

Научная статья

УДК 552.11+552.122(517)

DOI: 10.37102/0869-7698\_2023\_231\_05\_5

EDN: EFMCRС

## Расплавные «карманы» и включения сульфидов: свидетельства трансформации мегакристов граната в щелочных базальтоидах (Шаварын-Царам, Тарят, Монголия)

А.В. Асеева✉, А.А. Карабцов, С.В. Высоцкий, Т.А. Веливецкая,  
М.А. Ушкова, К.П. Косухин, А.В. Руслан, В.В. Яковенко, А.Ю. Синёв

*Анна Валерьевна Асеева*

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

barkar\_anna@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5809-8125>

*Александр Александрович Карабцов*

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель  
лаборатории

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

karabzov@fegi.ru

*Сергей Викторович Высоцкий*

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, руководитель  
лаборатории

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

vysotskiy@fegi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5194-5616>

*Татьяна Алексеевна Веливецкая*

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель  
лаборатории

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

velivetskaya@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2833-1026>

*Мария Александровна Ушкова*

инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

m\_ushkova@list.ru

*Константин Павлович Косухин*

инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
kokosus99@mail.ru

*Алексей Валерьевич Руслан*

кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

aleksei\_ruslan@mail.ru

*Виктория Васильевна Яковенко*

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

yakovenko\_v.v@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3834-3626>

*Антон Юрьевич Синёв*

инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

antsinyov@yandex.ru

**Аннотация.** Объектом исследования стали сульфидные включения и расплавные «карманы» в мегакристаллах граната из кайнозойского базальтового конуса Шаварын-Царам (плато Тарят, Монголия). Сингенетичные включения сульфидов, приуроченные к зонам роста мегакристаллов граната, образовались из-за присутствия в кристаллообразующей среде двух несмешиваемых расплавов – сильно флюидизированного силикатного и сульфидного. Согласно изотопным данным, сульфиды ( $\delta^{34}\text{S}$  0,1–0,4 ‰,  $\delta^{33}\text{S}$  0,1–0,2 ‰,  $\Delta^{33}\text{S}$  0,00–0,03 ‰) и вмещающие их гранаты ( $\delta^{18}\text{OVSMOW}$  5,4–5,8 ‰) имеют мантийный источник. Формирование гранатовых мегакристаллов происходило за счет гетерогенного зарождения (эпитаксиальный рост). Силикатные включения (расплавные и многофазные) были свидетелями эволюции гранатовых мегакристаллов в щелочно-базальтовом расплаве. По данным моделирования с помощью Win TWQ 2.32 захват гранатов происходил при  $P = 0,8\text{--}1$  ГПа и  $T = 1120\text{--}1160$  °С, а кристаллизация многофазного силикатного включения при том же давлении, но более низких температурах:  $P = 0,85\text{--}0,95$  ГПа,  $T = 790\text{--}950$  °С.

**Ключевые слова:** щелочные базальтоиды, мегакристаллы, гранат, расплавные «карманы», сульфиды, глубинные нодулы, Win TWQ 2.32, Шаварын-Царам, Монголия

**Для цитирования:** Асеева А.В., Карабцов А.А., Высоцкий С.В., Веливецкая Т.А., Ушкова М.А., Косухин К.П., Руслан А.В., Яковенко В.В., Синёв А.Ю. Расплавные «карманы» и включения сульфидов: свидетельства трансформации мегакристаллов граната в щелочных базальтоидах (Шаварын-Царам, Тарят, Монголия) // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 5. С. 82–100. [http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698\\_2023\\_231\\_05\\_5](http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_5).

**Благодарности.** Авторы отдают должное научному вкладу недавно ушедшего выдающегося ученого и доброго друга д.г.-м.н. О.В. Авченко в данное исследование.

Благодарим А.А. Чашина, Г.М. Вовна и О.А. Карась за ценные советы, а М.В. Мокроусова за помощь в пробоподготовке.

**Финансирование.** Работа выполнена по госзаданию на 2018–2020 гг. по теме № 0270-2016-0002 «Этапы и характеристики магматизма и метаморфизма в истории формирования и эволюции континентальной литосферы восточной окраины Азии».

# Melt “pockets” and sulfide inclusions: evidence for the garnet megacrysts transformation in alkali basalts (Shavaryn-Tsaram, Tariat Plateau, Mongolia)

A.V. Aseeva, A.A. Karabtsov, S.V. Vysotskiy, T.A. Velivetskaya,  
M.A. Ushkova, K.P. Kosukhin, A.V. Ruslan, V.V. Yakovenko, A.Yu. Sinyov

*Anna V. Aseeva*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
barkar\_anna@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5809-8125>

*Aleksandr A. Karabtsov*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Head of Laboratory  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
karabzov@fegi.ru

*Sergey V. Vysotskiy*

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy Chief Researcher, Head of Laboratory  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
vysotskiy@fegi.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-5194-5616>

*Tatyana A. Velivetskaya*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Head of Laboratory  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
velivetskaya@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2833-1026>

*Maria A. Ushkova*

Engineer  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
m\_ushkova@list.ru

*Konstantin P. Kosukhin*

Engineer  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
kokosus99@mail.ru  
antsinyov@yandex.ru

*Aleksey V. Ruslan*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Junior Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
aleksei\_ruslan@mail.ru

*Viktoriya V. Yakovenko*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
yakovenko\_v.v@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0003-3834-3626>

*Anton Yu. Sinyov*

Engineer

Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
antsinyov@yandex.ru

**Abstract.** This paper studies sulfide inclusions and melt “pockets” in garnet megacrysts collected from the Shavaryn-Tsaram Cenozoic basaltic cone (Tariat plateau, Mongolia). Syngenetic sulfide inclusions confined to growth zones of garnet megacrysts were formed in garnets due to the presence of two immiscible melts: strongly fluidized silicate and sulfide melts. Isotopic data indicate a mantle source for sulfides ( $\delta^{34}\text{S}$  0.1–0.4 ‰,  $\delta^{33}\text{S}$  0.1–0.2 ‰,  $\Delta^{33}\text{S}$  0.00–0.03 ‰) and host garnets ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  5.4 to 5.8 ‰). Formation of garnet megacrysts was caused by heterogeneous nucleation (epitaxial growth). Silicate inclusions (melt and multi-phase) witnessed garnet megacrysts evolution in alkali basaltic magma. The Win TWQ 2.32 modelling revealed that garnets were captured from the lower horizons of the Earth’s crust at  $P = 0.8\text{--}1$  GPa and  $T = 1120\text{--}1160$  °C and multi-phase silicate inclusion was crystallized at same pressure but lower temperatures:  $P = 0.85\text{--}1.1$  GPa and  $T = 790\text{--}950$  °C.

**Keywords:** alkali basalts, megacrysts, garnet, melt “pockets”, sulfide inclusions, deep nodules, Win TWQ 2.32, Shavaryn-Tsaram, Mongolia

**For citation:** Aseeva A.V., Karabtsov A.A., Vysotskiy S.V., Velivetskaya T.A., Ushkova M.A., Kosukhin K.P., Ruslan A.V., Yakovenko V.V., Sinyov A.Yu. Melt “pockets” and sulfide inclusions: evidence for the garnet megacrysts transformation in alkali basalts (Shavaryn-Tsaram, Tariat Plateau, Mongolia). *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(5):82-100. (In Russ.). [http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698\\_2023\\_231\\_05\\_5](http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_231_05_5).

