

## СЕКРЕЦИОННЫЙ РОСТ ЖАДЕИТА ИЗ РАСПЛАВА В УДАРНЫХ ЖИЛАХ H5/6 ХОНДРИТА НОВОСИБИРСК

И.С. Бажан<sup>1</sup>, С. Озава<sup>2</sup>, М. Мияхара<sup>3</sup>, Э. Отани<sup>1,2</sup>, К.Д. Литасов<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 980-8578, Sendai, Japan

<sup>3</sup> Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, 739-8526, Higashi-Hiroshima, Japan

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

При исследовании обыкновенного хондрита (метеорита) Новосибирск (тип H5/6) были обнаружены признаки ударного метаморфизма в виде темных жил, пересекающих основную массу хондрита. В обломках основной массы хондрита в ударных жилах найдены участки плагиоклазового состава ( $Ab_{78}An_{14}Or_7$ ) с жадеитом с необычной радиально-концентрической (секреционной) микротекстурой. Образование жадеита происходило в ходе ударного события из расплава плагиоклазового состава в условиях высокого давления и высокой температуры. Процесс кристаллизации сопровождался Na-K дифференциацией между областью, содержащей жадеит, и остаточным расплавом. Оценка *PT*-условий образования жадеита в метеорите Новосибирск составляет 3—14 ГПа и 1400—2150 °С. Кристаллизация жадеита, Na-K дифференциация и оценка *PT*-условий образования жадеита в хондрите Новосибирск схожи с LL5 хондритом Челябинск. Секреционный рост жадеита из расплава и его сосуществование со стеклом, по-видимому, указывают на высокую скорость остывания ударных жил на регрессивной стадии ударного метаморфизма.

*H5/6 хондрит Новосибирск, жадеит, плагиоклазовый расплав, ударный метаморфизм, секреторный рост.*

### «SPHERULITE-LIKE» JADEITE GROWTH IN SHOCK-MELT VEINS OF THE NOVOSIBIRSK H5/6 CHONDRITE

I.S. Bazhan, S. Ozawa, M. Miyahara, E. Ohtani, and K.D. Litasov

The Novosibirsk H5/6 ordinary chondrite has signs of shock metamorphism, such as dark shock-melt veins (SMVs) crossing the chondrite host rock. The plagioclase composition grains ( $Ab_{78}An_{14}Or_7$ ) with jadeite were found in the host-rock fragments inside the SMVs. Jadeite has an unusual radial-concentric spherulite-like microtexture. The spherulite-like jadeite formed from the molten plagioclase grain under high-pressure and high-temperature conditions during an impact event. The crystallization was accompanied by Na-K differentiation between coexisting jadeite and residual melt. The *PT*-conditions of jadeite formation were estimated to be 3–14 GPa and 1400–2150 °C. Jadeite crystallization, Na–K differentiation, and the pressure–temperature estimates of jadeite formation in the Novosibirsk chondrite are very close to those in the Chelyabinsk LL5 chondrite. The spherulite-like microtexture and jadeite–glass coexistence, most likely, point to a high cooling rate of the SMVs at the pressure release stage of the metamorphic process.

*Novosibirsk H5/6 chondrite, jadeite, plagioclase melt, shock metamorphism, spherulite-like microtexture*

## ВВЕДЕНИЕ

Жадеит является одним из наиболее распространенных минералов высокого давления в метаморфических и импактных породах, а также в ударно-метаморфизованных обыкновенных хондритах. Жадеит ударного происхождения в земных условиях был найден в импактных породах кратера Нордлингер-Рис (Германия) [James, 1969]. Первое описание жадеита, имеющего внеземное происхождение, было сделано в H6 хондрите Yamato 75100, где он образовался за счет ударного метаморфизма альбитового полевого шпата [Kimura et al., 2000]. В дальнейшем жадеит был найден в ударно-расплавленных жилах некоторых хондритовых метеоритов [Kimura et al., 2001; Ohtani et al., 2004; Zhang et al., 2006; Ozawa et al., 2009, 2014; Miyahara et al., 2011, 2013; Acosta-Maeda et al., 2013]. Статические эксперименты при высоких давлениях и температурах показывают, что образование жадеита происходит в результате реакции диссоциации альбита: альбит = жадеит + SiO<sub>2</sub>, при давлении > 3 ГПа и температуре > 1000 °С [Birch, LeComte, 1960; Bell, Roseboom Jr, 1969; Liu, 1978; Holland, 1980].

Несмотря на то, что, согласно стехиометрии полевого шпата, образование жадеита и кремнезема должно происходить одновременно, только жадеит был обнаружен в исходных зернах альбитового полевого шпата (плагиоклаза) в ударных жилах хондритов. Отсутствие кремнезема при образовании жадеита неоднократно обсуждалось в работах [James, 1969; Kimura et al., 2000; Zhang et al., 2006; Ozawa et al., 2009, 2014; Kubo et al., 2010, Miyahara et al., 2013].

Кроме этого, жадеит в природных образцах ударных хондритов имеет различную микротекстуру. Ранее были найдены точечные («particle-like»), нитевидные («stringer-like») и игольчатые («needle-like») выделения [Ozawa et al., 2009, 2014]. Разнообразие микротекстуры предполагает индивидуальную *PT*-историю при образовании каждой разновидности. Давление и температура, возникающие при столкновении астероидов, зависят от их размеров, плотности и относительной скорости. Различия в этих параметрах также могут влиять на образование и на разнообразие форм проявления минералов высокого давления, в том числе и жадеита.

Метеорит Новосибирск является обыкновенным хондритом типа H5/6, который был найден на восточной окраине г. Новосибирск в 1978 г. Первое детальное описание метеорита Новосибирск было выполнено в работе [Петаев и др., 1990] и включало петрологическое, минералогическое и химическое исследование метеорита. Авторами были представлены доказательства ударного метаморфизма, такие как наличие расплавленных карманов, развитая сеть ударных прожилков, сильная трещиноватость минералов, волнистое и блоковое погасание оливина и ортопироксена, плавление троилита и Fe—Ni железа, наличие каймы коричневого стекла вокруг некоторых силикатных зерен, однако при столь явных проявлениях сильного ударного метаморфизма, маскелинита найдено не было. На основании выделенных признаков авторы оценили ударное давление в метеорите Новосибирск по схеме Додде и Ярошевича в 40—45 ГПа. Авторы определили константу равновесия для обменной реакции Fe—Cr между хромитом и троилитом и оценили пиковую температуру ударного воздействия для метеорита Новосибирск в 1327 °С. Минералы высокого давления в работе [Петаев и др., 1990] описаны не были.

