

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИОПСИД-ГРАНАТ-ВЕЗУВИАНОВЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ В РОДИНГИТАХ БАЖЕНОВСКОГО ГИПЕРБАЗИТОВОГО МАССИВА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

В. В. Мурзин, Ю. В. Ерохин

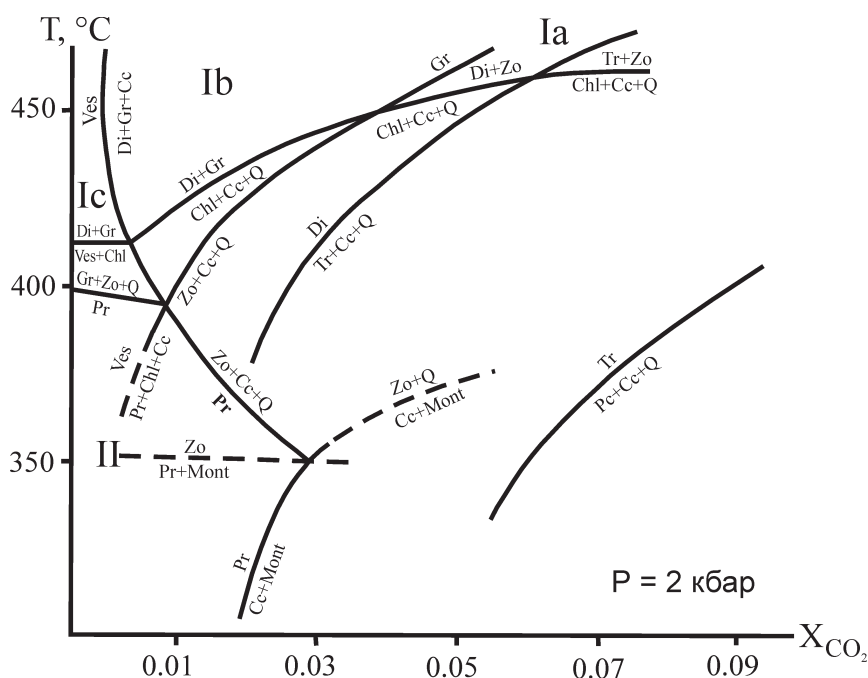
Родингиты Баженовского массива альпинотипных гипербазитов, вскрытые карьерами по добыче хризотил-асбеста, являются классическими образованиями, развитыми по субстрату даек диоритов и габбро среди ультраосновных пород. Аподайковая их природа отчетливо устанавливается по наличию реликтов исходных пород или отдельных минералов.

Наиболее детальными минералогическими исследованиями родингитов Баженовского массива выделены две разорванные во времени стадии минералообразования [1]. С первой стадией связано последовательное формирование ранних родингитовых ассоциаций (цоизитовой, цоизит-диопсидовой и диопсидовой) и развивающихся по ним поздних ассоциаций (гроссуляровой, гроссуляр-диопсидовой и везувиан-диопсид-гроссуляровой). Ранние и поздние ассоциации родингитов рассматриваются при этом как единый во времени генетический процесс, сопровождающийся фрагментарной перекристаллизацией минералов

ранних ассоциаций и заканчивающийся секреторным выполнением трещин и полостей минералами поздних ассоциаций. Минералогически и петрографически ранние родингиты первой стадии отличаются от поздних отсутствием гроссуляра и присутствием реликтов тневых структур и минералов дайкового субстрата.

Вторая стадия формирования родингитов связывается с воздействием на них поздних гидротермальных растворов, характеризующихся сравнительно низкими термодинамическими параметрами. В результате воздействия этих растворов на минералы ранних и поздних родингитов последние становятся неустойчивыми и замещаются цеолитами, пренитом, карбонатами и другими минералами, в том числе щелочными.

Термодинамические условия формирования родингитов Баженовского массива, а также параметры родингитизирующего флюида являются слабо разработанными вопросами их происхождения, трак-



**Рис. 1.** Положение полей устойчивости парагенезисов родингитов I и II стадий Баженовского месторождения на экспериментальной диаграмме температура–мольная доля углекислоты при  $P = 2$  кбар по [7]. Поля парагенезисов Ia – цоизита (Zo) и диопсида (Di), Ib – гроссуляра (Gr) и диопсида, Ic – диопсида, гроссуляра и везувиана (Vez), II – с пренитом (Pr).