**Acknowledgments.** The authors deeply appreciate Dr. O.V. Avchenko’s contribution to the paper. He was an outstanding scientist and our good friend. We are grateful to A.A. Chashchin, Dr. G.M. Vovna, and O.A. Karas for valuable advice, and M.V. Mokrousov for help in sample preparation.

**Funding.** The work was performed under the 2018-2020 State Assignment No. 0270-2016-0002 “Stages and characteristics of magmatism and metamorphism within the formation and evolutionary history of the continental lithosphere on the Eastern Asian margin”.

## Введение

Присутствие мегакристов (крупных монокристаллов полевого шпата, клинопироксена, граната, шпинели, ильменита, биотита и некоторых других минералов) в кайнозойских щелочных базальтоидах, их неизменное соседство с включениями гипербазитов, а также их взаимоотношения с вмещающими лавами и пирокластикой обсуждаются в научной литературе уже многие годы [1–9]. В соответствии с общепринятой классификацией [10], они принадлежат к группе А внутрикратонных ксенолитов, связанных с изверженными щелочными основными магмами, выделяясь среди других в силу своих размеров, прозрачности и обособленности.

Включения нодулей базитов и гипербазитов практически единогласно признаются тектонитами [5, 6, 10], в то время как единого мнения в отношении генезиса мегакристов нет. Существующие гипотезы в общем можно разделить на четыре

группы. Согласно первой, мегакристы были захвачены из гигантозернистых эклогитоподобных (сиенитоподобных) пород в нижних горизонтах земной коры и вынесены в качестве ксенолитов базальтами при их продвижении на поверхность [11 и др.]. Вторая объединяет гипотезы мантийного метасоматоза по различным механизмам и предполагает кристаллизацию мегакристаллов в виде одиночных кристаллов или гигантозернистых пород (мантийных пегматитов) из связанных с базальтами флюидов или флюидизированных расплавов при высоком давлении в глубинных камерах с последующим захватом базальтами [6–9]. Сторонники третьей гипотезы рассматривают мегакристы как продукты кристаллизации расплавов, связанных с переработанной субдущированной литосферой [3]. Согласно четвертой, мегакристы представляют собой пегматоидные жилы, возникшие в подводных каналах готовящихся базальтоидных извержений [12].

Включения мегакристов, по мнению многих исследователей, имеют глубинное происхождение и могут быть использованы для реставрации физико-химических условий процессов, происходящих на глубинах, соответствующих нижней коре – верхней мантии. В связи с этим мы исследовали все разнообразие мегакристов и глубинных ксенолитов в базальтах и вулканокластитах конуса Шаварын-Царам (плато Тарят, Монголия) с целью восстановить условия формирования и эволюции мегакристов. Для данной работы были отобраны преимущественно гранатосодержащие разновидности (мегакристаллы граната, гранат-клинопироксеновые сростания и гранатосодержащие нодулы ультраосновных пород), поскольку гранат является хорошо изученным и очень информативным объектом для термодинамического моделирования.

Кроме того, среди изученных пород были обнаружены мегакристы граната, содержащие силикатные расплавные и многофазные включения, а также сульфидные минеральные включения, никогда ранее не встречавшиеся в мегакристаллах граната (хотя подобные включения были известны в ультраосновных нодулах и мегакристах клинопироксена [13–15]).

Таким образом, целью работы было выяснить физико-химические условия формирования и дальнейшего преобразования гранатовых мегакристов в щелочных базальтах.

## **Методы исследования**

Большая часть исследований была выполнена в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. Химический состав минералов ассоциации мегакристов и гипербазитов, а также минералогия вмещающих щелочных базальтоидов были изучены с помощью рентгеноструктурного анализа на микродифрактометре JXA–8100 (Jeol, Япония). Валовый анализ содержания химических элементов и микроэлементов пород выполнен методом ICP-MS на спектрометре Agilent 7500c (Agilent Techn., США). Изотопный анализ кислорода – на изотопном масс-спектрометре MAT 253 (Thermo Scientific, ФРГ). Текстура и внутреннее строение образцов были изучены с помощью рентгеновской томографии на SkyScan 1272 (Bruker microCT, Бельгия). Наличие аморфной фазы определялось методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре MiniFlex II (Rigaku, Япония), Cu-K $\alpha$  эмиссия, база ICDD.

В Ярославском филиале ФТИАН РАН был определен точечный анализ микроэлементов методом вторично-ионной масс-спектрометрии на приборе Cameca

IMS-4F. Также авторами было выполнено термодинамическое моделирование петрографически обоснованных ассоциаций с помощью программного комплекса Win TWQ 2.32 на основании химического состава ассоциирующих фаз в координатах P-T-X по кривым фазовых равновесий [16].

#### **Список используемых в тексте сокращений:**

Alm – алмадин, Ap – апатит, Bt – биотит, Cpx – клинопироксен, Glass – стекло, Grs – гроссуляр, Grt – гранат, Ilm – ильменит, Mica – слюда, Mss – моносulfидный твердый раствор, Ol – оливин, Orx – ортопироксен, Phl – флогопит, Pl – плагиоклаз, Po – пирротин, Prp – пироп, Px – пироксен, Spl – шпинель, Sps – спескартин, Sympl – симплектит,  $\beta$  – базальт.

### **Краткое геологическое описание объекта исследования**

Палеовулкан Шаварын-Царам представляет собой эруптивный центр на правом берегу р. Нарын-Гичигинэ (48°02'55,3" N, 100°09'43,9" E), исключительно насыщенный мегакристаллами и обломками гипербазитов. Он и ранее привлекал внимание исследователей [1, 2, 5, 15–18]. Некк палеовулкана и прилегающие к нему покровы плато Хангай сложены лавами базальтов с порфировой структурой и пористой текстурой и вулканокластитами основного состава, насыщенными мегакристаллами и включениями глубинных ксенолитов [2, 17, 18]. По химическому составу содержащие мегакристаллы и включения гипербазитов лавы близки к нефелин-лейцитовым базанитам, причем вулканокластиты преобладают над лавами [5, 18]. Возраст вулкана оценивается в 0,54–0,42 млн лет [19].

### **Результаты**

Исследован исключительный по разнообразию минеральных включений палеовулкан Шаварын-Царам (Тарягское плато, Монголия), чьи лавы, а особенно пирокластита, изобилуют мегакристаллами полевого шпата, клинопироксена, граната, шпинели, ильменита, амфибола и слюды (рис. 1, табл. 1: Grt1, Cpx1, Mica1). Кроме того, в базальтоидах Шаварын-Царама присутствуют многочисленные ксенолиты гипербазитов «черной» и «зеленой» серий [2, 17].

Все эти включения сосуществуют в пределах единой вулканической постройки одновременно, а базальты в этом случае служат не только транспортерами, но и матриksom, где совершаются преобразования захваченных пород и минералов. Вслед за предшественниками [7, 17, 20] мы убеждены, что анализ всей совокупности включений, сосуществующих в щелочных базальтоидах, должен быть комплексным, поэтому мы изучали все обнаруженные разновидности включений. На рисунке показаны соседствующие в одном образце базальта (рис. 1, А) включения глубинных нодулей «зеленой» серии и мегакристаллов.

