

УДК 549+552

ОБРАЗОВАНИЕ РИНГВУДИТА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ДВУСЛЮДЯНО-КВАРЦЕВОГО СЛАНЦА (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ)

© 2003 г. Е. А. Козлов, Л. В. Сазонова, В. И. Фельдман,
Н. А. Дубровинская, Л. С. Дубровинский

Представлено академиком А.А. Маракушевым 27.12.2002 г.

Поступило 30.12.2002 г.

Рингвудит – плотная модификация оливина (гамма-оливин) синтезирован при статических нагрузках (в интервале 6–24 ГПа в зависимости от состава и температуры перехода оливин–рингвудит) [1]. В условиях ударно-волнового нагружения рингвудит получен впервые в ходе экспериментального изучения ударного метаморфизма пород, проводимого совместно РФЯЦ–ВНИИТФ (г. Снежинск) и кафедрой петрологии геологического факультета МГУ.

Рингвудит получен при обжати двуслюдяно-кварцевого сланца нижнепротерозойского возраста (Карелия, Россия). Эксперимент проводился по методике, разработанной во Всероссийском институте технической физики–Российского федерального ядерного центра [2]. Для этого из породы приготовлен шар диаметром 49 мм, который был заварен в вакууме в герметический сферический чехол из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и подвергнут нагружению сферической сходящейся ударной волной. При этом ударные напряжения на его внешней поверхности составили около 30 ГПа, а на расстоянии 1 мм от центра шара не менее 300 ГПа. Постановка взрывного эксперимента обеспечила сохранность образца, процесс его нагружения и разгрузки происходил в герметично закрытой системе. Охлаждение шара после эксперимента производилось в режиме закалки с начальной скоростью охлаждения 10^8 – 10^9 °С/с, что обеспечило сохранение высокотемпературных и высокобарических минеральных фаз, возникших под действием ударных нагрузок. После

охлаждения образец был распилен по диаметральной плоскости и изучался на сканирующем электронном микроскопе “CamScan-4DV” с энергодисперсионным анализатором Link AN10000 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда на образце $(1-3) \cdot 10^{-9}$ А и ширине электронного пучка около 2 мкм.

Как показано ранее, и в природе, и в эксперименте под действием ударных нагрузок железомagneзиальные силикаты и алюмосиликаты (за исключением кордиерита) испытывают ударно-термическое разложение, превращаясь в агрегат новообразованных фаз [3–5 и др.]. В описываемом эксперименте при ударно-термическом разложении биотита образовались рингвудит и аморфизованный остаток (табл. 1, рис. 1), в котором на растровом электронном микроскопе иногда наблюдаются выделения минерала, проанализировать

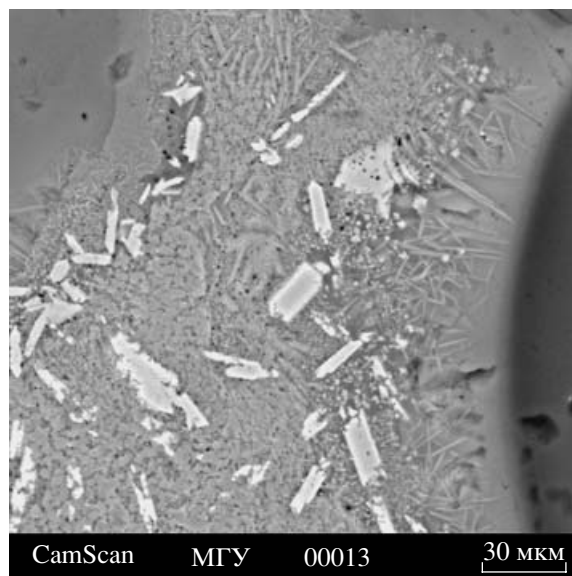


Рис. 1. Вытянутые зерна рингвудита (белое) в аморфной апобиотитовой фазе (серое).

Российский федеральный ядерный центр–Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики,
Снежинск Челябинской обл.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Баварский геологический институт,
Байройт, Германия

Таблица 1. Химические составы неизмененного биотита и фаз ударно-термических агрегатов, развивающихся по биотиту

