной дочерней фазой наиболее крупных включений в ядрах фенокристов оливина [Kóthay et al., 2007]. Фазовый состав таких включений: стекло + рёнит + клинопироксен + амфибол + апатит + газовый пузырек + сульфидная глобула \pm K-Na полевой шпат \pm Al-шпинель (см. рис. 2). Ксеногенная Ст-шпинель встречается редко. Взаимоотношения фаз во включениях подразумевают следующий порядок образования: Al-шпинель \rightarrow рёнит \rightarrow клинопироксен \rightarrow апатит \rightarrow амфибол \rightarrow K-Na полевой шпат \rightarrow стекло. К сожалению, микротермометрия флюидных CO_2 включений и газовой фазы в расплавных включениях не проводилась.

Залахалат. Рёнит чрезвычайно редко встречается во включениях расплава в оливине этих щелочных базальтов. Включения также содержат стекло, сульфидную глобулу, клинопироксен, Al-шпинель, апатит, ильменит, амфибол и газовый пузырек (см. рис. 2) [Kóthay et al., 2007]. Рёнит является одной из самых ранних дочерних фаз во включениях. Следует отметить, что включения без рёнита более обычные и содержат стекло + Al-шпинель + клинопироксен + ильменит + сульфидная глобула + газовый пузырек. Согласно микротермометрическим и рамановским данным, газовый пузырек включений расплава содержит преимущественно CO_2 и небольшое количество CO и CH_4 [Kóthay et al., 2007].

Бадачони. В расплавных включениях из щелочных базальтов этого вулкана рёнит встречается очень редко. Фазовый состав таких включений — стекло + рёнит + клинопироксен \pm сульфидная глобула \pm Ti-магнетит + газовый пузырек (см. рис. 2). Рёнит также является самой ранней фазой. Включения без рёнита содержат дочерние клинопироксен, апатит, ильменит, лейцит и флогопит. Очень часто ксеногенная Ст-шпинель «прилепляется» к таким включениям.

Хегиеиты. Фенокристы оливина щелочных базальтов этого вулкана содержат первичные включения расплава, флюидные CO_2 -включения, индивидуальные кристаллиты Ст-шпинели и сульфидные глобулы [Kóthay et al., 2003, 2005]. Обычно все эти включения декорируют ядерные зоны роста минерала-хозяина. Модальный состав включений расплава — стекло + газовый пузырек + силикатные дочерние фазы \pm сульфидная глобула \pm ксеногенная Ст-шпинель. Клинопироксен и рёнит являются главными дочерними минералами. Некоторые включения содержат также апатит, ильменит, Al-шпинель, K-Na-полевой шпат и нефелин. Иногда вокруг самых крупных ($> 50 \text{ мкм}$) включений расплава наблюдается гало из мелких ($1\text{—}5 \text{ мкм}$) расплавных и флюидных включений, что подразумевает частичную разгерметизацию после захвата (см. рис. 2). Порядок образования фаз во включениях расплава следующий: Al-шпинель \rightarrow рёнит \rightarrow клинопироксен \rightarrow апатит \rightarrow (ильменит, K-Na-полевой шпат, нефелин) \rightarrow стекло.

Криометрические исследования газовых пузырьков включений расплава показали, что флюид имеет низкую плотность (CO_2 + другие газы). Его тройная точка от -56.8 до -60.9°C . Однако присутствие гало вокруг крупных включений (см. рис. 2) подразумевает частичную разгерметизацию после захвата и, соответственно, исходная плотность флюида была относительно высокой. Сосуществующие с расплавными флюидные включения имеют гетерогенный состав при комнатной температуре (жидкость + газ) и гомогенизируются в жидкость при $+25^\circ\text{C}$ (тройная точка -57.8°C). Рассчитанная плотность составляет 0.7 г/см^3 . Согласно рамановским данным, флюид во включениях расплава представлен низкоплотной CO_2 с небольшим количеством CO и CH_4 [Kóthay et al., 2007].

Ноград-Гомор (NGVF), Северная Венгрия — Южная Словакия.

Включения расплава с рёнитом были обнаружены в оливине щелочных базальтов с нескольких проявлений этого поля. Однако только гавайиты Печко достаточно хорошо изучены в отношении расплавных включений [Kóthay et al., 2003]. Следует отметить интересный факт, что ранее рёнит был выявлен во включениях в оливине кумулятивных ксенолитов (оливин + клинопироксен + шпинель \pm амфи-

бол) в базанитах Наги-Салго [Zajacz et al., 2007], в шпинели и оливине шпинелевых лерцолитов из базанитов Тербелед [Hurai et al., 2007].

Печко. Включения с рёнитом достаточно часто встречаются в фенокристах оливина. Эти включения обычно значительно крупнее по размерам, чем включения без рёнита. Их фазовый состав — стекло + Al-шпинель + рёнит + клинопироксен ± Ti-амфибол ± сульфидная глобула + газовый пузырек ± ксеногенная Cr-шпинель. В некоторых включениях газовый пузырек иногда содержит карбонат. Взаимоотношения фаз показывают, что рёнит кристаллизовался после Al-шпинели. Помимо включений расплава в зернах оливина присутствуют кристаллиты Cr-шпинели, округлые зерна Cr-диопсида и сульфидные глобулы. Иногда вокруг самых крупных включений с рёнитом наблюдается гало из мелких (< 1 мкм) расплавных и флюидных включений (см. рис. 2).

Медвеш плато и другие проявления. Во включениях в оливине рёнит был обнаружен в породах Эрествени, Мадьярбана и Тербелед. Обычно он сосуществует с клинопироксеном, апатитом и сульфидной глобулой, иногда с флогопитом.

Хребет Цаган-Хуртей (TKRVF), Забайкалье, Россия.

Рёнит был ранее описан в некоторых включениях в оливине трахибазальтов этого региона [Кузьмин и др., 1999], однако дальнейшие исследования показали, что он — обычная фаза включений. Фазовый состав включений — стекло + рёнит + клинопироксен + апатит + сульфидная глобула + газовый пузырек ± ксеногенная Cr-шпинель (см. рис. 1). Al-шпинель, амфибол и K-Na-полевой шпат очень редко встречаются как дочерние фазы. Согласно рамановским данным, флюидное обособление в расплавных включениях представлено низкоплотной CO₂. В некоторых включениях стекло тонкодевитрифицировано или подверглось вторичным изменениям, а газовый пузырек иногда заполнен поздними карбонатами. Включения расплава сосуществуют с кристаллитами Cr-шпинели, сульфидными глобулами и очень редко с флюидными CO₂ включениями. Последние гетерогенны при комнатной температуре (жидкость + газ), их гомогенизация происходит в газовую фазу при +26°C (тройная точка –56.8°C, плотность < 0.1 г/см³).

Махтеш Рамон (MRVF), Южный Израиль.

Расплавные включения с рёнитом были обнаружены в фенокристах оливина базанитов Юж. Кварней Рамон [Varnik et al., 2007]. Их обычный фазовый состав — стекло + рёнит + клинопироксен + сульфидная глобула + газовый пузырек ± апатит ± Cr-шпинель (см. рис. 1). Рёнит является ранней дочерней фазой. Следует отметить, что включения без рёнита могут содержать ильменит. Включения расплава сосуществуют с одиночными кристаллитами Cr-шпинели и реже с поликристаллическими включениями (Cr-шпинель + рёнит или Cr-шпинель + Cr-клинопироксен + Cr-ильменит). Криометрические исследования флюидного обособления расплавных включений выявили углекислотный состав (тройная точка –57.2 °C, гомогенизация в жидкость при –5°C). Редкие включения с рёнитом были обнаружены также в кумулатных ксенолитах (оливин + клинопироксен + шпинель) в базанитовых нефелинитах влк. Арод. Такие включения содержат также клинопироксен, сульфидную глобулу и апатит (см. рис. 1).

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ РАСПЛАВА В ОЛИВИНЕ

Более 50 первичных рёнитсодержащих включений расплава в оливине из щелочных базальтов изученных регионов было использовано для термометрии с целью выявления температур гомогенизации и последовательности кристаллизации фаз. К сожалению, в некоторых случаях не удалось получить данные по полной гомогенизации (полное исчезновение газового пузырька в расплаве) из-за присутствия гало вокруг включений (см. рис. 1—2) и частичной их разгерметизации в процессе нагрева. Однако удалось установить интервалы плавления дочерних фаз (табл. 3). Все термометрические данные подтверждают петрографические наблюдения для включений расплава. Рёнит является одной из самых ранних дочерних фаз с интервалом плавления 1180—1265°C. С повышением температуры он плавился позже ильменита (или Ti-магнетита), апатита (> 1100°C) и клинопироксена (1130—1240°C) и раньше Al-шпинели (1255—1320°C). Следует отметить, что подобные интервалы плавления для других фаз характерны и для включений, не содержащих рёнит. Давление захвата включений расплава, оцененное по сингенетичным флюидным CO₂ включениям, составляет 3—5 кбар (см. табл. 3).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РЁНИТСОДЕРЖАЩИХ ВКЛЮЧЕНИЙ РАСПЛАВА

Стекла и дочерние фазы включений расплава с рёнитом были проанализированы на микрозонде. Представительные анализы приведены в табл. 4 и 5. Следует отметить, что большинство дочерних минералов (клинопироксен, амфибол, магнетит, ильменит) во включениях с рёнитом обогащено Ti. Каких-либо значимых различий по химизму фаз во включениях с рёнитом и без него выявить не удалось.

Рёнит. Состав рёнита достаточно сильно варьирует по главным компонентам, даже во включениях из одной породы (мас. %): SiO₂ — 21.4—29.4; TiO₂ — 8.1—12.4; Cr₂O₃ — до 3.8; Al₂O₃ — 13.2—22.5; FeO_{общ.} — 12.5—25.0; MgO — 10.1—17.3; CaO — 9.9—12.7; Na₂O — 0.6—2.0. Этот минерал сильно

Таблица 3. **Обобщенные данные по термометрии рёнитсодержащих включений расплава в оливине некоторых щелочных базальтов**