Статистически распространенность минералов высокого давления в H- и LL-хондритах значительно ниже, чем в L-хондритах [Kimura et al., 2001; Xie et al., 2011]. Целью настоящей работы являлось обнаружение минералов высокого давления, связанных с процессами ударного метаморфизма в H5/6 хондрите Новосибирск. В результате исследований удалось обнаружить минерал высокого давления жадеит в ударно-расплавленных жилах и рассмотреть процесс его образования.

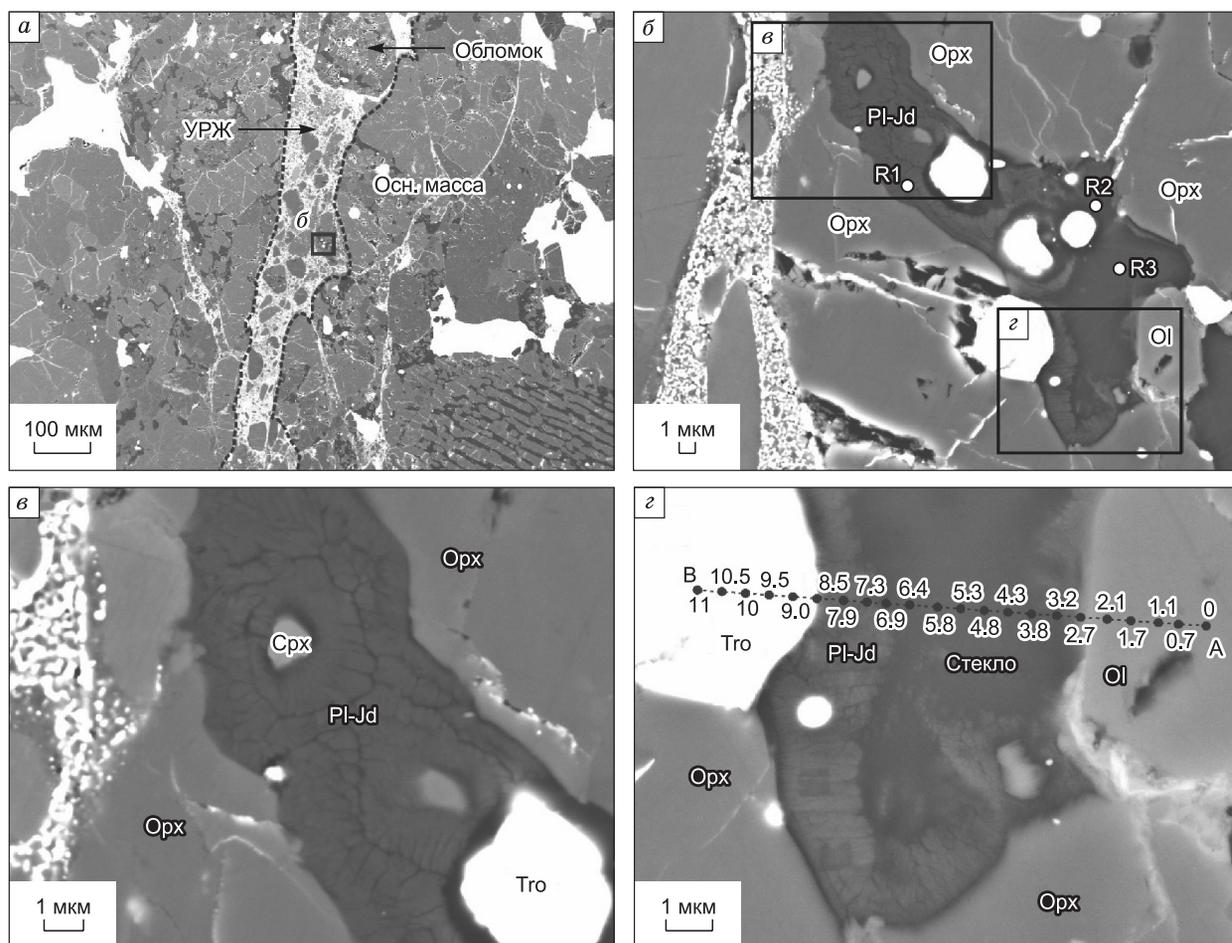
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовался метеорит Новосибирск из коллекции Центрального сибирского геологического музея (г. Новосибирск). Для исследования подготовили три образца метеорита, которые были помещены в шашки с эпоксидной смолой и отполированы. Петрологические наблюдения проводились с помощью оптического микроскопа, детальное исследование микротекстур — с использованием эмиссионной сканирующей электронной микроскопии на приборе JEOL JSM-7001F (Field-Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM). Условия съемки — ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 1.4 нА. Химический состав минералов определялся с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS) в сочетании с FE-SEM, время накопления сигнала спектра составляло 30—60 с. При определении химического состава фаз плагиоклазового состава использовался растровый режим, позволяющий снизить деструктивное воздействие электронного пучка на объект исследования. В качестве стандартов использовались простые оксиды —  $Al_2O_3$  (на Al), MgO (на Mg); силикаты — волластонит  $CaSiO_3$  (на Si, Ca), альбит  $NaAlSi_3O_8$  (на Na), ортоклаз  $KAlSi_3O_8$  (на K); металлы —  $Cr^0$ ,  $Ti^0$ ,  $Fe^0$ ,  $Mn^0$ , а также GaP (на P), пирит  $FeS_2$  (на Fe, S). Расчет химических анализов проводился с использованием программы «Oxford Instruments INCA 5.05». При расчете содержания оксидов нормировка суммы оксидов к 100 % не проводилась.