Компонент	Bi	Рингвудит					Аморфная апобиотитовая фаза								
	ан. J134	ан. 11	ан. 2\36	ан. 17	ан. 75	ан. 2\32	ан. 2\31	ан. 2\48	ан. 2\50	ан. 2\51	ан. 54	ан. 58	ан. 60	ан. 76	
SiO ₂	36.99	32.84	32.41	30.54	29.13	52.17	43.08	43.61	55.78	44.64	40.56	41.81	43.81	34.06	
TiO ₂	2.01	0.43	0.91	0.27	0.50	1.07	2.66	1.77	0.72	1.67	1.90	1.94	2.87	1.43	
Al ₂ O ₃	21.12	8.53	0.94	8.92	14.17	20.98	25.96	22.82	23.28	21.74	22.76	22.42	27.55	24.20	
FeO	22.04	28.78	47.54	35.54	34.49	12.45	15.34	24.75	11.05	16.61	20.24	18.41	12.90	24.11	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.26	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	
MgO	8.46	28.97	17.44	24.29	21.12	3.86	3.74	3.56	0.50	6.64	7.79	6.66	3.15	9.28	
CaO	0.00	0.00	0.14	0.00	0.12	1.76	1.20	2.18	2.96	1.57	0.90	0.73	0.59	0.59	
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	1.59	0.76	2.77	1.54	1.97	2.31	2.58	1.47	
K ₂ O	9.06	0.12	0.11	0.09	0.31	5.59	4.00	0.23	2.77	4.46	2.89	4.55	5.16	2.63	
<i>f</i>	0.72	0.50	0.73	0.59	0.62	0.76	0.80	0.87	0.96	0.71	0.72	0.73	0.80	0.72	

Примечания. Bi – исходный биотит; $f = \text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ – железистость фазы.

который не удается (из-за крайне мелких – меньше микрона в поперечнике – размеров). Косвенные признаки (качественный анализ, форма выделений) позволяют предположить, что этот минерал может быть шпинелью герцинитового типа (рис. 1).

Рингвудит образует вытянутые и таблитчатые кристаллы (отношение длины к ширине достига-

ет 3, при длине до 20 мкм). На концах кристаллов иногда появляются признаки футляровидного строения (рис. 1). Железистость рингвудита колеблется от 0.50 до 0.73. Примечательно постоянное наличие в нем глинозема (от 0.94 до 14, 17%).

Рамановские спектры рингвудита были сняты на LabRam-спектрометре (Баварский геологичес-

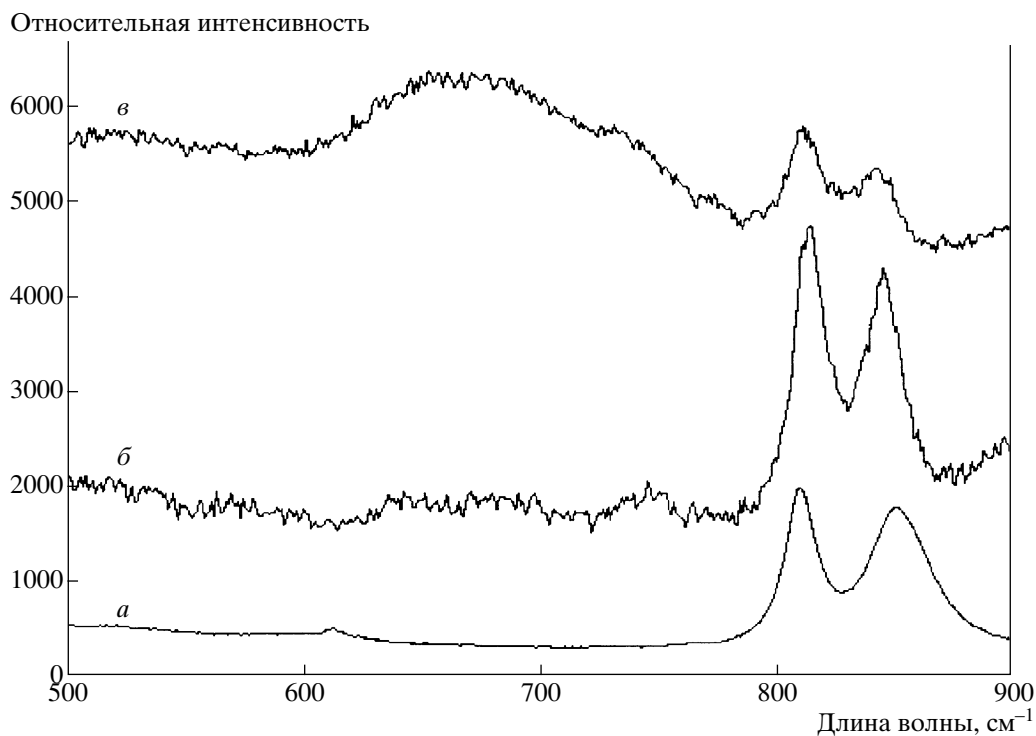


Рис. 2. Рамановские спектры в интервале 500–900 см⁻¹. а – синтетический рингвудит; б, в – спектры рингвудита, полученного в условиях ударно-волнового нагружения двуслюдяно-кварцевого сланца (б – кристалл точки 11, в – кристалл точки 17).

