

## ВКЛЮЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ЭКЛОГИТОВОМ ГРАНАТЕ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДЕМОСТРАЦИЯ ПРИРОДНОГО ПРОЦЕССА

А.Л. Перчук<sup>1,2</sup>, В.О. Япаскерт<sup>3</sup>, В.В. Давыдова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия

<sup>2</sup> Институт экспериментальной минералогии РАН, 142432, Московская обл., Черноголовка, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет,  
119899, Москва, Воробьевы Горы, Россия

Эксперимент с пойкилитовым гранатом при 3 ГПа и 800 °С выявил дегидратационное плавление минеральных включений, которое сопровождается ростом (суб)идiomорфных кристаллов граната в глубь включения и(или) ксеноморфных гранатов, замещающих минерал-хозяин. Новообразованный и вмещающий гранаты имеют резко отличные составы. Поверхность включений осложнена специфическими клиновидными выступами или тонкими ответвлениями, выполненными расплавом или продуктами его раскристаллизации. Выделенные признаки обнаружены в полиминеральных включениях в гранате из относительно низкотемпературного (~650 °С) эклогита из комплекса Юкон-Танана, Канада. Включения интерпретируются как продукты раскристаллизации расплава, образованного *in situ*.

*Эклогит, плавление, гранат, включение.*

## MELT INCLUSIONS IN ECLOGITE GARNET: EXPERIMENTAL STUDY OF NATURAL PROCESSES

A.L. Perchuk, V.O. Yapaskurt, and V.V. Davydova

Experiment with poikilitic garnet at 3 GPa and 800°C showed dehydration melting of its mineral inclusions, which is accompanied by the growth of (sub)euohedral garnet crystals inside the inclusion and/or xenomorphic garnets replacing the host mineral. The newly formed and host garnets differ drastically in composition. The inclusion surface is complicated by specific wedge-like protrusions or thin branches composed of melt or its crystallization products. The above features have been discovered in polymineral inclusions in garnet from relatively low-temperature (~650°C) eclogite from the Yukon-Tanana terrane, Canada. The inclusions are interpreted as the crystallization products of *in situ* formed melt.

*Eclogite, melting, garnet, inclusions*

### ВВЕДЕНИЕ

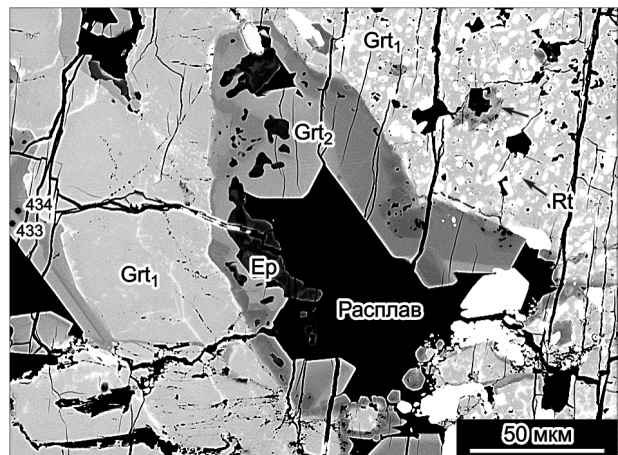
Минеральные включения в гранате широко используются в петрологии для реконструкции физико-химических условий эволюции метаморфических пород. Включения не всегда сохраняют реликтовый состав и свойства в условиях закрытой системы: хорошо известны случаи их изменения, обусловленные химическим или механическим взаимодействием с минералом хозяином [Chopin, 1984; Perchuk et al., 1985]. Включения в гранате, испытавшие плавление *in situ*, пока мало известны в метаморфической петрологии. Цель работы — выявление их особенностей в эксперименте и в природе.