**Нодули ультраосновных пород.** Включения гипербазитов представляют собой ксенолиты крупнозернистых пород, иногда даже в пределах одного образца сильно различающиеся по минеральному составу и геохимии [5, 20]. Ультрабазиты «зеленой» серии (рис. 1, Б) сложены преимущественно зелеными оливином, диопсидом (табл. 1, Cpx3) и энстатитом в различных пропорциях (лерцолины (рис. 1, Б1), клинопироксениты (рис. 1, Б2)). Они крупные (до 20 см), имеют

Таблица 1  
Химический состав (вес.%) мегакристов, глубинных нодулей, а также минералов и фаз включений в мегакристаллах граната (Шаварын-Царам, Монголия)

|                                | Мегакристы       |        |       | Grt-Px сросток |       | Нодули «зеленой» серии |       | Нодули «черной» серии |                  | Мультифазное включение |       |       |        |        | Распл, вкл., Grt | Сульфидные включения* |                  |       |
|--------------------------------|------------------|--------|-------|----------------|-------|------------------------|-------|-----------------------|------------------|------------------------|-------|-------|--------|--------|------------------|-----------------------|------------------|-------|
|                                | Grt1             | Cpx1   | Mica1 | Grt2           | Cpx2  | Grt3                   | Cpx3  | Cpx4                  | Mica4            | Mica5                  | Cpx5  | Spl5  | Glass5 | Glass6 |                  |                       | Po               | Mss   |
|                                | SiO <sub>2</sub> | 40,92  | 49,27 | 35,15          | 40,61 | 49,58                  | 42,61 | 52,47                 | 47,85            | 40,57                  | 36,82 | 49,39 | 0,00   | 47,67  | 45,32            |                       |                  |       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,48             | 1,84   | 11,32 | 0,69           | 1,54  | 0,00                   | 0,71  | 0,76                  | 3,83             | 11,04                  | 1,70  | 0,52  | 4,90   | 2,61   |                  |                       |                  |       |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,00             | 0,00   | 0,00  | 0,00           | 0,00  | 0,51                   | 0,32  | 0,00                  | 0,00             | 0,00                   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00   |                  |                       |                  |       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 23,10            | 9,08   | 14,89 | 22,54          | 8,83  | 22,77                  | 7,03  | 9,67                  | 16,36            | 15,87                  | 8,41  | 63,07 | 18,33  | 16,65  |                  |                       |                  |       |
| FeO                            | 14,40            | 9,30   | 12,51 | 14,79          | 7,83  | 8,31                   | 3,80  | 6,26                  | 8,35             | 11,95                  | 8,33  | 19,61 | 10,07  | 10,75  | Fe               | 45,32                 | 44,40            |       |
| MnO                            | 0,42             | 0,00   | 0,05  | 0,36           | 0,16  | 0,29                   | 0,10  | 0,00                  | 0,00             | 0,00                   | 0,00  | 0,30  | 0,00   | 0,14   |                  |                       |                  |       |
| MgO                            | 15,59            | 11,64  | 12,07 | 15,31          | 13,26 | 20,62                  | 15,75 | 11,08                 | 19,92            | 12,69                  | 14,22 | 16,44 | 3,62   | 3,69   |                  |                       |                  |       |
| CaO                            | 5,14             | 16,59  | 0,83  | 5,58           | 15,90 | 4,78                   | 18,03 | 22,91                 | 0,00             | 0,00                   | 16,20 | 0,00  | 8,61   | 6,84   |                  |                       |                  |       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,00             | 2,29   | 0,48  | 0,00           | 2,18  | 0,17                   | 1,60  | 0,94                  | 0,00             | 0,00                   | 1,38  | 0,00  | 1,44   | 6,17   |                  |                       |                  |       |
| K <sub>2</sub> O               | 0,00             | 0,00   | 9,06  | 0,00           | 0,00  | 0,01                   | 0,04  | 0,00                  | 11,04            | 9,63                   | 0,00  | 0,00  | 4,62   | 5,52   |                  |                       |                  |       |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,00             | 0,00   | 0,00  | 0,00           | 0,00  | 0,00                   | 0,00  | 0,00                  | 0,00             | 0,00                   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 1,98   |                  |                       |                  |       |
| NiO                            | 0,00             | 0,00   | 0,00  | 0,00           | 0,00  | 0,00                   | 0,00  | 0,00                  | 0,00             | 0,00                   | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00   | Ni               | 1,91                  | 5,70             |       |
|                                |                  |        |       |                |       |                        |       |                       |                  |                        |       |       |        |        |                  | Cu                    | 0,00             | 9,04  |
|                                |                  |        |       |                |       |                        |       |                       |                  |                        |       |       |        |        |                  | S                     | 52,68            | 40,86 |
| Σ                              | 100,05           | 100,01 | 99,94 | 99,88          | 99,28 | 100,07                 | 99,85 | 99,47                 | 100 <sup>x</sup> | 98                     | 99,63 | 99,94 | 99,26  | 99,67  |                  | 99,91                 | 100 <sup>x</sup> |       |

\* Атомные количества.

Примечание. Сульфидные включения – атомные количества. 100<sup>x</sup> – в пересчете на 100 %.