Проявление	Регион	Порода	Фазовый состав включений	T плав. фаз, °C			T _{гом} , °C	P, кбар расчет.	Литература
				Cpx	Rho	Al-sp			
Камчатка	ДВ Россия	Высоко-Al базальт	Gl + Opx + Al-sp ± Rho + Cpx ± Amph + g	—	—	—	1250—1350	> 2—3	[Ananiev, Okrugin, 1991]
Ингамакит, Мундужак	UPLF	Ol нефелинит	Gl + Rho + Cpx + Ap + Mag ± Ne + g	1180—1200	> 1200	—	> 1250	> 4.5	[Литасов, 1992] автор. дан.
Свита Цаган-Хунтей	TKRVF	Трахибазальт	Gl ± Al-sp + Rho + Cpx Ap ± Mag ± Ilm + Kfs + g	—	—	—	1280—1320	> 0.8—1	[Кузьмин и др., 1999]
Белё	NMDVF	Базанит	Gl + Rho + Cpx + Ap ± Mag + g	—	—	—	> 1250	> 2	[Головин и др., 2000]
Тергеш	»	Гиалобазанит	Gl + Rho + Cpx + Ap ± Mag ± Ilm + Sulph + g	1130—1190	> 1200	—	1270—1310	> 3	[Тимина и др., 2006]
Хегиешты	BBHVF	Lc базанит	Gl ± Al-sp + Rho + Cpx + Ap ± Ne + Sulph + g	1190—1210	1220—1245	—	1270—1310	> 4	[Kóthay et al., 2005]
Кабхеги	»	Базанит	Gl + Al-sp + Rho + Cpx + Amph + Ap ± Ilm + Sulph + g	—	—	—	1280—1300	—	Авторские данные
Залахалап	»	»	Gl + Rho + Cpx ± Amph + Ap + Ilm + Sulph + Cc + g	—	—	—	1220—1270	—	[Kóthay et al., 2007]
Печко	NGVF	Гавайит	Gl + Al-sp + Rho + Cpx ± Amph + Ap ± Ilm + Sulph + g	1165—1235	> 1200	1255—1275	1300—1350	> 3	[Kóthay et al., 2003]
Наги-Салго	»	Ol-Cpx кумулат. ксенолит в базаните	Gl + Al-sp + Rho + Cpx + Amph ± Ap ± Sulph + g	1190—1240	1220—1265	1260—1320	< 1350	> 4	[Zajacz et al., 2007]
Юж. Кварней Рамон	MRVF	Базанит	Gl + Rho + Cpx + Ap ± Ilm + Sulph + g	1140—1180	1180—1230	—	1310—1355	7.0—7.2	[Vapnik et al., 2007]
Арод	»	Ol-Cpx кумулат. ксенолит в базаните	Gl + Rho + Cpx + Ap + Sulph + g	—	—	—	> 1250	7.0—7.2	»
Пай Бени	Франция	Щелочной базальт	Gl + Rho + Cpx + Pl + Sp + Sulph + g	1225—1245	—	—	1260	—	[Jannot et al., 2005]

Примечание. Rho — рёнит; g — газовый пузырек; Al-sp — Al-шпинель без Cr; Amph — Ti-керсутит/паргасит; Cc — кальцит, присутствующий в газовом пузырьке; Sulph — сульфидная глобула. Другие обозначения см. в табл. 2.

отличается от идеального состава $Ca_2(Mg,Fe^{2+})_4(Fe^{3+},Al)Ti[Al_3Si_3O_{20}]$ (рис. 3). Рёнит единственный член супергруппы сапфирина [Kunzmann, 1999; Grew et al., 2008], для которого характерны составы широких вариаций по $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe^{2+})$. Такие вариации, возможно, зависят от состава исходного силикатного расплава, захваченного оливином, и окислительно-восстановительных условий кристаллизации. Не выявлено и каких-либо корреляций между составом рёнита и других фаз в пределах индивидуальных включений. В последнее время на основании известных в природе составов в пределах подгруппы рёнита предлагается выделение следующих минеральных видов: $Ca_4(Mg_8Fe_2^{3+}Ti_2)O_4[Si_6Al_6O_{36}]$ — собственно рёнит; $Ca_4(Fe_{10}^{2+}Ti_2)O_4[Si_8Al_4O_{36}]$ — Fe^{2+} -аналог рёнита; $Ca_4(Mg_7AlTi_2^{3+}Ti_2^{4+})O_4[Si_5Al_7O_{36}]$ — Mg-Ti³⁺-аналог рёнита [Grew et al., 2008]. Большинство рёнитов, выявленных во включениях, характеризуются $X_{Mg} > 0.5$ и, соответственно, приближаются к составу $Ca_2Mg_4Fe^{3+}Ti[Si_3Al_3O_{20}]$ (рис. 4).

Клинопироксен и другие дочерние фазы. Клинопироксен также имеет широкие вариации состава. Он обогащен TiO₂ (2.0—6.0 мас. %) и Al₂O₃ (8.0—13.0 мас. %), содержит низкие концентрации SiO₂ (38.0—45.0 мас. %). Согласно классификации MMA, такие составы относятся к Fe-Al-обогащенным диоксидам или авгитам [Morimoto et al., 1988]. Ядра дочерних зональных клинопироксенов (см. рис. 2)

Таблица 4.

**Представительные анализы фаз из включений расплава с рёнитом
в оливинных щелочных базальтах (UPVF, TKRVF, NMDVF и MRVF)**

Состав включений	Фаза	n	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма	OI, Fo
ОI нефелинит, влк. Правый Лурбун, UPVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ap + Mag + g	Gl	2	55.19	0.87	0.00	23.75	0.84	0.01	0.10	0.91	6.07	11.38	0.23	0.23	99.58	76.9
	Rho	3	25.78	11.86	0.10	15.26	17.87	0.11	14.56	11.63	1.19	0.00	0.08	0.00	98.44	—
	Cpx	2	41.82	5.27	0.05	9.56	6.15	0.08	11.60	22.70	0.66	0.00	0.94	0.00	98.83	—
	Mag	1	—	17.16	10.13	16.80	43.72	0.53	6.70	—	—	—	—	—	95.04	—
ОI нефелинит, экструзия Нижний Лурбун, UPVF																
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	1	59.70	0.25	0.01	25.70	1.56	0.01	0.28	0.10	7.97	3.47	0.07	0.20	99.32	75.9
	Rho	1	24.31	12.20	3.30	16.63	15.00	0.10	15.00	10.60	1.65	0.00	0.00	—	98.79	—
Базанит, лавовый поток Верхний Ингамакит, UPVF																
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	1	55.64	0.97	0.01	26.34	1.24	—	0.43	2.60	6.57	2.27	1.00	—	97.07	85.4
	Rho	2	24.56	10.07	0.40	16.73	17.21	—	14.26	12.51	0.86	0.03	0.03	—	96.66	—
	Cpx	1	45.24	3.02	0.01	8.13	6.87	—	11.99	23.34	0.59	0.00	0.16	—	99.35	—
Гавайит, влк. Кислый Ключ (Поляков), UPVF																
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	1	65.50	0.17	—	22.90	0.54	—	0.06	1.74	2.43	4.13	0.87	0.12	98.46	70.7
	Rho	1	25.70	8.64	—	16.91	23.01	—	10.59	10.93	1.49	0.05	0.25	—	97.57	—
	Cpx	1	41.95	3.90	—	11.58	8.08	—	10.24	22.44	0.64	0.00	0.17	—	99.00	—
Трахибазальт, свита Цаган—Хунтей, TKRVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ap + Sulph + g	Gl	5	64.58	0.32	0.01	23.53	1.05	0.02	0.18	1.19	5.56	2.38	0.32	0.06	99.20	74.8
	Rho	1	27.03	8.46	0.01	17.24	22.34	0.18	12.27	11.04	1.34	0.00	0.00	—	99.91	—
	Cpx	1	44.44	1.99	0.00	10.63	8.81	0.15	10.60	21.82	0.68	0.00	0.81	—	99.92	—
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	4	62.17	0.65	0.01	23.79	1.05	0.01	0.28	1.85	6.55	2.34	0.49	0.06	99.24	78.0
	Rho	1	24.87	9.12	0.34	17.96	22.49	0.08	12.71	11.24	1.04	0.00	0.00	—	99.85	—
	Cpx	1	43.22	3.90	0.00	9.94	8.24	0.07	11.43	21.77	0.63	0.00	0.76	—	99.96	—
Gl + Al-sp + Rho + + Cpx + Ap + g	Gl	3	61.55	0.69	0.02	23.19	1.33	0.02	0.62	2.17	6.09	2.34	0.69	0.07	98.78	77.7
	Al-sp	1	0.00	0.31	0.02	63.23	19.63	0.15	16.31	0.00	0.00	0.00	0.00	—	99.65	—
	Rho	4	24.29	9.56	0.12	18.64	22.43	0.10	12.20	11.27	0.92	0.00	0.00	—	99.53	—
Cpx	1	43.88	3.73	0.00	10.65	7.74	0.09	11.87	21.15	0.66	0.00	0.00	—	99.77	—	
Базанит, тр. Белё, NMDVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ap + g	Gl	1	55.53	0.24	0.02	24.57	1.13	0.02	0.36	0.22	14.04	1.60	0.00	0.01	97.74	70.7
	Rho	1	26.45	11.21	0.32	15.26	21.61	0.18	10.27	11.59	1.20	0.00	0.00	0.00	98.09	—
Базанит, дайка Белё, NMDVF																
Gl + Rho + Cpx + + Sulph + g	Gl	1	57.04	0.24	0.00	26.97	0.98	0.00	0.35	0.78	6.78	4.81	1.12	0.25	99.31	79.6
	Rho	1	25.71	10.26	0.11	16.09	20.67	0.10	13.11	11.35	1.22	0.00	0.02	0.00	98.65	—
	Cpx	1	42.68	3.97	0.00	11.33	7.36	0.08	10.38	22.85	0.77	0.00	0.54	0.00	99.96	—
Гналобазанит, тр. Тергеш, NMDVF																
Gl + Rho + g	Gl	1	54.42	1.18	0.00	23.25	3.16	0.08	0.38	3.62	4.40	3.21	1.48	—	95.18	75.7
	Rho	1	26.27	11.38	0.02	15.70	19.58	0.12	13.99	11.36	1.28	0.00	0.00	—	99.70	—
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	1	52.79	1.68	0.00	22.99	3.90	0.07	0.17	3.46	5.26	5.35	1.29	—	96.95	76.7
	Rho	1	24.89	10.54	0.92	17.02	19.73	0.14	12.37	11.49	0.94	0.00	0.00	—	98.04	—
	Cpx	1	41.61	5.99	0.00	11.41	7.15	0.11	9.76	21.91	0.71	0.00	1.16	—	99.81	—
Базанит, Южный Кварней Рамон, MRVF																
Gl + Rho + Sulph + g	Gl	2	60.35	0.29	0.02	23.69	1.73	0.04	1.48	0.58	5.64	4.99	0.52	0.32	99.73	83.8
	Rho	2	23.77	11.44	1.64	19.48	12.64	0.10	17.32	10.02	2.25	0.00	0.00	—	98.65	—
Gl + Rho + Cpx + + Sulph + g	Gl	2	61.06	0.24	0.00	24.49	0.91	0.01	0.41	0.57	5.26	5.73	0.31	—	99.05	81.5
	Rho	1	27.38	10.72	0.49	17.59	14.51	0.11	14.73	12.45	1.21	0.00	0.00	—	99.19	—
	Cpx	1	43.60	4.40	0.02	10.60	5.85	0.06	11.97	21.93	0.75	0.00	0.61	—	99.79	—

Состав включений	Фаза	<i>n</i>	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма	Ol, Fo
Ol—Cpx кумулятивный ксенолит в базанитовом нефелините, влк. Арод, MRVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ap + Sulf + g	Gl	1	59.24	0.02	0.01	25.23	0.86	0.00	0.07	0.41	7.53	5.93	0.09	0.28	99.66	74.6
	Rho	1	26.90	8.76	0.04	19.82	18.31	0.10	12.62	11.23	1.37	0.00	0.00	0.00	99.15	—
	Cpx	1	43.90	0.10	0.00	17.43	6.42	0.09	8.88	21.78	1.12	0.00	0.19	0.00	99.91	—
Gl + Rho + Cpx + + Ap + Suph + g	Gl	2	60.07	0.07	0.00	25.29	0.70	0.01	0.13	0.58	5.62	4.19	0.15	0.41	97.21	74.6
	Rho	1	26.81	8.36	0.07	19.74	18.31	0.11	12.66	11.52	1.19	0.00	0.00	0.00	98.77	—
	Cpx	1	49.10	0.73	0.00	7.81	6.51	0.15	13.97	20.86	1.00	0.00	0.20	0.00	100.33	—

Примечание. Состав включений = фазовый состав включений; Ol, Fo = состав оливина, форстеритовый компонент, *n* — число анализов.