Определение фаз выполнялось методом микрорамановской спектроскопии на приборе JASCO NRS-5100 с длиной волны 532 нм. Мощность лазера составляла 6.7 мВ, диаметр лазерного пучка 1—2 мкм, сигнал накапливался дважды по 60—120 с в каждой точке в диапазоне 140—1206  $cm^{-1}$ , калибровка рамановского смещения осуществлялась относительно стандарта пика кремния при  $520.5 \pm 0.5 cm^{-1}$ . Все измерения делались в Университете Тохоку (Сендай, Япония).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Хондрит Новосибирск имеет типичную хондритовую, брекчиевую текстуру, пронизанную черными ударно-расплавленными жилами (рис. 1, а) шириной от 10 до 300 мкм. Главные породообразующие минералы в первичном хондритовом парагенезисе (основной массе) представлены оливином ( $Fe_{81}$ ), ортопироксеном ( $En_{82}Fs_{17}Wo_1$ ), клинопироксеном ( $En_{49}Fs_6Wo_{45}$ ) и плагиоклазом ( $Ab_{82}An_{14}Or_4$ ) (табл. 1, 2), камаситом (6.1—9.1 мас.% Ni), тенитом (33.2—39.4 мас.% Ni) и троилитом (36.2—



**Рис. 1. Микрофотографии метеорита Новосибирск в обратнорассеянных электронах.**

(а) УРЖ — ударно-расплавленная жила с жадеитом; (б) увеличенная область на рисунке (а) с Pl-Jd и стеклом, R1, R2 и R3 точки рамановских спектров, приведенных на рис. 2; (в) увеличенная область на рисунке (б), область со «сферолитоподобной» микротекстурой Pl-Jd; (г) увеличенная область на рисунке (б), с Pl-Jd «сферолитоподобной» микротекстурой вдоль края и стеклом в центре, линия А-В — профиль химического состава, приведенный на рис. 3, цифры — расстояние (в мкм) от точки А. Осн. масса — основная масса хондрита; ОI — оливин; Орх — ортопироксен; Срх — клинопироксен; Тро — троилит; Pl-Jd — область плагиоклазового состава с жадеитом и со «сферолитоподобной» микротекстурой.

36.7 мас.% S). Второстепенные минералы включают хромит ( $Mn_{0.03}Mg_{0.17}Fe_{0.85}Ti_{0.05}V_{0.20}Al_{0.31}Cr_{1.58}O_4$ ), ильменит ( $Mn_{0.05}Mg_{0.16}Fe_{0.79}Ti_{1.01}O_3$ ) и меррилит. Жилы состоят из скрытокристаллического силикатного материала с каплевидными вкраплениями Fe-Ni металла, троилита и моно-, полиминеральных обломков основной массы метеорита-хозяина.

В некоторых обломках основной массы в ударно-расплавленных жилах были обнаружены участки плагиоклазового состава, имеющие радиально-концентрическую микротекстуру. На рис. 1, б приведен наиболее представительный участок, в котором визуально можно выделить две области. Первая область занимает большую часть участка, имеет радиально-концентрическую микротекстуру, распространяющуюся от границы участка с окружающими минералами (оливином, ортопироксеном и троилитом) к его центру (рис. 1, б, г). Вторая область находится в центре (см. рис. 1, г) и не имеет радиально-концентрической микротекстуры. Микротекстура имеет секреционное строение и не является классически сферолитовой, так как распространяется от края участка к его центру, однако из-за визуальной схожести со сферолитовой, на наш взгляд, возможно и использование термина «сферолитоподобная» микротекстура.

Рамановский спектр от «сферолитоподобной» микротекстуры содержит пики жадеита ( $\sim 702$ ,  $\sim 529$  и  $\sim 379$   $cm^{-1}$ ) и ортопироксена ( $\sim 1007$ ,  $\sim 682$ ,  $\sim 662$  и  $\sim 337$   $cm^{-1}$ ) (спектр R1 на рис. 2). Рамановский спектр от второй области (R3, см. рис. 2) содержит широкие пики около 500 и 1100  $cm^{-1}$  и слабый пик около 700  $cm^{-1}$ , отвечающие стеклу и жадеиту соответственно. Исследования, проведенные с использованием

Таблица 1.

**Средний химический состав оливина, ортопироксена и клинопироксена  
в основной массе и в обломках основной массы в ударно-расплавленных жилах**

Компонент	Оливин		Ортопироксен		Клинопироксен	
	осн. масса, <i>n</i> = 29	обломок, <i>n</i> = 6	осн. масса, <i>n</i> = 5	обломок, <i>n</i> = 9	осн. масса, <i>n</i> = 6	обломок, <i>n</i> = 2
SiO <sub>2</sub>	39.4(6)	39.6(5)	56.6(6)	56.7(6)	55.0(7)	54.3(1.5)
TiO <sub>2</sub>	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.50 (10)	0.85(34)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	»	»	»	»	0.83(33)	1.16(66)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	»	»	»	»	0.77(08)	0.92(34)
<sup>a</sup> FeO	17.6(4)	18.1(7)	11.4(3)	12.0(9)	3.97(40)	3.72(30)
MnO	0.48(10)	0.50(22)	0.53(06)	0.58(11)	0.36(22)	0.32(04)
MgO	42.7(8)	43.5(2)	30.9(4)	31.4(4)	17.2(3)	17.1(0)
CaO	н.о.	н.о.	0.68(14)	0.53(10)	22.0(7)	22.2(5)
Na <sub>2</sub> O	»	»	н.о.	н.о.	0.64(15)	0.61(06)
Сумма	100	102	100	101	101	101