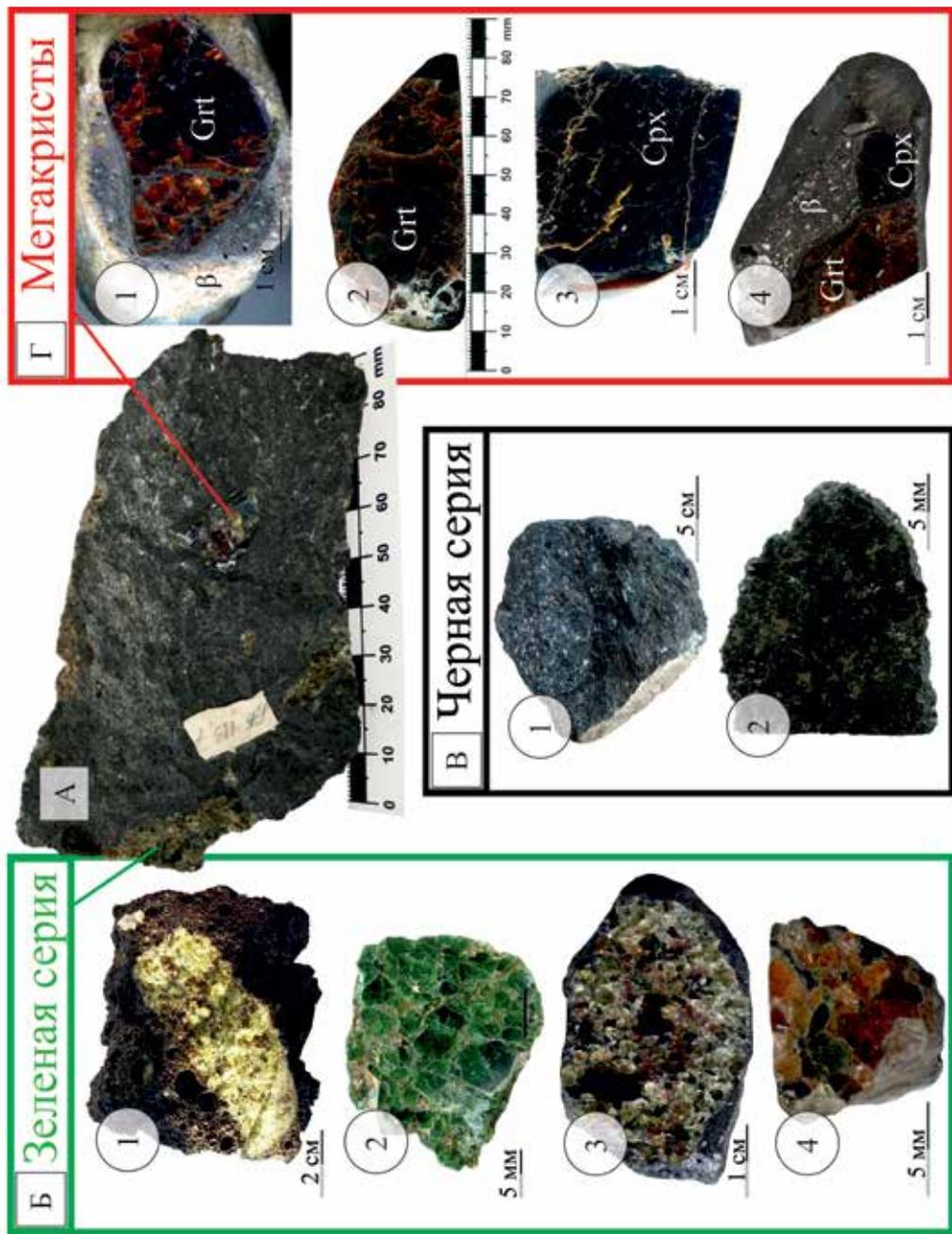


Рис. 1. Сосуществующие в щелочных базальтоидах (А) включения «зеленой» (Б) и «черной» (В) серий гипербазитов и мегакристов (Г).

1–4: пояснения см. в тексте

округлую или уплощенную форму, часто окружены реакционной каймой. Лерцолиты и вебстериты преобладают, реже встречаются верлиты и клинопироксены. Иногда в этих породах присутствуют гранат, шпинель и/или слюда (табл. 1: Grt3, Cpx3). В отдельных случаях этими минералами может быть сложено до 90 % включения, тогда породу классифицируют как, например, гранатовый лерцолит (рис. 1, Б3) или гранатовый вебстерит (рис. 1, Б4).

Включения «черной» серии (рис. 1, В) состоят в основном из черного авгита (табл. 1: Cpx4), керсутита и биотита (табл. 1: Mica4). Они встречаются гораздо реже, чем включения «зеленой» серии, и представлены преимущественно пироксеновым горнблендитом (рис. 1, В1) и амфиболовым пироксенитом (рис. 1, В2). В этих включениях мало оливина, а гранат отсутствует вовсе. Клинопироксен здесь представлен авгитом, а не диопсидом (табл. 1: Cpx3 и Cpx4). Иногда включения «черной» серии образуют прожилки в перидотитовых включениях, были находки и «такситовых» перидотитов [9, 17].

**Мегакристы.** Самая загадочная разновидность включений в щелочных базальтоидах и их пирокластике – мегакристы (рис. 1, Г1). Это весьма крупные (до 10 см и более) изометричные монокристаллы или мономинеральные агрегаты полевого шпата, граната (рис. 1, Г2), титанавгита (рис. 1, Г3), ильменита, слюды, ортопироксена, шпинели, амфиболов, редко цирконов и корундов, залегающие как отдельные обломки в пирокластике (рис. 1, Г2) или как включения в базальте (рис. 1, Г1). Обычно они представлены мономинеральными образованиями, однако встречаются сростания мегакристаллов, например граната и авгита (рис. 1, Г4). Внешняя поверхность мегакристов окружена, как правило, закалочной каймой (рис. 1, Г1 и Г4), они утратили кристаллографические формы, часто трещиноваты и несут следы растворения и оплавления.

**Гранат.** Неизменные гранаты мегакристов представляют собой красные «сливные» монокристаллы. Они относятся к группе пиральспита с  $\text{Prp}56.48 \text{ Alm}29.27 \text{ Grs}13.39 \text{ Sps}0.87$  (рис. 1, табл. 1: Grt1). Примечательно, что химический состав мегакристов граната из кайнозойских щелочных базальтов таких пространственно разобщенных территорий, как, например, Австралия, Вьетнам и Китай, аналогичен составу гранатов, исследованным нами. Гранаты монокристаллов и гранат-авгитовых агрегатов идентичны, однако отличаются от гранатов из глубинных нодулей меньшим содержанием пиропового компонента (табл. 1: Grt1, Grt2, Grt3). Примечательно, что некоторые сростки мегакристов граната и пироксена имеют первичные межзерновые границы и связаны парагенетически, а другие имеют реакционные межзерновые каймы.

Внутри мегакристов граната зачастую можно обнаружить изменения по трещинам и ослабленным зонам кристалла, симплектиты, структуры твердофазного разложения гранатов. Они присутствуют почти во всех изученных гранатах. В результате такой трансформации вещество граната преобразовывается в коллаж минералов вторичной ассоциации: оливин, плагиоклаз, шпинель и ортопироксен. При этом, несмотря на глубокую структурную реорганизацию, концентрации основных элементов остаются неизменными [8]. Зондирование широким лучом показывает, что симплектит по химическому составу соответствует первичному гранату.

## Включения в мегакристаллах граната

Большинство исследованных гранатов не содержат никаких других фаз, за исключением вторичных симплектитов, однако были найдены образцы с необычными включениями стекол, именуемыми расплавленными карманами, а также многофазные и минеральные включения.

**Силикатные включения.** Среди силикатных включений выделяются расплавленные «карманы» и мультифазные. Расплавленные включения представляют собой изометричные обособления вулканического стекла, расположенные в межзерновых трещинах (рис. 2, табл. 1: Glass6). Воды в исследованных стеклах не более 1 %. Приведенный на рис. 2 образец содержит также включения сульфидов.

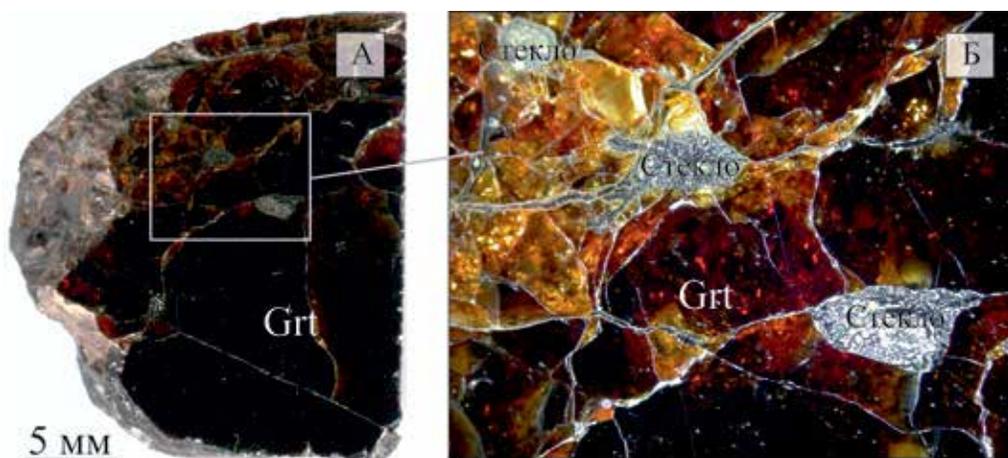


Рис. 2. Включения вулканического стекла (расплавленные «карманы») в сульфидсодержащем мегакристе граната (А) из щелочных базальтоидов Шаварын-Царама. Б – увеличенный фрагмент А

В центре другого мегакриста граната было обнаружено многофазное включение (рис. 3, Ж), большая часть которого занята стеклом (табл. 1: Glass5). В отличие от обсидиановидных расплавленных карманов, эти стекла пемзовидные, с пористостью около 25 % и округлой формой газовых каверн (рентгеновский спектр см. на рис. 3, З). В стекло «погружены» почти идиоморфные кристаллы биотита, ортопироксена, шпинели и других минералов.