иногда содержат до 0.5 мас. % Cr₂O₃. В целом эволюция состава клинопироксена включений от центра к краю направлена в сторону повышения концентраций Al₂O₃ и TiO₂ и уменьшения SiO₂. Такой тип эволюции характерен как для клинопироксена фенокристовой ассоциации, так и для минерала основной массы вмещающих щелочных базальтов [Embey-Isztin et al., 1993a; Головин и др., 2000; Kóthay et al., 2005; Тимина и др., 2006; Vapnik et al., 2007].

Дочерняя Al-шпинель имеет низкие концентрации TiO₂ (0.3—0.7 мас. %), Cr₂O₃ (0.0—1.2 мас. %) и относится к серии FeAl₂O₄—MgAl₂O₄. В некоторых включениях она иногда обрастает ксеногенную

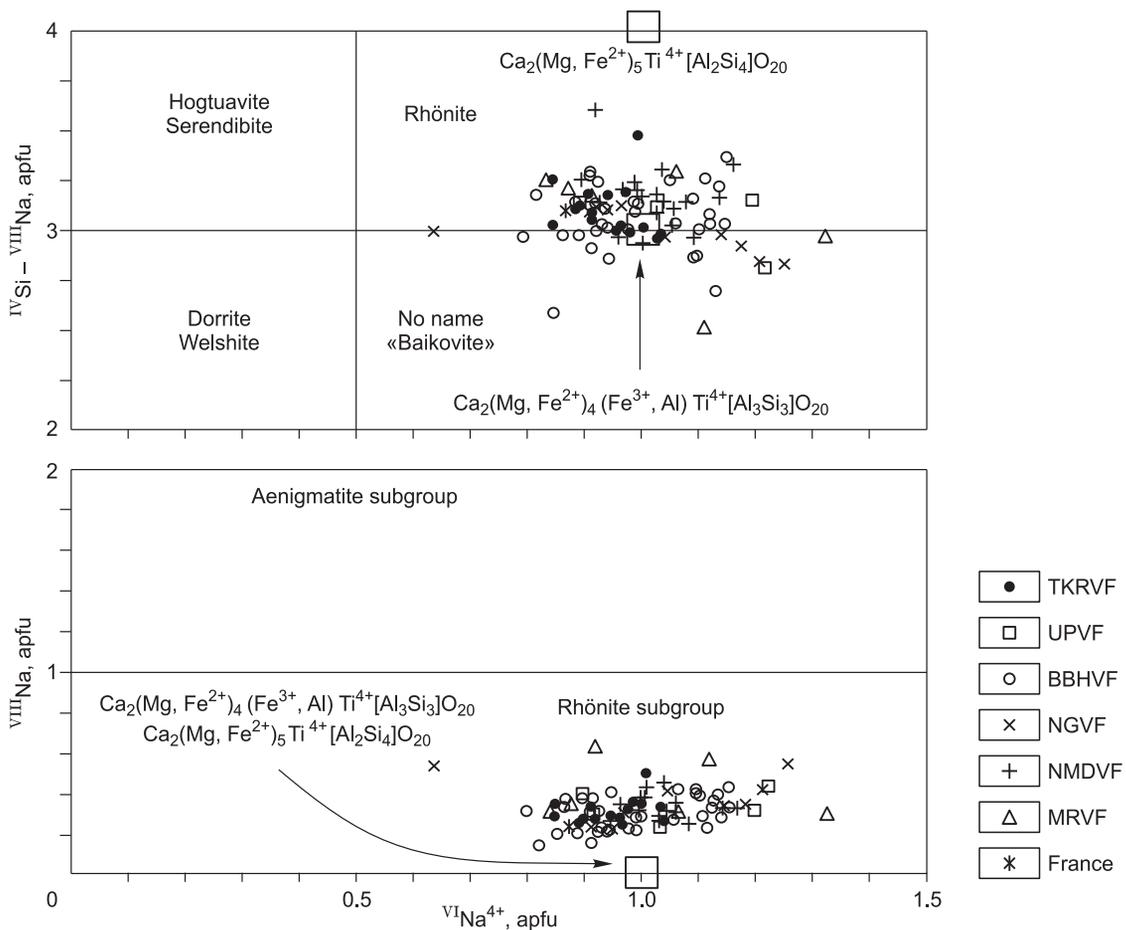


Рис. 3. Классификационные диаграммы [Kunzmann, 1999] для рёнитов из включений расплава в оливине щелочных базальтов (ф.е.).

Идеальные составы приведены для сравнения. Данные по Наги-Салго, NGVF [Zajacz et al., 2007] и массив Централ, Франция [Jannot et al., 2005] также указаны на графиках.

Таблица 5.

**Представительные анализы фаз из включений расплава с рёнитом
в оливине щелочных базальтов (BBHVF и NGVF)**

Состав включений	Фаза	n	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма	OI, Fo
Базанит, влк. Бадачони, BBHVF																
Gl + Rho + Cpx + + Mag + Sulph + g	Gl	1	62.36	0.11	0.00	27.90	0.86	—	0.08	0.24	2.49	4.62	0.21	—	98.87	74.8
	Rho	2	24.45	9.08	0.29	17.39	22.47	—	12.03	11.65	1.18	0.00	0.00	—	98.53	—
	Cpx	1	46.09	3.79	0.11	8.47	6.95	—	11.79	21.19	1.36	0.00	0.00	—	99.75	—
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	1	60.45	0.35	0.00	26.62	1.17	—	0.11	0.25	4.13	6.87	0.02	—	99.97	72.8
	Rho	2	26.30	10.70	0.14	13.23	24.25	—	12.79	9.89	1.60	0.00	0.00	—	98.88	—
Базанит, влк. Хегешты, BBHVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ne + g	Gl	1	56.71	0.00	—	22.44	0.84	0.00	0.00	0.93	3.72	10.92	—	0.00	95.56	84.7
	Rho	1	25.89	9.23	0.34	19.84	15.11	0.00	15.43	12.66	1.46	0.00	—	—	99.96	—
	Cpx	1	42.65	3.24	—	11.54	7.16	0.00	10.05	23.79	0.80	—	—	—	99.23	—
	Ne	1	41.42	0.00	—	32.51	0.81	0.00	0.00	2.37	14.64	4.59	—	0.00	96.34	—
Gl + Rho + Cpx + g	Gl Na	1	55.35	1.03	0.00	25.72	1.30	0.01	0.56	0.61	8.31	4.96	0.25	0.12	98.23	84.1
	Gl K	1	51.96	0.70	0.00	24.65	0.74	0.00	0.31	0.42	5.51	14.03	0.26	0.03	98.60	—
	Rho	3	25.22	9.49	0.07	19.22	17.42	0.10	14.58	12.63	0.80	0.01	—	—	99.55	—
	Cpx	2	41.91	3.62	0.01	13.15	6.85	0.09	9.81	23.25	0.64	0.00	0.43	0.00	99.73	—
Gl + Rho + Cpx + Ap + + Ilm + Sulph + g	Gl	2	52.04	1.07	0.00	24.56	2.05	—	0.64	0.91	7.50	9.65	0.28	0.42	99.10	85.0
	Rho	1	24.29	9.45	0.04	18.95	18.71	—	14.33	12.34	0.82	0.00	0.00	0.00	98.93	—
	Cpx	2	41.05	4.03	0.00	12.12	8.49	—	10.67	22.32	0.68	0.00	0.20	0.00	99.55	—
Базанит, влк. Кабхеги, BBHVF																
Gl + Rho + Cpx + + Amph + Ap + + Sulph + Flsp + g	Gl K	7	61.59	0.11	0.01	23.31	0.54	0.00	0.07	0.06	6.46	7.18	0.25	0.32	99.91	82.2
	Gl Na	4	61.90	0.18	0.00	25.67	0.50	0.01	0.03	0.34	10.63	0.23	0.31	0.00	99.79	—
	Rho	5	26.53	10.55	0.28	18.76	14.14	0.10	14.61	12.24	1.04	0.00	0.00	0.00	98.25	—
	Cpx	2	43.70	4.14	0.01	11.05	6.14	0.10	11.09	22.57	0.65	0.00	0.41	0.00	99.85	—
	Amph	2	39.26	7.61	0.04	15.82	6.27	0.03	13.30	12.05	2.88	0.85	0.09	0.07	98.23	—
	Flsp	1	62.65	0.12	0.00	23.19	0.43	0.01	0.04	4.15	7.18	0.65	0.00	0.00	98.41	—
Gl + Cr-sp + Rho + + Cpx + Amph + Ap + + Sulph + g	Gl K	2	58.85	0.09	0.03	22.26	0.46	0.00	0.02	0.12	4.52	13.34	0.22	0.04	99.94	82.2
	Gl Na	3	61.83	0.22	0.01	25.15	0.37	0.01	0.04	0.26	11.35	0.20	0.18	0.00	99.61	—
	Rho	2	26.14	11.10	0.34	18.82	14.37	0.07	14.12	12.32	0.88	0.00	0.00	0.00	98.14	—
	Cpx	3	43.02	4.55	0.02	11.04	6.61	0.07	10.94	22.69	0.69	0.00	0.20	0.00	99.84	—
Gl + Rho + Cpx + + Sulph + g	Gl	1	60.38	0.20	0.02	25.54	0.56	0.00	0.14	0.22	7.20	4.48	0.21	0.27	99.21	81.5
	Rho	1	26.22	10.74	0.93	18.20	14.28	0.05	14.85	11.95	1.64	0.00	0.00	0.00	98.87	—
	Cpx	1	43.95	4.07	0.09	11.61	5.69	0.10	11.10	22.36	0.83	0.00	0.20	0.00	100.00	—
Базанит, влк. Залахалап, BBHVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ap + Ilm + g	Gl	2	62.93	0.61	0.00	23.90	1.04	0.01	0.19	1.32	4.59	3.35	0.99	0.17	99.08	72.2
	Rho	1	27.45	11.42	0.48	15.30	17.94	0.14	13.21	11.75	1.24	0.00	0.07	0.00	99.00	—
Базанит, Эрествени, NGVF																
Gl + Rho + Cpx + + Ap + g	Gl	1	55.30	0.14	0.14	25.60	1.67	0.13	0.01	0.11	9.52	6.28	0.04	0.05	98.99	77.1
	Rho	1	24.90	9.03	0.37	18.10	18.20	0.35	13.80	12.10	0.94	0.00	—	0.00	97.79	—
Базанит, Мадьярбания, NGVF																
Gl + Rho + g	Gl	1	52.60	0.03	0.00	23.20	0.33	0.21	0.04	7.88	12.60	0.96	0.02	0.11	97.98	62.8
	Rho	1	24.30	12.00	0.20	14.00	24.30	0.61	10.10	10.20	2.03	0.00	—	0.00	97.74	—
Базанит, Тербелед, NGVF																
Gl + Rho + Cpx + g	Gl	1	56.70	0.13	0.15	24.90	0.90	0.25	0.17	0.82	9.04	5.89	0.00	0.47	99.42	72.5
	Rho	1	24.10	9.05	0.35	18.40	21.30	0.71	10.70	11.50	0.83	0.00	—	0.00	96.94	—
	Cpx	1	44.30	1.87	0.05	13.00	7.14	0.29	10.30	22.10	0.67	—	—	—	99.72	—