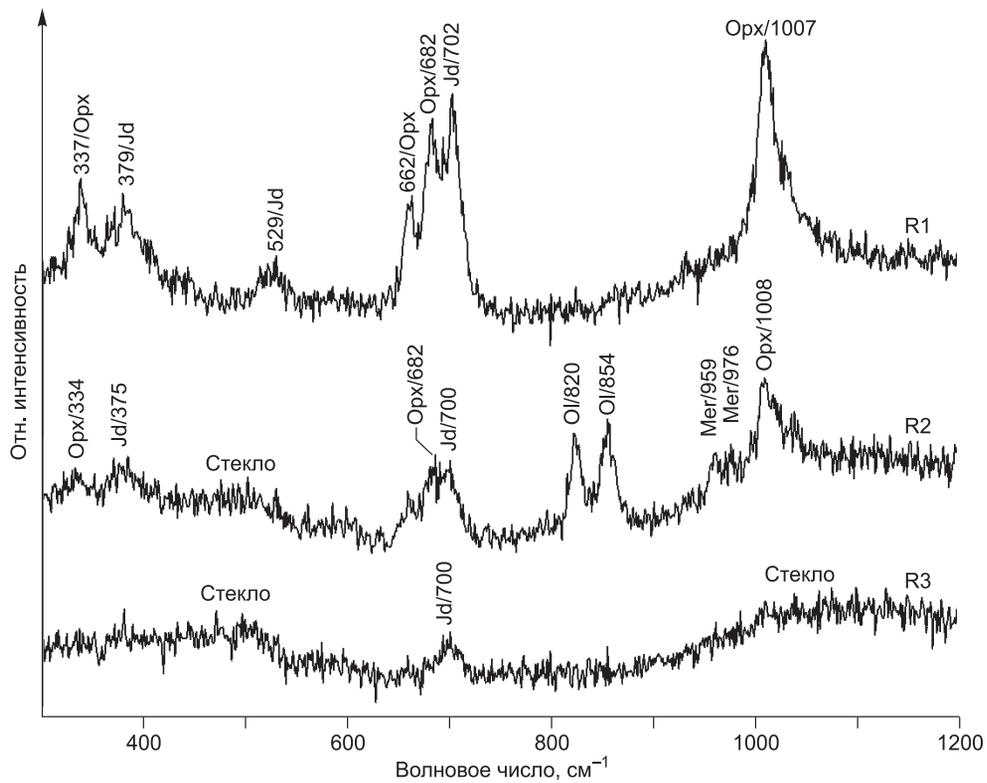
  

Формульные количества атомов кислорода						
	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 6
Si	1.00	0.99	1.99	1.99	1.99	1.96
Ti	—	—	—	—	0.01	0.02
Al	—	—	—	—	0.04	0.05
Cr	—	—	—	—	0.02	0.03
<sup>a</sup> Fe <sup>2+</sup>	0.37	0.38	0.33	0.33	0.12	0.11
Mn	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01
Mg	1.62	1.62	1.63	1.63	0.92	0.92
Ca	—	—	0.03	0.02	0.85	0.86
Na	—	—	—	—	0.05	0.04
Сумма	3.00	3.01	4.00	4.00	4.00	4.01
Fo	81.2	81.1				
Fa	18.8	18.9				
En			81.8	82.1	48.7	48.7
Fs			16.9	16.7	6.4	5.9
Wo			1.3	1.2	44.9	45.4

Примечание. Число в скобках — стандартное отклонение для последних значащих цифр; ноль в скобках означает что стандартное отклонение ниже 0.05 мас.%; *n* — число анализов; н.о. — оксид не определен. <sup>a</sup>Все железо в форме FeO. Fo — фостерит; Fa — фаялит; En — энстатит; Fs — ферросилит; Wo — волластонит.

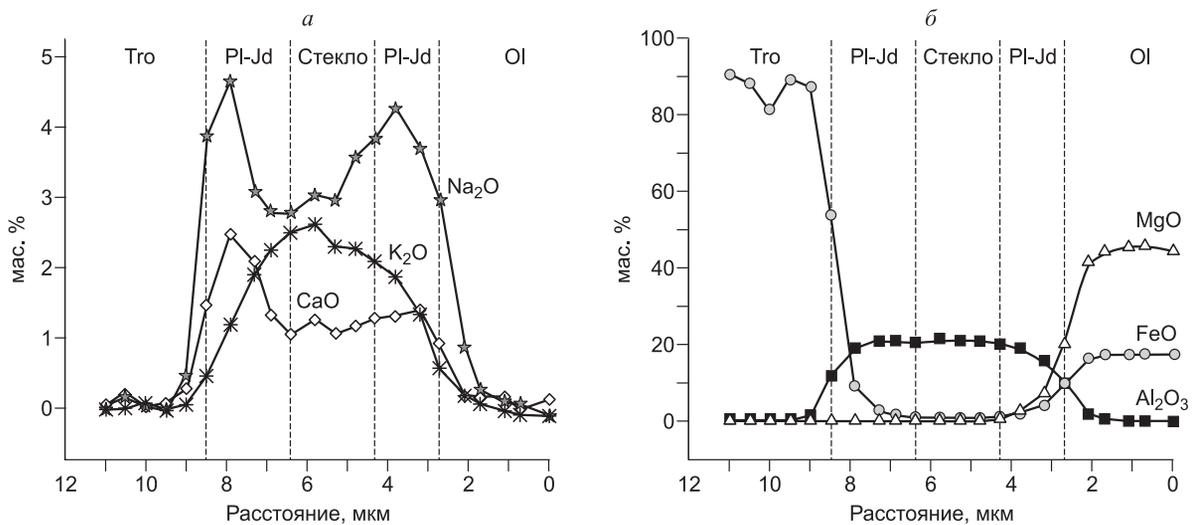
FE-SEM-EDS и рамановской спектроскопией, показывают, что стекло имеет преимущественно плагиоклазовый состав с небольшим количеством жадеита. Рамановские пики ортопироксена и оливина на спектрах R1 и R2 (см. рис. 2) принадлежат соответствующим окружающим минералам. Тщательно проведенный анализ зерен оливина, ортопироксена и клинопироксена показал отсутствие высокобарических полиморфных модификаций данных минералов в изучаемом образце метеорита Новосибирск. Химический состав оливина, ортопироксена и клинопироксена в основной массе почти полностью идентичен их составу в обломках, заключенных в ударных жилах (см. табл. 1).

Стекло в исследуемом участке (см. рис. 1, з) значительно обогащено К и обеднено Na и Са по сравнению с областью, содержащей жадеит (Pl-Jd, см. табл. 2). Для определения распределения Na, Са и К между двумя областями был сделан аналитический профиль (см. рис. 1, з и рис. 3). Профиль отчетливо показал, что область Pl-Jd обогащена Na и Са, тогда как стекло — К (см. рис. 3, а). Содержания Mg, Fe и Al практически не меняются между двумя областями (см. рис. 3, б). Небольшое изменение в содержаниях Mg, Fe и Al наблюдается только вдоль границ между областью Pl-Jd и окружающими минералами (оливином и троилитом). Такое изменение может быть объяснено незначительной реакцией с окружающими минералами, что приводит к повышению содержаний Mg, Fe и Al.



**Рис. 2. Представительные рамановские спектры.**

R1 — спектр от области с жадеитом со «сферолитоподобной» микротекстурой, R2 и R3 — спектры от стекла (см. рис. 1, б). Mer — меррилит; Jd — область плагиоказового состава с жадеитом.



**Рис. 3. Вариации химического состава  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  (а) и  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (б) вдоль профиля А-В, пересекающего сосуществующие области с жадеитом и стеклом (см. рис. 1, з).**

Штриховые линии соответствуют границам между фазами/минералами.