тующегося неоднозначно. Наиболее разработанной является модель метаморфо-метасоматической природы родингитов в процессах регионального метаморфизма, затрагивающего как тела гипербазитов, так и вмещающие эти тела породы [1, 8]. В рамках этой модели обозначен эволюционирующий тренд параметров метаморфизма от пумпеллит-актинолитовой ( $T = 390^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 4$  кбар) до цеолитовой ( $T = 150\text{--}220^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2$  кбар) фации. Гипербазиты при метаморфизме превращаются в антигоритовые серпентиниты.

Анализ экспериментальных данных по устойчивости минеральных парагенезисов родингитов (рис. 1) по [4, 7] показывает, что:

1) парагенезисы ранних и поздних родингитов 1 стадии должны формироваться при температурах не менее  $420^{\circ}\text{C}$  (нонвариантная точка устойчивости парагенезиса везувиан + диопсид + гроссуляр + хлорит при  $P_{\text{общ}} = 2$  кбар –  $415 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ), а температура отложения парагенезиса диопсида и волластонита – не менее  $470\text{--}480^{\circ}\text{C}$ . Влияние давления на температуру основных равновесий незначительно. Так, температура достижения равновесия (диопсид + гранат)–(везувиан + хлорит + кварц) составляет  $415 \pm 10^{\circ}\text{C}$  при 2 кбар и  $430^{\circ}\text{C}$  при 4 кбар. Для равновесия (диопсид + гранат + волластонит)–(везувиан + кварц) эти значения составляют 470, 500 и  $520^{\circ}\text{C}$  при давлении, соответственно, 2.4 и 6 кбар;

2) выделенные в [1, 8] ранние и поздние ассоциации родингитов (ранние и поздние родингиты) отражают режим углекислотности процесса преобразования пород даек – парагенезисы с цоизитом образуются при  $X_{\text{CO}_2} = 0.05\text{--}0.1$ , гранат-диопсидовые при  $X_{\text{CO}_2} < 0.05$ , а с везувианом при  $X_{\text{CO}_2} < 0.01$ ;

3) парагенезисы с пренимом образуются при пониженных температуре и мольной доле углекислоты –  $T < 400^{\circ}\text{C}$  и  $X_{\text{CO}_2} < 0.03$ .

Исследование включений минералообразующей среды в минералах родингитов, которое обычно используется для восстановления термодинамических параметров минералообразования, на Баженовском массиве проводилось в очень ограниченном объеме [1, 6]. В цитируемых работах приводятся значения температуры гомогенизации ( $T_g$ ) первичных включений в кристаллах диопсида из полостей –  $180\text{--}220^{\circ}\text{C}$  и везувиана –  $210\text{--}230^{\circ}\text{C}$ , которые существенно ниже температуры образования парагенезисов с этими минералами, оцененными по экспериментальным данным. Пониженные значения  $T_g$  включений из наиболее поздних генераций минералов в полостях при этом отождествляются с температурой минералообразования ( $T_m$ ) и делается заключение о понижении температуры в процессе эволюции родингитовых пород [1].

Нами изучались первичные включения минералообразующей среды в минералах родингитов I стадии в образцах из карьера Центральный (табл. 1). Исследование газово-жидких включений осуществлялось на термокриостатике THMSG-600 фирмы “Linkam” (Англия), позволяющем производить измерения температур фазовых переходов внутри включений в диапазоне температур  $-196\text{--}600^{\circ}\text{C}$ . Тип солевой системы растворов определялась по температурам эвтектик ( $T_{\text{эвт}}$ ) [2]. Концентрация солей во включениях оценивалась по температурам плавления льда ( $T_{\text{пл}}$ ) для солевой системы  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  [9].

Анализ последовательности отложения минералов показал наличие, по меньшей мере, двух периодов деформаций, подчеркнутых присутствием гнездовых и прожилковых агрегатов диопсида, граната и везувиана нескольких генераций.