Состав включений	Фаза	n	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма	OI, Fo
Gl + Rho + Cpx + + Sulph + g	Gl	1	55.60	0.19	0.00	24.90	1.38	0.00	0.34	0.24	9.71	5.67	0.00	0.03	98.06	73.3
	Rho	1	24.90	9.38	0.29	18.20	19.80	0.40	11.60	11.30	1.10	0.00	—	0.00	96.97	—
Гавайит, Печко, NGVF																
Gl + Al-sp + Rho + + Cpx + Sulph + g	Gl	1	62.49	0.78	0.00	26.17	0.54	—	0.14	0.84	2.17	5.19	0.76	0.23	99.31	87.0
	Al-sp	1	0.00	0.70	0.22	64.04	14.83	—	20.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.86	—
	Rho	1	25.43	11.63	0.12	19.12	14.35	—	15.67	11.64	1.35	0.00	0.04	0.00	99.35	—
	Cpx	1	42.35	6.00	0.03	11.86	4.06	—	12.22	22.13	0.82	0.00	0.04	0.00	99.51	—
Gl + Al-sp + Rho + + Cpx + Amph + + Sulph + g	Gl	2	62.26	0.72	0.00	26.75	0.50	—	0.27	1.22	2.17	3.67	1.47	0.26	99.26	86.0
	Rho	1	25.24	12.42	0.35	19.77	12.50	—	16.44	11.02	1.67	0.00	0.00	0.00	99.41	—
	Cpx	1	44.13	4.19	0.01	11.41	4.23	—	12.50	21.74	0.69	0.00	0.04	0.00	98.95	—
	Amph	1	38.93	10.21	0.00	13.93	5.78	—	13.44	12.44	2.95	0.68	0.37	0.01	98.74	—

Примечание. Gl K, Gl Na = сосуществующие стекла, обогащенные K и Na.

Ст-шпинель. Последняя фаза обычно имеет переменный состав, обеднена TiO₂ (< 5 мас. %) и соответствует одиночным кристаллитам Ст-шпинели в оливине-хозяине. Дочерний магнетит очень редко встречается в рёнитсодержащих включениях и обогащен TiO₂ (до 17 мас. %).

Амфибол из включений содержит до 10.2 мас. % TiO₂ и относится к Ti-керсутиту. Концентрации Cl, SiO₂ и SrO во фторапатите обычно не превышают 1 мас. %. Согласно данным сканирующей микроскопии, сульфидные глобулы состоят в основном из пирротина с очень низкими содержаниями Ni. Другие сульфидные фазы (пентландит, халькопирит или моносульфидный твердый раствор) встречаются очень редко.

Стекло. Химический состав стекол в негретых включениях варьирует в широких пределах (в мас. %): SiO₂ — 49.5—65.5; Al₂O₃ — 20.6—28.2; щелочи — до 19.5, при этом концентрации FeO_{общ.}, CaO и MgO обычно не превышают 5 мас. %. Соотношение Na₂O/K₂O также непостоянно, даже для включений из одной породы. В некоторых включениях расплава из базальтов NGVF и BBHVF (табл. 5) было выявлено сосуществование K- и Na-стекол [Kóthay et al., 2003, 2007]. Возможно, это характеризует химическую неоднородность в замкнутом объеме, или «предкристаллизационный» этап расплава для фор-

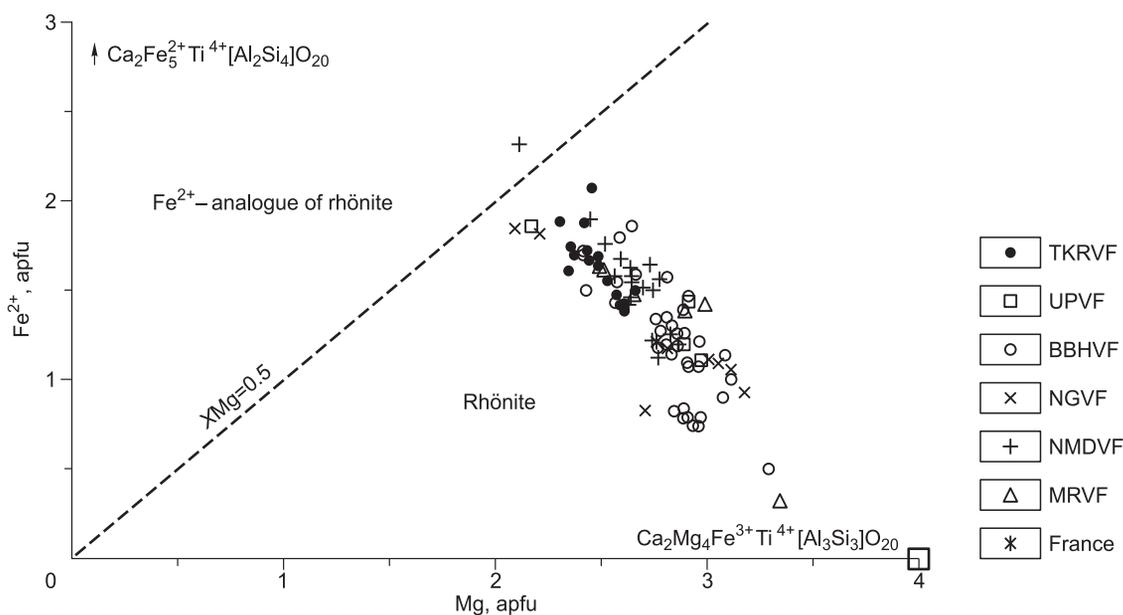


Рис. 4. Соотношение Mg-Fe²⁺ (ф.е.) для рёнитов из включений расплава в оливине щелочных базальтов.

Идеальные составы приведены для сравнения. Данные по Наги-Салго, NGVF [Zajacz et al., 2007] и массив Централ, Франция [Jannot et al., 2005] также указаны на графиках. Диаграмма адаптирована из [Grapes, Keller, 2010].

мирования новых дочерних фаз, не появившихся из-за быстрой закалки расплава. Варьирующий состав остаточных стекол определяется как исходным составом расплава, захваченного оливином в качестве включения, так и количеством и составом дочерних фаз, образующихся во включении после его захвата. Данные по составу стекол гретых и гомогенизированных включений даны в работах [Кузьмин и др., 1999; Головин и др., 2000; Kóthay et al., 2005; Тимина и др., 2006; Vapnik et al., 2007].

ОБСУЖДЕНИЕ

Генезис и стабильность рёнита в щелочных базальтах и их ксенолитах.

Обзор литературных данных по вулканитам мира показывает, что рёнит обычно встречается как фенокристал/микрофенокристал или минерал основной массы в недосыщенных по SiO_2 высокоглиноземистых (миаскитовых) породах, таких как щелочные базальты, щелочные лампрофиры, фонолиты, тефриты, шошониты и нефелиниты, а также как фаза, замещающая Ti-амфибол в глубинных ксенолитах. Рёнит никогда не отмечался в агапитовых вулканитах и карбонатитах, вместо него в этих породах обычно присутствует энigmatит, который обычно не содержит Ca и Al (подгруппа энigmatита, супергруппа сапфирина) [Kunzmann, 1999; Grew et al., 2008]. Таким образом, присутствие рёнита как высокоглиноземистой фазы согласуется с миаскитовым характером пород всех изученных регионов.

В щелочных базальтах рёнит очень редко встречается как фенокристал [Kogarko et al., 2005], чаще он присутствует как микрофенокристал или минерал основной массы. Этот минерал характерен для стекловатых пород или пород, имеющих закалочную структуру основной массы [Magonthier, Velde, 1976; Voivin, 1980; Olsson, 1983; Johnston, Stout, 1985; Grapes, Keller, 2010]. К сожалению, пока очень мало петрографических данных о взаимоотношениях рёнита с другими минералами. В основной массе щелочных базальтов в некоторых случаях выявляется следующая последовательность кристаллизации фаз: оливин → рёнит → клинопироксен → Ti-магнетит [Lacroix, 1909; Kyle, Price, 1975; Seghedi et al., 1995]. Однако в безоливиновых породах (тефриты-фонолиты) наблюдается иная последовательность: Ti-магнетит → клинопироксен → рёнит [Kogarko et al., 2005] либо клинопироксен → рёнит → Ti-магнетит [Grapes, Keller, 2010].

В многочисленных публикациях отмечается, что рёнит является достаточно распространенной фазой в ассоциациях, частично или полностью замещающих амфибол (мега/ксенокристы, основные—ультраосновные ксенолиты) (см. табл. 1). Генезис таких рёнитов рассматривается как: 1) продукт твердофазного распада амфибола [Kunzmann et al., 1986; Grapes et al., 2003]; 2) продукт декомпрессионного плавления амфибола [Voivin, 1980]; 3) продукт реакции амфибола с вмещающим расплавом базальтового состава [Shaw, Klügel, 2002].

Во всех этих случаях продукты замещения амфибола представлены следующей ассоциацией оливин ± шпинель + рёнит + клинопироксен ± Ti-магнетит/ильменит ± плагиоклаз или фельшпатоид ± стекло (в примерном порядке их появления). Все это заставляет предполагать, что такая ассоциация могла образоваться при $> 1000^\circ\text{C}$ при временном интервале пребывания ксенолитов в промежуточной магматической камере и, возможно, не имеет никакого отношения к метасоматическим процессам, происходившим в мантии [Shaw, Klügel, 2002; Grapes et al., 2003]. Такого типа рёнитосодержащие ксенокристы и ксенолиты являются достаточно обычным явлением в изученных базальтах (BBHVF, NGVF, NMDVF, MRVF и UPVF, табл. 6). В некоторых случаях рёнит встречается в продуктах полного замещения фенокристов амфибола (влк. Хегиешты, BBHVF). Кроме того, этот минерал присутствует в интерстициях ксенолитов, которые изначально не содержали первичный амфибол [Babkine et al., 1964; Grapes et al., 2003] (см. авторские данные в табл. 6). Вслед за авторами [Babkine et al., 1964] мы предполагаем, что такие рёнитосодержащие ассоциации могли образоваться как за счет локального плавления клинопироксена ксенолитов с участием или без участия вмещающего расплава, так и за счет проникновения вмещающего расплава в ксенолит.