Слюда мультифазного включения представлена крупными идиоморфными кристаллами биотита с необычайно высокими концентрациями Ti (рис. 3, А, Б, Е, табл. 1: Mica5). Интересно, что подобные по составу мегакристаллы биотита (табл. 1: Mica1) обнаружены в пирокластике изученного объекта [19]. Предполагается, что крайне высокие концентрации титана являются результатом того, что  $Ti^{4+}$  занимает и октаэдрические, и тетраэдрические позиции в структуре биотита [21].

Ортопироксен и клинопироксен (табл. 1: Srx5) представлены крупными кристаллами с нечеткими границами, постепенно «переходящими» в вулканическое стекло (рис. 3, В, Г). Червеобразные зерна оливина можно наблюдать на внешней границе некоторых кристаллов ортопироксена (рис. 3, Е). Промежутки между зернами оливина заполнены плагиоклазом. Шпинель в многофазном включении

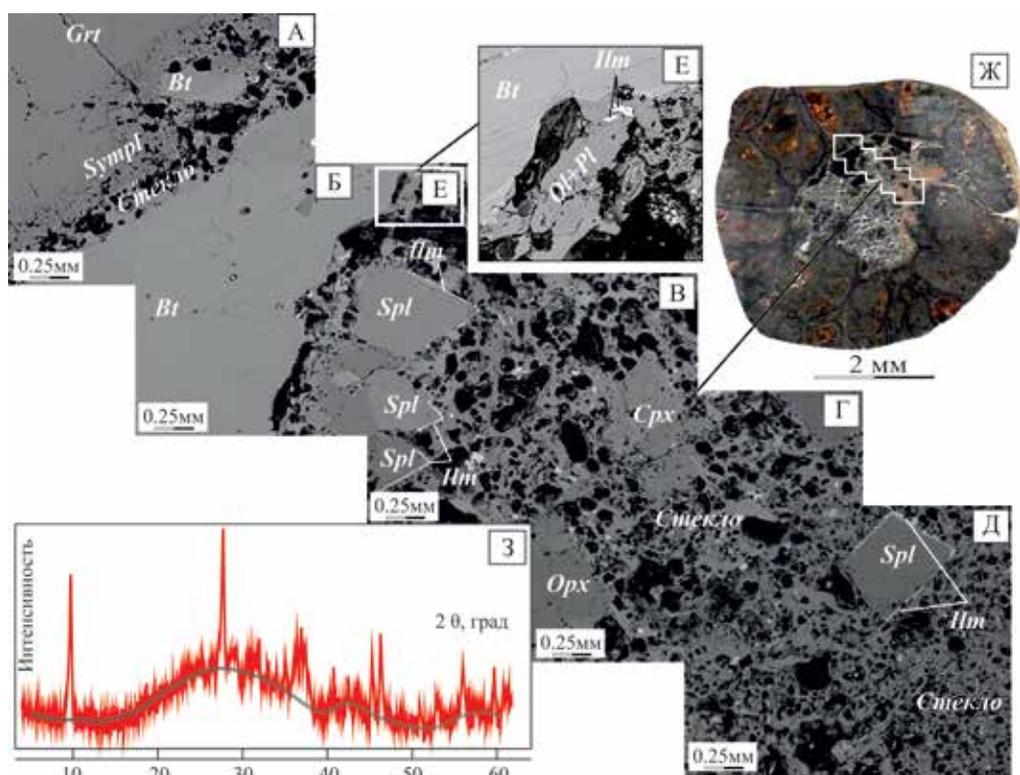


Рис. 3. Внутренняя структура многофазного включения (совмещенное изображение микрофотографий А–Д). Ж – общий вид исследуемой области. Вставка Е демонстрирует увеличенные изображения фрагмента Б. 3 – дифрактограмма стекла включения

встречается в виде идиоморфных октаэдрических кристаллов (рис. 3, Б, В, Д, табл. 1: Spl5), окруженных каймой ильменита на границе со стеклом.

**Сульфидные включения** (рис. 4, А и Б) сингенетичные и состоят преимущественно из Ni-содержащего пирротина (табл. 1: Po) и раскристаллизованных капель моносльфидного твердого раствора (Mss) (табл. 1: Mss, рис. 4, Г). Эти включения Mss считаются продуктом кристаллизации сульфидного расплава, вызванной переохлаждением [4].

Сульфидные включения изометричные (рис. 4, Б–Г, 3), часто удлиненные (рис. 4, Б–Г), ориентированы согласно направлению роста кристалла (3D рентгеновские изображения, SkyScan, рис. 4, Д). Рои включений очерчивают плоскости роста, характерные для дельтоидального икоситетраэдра (рис. 4, Е, Ж). Субмикронный анализ поверхности выявил линейно-глобулярную структуру граната (рис. 4, 3, И). Глобулы размером почти 1 мкм, которые, вероятно, сами являются нуклеарами, формируют слои граната. Такой способ упорядочения значительно отличается от организации слоев в метаморфогенном гранате (рис. 4, К).