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Эксперименты с пойкилитовым гранатом, выделенным из эклогита максютовского комплекса, проводились на установке цилиндр—поршень в Рурском университете (Бохум, Германия) по недавно разработанной методике [Perchuk et al., 2005]. В ходе экспериментов изучалось поведение реликтовых включений (эпидот (Ep), кварц (Q), рутил (Rt), фенгит (Phn) и амфибол (Am)) и их взаимодействие с минералом-хозяином при *P-T* условиях, отвечающих зонам субдукции/коллизии. При параметрах 800 °С, 3 ГПа, 276 ч и фугитивности кислорода, соответствующей  $\log(f_{O_2})$  между буфером QFM и QFM-2 (Patiño Douce, Harris, 1998), происходит дегидратационное плавление (рис. 1), обусловленное снижением температуры солидуса системы за счет воды, выделенной из водосодержащих минералов при их разложении. С очагами расплава связаны ветвящиеся трещины или клиновидные выступы. Состав расплава в целом отвечает дациту (таблица). На стенках включений расплава отмечается рост идиоморфных кристаллов граната как однородных, так и обладающих концентрически-зональным строением (см. рис. 1). В случае прямого замещения стенок минерала-хозяина формируются зональные гранаты с ксеноморфными очертаниями. Новообразования отличаются от вмещающего граната повышенными содержаниями Ca, Ti, а в некоторых зонах роста — Mg (см. таблицу).

**Рис. 1. Очаги расплава в порфиробласте граната (Grt<sub>1</sub>), ассоциирующие с новообразованными идиоморфными гранатами (Grt<sub>2</sub>).**

Стрелка — ксеноморфные гранаты, замещающие минерал-хозяин. Эксперимент при 800 °С, 3 ГПа, 276 ч. Система субвертикальных трещин образована при закалке опыта и не связана с ветвящимися радиальными трещинами.



На основе экспериментов можно выделить несколько признаков существования в гранате очагов расплава: 1) рост (суб)идiomорфных кристаллов граната в глубь включения и(или) ксеноморфных гранатов, замещающих минерал-хозяин; 2) новообразованный и вмещающий гранат имеют резко отличные составы; 3) поверхность включений осложнена специфическими клиновидными выступами или тонкими ответвлениями, выполненными расплавом или продуктами его кристаллизации. Совокупность выделенных признаков является убедительным свидетельством процесса плавления. Вместе с тем следует учитывать, что при иных физико-химических параметрах процесса, а также при наложенных метаморфических преобразованиях могут обнаруживаться не все признаки.

Рассматриваемый тип включений отличается от капель расплава, захваченного растущим кристаллом. Плавление минеральных включений дает расплавы, исходно неравновесные по отношению к вмещающему гранату. Такие расплавы, находящиеся к тому же под повышенным давлением, будут более активно взаимодействовать (химически и механически) со стенками вмещающего граната, чем исходно равновесные с ним и лишённые избыточного давления капли захваченного расплава.

#### ПРИЗНАКИ ЧАСТИЧНОГО ПЛАВЛЕНИЯ В ЭКЛОГИТЕ

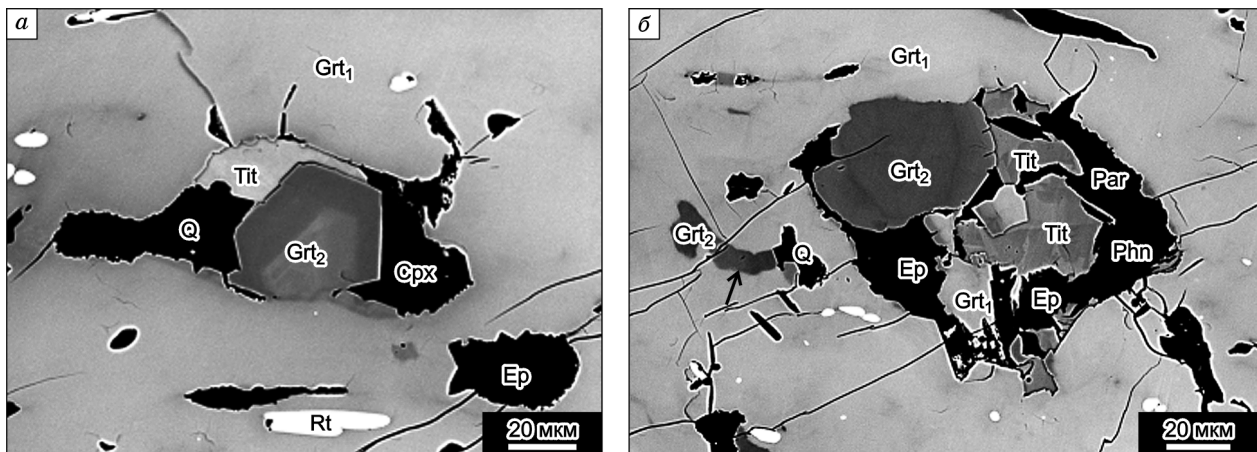
Результаты эксперимента проливают свет на генезис необычных включений граната в гранате, обнаруженных нами ранее в эклогите из района Фаро в комплексе Юкон-Танана, Канада [Perchuk et al., 1999]. Матрикс эклогита сложен преимущественно мелкозернистой омфацил-кварцевой ассоциацией. Однако на отдельных участках встречаются среднезернистые омфацил-эпидотовые прожилки, переходящие в агрегат водосодержащих минералов (Phn, Paq, Am, Ep) [Перчук, Геря, 2005]. Новообразования граната на этих участках не наблюдается. Скорее наоборот — гранат интенсивно замещается хлоритом. При детальном изучении пойкилобластов граната обнаруживается, что гранат из включений стремится к идиоморфизму, если находится в полиминеральных включениях с эпидотом, кварцем, реже с фенгитом,