П. Бойвин [Voivin, 1980] экспериментально определил границы поля стабильности для ассоциации рёнит + оливин + клинопироксен + плагиоклаз + магнетит при температуре $< 1090^\circ\text{C}$. Т. Кунцманн [Kunzmann, 1989, 1999] обобщил все известные данные по стабильности рёнита. Согласно его данным, рёнит стабилен в интервале температур $850\text{—}1000^\circ\text{C}$ при $P = 1$ бар и $900\text{—}1100^\circ\text{C}$ при $P = 5$ кбар, при этом выявлено, что нет каких-либо ограничений по фугитивности кислорода. Стабильность минерала в щелочных базальтах (оливиновый нефелинит, нефелиновый базанит, оливин-мелилитовый нефелинит) была определена экспериментально и соответствует < 0.6 кбар и $840\text{—}1200^\circ\text{C}$ [Kunzmann, 1989]. Опираясь на экспериментальные работы [Voivin, 1980; Kunzmann, 1989], Р. Грейпс с соавторами [Grapes et al., 2003] выявили, что интерстиционная ассоциация микрофенокристов (рёнит + оливин + клинопироксен + плагиоклаз) в ксенолитах Маунт Сидлей образовалась в очень узком температурном интервале $1190\text{—}1140^\circ\text{C}$ и давлении < 0.5 кбар. Кроме того, эти авторы показали, что рёнит, замещающий керсутит, кристаллизовался в более окисленных условиях (NNO буфер), чем минерал из интерстиционных ассоциаций (QFM буфер).

Таблица 6.

Химический состав (мас. %) рёнитов из продуктов замещения амфибола и ксенолитов в щелочных базальтах изученных регионов

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	(10)	(6)	(8)	(3)	(11)	(13)	(11)	(4)	(13)	(3)	(4)
SiO ₂	27.12	25.50	26.01	28.53	23.64	25.97	24.91	28.97	22.48	25.21	24.35
TiO ₂	9.18	8.67	8.42	8.47	11.13	10.02	11.30	8.34	13.50	8.87	11.56
Cr ₂ O ₃	0.09	0.03	0.00	0.29	0.00	0.06	0.01	0.06	0.29	0.02	0.20
Al ₂ O ₃	16.20	15.26	16.26	18.93	18.22	15.92	15.95	14.79	17.13	16.51	16.44
FeO _{общ.}	18.64	20.37	22.38	9.90	19.44	20.56	20.52	20.29	18.27	25.76	21.72
MnO	0.15			0.07	0.11	0.11	0.14	0.12	0.06	0.15	0.16
MgO	14.73	15.69	12.93	17.77	13.37	13.64	13.39	14.27	13.76	10.48	11.60
CaO	11.09	11.31	11.68	12.07	11.68	11.19	11.34	10.27	11.87	11.24	11.36
Na ₂ O	1.65	1.86	1.62	1.28	1.05	1.32	1.30	2.02	0.98	1.12	1.15
Сумма	98.85	98.68	99.30	97.30	98.64	98.80	98.86	99.11	98.35	99.36	98.54
Fe ₂ O ₃	9.04	16.71	12.50	3.22	7.90	8.38	8.17	9.02	6.55	9.43	6.02
FeO	10.51	5.34	11.13	7.00	12.34	13.02	13.17	12.17	12.38	17.28	16.31
Сумма	99.76	100.36	100.56	97.62	99.43	99.64	99.68	100.01	99.00	100.31	99.14

Формула рассчитана на 14 катионов и 20 кислорода

Si	3.584	3.362	3.463	3.710	3.173	3.480	3.350	3.828	3.041	3.431	3.324
Al ^{IV}	2.416	2.372	2.537	2.290	2.827	2.513	2.527	2.172	2.731	2.569	2.645
Fe ^{3+IV}	0.000	0.266	0.000	0.000	0.000	0.007	0.123	0.000	0.228	0.000	0.032
[Z]	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Al ^{VI}	0.107	0.000	0.015	0.612	0.055	0.000	0.000	0.130	0.000	0.079	0.000
Ti ⁴⁺	0.913	0.859	0.843	0.828	1.124	1.010	1.143	0.828	1.373	0.908	1.187
Cr	0.009	0.003	0.000	0.029	0.001	0.007	0.002	0.007	0.031	0.002	0.022
Fe ^{3+VI}	0.898	1.392	1.253	0.315	0.798	0.838	0.703	0.897	0.438	0.966	0.586
Fe ^{2+VI}	1.155	0.589	1.239	0.762	1.337	1.409	1.454	1.315	1.376	1.900	1.827
Mn	0.017			0.008	0.012	0.013	0.015	0.013	0.007	0.017	0.018
Mg	2.901	3.085	2.566	3.444	2.674	2.724	2.683	2.810	2.775	2.127	2.360
Ca ^{VI}	0.000	0.073	0.084	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
[Y]	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Ca ^{VIII}	1.570	1.524	1.583	1.678	1.680	1.606	1.634	1.453	1.720	1.639	1.661
Na	0.424	0.476	0.417	0.322	0.273	0.344	0.340	0.517	0.256	0.295	0.304
Fe ^{2+VIII}	0.006	0.000	0.000	0.000	0.047	0.050	0.027	0.029	0.024	0.066	0.034
[X]	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
X _{Mg}	0.72	0.82	0.66	0.82	0.67	0.66	0.65	0.68	0.67	0.53	0.56

Примечание. 1 — ксеноморфное зерно в фенокрите клинопироксена, гавайит, Печко, NGVF; 2, 3 — продукт полного замещения ксено/фенокрисов амфибола в базальтах: 2 — влк. Хегиешты, BBHVF; 3 — влк. Бондоро, BBHVF; 4—8 — интерстиционная фаза в амфиболсодержащих ксенолитах: 4 — Ol горблендит, Фулек, NGVF; 5 — Sr клинопироксенит, тр. Красноозерская-сателлит, NMDVF; 6 — Sr клинопироксенит, дайка Белё, NMDVF; 7 — Ol клинопироксенит, влк. Учучей, UPVF; 8 — Ol клинопироксенит, UPVF; 9, 10 — интерстиционная фаза в безамфиболовых ксенолитах: 9 — Sr гарцбургит, влк. Ингамакит, UPVF; 10 — клинопироксенит, тр. Ботиха, NMDVF; 11 — Ol-Crx кумулатный ксенолит, влк. Арод, MRVF. X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺). Формулы рассчитаны по схеме [Kunzmann, 1999].

Данные по рёниту из включений расплава в оливине щелочных базальтов свидетельствуют о достаточно узком температурном интервале его кристаллизации (1180—1260°C). К сожалению, невозможно реконструировать стабильность этого минерала в пределах давления и фугитивности кислорода. Данные по омогенизации включений расплава и микротермометрии сингенетичных флюидных CO₂ включений указывают на то, что оливин захватывал эти включения при > 1300°C и > 3—5 кбар. Однако

давление, при котором рёнит и другие дочерние фазы начинали кристаллизоваться во включениях, достаточно трудно оценить: при повышенном давлении или $< 0.5\text{—}1$ кбар (?). Тем не менее по аналогии с фенокристами рёнита предполагается, что давление могло быть < 0.5 кбар. Петрография включений выявляет следующий порядок кристаллизации фаз: Al-шпинель \rightarrow рёнит \rightarrow Ti-Al-клинопироксен \rightarrow апатит \rightarrow амфибол \rightarrow Ti-магнетит (и/или ильменит). Малые размеры дочерних фаз во включениях в оливине не позволяют точно оценить фугитивность кислорода при кристаллизации рёнита, хотя грубая оценка возможна, исходя из состава самого минерала [Grapes et al., 2003]. Однако все эти расчеты дают достаточно большой интервал (от NNO до QFM и ниже), даже для рёнита из одной породы и одного проявления (см. рис. 4). Расчеты по паре оливин—Cr-шпинель соответствуют значениям фугитивности кислорода на $1\text{—}2.5$ лог. ед. выше буфера QFM для ранних стадий кристаллизации базальтов Хегиешты и Тергеша [Kóthay et al., 2005; Тимина и др., 2006].

Данные по включениям расплава в некоторой степени противоречат выводам Т. Кунцманна о температурной стабильности рёнита [Kunzmann, 1999]. Возможно, некоторые расхождения по температуре связаны с тем, что рёнит имеет варьирующий состав по содержанию Fe^{2+} , Fe^{3+} и других катионов, изоморфно замещающих друг друга. Следует заметить, что в экспериментах с оливиновым нефелинитом [Kunzmann, 1989] был синтезирован рёнит с $X_{\text{Mg}} = 0.6$, тогда как рёниты из включений характеризуются $X_{\text{Mg}} = 0.48\text{—}0.91$, причем составы с $X_{\text{Mg}} > 0.6$ преобладают (см. рис. 4). К сожалению, нет каких-либо экспериментальных данных о зависимости состава рёнита от температуры. Кроме того, физико-химические условия кристаллизации во включениях в оливине и в основной массе щелочных базальтов могли существенно различаться (закрытая и открытая система). По-видимому, только изучение включений расплава в самом рёните поможет установить более точные параметры кристаллизации этого минерала в различных обстановках.

Сопоставление химизма рёнита из включений в оливине и других ассоциаций.

Общие различия химического состава рёнита из щелочных базальтов и их ксенолитов показаны на рис. 5. Все анализы этого минерала, включая литературные данные, условно разделены на четыре группы: 1) фаза из включений расплава в фенокристах оливина щелочных базальтов; 2) фенокристаллит и минерал основной массы щелочных базальтов; 3) продукт частичного или полного замещения амфибола (фенокристы, ксенокристы, ксенолиты); 4) интерстиционная фаза в безамфиболовых основных—ультраосновных ксенолитах. Следует отметить, что некоторые составы минерала по ряду причин не были использованы в этом сопоставлении. В частности, это касается фаз, определенных как рёнит [Heritsch, 1986, 1987; Rondorf, 1989; Heritsch, Ettinger, 1998] и лейкорёнит [Чесноков и др., 1994; Чесноков, 1997] и содержащих очень низкие концентрации TiO_2 . Используя «правило 50 %» и теоретические составы, предложенные Т. Кунцманном [Kunzmann, 1999] для группы энigmatита—рёнита, эти фазы следует относить к $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_2[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{20}]$. Составы из пирометаморфических пород также не использовались для сравнения [Чесноков и др., 1994; Чесноков, 1997; Žáček et al., 2010]. Рёниты из метеоритов и лунных пород исключены из обзора, поскольку имеют внеземное происхождение [Beckett et al., 1986; Mao, Bell, 1974; Fuchs, 1971, 1978; Mason, Taylor, 1982; Warren et al., 2006; Treiman, 2008]. Некоторые из них содержат в структуре трехвалентный титан (метеорит Алльенде) и кристаллизовались в ультравосстановительных условиях, что очень редко реализуется в земных обстановках. Согласно данным Е. Боначчорси с соавторами [Bonaccorsi et al., 1990], большинство земных рёнитов не содержат Ti^{3+} . В целом рёнит из включений в оливине образует очень компактное поле, тогда как другие рёниты характеризуются широким разбросом составов (см. рис. 5). Для всех рёнитов характерна ярко выраженная негативная корреляция $\text{Ca} + \text{Al} \text{—} \text{Na} + \text{Si}$ и $\text{Ti} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} \text{—} \text{Fe}^{3+}$, что отражает кристаллохимическую связь этого минерала с другими членами группы энigmatита—рёнита.

Проблема появления рёнита во включениях в оливине.

Изучение включений расплава в фенокристах оливина щелочных базальтов различных регионов поднимает проблему присутствия рёнита в одних включениях и его отсутствия в соседних включениях. Такая же проблема по отношению к рёниту возникает и для базальтов сходного химического и модального состава. В случае включений расплава это можно объяснить тем, что включения с рёнитом приурочены к центральному зонам минерала-хозяина, а включения без рёнита — к его внешним зонам. Кроме того, ильменит и Ti-магнетит являются обычными фазами включений без рёнита, тогда как в рёнитсодержащих включениях они отсутствуют или встречаются очень редко. Следует также отметить, что какие-либо значимые различия по составу других дочерних фаз (Al-шпинель, клинопироксен) не выявляются для включений с рёнитом и без него.