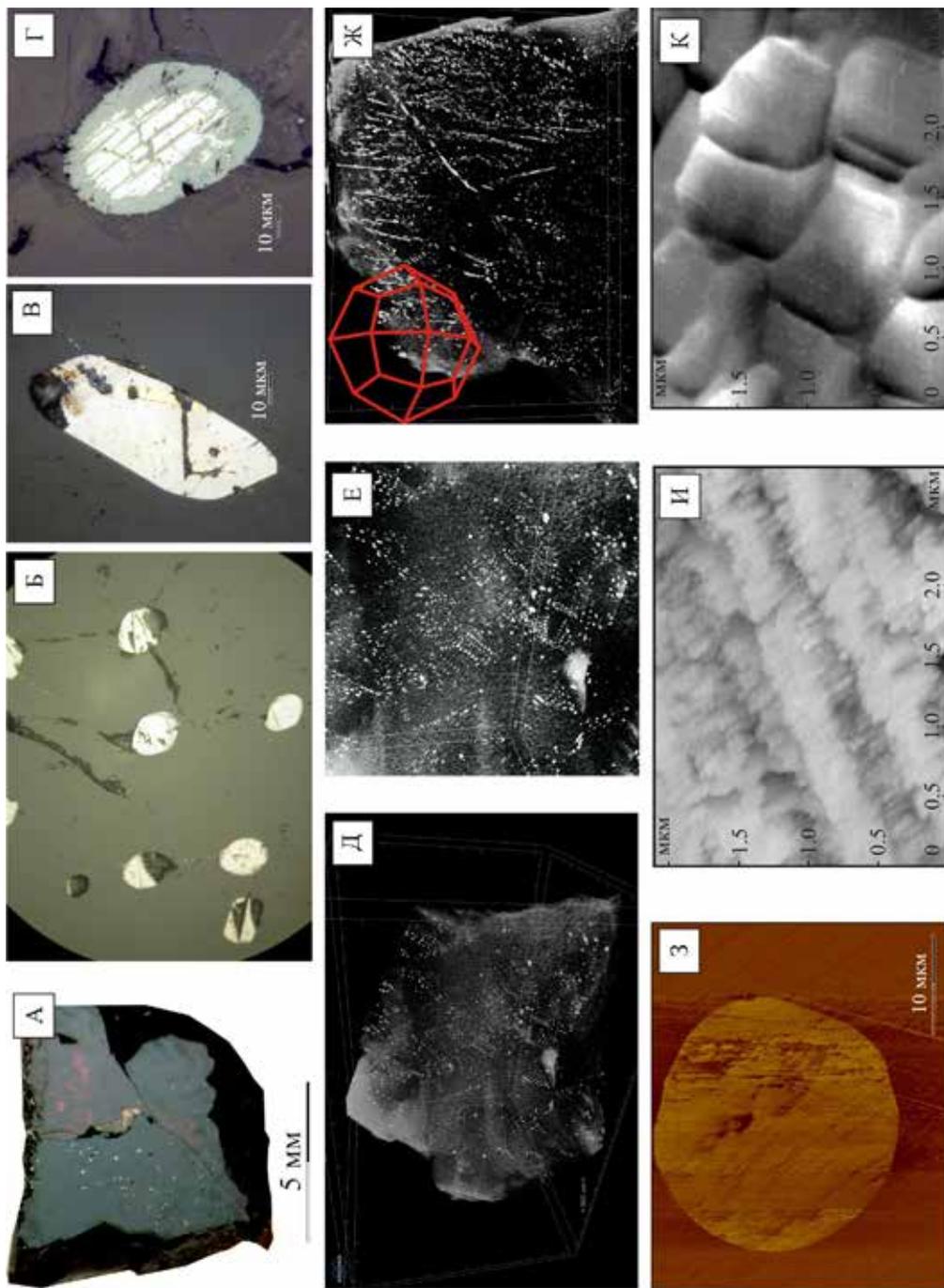


Рис. 4. Сульфидные включения в метакристаллах граната. *А* – обломок сульфидсодержащего метакристалла граната, *Б* – увеличенный фрагмент *А*, *В* – прожилок кубанита в пирротине, *Г* – выделение пирротина в *Mss*, *Д* – обобщенный вид, *Е* – рой включений, *Ж* – плоскости роста граната, маркированные включениями сульфидов, *З* – *Mss* в гранате, *И* – субмикронная структура *Mss*, *К* – наноструктура граната метаморфического происхождения. *А-Г* – оптический микроскоп, *Д-Ж* – рентгеновский томограф, *З-К* – наноскоп

## Стабильные изотопы

**Мультиизотопный состав серы ( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\Delta^{33}\text{S}$ )** сульфидных включений из гранатовых мегакристов базальтоидов Шаварын-Царама был изучен с целью определить, является ли источник серы коровым или мантийным. Были получены значения  $\delta^{34}\text{S}$  0,1–0,4 ‰,  $\delta^{33}\text{S}$  0,1–0,2 ‰,  $\Delta^{33}\text{S}$  0,00–0,03 ‰, характерные для мантийных, метеоритных, вулканогенных образований и MORB (базальтов срединно-океанических хребтов) [22, 23].

**Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ )** кислородсодержащих минералов глубинных нодулей «зеленой» и «черной» серий, мегакристов, а также кристаллов слюды из расплавленного кармана использовался для определения генетического источника этого элемента. На основании полученных данных мы выделили две группы минералов (и пород) с близкими значениями (табл. 2). Первая группа включает в себя глубинные нодули «зеленой» серии, минералы мегакристовой ассоциации и включений в них ( $5,3\text{--}5,7 \pm 0,2$  ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ). Концентрация  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  во вмещающих базальтах и вулканокластитах несколько выше ( $\sim 6,4$  ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ). Однако полученные характеристики соответствуют типичным мантийным значениям [24], свидетельствуя о магматическом происхождении всех этих пород и минералов. Ко второй группе можно отнести глубинные нодули «черной» серии и слагающие их минералы, концентрации  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  в которых значительно выше мантийных (12,1–12,7 ‰).

Таблица 2

**Изотопные составы компонентов многофазного включения, а также связанных с ним ультраосновных пород и базальта (Шаварын-Царам, Монголия)**

| Группа включений/<br>порода | Характеристика                        | Минерал/<br>вещество | $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ , ‰ |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------|--|
| Мегакристы                  | Из лав                                | Гранат               | 5,8                                      |
|                             | Из пирокластике                       | Клинопироксен        | 5,9                                      |
|                             | Гранат<br>с мультифазным включением   | Гранат               | 5,3                                      |
|                             | Многофазное включение<br>в мегакристе | Слюда                | 5,3                                      |
| Нодули «зеленой» серии      | Гранатовый вебстерит                  | Гранат               | 5,5                                      |
|                             |                                       | Вал                  | 5,7                                      |
|                             | Шпинелевый лерцолит                   | Слюда                | 5,7                                      |
| Нодули «черной» серии       |                                       | Вал                  | 5,5                                      |
|                             | Амфиболовый пироксенит                | Клинопироксен        | 12,5                                     |
|                             |                                       | Слюда                | 12,1                                     |
| Лавы                        |                                       | Вал                  | 12,2                                     |
|                             | Базанит                               | Вал                  | 6,4                                      |

Примечание. Стандартная ошибка  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} \pm 0,2$  ‰.

## Термодинамическое моделирование Win TWQ 2.32

С помощью программного комплекса WinTWQ 2.32 [16] были рассчитаны возможные равновесные P-T условия для мегакристов и минералов гипер-базитовых нодулей, ассоциирующих с щелочными базальтоидами Шаварын-Царам. В качестве исходных данных была использована информация о составе