**Представительные микрондовы анализы минералов и расплава из эксперимента и эклогита Фаро (мас.%)**

Оксид	Эксперимент (800 °С, 3 ГПа, 276 ч)				Эклогит Фаро		
	стекло*	Grt <sub>1</sub>	Grt <sub>2</sub>	Grt <sub>2</sub>	Grt <sub>1</sub>	Grt <sub>2</sub>	Grt <sub>2</sub>
SiO <sub>2</sub>	66.01	38.24	38.97	37.96	38.03	37.86	38.30
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.00	0.59	0.75	0.00	0.00	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.30	21.17	21.02	20.71	20.89	20.88	20.78
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.27	0.00	0.06	0.00	0.00	0.12
FeO	1.27	25.14	19.45	19.48	30.14	25.15	23.26
MnO	0.00	0.85	0.30	0.47	1.20	0.76	0.66
MgO	0.09	4.61	6.14	3.15	3.20	2.62	3.09
CaO	2.21	8.95	13.72	17.05	7.02	12.53	13.76
Na <sub>2</sub> O	0.76	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	3.33	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Сумма	87.37	99.23	100.25	99.82	100.47	99.80	100.17

Примечание. Grt<sub>1</sub> — вмещающий гранат, Grt<sub>2</sub> — новообразованный гранат. Анализы выполнялись с использованием растрового электронного микроскопа „Jeol JSM-6480LV“ с ЭДС приставкой „Inca Energy-350“ в лаборатории локальных методов исследования вещества МГУ, ускоряющее напряжение 15 кВ, сила тока 15 нА. Локальность анализа минералов — 2 мкм, стеклов (сканирование по площади) — до 20-15 мкм<sup>2</sup>.

\* Среднее по 5 анализам.



**Рис. 2.** Включения граната в гранате из эклогита Фаро, комплекс Юкон-Танана.

*a* — идиоморфный гранат во включении; *б* — полиминеральное включение с субидиоморфным гранатом. Стрелка — ксеноморфный гранат, замещающий минерал-хозяин.

парагонитом (Par) и сфеном (Tit). На границах с гранатом-хозяином новый гранат часто имеет ксеноморфные очертания. Он может быть как химически однородным, так и зональным (рис. 2), но всегда с резким переходом к вмещающему гранату. В морфологии полиминеральных включений нередко прослеживаются ростовые формы нового граната, а также характерные клиновидные выступы и радиальные ответвления (см. рис. 2). Там же, где поверхность включений кажется пилообразной, в действительности ее выполняют многочисленные мелкие кристаллы нового граната.

Включения в гранатах из эклогита Фаро, несмотря на относительно низкую температуру метаморфизма (~660 °C при 1.5 ГПа [Перчук, Геря, 2005]), отвечают всем вышеизложенным признакам плавления, свидетельствуя, таким образом, о наличии эпизода частичного плавления в их истории. Заметим, что для частичного плавления не требуется дополнительного термального воздействия, так как эклогит преодолевал водный солидус габбро [Lambert, Wyllie, 1972]. В настоящее время трудно сказать, испытывали ли плавление водосодержащие минералы из тонких прожилков матрикса породы. Их наложенный характер по отношению к матриксу породы свидетельствует о том, что, если плавление действительно имело место, то протекало оно на ранней стадии регрессивного изменения породы. Возможно, на этом же этапе происходило плавление включений, хотя точных данных по этому вопросу у нас пока нет: высокая степень гетерогенности высокобарных включений не позволяет получить воспроизводимые термобарометрические оценки. Тем не менее сам факт наличия таких включений (без *P-T* параметров) принципиально важен, ибо показывает, что изолированные включения в ядрах прогрессивно зонального граната могут кристаллизоваться позднее, чем вмещающие их гранаты.