Вполне вероятно, что появление рёнита никоим образом не связано ни с химизмом этого минерала и других дочерних фаз, ни с характером расположения включений в минерале-хозяине. Это может быть объяснено из структурных особенностей рёнита и модального состава его парагенезисов. Изучение кристаллической структуры показало, что этот минерал является цепочечным силикатом [Walenta, 1969; Bonaccorsi et al., 1990]. Он постоянно сосуществует с клинопироксеном и минералами семейства шпинели.

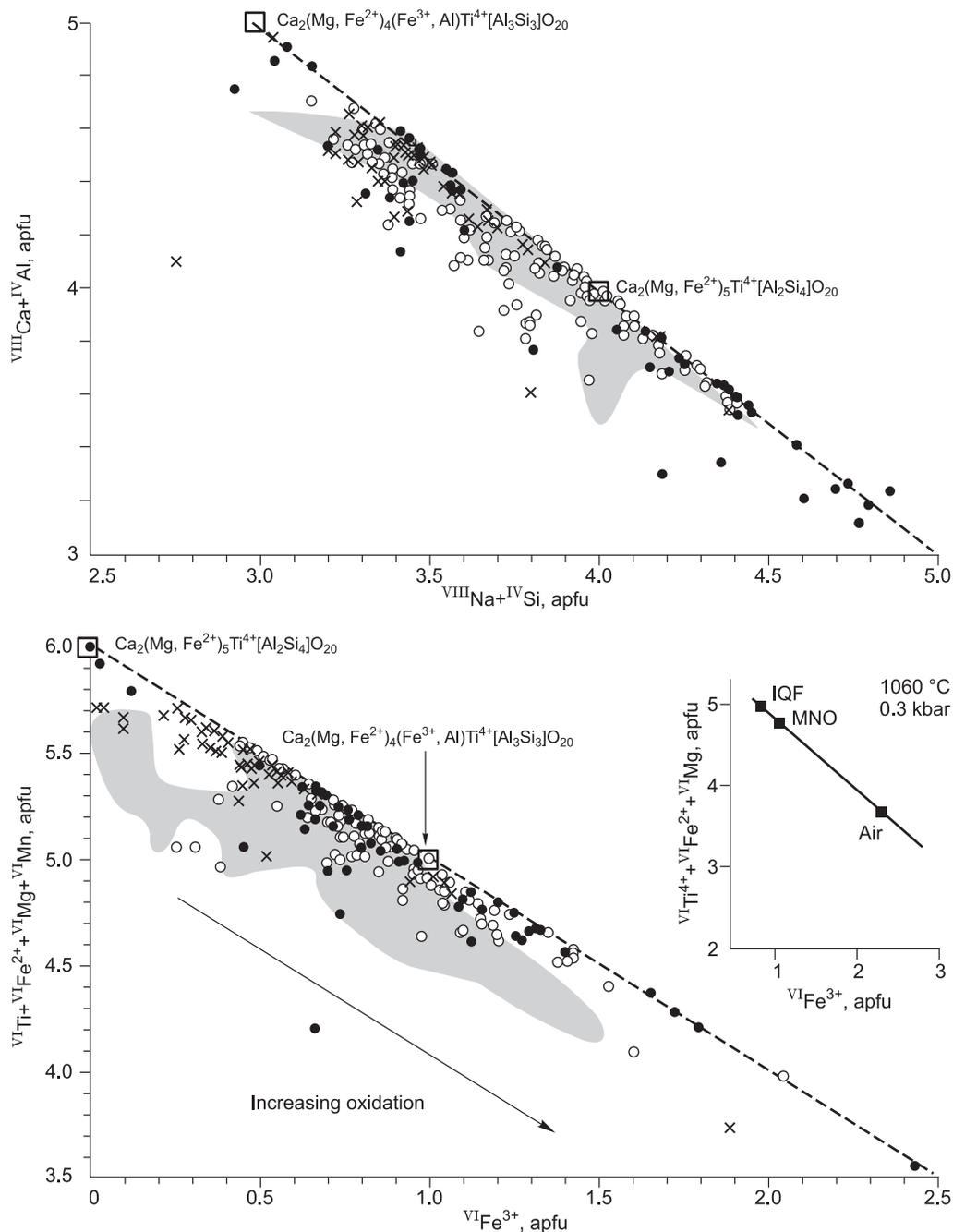


Рис. 5. Графики $VIII Na + IV Si$ — $VIII Ca + IV Al$ и $VI Fe^{3+} - VI Ti^{4+} + VI Fe^{2+} + VI Mg + VI Mn$ (ф.е.) для рёнитов из земных пород и включений расплава в оливине базальтов (серое поле).

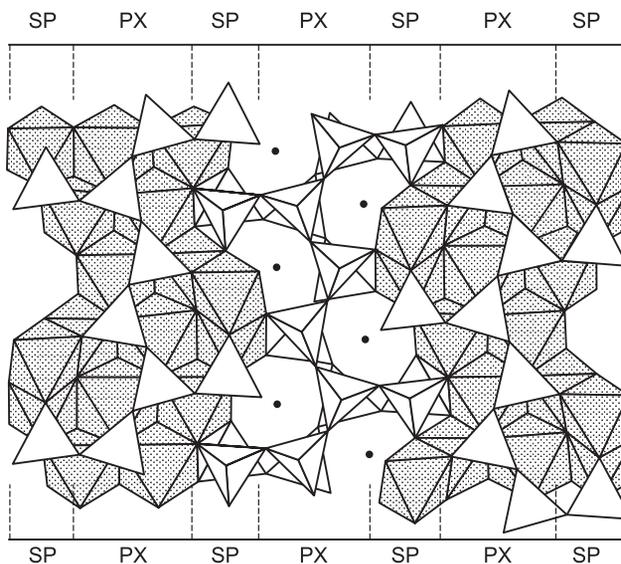
Черные кружки — фенокрит и минерал основной массы из щелочных базальтов [Soellner, 1907; Lacroix, 1909; Cameron et al., 1970; Grünhagen, Seck, 1972; Kyle, Price, 1975; Magonthier, Velde, 1976; Brooks et al., 1979; Boivin, 1980; Havette et al., 1982; Olsson, 1983; Johnston, Stout, 1985; Bonaccorsi et al., 1990; Seghedi et al., 1995; Downes et al., 1995; Kunzmann, 1999; Prestvik et al., 1999; Fodor, Hanan, 2000; Nédli, Tóth, 2003; Kogarko et al., 2005; Grapes, Keller, 2010]. Белые кружки — продукт замещения первичного керсутита в основных—ультраосновных ксенолитах и ксено/фенокритов керсутита в щелочных базальтах [Kyle, Price, 1975; Magonthier, Velde, 1976; Гушин и др., 1991; Shaw, Klügel, 2002; Grapes et al., 2003; Alletti et al., 2005; Zajacz et al., 2007; Gil-Crespo et al., 2010; авторские данные] (см. табл. 6). Крестики — интерстиционный минерал в основных—ультраосновных ксенолитах из щелочных базальтов [Babkine et al., 1964; Gamble, Kyle, 1987; Shaw, Klügel, 2002; Grapes et al., 2003; авторские данные] (см. табл. 6). Идеальные составы приведены для сравнения. Вставка показывает изменение состава рёнита в нефелин-базанитовом расплаве при разной фугитивности кислорода (IQF, NNO, воздушная среда) при 1060°C/0.3 кбар [Kunzmann et al., 1986; Kunzmann, 1989].

Рис. 6. Структура рёнита, по [Bonaccorsi et al., 1990].

SP — шпинелевый слой; PX — пироксеновый слой.

нели (Cr-шпинель, Al-шпинель, Ti-магнетит). Е. Боначчорси с соавторами [Bonaccorsi et al., 1990] первыми акцентировали внимание на такие необычные ассоциации в разных геологических обстановках. Кроме того, согласно этим авторам, структура рёнита представляет собой чередование слоев со структурой пироксена и шпинели (рис. 6). В этом смысле рёнит является не только переходной фазой между Al-шпинелью и Ti-Al-клинопироксеном при кристаллизации, но также и промежуточным структурным членом полисоматической серии шпинель—пироксен.

Именно эта структурная особенность рёнита объясняет, почему он является короткоживущим (эфмерным) минералом и очень чутко реагирует на изменения любого параметра среды кристаллизации. В случае включений расплава или пород, одним из таких параметров вполне может быть скорость охлаждения расплава, и как следствие, вместо рёнита появляются клинопироксен или Ti-магнетит (либо другая шпинель) или ассоциация этих двух минералов.



ВЫВОДЫ

1. Рёнит является достаточно редким минералом, который встречается во включениях расплава в фенокристаллах оливина щелочных базальтов различных вулканических регионов мира. Обычно рёнитсодержащие включения приурочены к центральным зонам минерала-хозяина. Захват таких включений происходил при $T > 1300^\circ\text{C}$ и $P > 3\text{—}5$ кбар.

2. Петрографические и термометрические данные по рёнитсодержащим включениям в оливине указывают на следующую последовательность появления фаз: Al-шпинель → рёнит → Ti-Al-клинопироксен → апатит → амфибол, Ti-магнетит (или ильменит) → стекло. Рёнит во включениях кристаллизовался в очень узком температурном интервале ($1180\text{—}1260^\circ\text{C}$) и давлении < 0.5 кбар.

3. Редкость находок рёнита как во включениях расплава, так и в самих щелочных базальтах может быть объяснена с позиций микроструктурных особенностей этого минерала. Он является промежуточным членом полисоматической серии шпинель—пироксен, что предполагает его нестабильность в изменяющихся условиях кристаллизации.

4. Состав рёнита может быть использован для грубой оценки фугитивности при кристаллизации щелочных базальтов.

Авторы крайне признательны Л.Н. Поспеловой за помощь в проведении микрозондовых анализов в ИГМ СО РАН, С.В. Ковязину и Е.И. Петрушину — за термометрические эксперименты с включениями расплава. Авторы благодарны Ф.М. Ступаку, Б.А. Литвиновскому, В.С. Самойлову, Т.Ю. Базаровой, С. Харанги, В.Г. Мальковцу, С.В. Рассказову и А.В. Иванову за предоставление рёнитсодержащих пород из вулканических полей России, Венгрии и Израиля. Авторы благодарны рецензентам за их ценные критические замечания.

Данная работа выполнена при поддержке СО РАН (интеграционный проект 6.15) и РФФИ (грант 08-05-00134).

ЛИТЕРАТУРА

Ащепков И.В., Кебезинская В.В., Мальковец В.Г., Овчинников Ю.И. Мантийные ксенолиты из мезокайнозойских вулканических трубок Хакасии. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1995, 39 с.

Брагин В.Ю., Реутский В.Н., Литасов К.Д., Мальковец В.Г. Позднемеловой эпизод внутриплитного магматизма в Северо-Минусинском прогибе по палеомагнитным и геохронологическим данным // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (4), с. 576—582.

Головин А.В., Шарыгин В.В. Петрогенетическая информативность флюидных и расплавных включений в минералах глубинных ксенолитов из базанитов трубки Беле (Северо-Минусинская впадина) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (10), с. 1043—1060.