парагенетически связанных минералов (табл. 1). Основная проблема применения таких программных комплексов к реальным объектам состоит в том, что наблюдаемая минеральная ассоциация практически никогда не бывает равновесна и полное ее совпадение с модельной ассоциацией по составу минералов и их модам наблюдается крайне редко. Тем не менее, применение геотермометров и геобарометров возможно в случае, когда достигается локальное термодинамическое равновесие внутри некоторого объема в некоторый момент времени [25]. В соответствии с принципом мозаичного равновесия, к минералам, сосуществующим в такой относительно закрытой системе, может быть применено понятие о минеральной ассоциации. Таким образом, в основе нашей работы лежит предположение, что именно такое локальное равновесие устанавливается между захваченными минералами и щелочным базальтом-хозяином. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты WinTWQ 2.32 моделирования минералов включений, сосуществующих в щелочных базальтоидах

|                             | Порода/парагенезис                          | Моделируемая ассоциация       | T, °C             | P, ГПа       |
|-----------------------------|---|-------------------------------|-------------------|--------------|
| Мегакристы                  | Гранат-клинопироксеновые сростки            | Grt-Cpx                       | 1070–1170         | 0,75–1,1     |
|                             | Мегакрист граната с расплавленным карманом  | Grt-Cpx                       | 1120–1160         | 0,8–1        |
|                             | Мультифазное включение в мегакристе граната | Ol-Spl ± Grt<br>Opx-Cpx ± Grt | 950<br>790        | 0,95<br>0,85 |
| Гипербазиты «зеленой» серии | Гранат-шпинелевый вебстерит                 | Grt-Cpx-Ol-Spl                | 1050–1160         | 1,5–1,6      |
|                             |   | Grt-Opx-Cpx                   | 1050              | 1,2–1,4      |
|                             | Пироксенит<br>Шпинелевый лерцолит           | Cpx-Ol-Spl<br>Cpx-Ol-Spl      | 1090<br>1130–1180 | 1,8<br>1,4   |
| Гипербазиты «черной» серии  | Пироксеновый горнблендит                    | Cpx-Ap-Pl-Phl                 | 700–900           | 1,9          |

Моделируемые минералы мегакристовой ассоциации (гранат и клинопироксен), как показало исследование, равновесны в широком диапазоне давлений (0,75–1,1 ГПа) и температур (1070–1170 °C). Кристаллизация ассоциации оливин–шпинель в расплавленном «кармане» в гранатовом мегакристе протекала при T = 950 °C и P = 0,95 GPa, а ассоциации ортопироксен–клинопироксен – при T = 790 °C и P = 0,85 ГПа.

Равновесные температуры и давления минералов гипербазитов «зеленой» серии варьируют от 1050 до 1180 °C и 1,2–1,8 ГПа. Гипербазиты «черной» серии имеют более низкие температуры и более высокие давления равновесия: T = 700–900 °C, P = 1,9 ГПа.

### Обсуждение

Обобщая имеющиеся и полученные в настоящем исследовании данные, становится очевидным, что нодулы и мегакристы, в избытке присутствующие в конусе Шаварын-Царам, не были образованы в базальтах *in situ*, а являются тектонитами и ксенокристами. Об этом свидетельствуют закалочные

(келифитовые) каймы, окружающие мегакристы, и структуры твердофазного разложения – симплектиты. При этом прослеживается сильное влияние флюидной составляющей щелочно-базальтового расплава, поскольку: 1) вулканокластиты количественно преобладают над дегазированными лавами; 2) среди мегакристов и глубинных нодулей присутствуют водосодержащие минералы и фазы (амфибол, слюда и стекло); 3) в гранатовых мегакристах присутствуют алюмосиликатные расплавные и многофазные включения, образованные за счет метасоматически привнесенного материала.

Что касается процесса образования мегакристаллов, то гигантские размеры первичных гранатовых кристаллов, их однородность и прозрачность предполагают необычные условия роста. Сингенетичные включения, представленные моносulfидным твердым раствором или пирротинном, маркируют поверхности роста в кристалле граната и фиксируют присутствие двух несмесимых кристаллизационных сред (сульфидной и алюмосиликатной) в процессе роста. А анализ поверхности выявил необычную линейно-глобулярную структуру гранатов-мегакристов. Поэтому мы рассматриваем мегакристы как продукт гетерогенной кристаллизации в условиях переохлаждения, что обеспечивает быстрый рост, прозрачность и ярко выраженные кристаллографические формы. Все это характерно для базальтовых мегакристаллов, даже если они закалены, частично растворены или оплавлены при захвате базальтами.

Кроме того, находки гранат-пироксеновых агрегатов в базальтах могут служить доказательством того, что эти два минерала были захвачены на одном уровне в коре и быстро подняты на поверхность. Об этом, в частности, свидетельствуют не полностью раскристаллизованные минералы мультифазного включения. Как показано [26], некоторые базальтовые расплавы при определенных условиях могут очень быстро подниматься по сети разломов или ослабленных зон к поверхности, изливаясь на поверхность в виде вулканической лавы [26] или будучи выброшенными в виде пирокластики.

Все минералы ассоциации мегакристов и глубинных нодулей представляют собой изоморфные ряды, например гранатовый – алмадин–пироп–гроссуляр–спессартин, в то же время гранаты мегакристов и гранат-клинопироксеновых сростков содержат меньше «пироповой компоненты», чем гранаты глубинных нодулей «зеленой» серии. Захваченные щелочно-базальтовыми лавами, гранаты прошли на своем пути к поверхности Земли через ряд метастабильных состояний и испытали перераспределение составляющих их компонентов. Эти изменения, зарегистрированные в химическом составе раскристаллизованных минералов, мы использовали для термодинамического моделирования условий формирования, захвата расплавом и дальнейшей эволюции мегакристов и ультраосновных ксенолитов с помощью программного комплекса WinTWQ 2.32. Согласно результатам термодинамического моделирования минералы мегакристовой ассоциации, найденные в палеовулкане Шаварын-Царам, формировались в условиях, соответствующих нижней коре (0,8–1,1 ГПа), а сосуществующие с ними гипербазитовые нодули – на значительно больших глубинах, вплоть до границы верхней и нижней мантии (до 1,8 ГПа).

И, наконец, изучение изотопного состава показало родственность глубинных нодулей «зеленой серии», мегакристов и вмещающих базальтоидов и чужеродность нодулей «черной серии», хотя ранее предполагалось их близкое средство с минералами мегакристов [9].

Изложенные факты, на наш взгляд, свидетельствуют в пользу гипотезы образования мегакристов как продуктов мантийного метасоматоза [7, 9, 12] за счет полибарического фракционирования поднимающихся из мантии расплавов. Мегакристаллы граната в вулканической системе Шаварын-Царам могли образоваться в верхней части этой полибарической системы, в земной коре. Таким образом, результаты моделирования указывают на метасоматические процессы в земной коре, а не в мантии. А сами мегакристы граната с расплавленными карманами и сульфидными сингенетичными включениями внутри стали «отпечатком» процессов, происходивших в недрах Земли около 0,54–0,42 млн л. н.

## Выводы

1. Магматический источник щелочно-базальтового конуса Шаварын-Царам был сильно флюидизирован. Этот фактор обусловил быстрый рост крупных кристаллов (мегакристов) и определил низкую вязкость расплава, а также взрывной способ разгрузки палеовулкана.

2. Расплавные карманы и мультифазные включения вторичны, являются результатом метасоматических изменений и не могли быть продуктами прямой перекристаллизации граната.

3. Сульфидные включения сингенетичны мегакристам гранатов и фиксируют наличие двух несмешиваемых кристаллизационных сред во время их формирования. Упорядочение в рядах сульфидных включений связано с необычной линейно-глобулярной надмолекулярной структурой граната мегакристов, образованных в результате эпитаксиального роста.

4. Вещество мегакристов, сингенетичных включений и расплавных включений имеет, по данным изотопии, общий мантийный источник, в то время как вещество, слагающее нодулы «черной» серии, имеет характеристики, присущие коровым породам.