Частичное плавление при метаморфизме высокого давления стало предметом пристального внимания ученых лишь в последние годы в связи с так называемыми ультравысокобарными породами, образованными на глубинах >90 км [Перчук, Япаскурт, 1998; Shatsky et al., 1999; Stöckhert et al., 2001; Hwang et al., 2001, 2006; Perchuk et al., 2005; Korsakov, Hermann, 2006; Lang, Gilotti, 2007]. Наше исследование расширяет диапазон процессов плавления в метаморфических комплексах зон субдукции/коллизии, поднимая верхний порог до глубин ~50 км (1.5 ГПа).

Мы выражаем признательность М. Бурхарду, Х.-П. Шертлу и В.В. Марешу (Рурский Университет, Бохум, Германия) за содействие в проведении экспериментов, А.В. Корсакову и Ю.А. Литвину за критические замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 06-05-65204, 06-05-64098), Фонда содействия отечественной науке, фонда А. фон Гумбольдта, а также гранта НШ-5338.2006.05.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Перчук Л.Л., Япаскурт В.О. Глубинные ультракальциевые жидкости // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (12), с. 1756—1765.
- Перчук А.Л., Геря Т.В. Динамика погружения и эксгумации эклогитов комплекса Юкон-Танана (Канадские Кордильеры) на основе петрологических реконструкций и геодинамического моделирования // Петрология, 2005, т. 13, с. 280—294.

**Chopin C.** Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: first record and some consequences // *Contr. Miner. Petrol.*, 1984, v. 86, p. 107—118.

**Hwang S.L., Shen P., Chu H.T., Yui T.F., Lin C.C.** Genesis of microdiamonds from melt and associated multiphase inclusions in garnet of ultrahigh-pressure gneiss from Erzgebirge, Germany // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 188, p. 9—15.

**Hwang S.L., Chu H.T., Yui T.F., Shen P., Schertl H.P., Liou J.G., Sobolev N.V.** Nanometer-size P/K-rich silica glass (former melt) inclusions in microdiamond from the gneisses of Kokchetav and Erzgebirge massifs: diversified characteristics of the formation media of metamorphic microdiamond in UHP rocks due to host-rock buffering // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 243, p. 94—106.

**Lambert I.B., Wyllie P.J.** Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kb pressure, with geological applications // *J. Geol.*, 1972, v. 80, p. 693—708.

**Lang H.M., Gilottii J.A.** Partial melting of metapelites at ultrahigh-pressure conditions, Greenland Caledonides // *J. Metamorph. Geol.*, 2007, v. 25, p. 129—147.

**Korsakov A.V., Hermann J.** Silicate and carbonate melt inclusions associated with diamonds in deeply subducted carbonate rocks // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 241, p. 104—118.

**Patino Douce A.E., Harris N.** Experimental constraints on Himalayan anatexis // *J. Petrol.*, 1998, v. 39, p. 689—710.

**Perchuk L.L., Aranovich L.Ya., Podlesskii K.K., Lavrent'eva I.V., Gerasimov V.Yu., Fed'kin V.V., Kitsul V.N., Korsakov L.P.** Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR // *J. Metamorph. Geol.*, 1985, v. 3, p. 265—310.

**Perchuk A.L., Philippot P., Erdmer P., Fialin M.** Rates of thermal equilibration at the onset of subduction deduced from diffusion modeling of eclogitic garnets, Yukon-Tanana terrain // *Geology*, 1999, v. 27, p. 531—534.

**Perchuk A.L., Burchard M.M., Maresch W.V., Schertl H.-P.** Fluid-mediated modification of garnet interiors under ultrahigh-pressure conditions // *Terra Nova*, 2005, v. 17, p. 545—553.

**Shatsky V.S., Jagoutz E., Sobolev N.V., Kozmenko O.A., Parkhomenko V.S., Troesch M.** Geochemistry and age of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif (northern Kazakhstan) // *Contr. Miner. Petrol.*, 1999, v. 137, p. 185—205.

**Stöckhert B., Duyster J., Trepmann C., Massonne H.-J.** Microdiamond daughter crystals precipitated from supercritical COH silicate fluids included in garnet, Erzgebirge, Germany // *Geology*, 2001, v. 29, p. 391—394.

*Рекомендована к печати 2 октября 2007 г.  
В.С. Шацким*

*Поступила в редакцию 5 апреля 2007 г.,  
после доработки — 10 сентября 2007 г.*