- Головин А.В., Шарыгин В.В., Мальковец В.Г.** Эволюция расплава в процессе кристаллизации базанитов трубки Белё, Минусинская котловина // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (12), с. 1760—1782.
- Головин А.В., Шарыгин В.В., Мальковец В.Г.** Интерстиционные ассоциации в глубинных ксенолитах из трубок взрыва Северо-Минусинской впадины // Тезисы семинара «Щелочной магматизм Земли», М., 2002, с. 34—35.
- Гущин А.В., Иванова Т.А., Ганзеев А.А.** Тефрит-шошонитовая серия Юго-Восточной Армении // Геология и разведка, 1991, № 11, с. 3—14.
- Копылова М.Г., Рикард Р.С., Клейнштьюбер А., Тэйлор В.Р., Гернеи Д.Д., Даниелс Л.Р.М.** Первая находка стронциевого К-Сг-лопарита и Сг-чевкинита в алмазах // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 382—397.
- Кузьмин Д.В., Чупин В.П., Литвиновский Б.А.** Температуры и составы магм трахибазальт-командитовой ассоциации хребта Цаган-Хуртей, Западное Забайкалье (по включениям в минералах) // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (1), с. 62—72.
- Литасов Ю.Д.** Особенности эволюции щелочных базальтоидов вулканов Ингамакит и Мундужак (Удоканское лавовое плато) // Термобарогеохимия минералообразующих процессов, ОИГТМ СО РАН, Новосибирск, 1992, т. 2, с. 16—29.
- Литвиновский Б.А., Ярмолюк В.В., Воронцов А.А., Журавлев Д.З., Посохов В.Ф., Сандиминова Г.П., Кузьмин Д.В.** Позднетриасовый этап формирования Монголо-Забайкальской щелочно-гранитоидной провинции: данные изотопно-геохимических исследований // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (3), с. 445—455.
- Петрушин Е.И., Базаров Л.Ш., Гордеева В.И., Шарыгин В.В.** Термокамера для петрологических исследований щелочных изверженных горных пород // Приборы и техника эксперимента, 2003, т. 46, № 2, с. 108—112.
- Рассказов С.В., Бовен А., Андре Л., Легеос Д.П., Иванов А.В., Пунзалан Л.** Эволюция магматизма в северо-восточной части Байкальской рифтовой системы // Петрология, 1997, т. 5, № 2, с. 101—120.
- Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В.** Геохронология и геодинамика в позднем кайнозое: Южная Сибирь — Южная и Восточная Азия. Новосибирск, Наука, 2000, 288 с.
- Соболев А.В., Слуцкий А.Б.** Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика, 1984, т. 25 (12), с. 93—104.
- Соболев В.С., Костюк В.П., Базарова Т.Ю., Базаров Л.Ш.** Включения расплава в фенокристаллах нефелиновых базальтов // Докл. АН СССР, 1967, т. 173, № 2, с. 431—434.
- Ступак Ф.М.** Кайнозойский вулканизм хребта Удокан. Новосибирск, Наука, 1987, 169 с.
- Тимина Т.Ю., Шарыгин В.В., Головин А.В.** Эволюция расплава при кристаллизации базанитов трубки Тергешская, Северо-Минусинская впадина // Геохимия, 2006, т. 44, № 8, с. 814—833.
- Чесноков Б.В.** Силикооксиды в продуктах горения отвалов угольных шахт // Докл. РАН, 1997, т. 356, № 3, с. 374—375.
- Чесноков Б.В., Виллисов В.А., Бушмакин А.Ф., Котляров В.А., Белогуб Е.В.** Новые минералы из горелых терриконов Челябинского угольного бассейна (сообщение шестое) // Уральский минералогический сборник, 1994, т. 3, с. 3—34.
- Alletti M., Pompillo M., Rotolo S.G.** Mafic and ultramafic enclaves in Ustica Island lavas: inferences on composition of lower crust and deep magmatic processes // Lithos, 2005, v. 84, p. 151—167.
- Ananiev V.V., Okrugin V.M.** Mineralogy of molten inclusions in olivines from high-alumina basalt melts in Kamchatka // Plinius, 1991, № 5, p. 264—269.
- Babkine J., Conquere F., Vilminot J.C., Duong P.K.** Sur un nouveau gisement de rhönite (Monistrol d'Allier, Haute Loire) // C. R. Acad. Sci., Paris, 1964, Ser. D 258, p. 5479—5481.
- Balogh K., Árvai-Sós E., Pécskai Z., Ravasz-Baranyai L.** K/Ar dating of Post-Sarmatian alkali basaltic rocks in Hungary // Acta Miner. Petrogr. Szeged, 1986, v. 28, p. 75—93.
- Beckett J.R., Grossman L., Haggerty S.E.** Origin of Ti³⁺-bearing rhönite in Ca-Al-rich inclusions: an experimental study // Meteoritics, 1986, v. 21, p. 332—333.
- Boivin P.** Données expérimentales préliminaires sur la stabilité de la rhönite à 1 atmosphère. Application aux gisements naturels // Bull. Miner., 1980, v. 103, p. 491—502.
- Bonaccorsi E., Merlino S., Pasero M.** Rhönite: structure and microstructural features, crystal chemistry and polysomatic relationships // Eur. J. Miner., 1990, v. 2, p. 203—218.
- Brooks C.K., Pedersen A.K., Rex D.C.** The petrology and age of alkaline mafic lavas from the Nunatak zone of central East Greenland // Grønlands Geologiske Undersøgelse, Bull., 1979, v. 133, 28 p.

- Cameron K.L., Carman M.F., Butler J.C.** Rhönite from Big Bend National Park, Texas // *Amer. Miner.*, 1970, v. 55, p. 864—874.
- Canil D., Scarfe C.M.** Origin of phlogopite in mantle xenoliths from Kostal Lake, Wells Gray Park, British Columbia // *J. Petrol.*, 1989, v. 30, p. 1159—1179.
- Clocchiatti R.** Les fulgurites et roches vitrifiées de l'Etna // *Eur. J. Miner.*, 1990, v. 2, p. 479—494.
- De Ignacio C., Muñoz M., Sagredo J.** Carbonatites and associated nephelinites from São Vicente, Cape Verde Islands // *Acta Miner. Petrogr. Abstr. Ser.*, Szeged, 2010, v. 6, p. 552—552.
- Downes H., Vaselli O., Seghedi I., Ingram G., Rex D., Coradossi N., Pécskay Z., Pinarelli L.** Geochemistry of late Cretaceous — early Tertiary magmatism in Poiana Ruscă (Romania) // *Acta Vulcanol.*, 1995, v. 7, № 2, p. 209—217.
- Embey-Isztin A., Downes H., James D.E., Upton B.G.J., Dobosi G., Scharbert H.G., Ingram G.A.** The petrogenesis of Pliocene alkaline volcanic rocks from the Pannonian Basin, Eastern Central Europe // *J. Petrol.*, 1993a, v. 34, p. 317—343.
- Embey-Isztin A., Dobosi G., James D.E., Downes H., Poultidis Ch., Scharbert H.G.** A compilation of new major, trace element and isotope geochemical analyses of the young alkali basalts from the Pannonian Basin // *Fragmenta Miner. Paleontol.*, 1993b, v. 16, p. 5—26.
- Eyal M., Becker A., Samoylov V.** Mt. Arod — an Early Cretaceous basanitic volcano with a fossil lava lake // *Isr. J. Earth Sci.*, 1996, v. 45, p. 31—38.
- Ficke B.** Petrologische Untersuchungen an Tertiären basaltischen bis phonolithischen Vulkaniten der Rhön // *Tschermars Miner. Petrogr. Mitt. Ser.*, 1961, v. 3, № 7, p. 337—436.
- Floss C., Nazarov M.A., Taylor L.A.** Ultrarefractory-depleted rare-earth-element patterns in a rhönite-bearing type B1 calcium-aluminum-rich inclusion from Efremovka // *Meteorit. Planet. Sci.*, 2000, v. 35, p. 53—54.
- Fodor R.V., Hanan B.B.** Geochemical evidence for the Trinitade hotspot trace: Columbia seamount ankaramite // *Lithos*, 2000, v. 51, p. 293—304.
- Friedrich L.** The pressure and temperature conditions and timing of glass formation in mantle-derived xenoliths from the Newer Basalts, W. Victoria, Australia. Master's thesis, University of Western Ontario, London, ON, Canada, 2004, 140 p.
- Fuchs L.H.** Occurrence of wollastonite, rhönite, and andradite in the Allende meteorite // *Amer. Miner.*, 1971, v. 56, p. 2053—2068.
- Fuchs L.H.** The mineralogy of a rhönite-bearing calcium aluminium rich inclusion in the Allende meteorite // *Meteoritics*, 1978, v. 13, p. 73—88.
- Gamble J.A., Kyle P.R.** The origin of glass and amphibole in spinel-wehrlite xenoliths from Foster Crater, McMurdo volcanic group, Antarctica // *J. Petrol.*, 1987, v. 28, p. 755—779.
- Garfunkel Z.** Darfur-Levant array of volcanics — a 140 Ma long record of hot spot beneath the African-Arabian continent and its bearing on Africa's absolute motion // *Isr. J. Earth Sci.*, 1991, v. 40, p. 138—150.
- Gil-Crespo P.P., Pesquera A., Torres-Ruiz J.** Rhönite and associate minerals in a basaltic pillow lava from the Basque-Cantabrian Basin (Vizcaya, Spain) // *Acta Miner. Petrogr. Abstr. Ser.*, Szeged, 2010, v. 6, p. 425—425.
- Grapes R., Keller J.** Fe²⁺-dominant rhonite in undersaturated alkaline basaltic rocks, Kaiserstuhl volcanic complex, Upper Rhine Graben, SW Germany // *Eur. J. Miner.*, 2010, v. 22, p. 285—292.
- Grapes R.H., Wysoczanski R.J., Hoskin P.W.O.** Rhönite paragenesis in pyroxenite xenoliths, Mount Sidley volcano, Marie Byrd Land, West Antarctica // *Miner. Mag.*, 2003, v. 67, p. 639—651.
- Grew E.S., Hålenius U., Pasero M., Barbier J.** Recommended nomenclature for the sapphirine and surinamite groups (sapphirine supergroup) // *Miner. Mag.*, 2008, v. 72, p. 839—876.
- Grünhagen H., Seck H.A.** Rhönit aus einem melaphonolith von Puy de Saint-Sandoux (Auvergne) // *Tschermaks Miner. Petrol. Mitt.*, 1972, v. 18, p. 17—38.
- Havette A., Clocchiatti R., Nativel P., Montaggioni L.** Une paragenèse inhabituelle à fassaïte, mélilite et rhönite dans un basalte alcalin contaminé au contact d'un récif coralline (Saint-Lieu, Ile de la Réunion) // *Bull. Miner.*, 1982, v. 105, p. 364—375.
- Heritsch H.** Rhönit-Kristallite in basaltischen Glasern des Steinberges bei Feldbach, Oststeiermark // *Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark*, 1986, v. 116, p. 43—49.
- Heritsch H.** Röntgendaten von Nephelin und Rhönit-Kristalliten aus den basaltischen Glasern des Steinberges bei Feldbach, Oststeiermark // *Mitt. Naturwiss. Ver. Steiermark*, 1987, v. 117, p. 27—34.
- Heritsch H., Ettinger K.** Titanarme Rhönit als Kristallite in basaltischen Glasern des Steinberges bei Feldbach, Steiermark // *Mitt. Abt. Miner. Landesmus, Joanneum*, 1998, v. 62—63, p. 75—78.