Таблица 2. Средний химический состав плагиоклаза в основной массе, а также областей плагиоклазового состава с жадеитом и стеклом в ударно-расплавленной жиле

Химический состав, мас.%				
Компонент	Осн. масса	Ударно-расплавленная жила		
	Pl, <i>n</i> = 9	Pl-Jd, <i>n</i> = 6	Стекло, <i>n</i> = 8	Pl-Jd + стекло*, <i>n</i> = 12
SiO <sub>2</sub>	66.0(7)	65.2(7)	64.1(1.1)	64.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.3(5)	21.1(4)	20.7(8)	20.8
*FeO	0.92(20)	1.10(19)	1.21(27)	1.16
MgO	0.17(13)	0.29(17)	0.29(16)	0.26
CaO	2.65(27)	2.63(33)	1.27(21)	1.91
Na <sub>2</sub> O	8.73(62)	7.94(96)	6.96(73)	7.34
K <sub>2</sub> O	0.68(40)	1.12(14)	2.65(23)	1.87
Сумма	100(1)	99.6(1.6)	97.2(2.3)	98.0
Формульные количества атомов кислорода				
	<i>n</i> = 8	<i>n</i> = 8	<i>n</i> = 8	<i>n</i> = 8
Si	2.89	2.89	2.90	2.90
Al	1.10	1.10	1.11	1.10
Fe <sup>2+</sup>	0.03	0.04	0.05	0.04
Mg	0.01	0.02	0.02	0.02
Ca	0.12	0.12	0.06	0.09
Na	0.74	0.68	0.61	0.64
K	0.04	0.06	0.15	0.11
Сумма	4.93	4.92	4.90	4.90
Ab	82.0	78.4	74.0	76.2
An	13.8	14.3	7.5	10.9
Or	4.2	7.3	18.5	12.9

Примечание. Pl-Jd область плагиоклазового состава с жадеитом + остаточный аморфный материал; Pl — плагиоклаз; Ab — альбит; An — анортит; Or — ортоклаз.

\* Средний состав участка плагиоклазового состава с жадеитом (Pl-Jd) и стеклом — состав расплава на основе шести анализов Pl-Jd и шести анализов стекла.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В некоторых хондритах, таких как Sahara 98222, Yamato 75100 и Yamato 791384 [Ozawa et al., 2009; Miyahara et al., 2013] валовой химический состав участков плагиоклазового состава с жадеитом приблизительно идентичен составу плагиоклаза или маскеленита в основной массе. В данном случае считается, что жадеит является продуктом твердофазного превращения плагиоклаза при высоком давлении и высокой температуре.

Образование жадеита также возможно при обратном превращении из лингунита (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> — высокобарической полиморфной модификации полевого шпата с голландитовым типом структуры) при относительно умеренном ударном давлении и высокой температуре [Kimura et al., 2000; Zhang et al., 2006; Ozawa et al., 2009].

В хондрите Новосибирск средний химический состав участков плагиоклазового состава с жадеитом в ударных жилах (Pl-Jd + стекло, см. табл. 2) отличается от состава плагиоклаза в основной массе. Участки обогащены K и обеднены Na (1.0—2.9 мас.% K<sub>2</sub>O; 6.1—9.1 мас.% Na<sub>2</sub>O) по сравнению с плагиоклазом (0.3—1.4 мас.% K<sub>2</sub>O; 7.8—9.7 мас.% Na<sub>2</sub>O). Разница в составах может быть связана с тем, что в ходе ударного события плагиоклаз в жилах метеорита Новосибирск был расплавлен. Похожее обогащение калием было отмечено в плагиоклазовом стекле [El Goresy et al., 1997; Chen, El Goresy, 2000], которое образуется при плавлении и закалке плагиоклаза, в сильно ударно-метаморфизованных обычных хондритах в/или непосредственной близости от ударных жил. Авторы статьи [El Goresy et al., 1997] считают, что обогащение расплавленного плагиоклаза K происходит в ходе ударного события за счет испарения и перераспределения по межзерновым трещинам K и некоторого количества Na из ударных жил в расплавленные карманы плагиоклазового состава. При этом примерно половина Na, оставшегося в расплавленных жилах, может входить в состав ликвидусной фазы высокого давления — мэйджорит-пирропа [El Goresy et al., 1997].

Примером образования жадеита из расплава при ударном метаморфизме в хондрите может быть «игольчатый» жадеит, найденный внутри исходного зерна плагиоклаза, в ударной жиле LL5 хондрита Челябинск [Ozawa et al., 2014]. На кристаллизацию жадеита из расплава указывает K–Na дифференциация между областью с жадеитом (8.5 мас.% Na<sub>2</sub>O; 1.2 мас.% K<sub>2</sub>O) и стеклом (6.3 мас.% Na<sub>2</sub>O; 2.2 мас.% K<sub>2</sub>O). Маловероятно, что такая дифференциация могла произойти при твердофазной реакции за короткий промежуток времени существования высоких температур и давлений, вызванных ударным событием.

Похожая K–Na дифференциация происходит между Pl-Jd и сосуществующим стеклом в участке плагиоклазового состава в ударной жиле H5/6 хондрита Новосибирск. Pl-Jd обогащен Na (6.6—9.1 мас.% Na<sub>2</sub>O; 1.0—1.3 мас.% K<sub>2</sub>O), тогда как стекло K (6.2—6.5 мас.% Na<sub>2</sub>O, 2.3—2.9 мас.% K<sub>2</sub>O). Исходное зерно плагиоклаза было расплавлено при ударном событии, а зарождение и рост субмикронных кристаллов жадеита происходили из плагиоклазового расплава вдоль границ с окружающими минералами, образуя «сферолитоподобную» микротекстуру, при этом Na и Ca преимущественно концентрировались в жадеите. По мере роста жадеита остаточный расплав обеднялся Na и Ca и с понижением температуры закаливался в виде стекла. Возможный субмикронный размер кристаллов жадеита будет обсуждаться ниже.