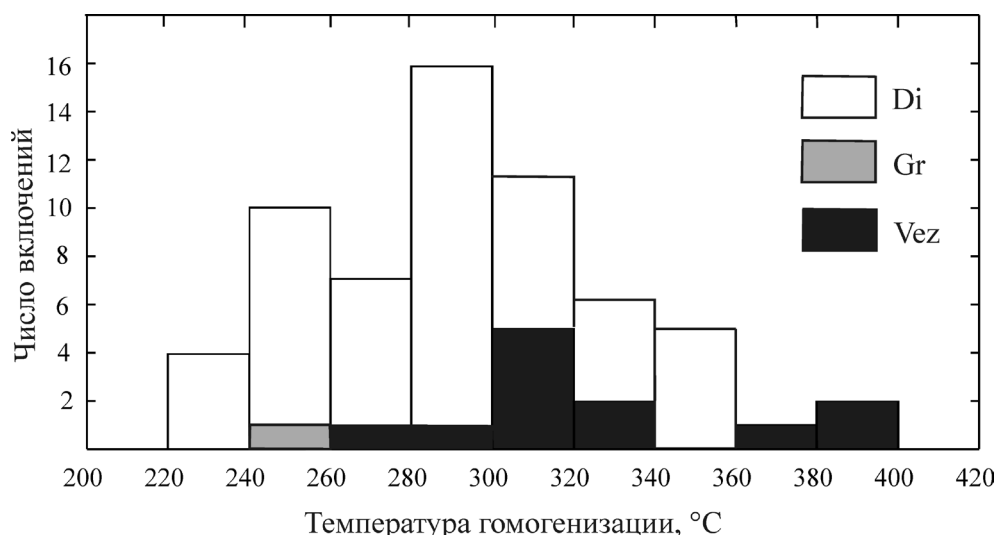
**Обр. 489/79** представлен однородной буровато-серой гроссуляр-диопсидовой породой (диопсид 1), рассеянной прожилком белого диопсида 2 с блоками реликтов основной массы породы. В прожилке присутствуют также тонкие зонки (до 2–3 мм) прозрачного диопсида 3, в котором приурочены щелевидные полости, выполненные кристаллами диопсида 3 и “розетками” хлорита.

Газово-жидкие включения в гроссуляре и диопсиде 1 родингита чрезвычайно мелкие (не более 5–7 мкм), уплощенные, содержат водную фазу и газовый пузырек (30–40%). Для наиболее крупных из них (в диопсиде 1) зафиксированы значения температуры гомогенизации в диапазоне  $330\text{--}360^{\circ}\text{C}$ . Другие точки фазовых переходов во включениях не зафиксированы.

**Таблица 1.** Температуры фазовых переходов и концентрация солей (мас. % экв. NaCl) в первичных газово-жидких включениях из минералов родингитов

№ обр.	Минерал, генерация	$T_{\text{гом.}}$ , °C	$T_{\text{эвт}}$ , °C	$T_{\text{пл}}$ , °C	$C_{\text{солей}}$
489/79	Диопсид 1	330–360 (8)			
	Диопсид 2	250–340 (18)	–33÷–34 (3)	–2.5÷–4.5 (13)	4.2÷–7.2
		250–320 (5)		–8.5÷–13.5 (5)	12.3÷–17.3
226/76	Диопсид 3	250–283 (5)		–3.5 (2)	5.7
	Диопсид 2	250–310 (4)			
51Бж	Диопсид 1	220–280 (9)		–2.4÷–2.6 (9)	4.0÷–4.3
	Везувиан 1	371–392 (3)	–36÷–38.2 (3)	–2.6 (2)	4.3
50 Бж	Везувиан 1	270–327 (5)			
	Везувиан 1	300–329 (4)			

Примечание. В скобках указано количество определений.



**Рис. 2.** Гистограмма распределения температуры гомогенизации включений минералообразующей среды из различных минералов (Di – диопсид, Gr – гранат, Vez – везувиан).

В основной массе белого диопсида 2 из прожилка включения значительно крупнее, чем в минералах родингита, и достигают размеров 10–15 мкм, реже до 50 мкм. Они имеют форму призматических отрицательных кристаллов, вытянутых вдоль зон роста индивидов. По фазовому составу включения в диопсиде 2 двухфазовые (жидкость + 20–30% газовый пузырек). Они гомогенизируются в широком интервале температуры 250–340°C, однако при хорошо выраженном максимуме 280–300°C.

Солевой состав включений в диопсиде 2 неоднороден. Содержимое большей части включений замерзает при  $-43\div-48^\circ\text{C}$ , имеет температуру эвтектики  $-33\div-34^\circ\text{C}$ , отвечающей типу солевой системы  $\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  [2] и низкую концентрацию солей 4.2–7.2 мас. % экв. NaCl. Меньшее количество включений имеет более низкую температуру замерзания ( $-49\div-57^\circ\text{C}$ ) и значительно более высокую концентрацию солей 12.3–17.3 мас. % экв. NaCl.

Газово-жидкие включения в прозрачных кристаллах диопсида 3 сходны по размерам, морфологии и фазовому составу с таковыми в диопсиде 2. Содержимое их гомогенизируется в узком интервале температуры 250–283°C. Концентрация солей в них составляет 5.7 мас. % экв. NaCl.