- Hurai V., Huraiova M., Konecny P., Thomas R.** Mineral-melt-fluid composition of carbonate-bearing cumulate xenoliths in Tertiary alkali basalts of southern Slovakia // *Miner. Mag.*, 2007, v. 71, p. 63—79.
- Jannot S., Schiano P., Boivin P.** Melt inclusions in scoria and associated mantle xenoliths of Puy Beaunit volcano, Chained ea Puys, Massif Central, France // *Contr. Miner. Petrol.*, 2005, v. 149, p. 600—612.
- Johnston, A.D., Stout, J.H.** Compositional variations of naturally occurring rhoenite // *Amer. Miner.*, 1985, v. 70, p. 1211—1216.
- Jones A.P.** Mafic silicates from the nepheline syenites of Motzfeldt centre, South Greenland // *Miner. Mag.*, 1984, v. 48, p. 1—12.
- Kogarko L.N., Hellebrand E., Ryabchikov I.D.** Trace element partitioning between rhonite and silicate melt in Cape Verde volcanics // *Geochem. Inter.*, 2005, v. 43, № 1, p. 1—7.
- Kóthay K., Pető M., Szabó Cs., Török K., Sharygin V.V., Timina T.Ju., Ntaflos T.** A comprehensive silicate melt inclusion study of olivine phenocrysts from Hegyestű (Bakony-Balaton Highland) and Pécskő (Nógrád-Gömör) alkali basalts, Pannonian basin, Hungary // *Acta Miner. Petrogr. Abstr. Ser.*, Szeged, 2003, v. 2, p. 105—106.
- Kóthay K., Szabó Cs., Török K., Sharygin V.V.** A droplet of the magma: silicate melt inclusions in olivine phenocrysts from alkali basalt of Hegyestű // *Földtani Közlöny*, 2005, v. 135, № 1, p. 31—55 (in Hungarian with English abstract).
- Kóthay K., Sharygin V.V., Török K., Ntaflos Th., Szabó Cs.** New results in study of silicate melt inclusions in Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Pannonian Basin, Western Hungary // Abstract volume of ECROFI XIX, University of Bern, Switzerland, 2007, p. 216—216.
- Kronz A., Zolgharnian Z., Maier P., Keesmann I.** Rhönit $\text{Ca}_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn}, \text{Al}, \text{Ti})_{12}(\text{Al}, \text{Si})_{12}\text{O}_{40}$ in historischen schlacken // *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft*, 1992, № 1, p. 165—165.
- Kunzmann T.** Rhönit: Mineralchemie, Paragenese und Stabilität in alkalibasaltischen Vulkaniten, Ein Beitrag zur Mineralogenese der Rhönit-Änimagnit-Mischkristallgruppe Dissertation Universität München, 1989, 151 p.
- Kunzmann T.** The aenigmatite-rhönite mineral group // *Eur. J. Miner.*, 1999, № 11, p. 743—756.
- Kunzmann T., Spicker G., Huckenholz H.G.** Stabilität von rhönit in natürlichen und synthetischen paragenesen // *Fortsch. Miner.*, 1986, v. 64, Beihelf 1, 92 p.
- Kyle P.R., Price R.C.** Occurrences of rhönite in alkalic lavas of the McMurdo Volcanic Group, Antarctica, and Dunedin Volcano, New Zealand // *Amer. Miner.*, 1975, v. 60, p. 722—725.
- Lacroix A.** Note sur la rhönite du Puy de Barneire à Saint Sandoux // *Bull. Soc. Fr. Miner. Cristallogr.*, 1909, v. 32, p. 325—331.
- Ladenberger A., Ntaflos Th., Michalik M.** Petrogenetic significance of rhoenite in basanite from Pilchowice (SW Poland) // *Miner. Polonica Spec. Papers*, 2006, v. 29, p. 48—52.
- Litasov K., Ohtani E., Simonov V., Taniguchi H.** Melting experiments on the mantle minerals and basaltic melts: possible relation to the melt-xenolith reactions during magma ascent // *Abstr. Vol. 32th IGC*, Rio de Janeiro, Brazil, 2000, CD-edition.
- Lofgren G.E., Huss G.R., Wasserburg G.J.** An experimental study of trace-element partitioning between Ti-Al-clinopyroxene and melt: equilibrium and kinetic effects including sector zoning // *Amer. Miner.*, 2006, v. 91, p. 1596—1606.
- Lopez M., Pompilio M., Rotolo S.G.** Petrology of some amphibole-bearing volcanics of the pre-Ellittico period (102-80 Ka), Mt. Etna // *Periodico di Mineralogia*, 2006, v. 75, № 2—3, p. 151—165.
- Lung B., Steinitz G.** K-Ar dating of Mesozoic magmatic rocks in Israel: a review // *Isr. J. Earth Sci.*, 1989, v. 38, p. 89—103.
- Magonthier M.C., Velde D.** Mineralogy and petrology of some Tertiary leucite-rhönite basanites from central France // *Miner. Mag.*, 1976, v. 40, p. 817—826.
- Mao H.K., Bell P.M.** Crystal-field effects of trivalent titanium in fassaite from the Pueblo de Allende meteorite // *Carnegie Inst. Washington Year Book*, 1974, v. 73, p. 488—492.
- Mason B., Taylor S.R.** Inclusions in the Allende meteorite // *Smiths. Contr. Earth Sci.*, 1982, v. 25, p. 1—30.
- Monkawa A., Mikouchi T., Matsuyama F., Koizumi E., Miyamoto M., Ohsumi K.** Multiple micro-area analyses of rhonite at the opacite rims of kaersutites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2003, v. 67, p. A302—A302.
- Morimoto N., Fabriès J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G.** Nomenclature of pyroxenes // *Amer. Miner.*, 1988, v. 73, p. 1123—1133.
- Nédli Zs., Tóth T.M.** Petrography and mineral chemistry of rhönite in ocelli of alkali basalt from Villány Mts., SW Hungary // *Acta Miner. Petrogr.* Szeged, 2003, v. 44, p. 51—56.

- Nono A., Deruelle B., Demaifee D., Kambou R.** Tchabal-Nganha volcano in Adamawa (Cameroon) — Petrology of a continental alkaline lava series // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1994, v. 60, p. 147—178.
- Olsson H.B.** Rhönite from Skåne (Skania), southern Sweden // *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 1983, v. 105, p. 281—286.
- Piccardo P., Amendola R., Rinasco M.R., Ienco M.G., Pellati G., Stagno E., Pirlo T.** Development of the Ligurian metallurgical activity: the iron in Stura Valley from XIV to VIII century // *Metallurgia Italiana*, 2008, № 7—8, p. 27—36.
- Prestvik T., Torske T., Sundvoll B., Karlsson H.** Petrology of early Tertiary nephelinites off mid-Norway. Additional evidence for an enriched endmember of the ancestral Iceland plume // *Lithos*, 1999, v. 46, p. 317—330.
- Roach I.G.** Mineralogy, textures and *P-T* relationships of a suite xenoliths from the Monaro volcanic province, New South Wales, Australia // *J. Petrol.*, 2004, v. 45, p. 739—758.
- Rondorf A.** Rhönit vom Vulkan Sattel bei Eich/Osteifel // *Aufschluss*, 1989, v. 40, p. 391—401.
- Seghedi I., Vasselli O., Downes H.** Occurrence of rhönite in basanites from Poiana Ruscă Mountains // *Roman. J. Miner.*, 1995, v. 77, p. 41—41.
- Shaw C.S.J., Klügel A.** The pressure and temperature conditions and timing of glass formation in mantle-derived xenoliths from Baarley, West Eifel, Germany: the case for amphibole breakdown, lava infiltration and mineral—melt reaction // *Miner. Petrol.*, 2002, v. 74, p. 163—187.
- Simon S.B., Davis A.M., Grossman L.** Origin of compact type *A* refractory inclusions from CV3 carbonaceous chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, v. 63, p. 1233—1248.
- Simon S.B., Davis A.M., Grossman L.** Formation of orange hibonite, as inferred from some Allende inclusions // *Meteorit. Planet. Sci.*, 2001, v. 36, p. 331—350.
- Soellner J.** Über Rhönit, ein neues ängmatitähnliches Mineral und über das Vorkommen und über die Verbreitung desselben in basaltischen Gesteinen // *Neues Jahr. Miner. Mh.*, 1907, v. 24, p. 475—547.
- Szabó Cs., Harangi Sz., Csontos L.** Review of Neogene and Quaternary volcanism of the Carpathian-Pannonian region // *Tectonophysics*, 1992, v. 208, p. 243—256.
- Tomita T.** On kaersutite from Dogo, Oki Islands, Japan, and its magmatic alteration and resorption // *Shanghai Sci. Inst. J. Sect.*, 1934, v. 2, № 1, p. 99—136.
- Treiman A.H.** Rhonite in Luna 24 pyroxenes: first find from the Moon, and implications for volatiles in planetary magmas // *Amer. Miner.*, 2008, v. 93, p. 488—491.
- Vapnik Ye., Sharygin V.V., Samoïlov V., Yudalevich Z., Eyal M.** The petrogenesis of basic and ultrabasic alkaline rocks of western Makhtesh Ramon, Israel: geochemistry, melt and fluid inclusion study // *Inter. J. Earth Sci.*, 2007, v. 96, № 4, p. 639—661.
- Velde D.** Quelques remarques préliminaires sur les peperites et les nephelinites de la Limagne: découverte de trois nouveaux gisements de rhonite // *Bull. Soc. Geol. de France*, 1971, v. 5, p. 279—280.
- Walenta K.** Zur kristallographie des Rhönits // *Z. Kristallogr.*, 1969, v. 130, p. 214—230.
- Warren P.H., Huber H., Ulf-Moller F.** Alkali-feldspathic material entrained in Fe,S-rich veins in a monomict ureilite // *Meteor. Planet. Sci.*, 2006, v. 41, p. 797—813.
- Wysoczanski R.J.** Lithospheric xenoliths from the Marie Byrd Land volcanic province, west Antarctica. PhD thesis, Victoria University of Wellington, New Zealand, 1993, 475 p.
- Yagi K.** Petrochemical studies on the alkalic rocks of the Morutu District, Sakhalin // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1953, v. 64, p. 769—810.
- Žáček V., Skála R., Dvořák Z.** Rocks and minerals formed by fossil combustion pyrometamorphism in the Neogene brown coal Most Basin, Czech Republic // *Bull. Miner. Petrol. Odd. Nár. Muz. (Praha)*, 2010, v. 18/1, p. 1—32 (in Czech).
- Zajacz Z., Kovács I., Szabó Cs., Halter W., Pettke T.** Evolution of mafic alkaline melts crystallized in the uppermost lithospheric mantle: a melt inclusion study of olivine-clinopyroxenite xenoliths, northern Hungary // *J. Petrol.*, 2007, v. 48, p. 853—883.

Поступила в редакцию
28 февраля 2011 г.