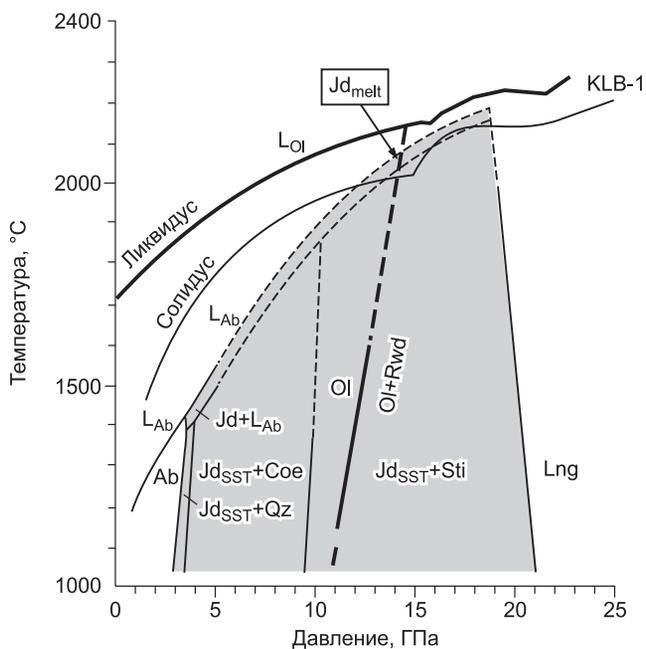
Образование стекла могло быть связано как с высокой скоростью охлаждения, так и с высокой концентрацией K в остаточном расплаве, при которой дальнейшая кристаллизация Na-фазы (жадеита) из расплава становилась невозможной. Так, среднее содержание K<sub>2</sub>O в остаточном стекле/расплаве в метеоритах Новосибирск (см. табл. 2) и Челябинск [Ozawa et al., 2014] составило 2.7 и 2.2 мас.% соответственно, а среднее содержание K<sub>2</sub>O в жадеите в метеоритах Новосибирск и Челябинск [Ozawa et al., 2014] 1.1 и 1.2 мас.% соответственно. Это наибольшие значения K<sub>2</sub>O по сравнению с другими хондритами: Y-791384 — 0.5 мас.% [Ohtani et al., 2004], в Sixiangkou — 1.1 мас.% [Zhang et al., 2006], в Sahara 98222 — 0.7 мас.%, в Y-74445 — 0.4 мас.% [Ozawa et al., 2009] и в Y-75100 — 1.0 мас.% [Miyahara et al., 2013]. Однако данное сравнение является не совсем корректным, так как образование жадеита в метеоритах Новосибирск и Челябинск происходило из расплава, тогда как ранее найденные жадеиты интерпретировались как результат твердофазной реакции и образовывались из плагиоклаза на стадии повышения давления и температуры [Ozawa et al., 2009; Miyahara et al., 2013] либо на регрессивной стадии из лингунита [Kimura et al., 2000; Zhang et al., 2006; Ozawa et al., 2009].

Литературные данные [Ohtani et al., 2004; Zhang et al., 2006; Ozawa et al., 2009, 2014; Miyahara et al., 2013] показывают, что стехиометрия жадеитов или участков, содержащих жадеит, в хондритах ближе к плагиоклазу, чем к клинопироксену. Исследование твердофазного образования жадеита в ударно-метаморфизованных хондритах [Miyahara et al., 2013] методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) показало, что области, содержащие жадеит, состоят из двух фаз: жадеит + остаточный плохо раскристаллизованный (аморфный) материал. Размеры фаз ~200—400 нм [Miyahara et al., 2013] не позволяют определить химические составы методами EDS и электронного микроанализа с диаметром анализирующего пучка 1—2 мкм. Однако использование сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM) в сочетании с EDS позволило авторам [Miyahara et al., 2013] определить химический состав каждой из фаз размером 200×200 нм и более. Полученные данные показывают, что выделенный жадеит имеет стехиометрию клинопироксена, тогда как сосуществующий с ним аморфный материал обогащен SiO<sub>2</sub> и обеднен Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Проведенные исследования [Miyahara et al., 2013] согласуются с экспериментальными данными [Kubo et al., 2010] по кинетике твердофазных превращений в плагиоклазе, из которых следует, что при высоких температурах и давлениях аморфизованный плагиоклаз распадается на жадеит и SiO<sub>2</sub>, при этом образование кристаллической фазы SiO<sub>2</sub> (стишовита) сильно запаздывает по сравнению с жадеитом. Авторы работ [Kubo et al., 2010; Miyahara et al., 2013] приходят к выводу, что образование стишовита маловероятно за короткий промежуток времени (по разным оценкам 0.8—4.0 с) существования высокого давления и высокой температуры при ударных событиях в хондритах. Это также объясняет отсутствие пиков стишовита на рамановских спектрах от областей, содержащих жадеит в хондритах, включая рис. 3.

Среднее содержание SiO<sub>2</sub> в жадеите из хондритов Y-791384 и Y-75100 [Miyahara et al., 2013] и из эксперимента (обр. s1644) [Kubo et al., 2010] составило 61.2, 61.8 и 57.4 мас.% соответственно. По всей видимости, избыток SiO<sub>2</sub> в химических анализах областей Pl-Jd в метеорите Новосибирск (65.2 мас.%, см. табл. 2) также связан с присутствием богатого кремнием аморфного материала, сосуществующего с субмикронными кристаллами жадеита, образующими «сферолитоподобную» микротекстуру. Вывод о возможном субмикронном размере кристаллов жадеита в метеорите Новосибирск следует на основании предположения о том, что механизм образования жадеита во всех хондритах близок к описанному в работе [Miyahara et al., 2013].

В работе [Kubo et al., 2010] было высказано предположение о том, что разница в кинетике образования жадеита и стишовита из аморфизованного плагиоклаза возможна не только в ходе твердофазной реакции, но и в случае образования фаз жадеита и кремнезема из расплава. Результаты нашего исследо-



**Рис. 4. *PT*-условия образования жадеита (3—14 ГПа и 1700—2150 °С) в ударных жилах Н5/6 хондрита Новосибирск.**

Линии солидуса и ликвидуса для KLB-1 перидотита [Zhang, Herzberg, 1994]; линия фазовой границы Ol/(Ol + Rwd) для состава (Fo<sub>82</sub>) [Akaogi et al., 1989]; тонкие линии показывают фазовые границы Ab [Bell, Roseboom 1969; Akaogi, Navrotsky, 1984; Tutti, 2007; Ozawa et al., 2014]; поле светлого цвета — поле стабильности жадеита. Ab — альбит; Coe — коесит; Jd — жадеит; Jd<sub>melt</sub> — образование жадеита из расплава при высоком давлении и температуре; Jd<sub>sst</sub> — жадеит, образованный в результате твердофазной реакции (SST) из альбита; L<sub>Ab</sub> — альбитовый расплав; L<sub>Ol</sub> — оливиновый расплав; Lng — лингунит (фаза высокого давления NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>); Ol — оливин; Орх — ортопироксен; Qz — кварц; Rwd — рингвудит, Sti — стишовит.