**Обр. 226/76** представлен серой мелкозернистой диопсидовой массой (диопсид 1), рассеянной прожилками (мощность до 3–5 мм), сложенными прозрачным диопсидом 2 и волластонитом. Игольчатые включения волластонита пронизывают кристаллы диопсида 2 (“волосатик”). Изучены двухфазовые включения в диопсиде 2, имеющие форму отрицательных кристаллов и размеры 4–10 мкм. Установлено, что включения гомогенизируются при 250–310°C.

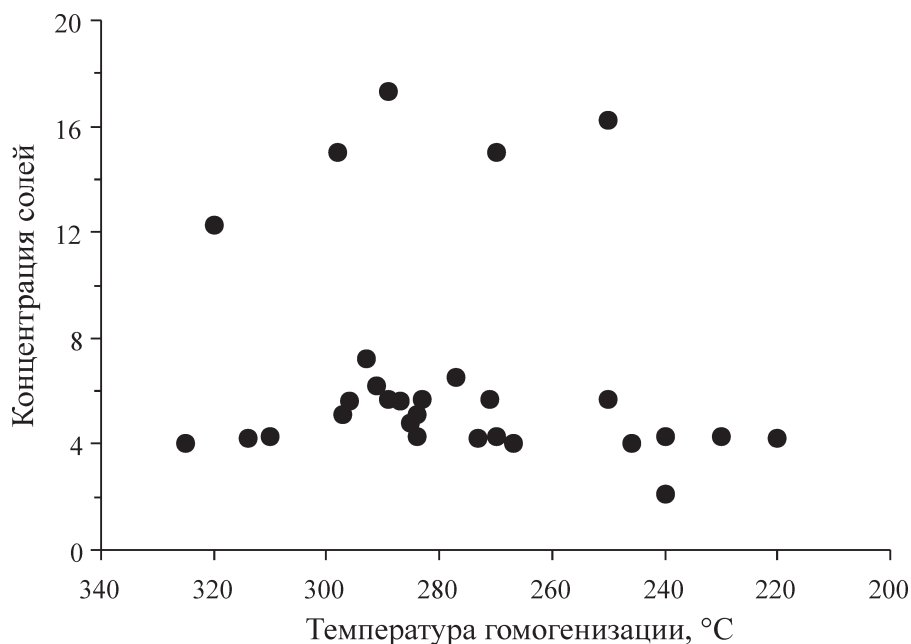
**Обр. 51 Бж** сложен массой белого диопсида 1 с блоками тонкозернистого гроссуляра 1. В родингите присутствуют крупные полости (до 5 см), вы-

полненные агрегатами крупных кристаллов темно-зеленого везувиана 1. Порода рассекается сетью параллельных тонких (1–2 мм) открытых трещин отрыва (перпендикулярных контакту тела родингитов с серпентинитом), стенки которых инкрустированы мелкими кристаллами минералов наиболее поздней 2 генерации – бурого граната, прозрачного бесцветного диопсида, игольчатого золотисто-зеленого везувиана.

Включения в диопсиде двухфазовые (жидкость + 20–25% газ) и, как в других образцах, преимущественно мелкие (менее 10 мкм), и лишь размеры отдельных из них достигают 20–30 мкм. Они гомогенизируются при 220–280°C. Концентрация солей в жидкой фазе низкая – 4.0–4.3 мас. % экв. NaCl.

Включения в везувиане редки и принадлежат к первичным, не обнаруживая приуроченности к микротрещинам и неравномерно рассеяны в массе зерен этого минерала. Размер их обычно менее 5 мкм, наиболее крупные достигают 20 мкм. По морфологии, степени наполнения и температуре гомогенизации включения в везувиане двух типов: 1) плоские, угловатые с объемом газового пузырька 35–40% и температурой гомогенизации 371–392°C и 2) овальные, удлинённые с объемом газового пузырька 25–30% и  $T_i=270\text{--}327^\circ\text{C}$ . Для включений первого типа установлена температура плавления эвтектики, составившая  $-36\div-38.2^\circ\text{C}$ , что отвечает наиболее вероятному типу солевой системы  $\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  с примесью  $\text{CaCl}_2$ , возможно  $\text{FeCl}_3$ . Для двух включений второго типа определена концентрация солей, составившая 4.3 мас. % экв. NaCl.

**Обр. 50 Бж.** Зернистые агрегаты темно-зеленого везувиана из центральной части дайки родингита. Включения минералообразующей среды овальной формы полностью соответствуют включениям второго типа в обр. 51 Бж и гомогенизируются при 300–329°C.