кий институт (Bayerisches Geoinstitut, Bayreuth)) с использованием 632 нм лазера, 50-кратного объектива и конфокальной щели 1.1 мм. При этом изучалась область около 7 мкм в фокусной плоскости (с глубиной проникновения внутрь образца <10 мкм) при разрешении 2 см⁻¹. На рис. 2 приведены три рамановских спектра для интервала 500–900 см⁻¹: для синтетического рингвудита и двух кристаллов из изучаемого образца. Использованный в качестве эталона рингвудит был синтезирован в Баварском геологическом институте на 1200-тонном прессе при давлении 21 ± 0.5 ГПа, температуре 1300 ± 50°C и выдержке 4 ч из образца природного оливина. На рис. 2 хорошо видны типичные для рингвудита диагностические дублеты в области 780–900 см⁻¹.

Параметры образования рингвудита в описываемом эксперименте определены на основании рассчитанных во ВНИИТФ кривых изменения давления (P , ГПа) и удельной внутренней энергии (E , кДж/г) в зависимости от расстояния по радиусу шара от центра к внешней поверхности (R , мм). Температура кристаллизации рингвудита рассчитывалась по формуле $T = E/C_p$, где E – удельная внутренняя энергия, кДж/г; C_p – теплоемкость кварцита (1.046 Дж/г · К по [6]). Для двух кристаллов оливина (для которых сняты рамановские спектры) были получены параметры 22 ГПа и 1065°C (для кристалла точки 11) и 28 ГПа и 1256°C (для кристалла точки 17). Обращает на себя внимание тот факт, что при статическом нагружении рингвудит аналогичного состава появляется при нагрузках в 2–3 раза меньше [1], чем в условиях ударно-волнового эксперимента. На подобные превышения нагрузок для высокобарических полиморфных модификаций различных веществ (SiO₂, C, MgSiO₃) и в природе, и в эксперименте неоднократно обращалось внимание и ранее [3, 7, 8 и др.].

В земных породах рингвудит обнаружен пока только в одном случае в импактных пемзах Эстремадуры (Extremadura), Испания [9], где его скелетные кристаллы росли в быстро остывающем расплаве. Описанный в данной работе рингвудит образовался на твердофазной стадии преобразования пород. В природе выявление такого рингвудита возможно только в выбросах из астроблем,

так как только здесь можно рассчитывать найти закаленные высокобарические и высокотемпературные минеральные фазы в обломках пород, испытывавших высокопараметрический ударный метаморфизм, но не прошедших стадии плавления.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 00–05–64102).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultrahigh-Pressure Mineralogy: Physics and Chemistry of the Earth's Deep Interior / R.J. Hemley Ed. // *Revs. in Miner.* 1988. V. 37. 637 p.
2. Козлов Е.А. Исследования металлов, минералов и метеоритов в сферических ударно-изэнтропических экспериментах: Полиморфные и фазовые превращения, откольные и сдвиговые разрушения, физико-химические превращения. Обзор. V Забабахинские научные чтения. 21–25 сентября 1998 г. Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ, 2000. Т. 1. С. 579–590. <http://delta.ch70.chel.su/ru/vniitf/events/1998/zst/>
3. Фельдман В.И. Петрология импактитов. М.: Издво МГУ, 1990. 299 с.
4. Козлов Е.А., Сазонова Л.В., Коваленко Г.В., Жугин Ю.Н. Фазовые превращения энстатита в сферических ударных волнах. Препр. РФЯЦ–ВНИИТФ № 138. Снежинск, 1998. 42 с. <http://www.ch70.chel.su/ru/vniitf/publish/>
5. Козлов Е.А., Фельдман В.И., Сазонова Л.В. Некоторые факторы, контролирующие преобразование минералов в горных породах при ударно-волновом нагружении. Тезисы Российской конференции “Фазовые преобразования при высоких давлениях”. 20–22 мая 2002 г. Черноголовка, 2002. С. У13.
6. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых / Под ред. Н.Б. Дортмана. М.: Недра, 1984. 455 с.
7. Stöffler D. // *J. Geoph. Res.* 1971. V. 76. № 12. P. 5474–5482.
8. Вальтер А.А., Еременко Г.К., Квасница В.Н., Полканов Ю.А. Ударно-метаморфогенные минералы углерода. Киев: Наук. думка, 1992. 171 с.
9. Glazovskaya L.I., Diaz-Martinez E., Fel'dman V.I., Martinez-Frias J. Microprobe Study of Ringwoodite in Pumice from Extremadura (W. Spain). VIII Workshop EST-Impact Program. Program, Abstract and Field Trip Book. Mora, 2002. P. 23.