вания являются подтверждением этого предположения и показывают, что образование кристаллической фазы SiO<sub>2</sub> является замедленным даже при кристаллизации жадеита из плагиоклазового расплава.

Pl-Jd область в хондрите Новосибирск имеет ранее неопisanную «сферолитоподобную» микротекстуру, отличающуюся от нитчатых и точечных выделений в L6 хондрите Sahara 98222 [Ozawa et al., 2009] и в импактных породах кратера Нордлингер-Рис, Германия [James, 1969]. Pl-Jd области в хондритах Новосибирск и Челябинск очень похожи друг на друга в плане Na-K дифференциации между Pl-Jd и стеклом, однако различаются по форме выделений: игольчатые в хондрите Челябинск и «сферолитоподобные» в хондрите Новосибирск. Форма выделений жадеита может зависеть от скорости охлаждения плагиоклазового расплава [Lofgren, 1971, 1974; Corrigan, 1982], которая в новосибирском метеорите, по всей видимости, была более быстрой, чем в челябинском.

Ключевым моментом для оценки *PT*-условий образования жадеита в ударных жилах метеорита Новосибирск при ударном метаморфизме являются: кристаллизация жадеита из плагиоклазового расплава, присутствие нерасплавленных обломков основной массы хондрита внутри ударных жил и отсутствие других минералов высокого давления.

Нижняя граница образования жадеита по давлению составляет 3 ГПа [Birch, LeComte, 1960; Bell, Roseboom Jr, 1969; Holland, 1980]. При давлении 19—23 ГПа ассоциация жадеит + стишовит трансформируется в лингунит или в NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (со структурой феррита кальция) + стишовит [Tutti, 2007]. Таким образом, стабильность жадеита ограничена интервалом 3—19 ГПа (рис. 4). А тот факт, что плагиоклаз в ударных жилах был расплавлен, указывает на то, что исходный плагиоклаз был нагрет выше температуры плавления, которая составляет 1400 °С при 3 ГПа [Bell, Roseboom Jr, 1969].

Оливин и низко-Са пироксен в обломках основной массы не имеют признаков плавления. Кроме того, в обломках не было обнаружено полиморфных модификаций высокого давления данных минералов. Поэтому температура обломков основной массы в ударных жилах должна быть ниже температуры ликвидуса в области стабильности оливина. *PT*-условия (14 ГПа и 2150 °С) плавления обломков H-хондритов могут быть получены по пересечению линии перехода оливин/(оливин + рингвудит) и кривой ликвидуса оливина на диаграмме плавления безводного перидотита KLB-1 (см. рис. 4) [Zhang, Herzberg, 1994]. Положение линии перехода оливин/(оливин + рингвудит) с составом Fo<sub>82</sub> (см. табл. 1) на *PT*-диаграмме [Zhang, Herzberg, 1994] определяется из диаграммы зависимости давления от состава оливинов при различных температурах [Akaogi et al., 1989]. Таким образом, обломки оливина из основной массы хондрита в ударных жилах хондрита Новосибирск остаются твердыми до 14 ГПа и 2150 °С, при этом фазовых превращений оливина в обломках не происходит.

Кроме того, низко-Са пироксен состава En<sub>82</sub>Fs<sub>17</sub>Wo<sub>01</sub> (см. табл. 1) должен трансформироваться в мэйджорит примерно при 16.5 ГПа и 1800 °С [Ohtani et al., 1991], но так как мэйджорит в метеорите Новосибирск найден не был, то значит ударное давление было ниже 16.5 ГПа. Поэтому максимальное давление соответствует границе стабильности оливина — 14 ГПа. Следовательно, *PT*-условия, отвечающие оливин-ортоклинопироксен-жадеитовому парагенезису обломков основной массы в ударных жилах метеорита Новосибирск, соответствуют, скорее всего, 3—14 ГПа и 1400—2150 °С. Образование жадеита (Jd<sub>melt</sub>) в ударных жилах, по всей видимости, происходило на регрессивной стадии метаморфиз-

ма (см. рис. 4). Данная оценка близка к значениям 3—12 ГПа и < 1700—2000 °С, полученным для такого же парагенезиса в LL5 хондрите Челябинск [Ozawa et al., 2014].

Оценка давления ударного метаморфизма, сделанная для метеорита Новосибирск на основе изучения характера деформаций минералов основной массы хондрита (см. главу Введение) по схеме Додда и Ярошевича, составляет 40—45 ГПа [Петяев и др., 1990]. Этот же характер деформаций соответствует S4 стадии метаморфизма 20—30 ГПа [Sttöfler et al., 1991].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жадеит обнаружен в участке плагиоклазового состава среди обломков основной массы, заключенных в ударно-расплавленных жилах обыкновенного хондрита H5/6 Новосибирск. Кристаллизация жадеита происходила из плагиоклазового расплава при 3—14 ГПа и 1400—2150 °С на регрессивной стадии ударного метаморфизма. Область, содержащая жадеит, имеет ранее не описанную радиально-концентрическую «сферолитоподобную» микротекстуру, распространяющуюся от края участка к центру, что указывает на секреторный рост из расплава. Образование жадеита из исходно гомогенного плагиоклазового расплава приводит к Na-K дифференциации между областью, содержащей жадеит, и сосуществующей областью, представленной стеклом (остаточным расплавом). «Сферолитоподобная» микротекстура и Na-K дифференциация могут быть реперами, косвенно указывающими на высокую скорость охлаждения жил на регрессивной стадии ударного метаморфизма.

Кристаллизация жадеита из плагиоклазового расплава при высоких давлениях и температурах в хондритах Новосибирск и Челябинск является единственным описанным случаем, при этом образование кристаллического кремнезема так же замедленно, как и в случае твердофазной реакции.

Авторы выражают благодарность Н.М. Подгорных за предоставление образцов метеорита Новосибирск из коллекции Центрального сибирского геологического музея и Й. Ито (университет Тохоку, Япония) за помощь в пробоподготовке и проведении химических анализов образцов метеорита.

Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (№ 14. В25.31.0032).