**Рис. 3.** Зависимость концентрации солей во включениях минералообразующей среды из различных минералов (мас. % NaCl) от температуры их гомогенизации (°C).

Значения  $T_r$  газовой-жидких включений в минералах различных генераций диопсида, гроссуляра и везувиана варьируют, таким образом, в широком диапазоне от 220 до 400°C (рис. 2). Тем не менее, эти значения существенно ниже оценок температуры образования ( $T_m$ ) парагенезиса диопсида, гроссуляра и везувиана для экспериментальной системы (см. рис. 1). Поскольку различие между значениями  $T_r$  и  $T_m$  отражает величину давления при минералообразовании [3], кажется логичным заключить, что отложение указанных минералов происходило при температуре выше 400°C, а появление нескольких их генераций обусловлено нестабильностью режима давления. Нестабильность этого режима обусловлена проявлением внутрискладчатых деформаций, а величина перепадов давления достигает 2 кбар (поправка к  $T_r$  при невысокой солёности гидротермального флюида составляет 80–90°C/1 кбар). Исходя из приведенных соображений, хорошо объясняются наблюдающиеся более высокие значения  $T_r$  включений из поздних минералов по сравнению с таковыми из более ранних минералов.

Концентрация солей во включениях минералообразующей среды для абсолютного большинства изученных включений достаточно выдержанна (4–6 мас. % экв. NaCl) и не обнаруживает корреляции с температурой гомогенизации (рис. 3). Часть включений из диопсида 2 генерации (обр. 489/79), напротив, содержит раствор значительно более высокой солёности – 12–17 мас. % экв. NaCl с тенденцией ее понижения с увеличением температуры гомогенизации. Возможно, что присутствие включений с повышенной концентрацией солей

отражают привнос в гидротермальную систему растворов магматогенного происхождения в период деформаций.

Ранее нами было показано, что в условиях деформаций в образованные при них открытые трещины имел место привнос углекислоты и восстановленных газов, прежде всего водорода, как наиболее легкого и подвижного газового компонента из вмещающих серпентинитов [5]. Этот привнос отчетливо фиксируется во включениях из везувиана, выполняющего полости в центральных частях тел родингита. При этом происходит также некоторое усложнение солевого состава изначально хлоридно-магнезиального родингитизирующего флюида за счет появления примесных  $CaCl_2$  или  $FeCl_3$  (см. обр. 51 Бж в табл. 1).

Таким образом, формирование парагенезисов диопсида, гроссуляра, везувиана в родингитах Баженовского массива, вероятно, происходило при повышенной температуре – более 420°C в условиях значительного перепада давления, связанного с проявлением деформаций. Родингитизирующий флюид имел магнезиально-хлоридный состав, усложняющийся при привносе в гидротермальную систему в периоды деформаций предположительно магматогенных растворов повышенной солёности, а также газовых компонентов из вмещающих серпентинитов.

*Исследования проведены по Программе № 2 фундаментальных исследований ОНЗ РАН на 2009–2011 гг. “Геолого-генетические модели и возраст благороднометалльного оруднения в габбро-гипербазитовых комплексах”, финансируемой УрО РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А.А. Минералогия родингитов Баженовского гипербазитового массива. СПб: Наука, 2003. 128 с.
2. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газожидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
3. Клевцов П.В., Леммлейн Г.Г. Поправка на давление к температурам гомогенизации водных растворов // Докл. АН СССР. 1959. Т. 128. № 6. С. 1250–1253.
4. Лихойдов Г.Г., Плюснина Л.П. Родингиты Северного Сахалина и физико-химические условия их формирования // Тихоокеанская геология. 1992. № 2. С. 53–64.
5. Мурзин В.В., Шанина С.Н. Газовый состав флюида при формировании родингитов // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 182–187.
6. Павловская А.Н., Анастасенко Г.Ф., Овчинников Н.О. Химический состав и температурные условия образования везувиана Баженовского месторождения // Материалы Уральской летней минералогической школы-98: Уральская летняя минералогическая школа. Екатеринбург: УГГГА, 1998. С. 119–120.
7. Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г., Зарайский Г.П. Физико-химические условия формирования родингитов по экспериментальным данным // Петрология. 1993. Т.1. № 5. С. 557–568.
8. Спиридонов Э.М., Барсукова Н.С., Антонов А.А. Минеральные фации метаморфитов Баженовского месторождения // Минералогия родингитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Екатеринбург: УГГГА, 1996. С. 25–44.
9. Bodnar R. J., Vityk M. O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Edited by: Benedetto De Vivo and Maria Luce Frezzotti. Pontignano-Siena. 1994. P. 117–130.