## ЛИТЕРАТУРА

**Петяев М.И., Барсукова Л.Д., Кононкова Н.Н.** Метеорит Новосибирск // Метеоритика, 1990, т. 49, с. 41—47.

**Acosta-Maeda T.E., Scott E.R.D., Sharma S.K., Misra A.K.** The pressures and temperatures of meteorite impact: Evidence from micro-Raman mapping of mineral phases in the strongly shocked Taiban ordinary chondrite // Amer. Miner., 2013, v. 98, p. 859—869.

**Akaogi M., Navrotsky A.** The quartz-coesite-stishovite transformations: new calorimetric measurements and calculation of phase diagrams // Phys. Earth Planet. Int., 1984, v. 36, p. 124—134.

**Akaogi M., Ito E., Navrotsky A.** Olivine-modified spinel-spinel transitions in the system  $Mg_2SiO_4$ — $Fe_2SiO_4$ : Calorimetric measurements, thermochemical calculation, and geophysical application // J. Geophys. Res., 1989, v. 94, p. 15671—15685.

**Bell P.M., Roseboom Jr E.H.** Melting relationships of jadeite and albite to 45 kilobars with comments on melting diagrams of binary systems at high pressures // Miner. Soc. Amer. Spec. Paper, 1969, v. 2, p. 151—169.

**Birch F., LeComte P.** Temperature-pressure plane for albite composition // Amer. J. Sci., 1960, v. 258, p. 209—217.

**Chen M., El Goresy A.** The nature of maskelynite in shocked meteorites: not diaplectic glass but a glass quenched from shock-induced dense melt at high pressures // Earth Planet. Sci. Lett., 2000, v. 179, p. 489—502.

**Corrigan G.** The crystal morphology of plagioclase feldspar produced during isothermal supercooling and constant rate cooling experiments // Miner. Mag., 1982, v. 46, p. 433—439.

**El Goresy A., Wopenka B., Chen M., Weinbruch S., Sharp T.** Evidence for two different shock induced high-pressure events and alkali-vapor metasomatism in Peace River and Tenham (L6) chondrites // LPS XXVIII, 1997, p. 329—330.

**Holland T.** The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600—1200 °С // Amer. Miner., 1980, v. 65, p. 129—134.

**James O.B.** Jadeite: shock-induced formation from oligoclase, Ries crater, Germany // Science, 1969, v. 165, p. 1005—1008.

**Kimura M., Suzuki A., Kondo T., Ohtani E., El Goresy A.** Natural occurrence of high-pressure phases, jadeite, hollandite, wadsleyite and majorite-pyrope garnet, in an H-chondrite, Yamato 75100 // Meteor. Planet. Sci., 2000, v. 35, p. A87—A88.

- Kimura M., Suzuki A., Ohtani E., El Goresy A.** Raman petrography of high-pressure minerals in H, L, LL and E-chondrites // Meteor. Planet. Sci., 2001, v. 36, p. A99.
- Kubo T., Kimura M., Kato T., Nishi M., Tominaga A., Kikegawa T., Funakoshi K.** Plagioclase breakdown as an indicator for shock conditions of meteorites // Nature Geosci., 2010, v. 3, p. 41—45.
- Liu L.-G.** High-pressure phase transformations of albite, jadeite and nepheline // Earth Planet. Sci. Lett., 1978, v. 37, p. 438—444.
- Lofgren G.** Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks // J. Geophys. Res., 1971, v. 76, p. 5635—5648.
- Lofgren G.** An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization // Amer. J. Sci., 1974, v. 274, p. 243—273.
- Miyahara M., Ohtani E., Kimura M., Ozawa S., Nagase T., Nishijima M., Hiraga K.** Evidence for multiple dynamic events and subsequent decompression stage recorded in a shock vein // Earth Planet. Sci. Lett., 2011, v. 307, p. 361—368.
- Miyahara M., Ozawa S., Ohtani E., Kimura M., Kubo T., Sakai, T., Nagase T., Nishijima M., Hirao N.** Jadeite formation in shocked ordinary chondrites // Earth Planet. Sci. Lett., 2013, v. 373, p. 102—108.
- Ohtani E., Kagawa N., Fujino K.** Stability of majorite (Mg, Fe)SiO<sub>3</sub> at high pressures and 1800 °C // Earth Planet. Sci. Lett., 1991, v. 102, p. 158—166.
- Ohtani E., Kimura Y., Kimura M., Takata T., Kondo T., Kubo T.** Formation of high-pressure minerals in shocked L6 chondrite Yamato 791384: constraints on shock conditions and parent body size // Earth Planet. Sci. Lett., 2004, v. 227, p. 505—515.
- Ozawa S., Ohtani E., Miyahara M., Suzuki A., Kimura M., Ito Y.** Transformation textures, mechanisms of formation of high-pressure minerals in shock melt veins of L6 chondrites, and pressure-temperature conditions of the shock events // Meteor. Planet. Sci., 2009, v. 44, p. 1771—1786.
- Ozawa S., Miyahara M., Ohtani E., Koroleva O.N., Ito Y., Litasov K.D., Pokhilenko N.P.** Jadeite in Chelyabinsk meteorite and the nature of an impact event on its parent body // Sci. Reports, 2014, v. 4, doi: 10.1038/srep05033.
- Stöffler D., Keil K., Edward R.D., S.** Shock metamorphism of ordinary chondrites // Geochim. Cosmochim. Acta, 1991, v. 55, p. 3845—3867.
- Tutti F.** Formation of end-member NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> hollandite-type structure (lingunite) in diamond anvil cell // Phys. Earth Planet. Inter., 2007, v. 161, p. 143—149.
- Xie X., Sun Z., Chen M.** The distinct morphological and petrological features of shock melt veins in the Suizhou L6 chondrite // Meteor. Planet. Sci., 2011, v. 46, p. 459—469.
- Zhang J., Herzberg C.** Melting experiments on anhydrous peridotite KLB-1 from 5.0 to 22.5 GPa // J. Geophys. Res., 1994, v. 99, p. 17729—17742.
- Zhang A.C., Hsu W.B., Wang R.C., Ding M.W.** Pyroxene polymorphs in melt veins of the heavily shocked Sixiangkou L6 chondrite // Europ. J. Miner., 2006, v. 18, p. 719—726.

*Рекомендована к печати 26 апреля 2016 г.  
В.В. Ревердатто*

*Поступила в редакцию  
3 декабря 2015 г.*