5. Мегакристы, по нашему мнению, являются продуктами гетерогенного зарождения флюидной или высокофлюидизированной магмы в переходной полибарической системе магматических камер между мантией и корой.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агафонов Л.В., Пинус Г.В., Леснов Ф.П. Глубинные включения в щелочных базальтоидах трубки Шаварын-Царам (МНР) // Докл. АН СССР. 1975. Т. 224, № 5. С. 1163–1165.
2. Кепежинскас В.В. Кайнозойские щелочные базальтоиды Монголии и их глубинные включения. М.: Наука, 1979. 312 с.
3. Allègre C.J., Turcotte D.L. Implications of a two-component marble-cake mantle // Nature. 1986. Vol. 323. P. 123–127. DOI: 10.1038/323123a0.
4. Chaussidon M., Albarède F., Sheppard S.M.F. Sulphur I isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulfide inclusions // Earth and Planetary Science Letters. 1989. Vol. 92, N 2. P. 144–156. DOI: 10.1016/0012-821X(89)90042-3.
5. Ionov D.A. Compositional variations and heterogeneity in fertile lithospheric mantle: Peridotite xenoliths in basalts from Tariat, Mongolia // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2007. Vol. 154. P. 455–477. DOI: 10.1007/S00410-007-0203-Y.
6. Yu X., Zeng G., Chen L.H., Hu S.L., Yu Z.Q. Magma-magma interaction in the mantle recorded by megacrysts from Cenozoic basalts in eastern China // International Geology Review. 2019. Vol. 61, N 6. P. 675–691. DOI: 10.1080/00206814.2018.1446190.

7. Юдалевич З.А., Вапник Е.А. Ксенокристы и мегакристы щелочной оливин-базальт-базанит-нефелинитовой ассоциации Махтеш Рамон (Израиль), их петрохимические взаимодействия с выносящими расплавами и кристаллографические преобразования // Литосфера. 2018. Т. 18, № 5. С. 718–742. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-718-742>.

8. Aseeva A., Avchenko O., Karabtsov A., Chashchin A., Vysotskiy S., Yakovenko V., Zarubina N., Kharitonova N. Melt pockets in garnet megacrysts from Cenozoic alkali basalts of The Savaryn-Tsaram vicinity, Mongolia // *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2022. Vol. 96, N 1. P. 111–122. DOI: 10.1111/1755-6724.14768.

9. Sharkov E.V., Prokofiev V.Y., Chistyakov A.V., Bogina M.M., Gornostaeva T.A. Megacrysts of “bubbly” kaersutite in Neogene–Quaternary volcanic rocks of Northwestern Syria: Evidence for crystallization in a boiling melt/fluid // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. Vol. 16, N 3. P. 221–238. DOI: 10.1134/S0742046322030046.

10. Pearson D.G., Canil D., Shirey S.B. Mantle samples included in volcanic rocks: Xenoliths and diamonds // *Treatise on Geochemistry* (2<sup>nd</sup> ed.). 2014. Vol. 3. P. 169–253. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00216-3.

11. Barns S.J., Roeder P.L. The range of spinel composition in Terrestrial mafic and ultramafic rocks // *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42. P. 2279–2302. DOI: 10.1093/petrology/42.12.2279.

12. Ashchepkov I.V., André L., Downes H., Belyatsky B.A. Pyroxenites and megacrysts from Vitim picrite-basalts (Russia): Polybaric fractionation of rising melts in the mantle? // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. Vol. 42, N 1–2. P. 14–37. DOI: 10.1016/j.jseas.2011.03.004.

13. Bali E., Szabo C., Vaselli O., Török K. Significance of silicate melt pockets in upper mantle xenoliths from the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Western Hungary // *Lithos*. 2002. Vol. 61, N 1–2. P. 79–102. DOI: 10.1016/S0024-4937(01)00075-5.

14. Aliani P., Ntaflou T., Bjerg E. Origin of melt pockets in mantle xenoliths from southern Patagonia, Argentina // *Journal of South American Earth Sciences*. 2009. Vol. 28, N 4. P. 419–428. DOI: 10.1016/j.jsames.2009.04.009.

15. Ionov D.A., Hoefs J., Wedepohl K.H., Wiechert U. Content and isotopic composition of sulfur in ultramafic xenoliths from central Asia // *Earth and Planetary Science Letters*. 1992. Vol. 111, N 2–4. P. 269–286. DOI: 10.1016/0012-821X(92)90184-W.

16. Berman R.G. WinTWQ (version 2.3): A software package for performing internally-consistent thermobarometric calculations // *Geological Survey of Canada*. 2007. Open File 5462. 41 p. DOI: 10.4095/223228.

17. Геншафт Ю.С., Салтыковский А.Я. Каталог включений глубинных пород и минералов в базальтах Монголии. М.: Наука, 1990. 72 с.

18. Lesnov F.P., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V., Koz'menko O.A., Kuchkin A.M., Korolyuk V.N. Detailed mineralogical-geochemical study of a large spinel Lherzolite xenolith in alkali basalt of Shavaryn Tsaram paleovolcano, Mongolia // *Geochemistry International*. 2009. Vol. 47. P. 18–40. DOI: 10.1134/S0016702909010029.

19. Vysotskii S.V., Budnitskii S.Yu., Rasskazov S.V., Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Karabtsov A.A. Preservation of radiogenic argon in mantle micas in situ: Dating of deep seated inclusions from the Shavaryn-Tsaram Paleovolcano, Mongolia // *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 440. P. 1423–1426. DOI: 10.1134/S1028334X11080216.

20. Волохов И.М. Обломки основных и ультраосновных пород в базальтах и кимберлитах – родственные включения или ксенолиты пород верхней мантии? Новосибирск: Наука, 1972. 72 с.

21. Коваль П.В., Ёвсиг В., Сапожников А.Н. Сосуществующие титановые оксибиотиты 3Т и 2М1 мегакристов в базальтоидах Шаварын-Царама (МНР) // *Докл. АН СССР*. 1988. Т. 302, № 2. С. 430–433.

22. Farquhar J., Wing B.A. Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 213. P. 1–13. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00296-6.

23. Vysotskiy S.V., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Slabunov A.I., Aseeva A.V. Multiple sulfur isotope evidence for bacterial sulfate reduction and sulfate disproportionation operated in mesoarchaeal rocks of the Karelian Craton // *Minerals*. 2022. Vol. 12. 1143. DOI: 10.3390/min12091143.

24. Mathey D.P., Lowry D., Macpherson C.G., Chazot G. Oxygen isotope composition of mantle minerals by laser fluorination analysis: Homogeneity in peridotites, heterogeneity in eclogites // *Mineralogical Magazine*. 1994. Vol. 58A. P. 573–574.

25. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1969. 114 с.

26. Mutch E.J.F., MacLennan J., Holland T.J.B., Buisman I. Millennial storage of near-Moho magma // *Science*. 2019. Vol. 365, N 6450. P. 260–264. DOI: 10.1126/science.aax4092.

## REFERENCES

1. Agafonov L.V., Pinus G.V., Lesnov F.P. Glubinnye vklyucheniya v shchelochnykh bazal'toidakh trubki Shavaryn-Tsaram (MNR). *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1975;224(5):1163-1165. (In Russ.).
2. Kepezhinskas V.V. Kainozoiskie shchelochnye bazal'toidy Mongolii i ikh glubinnye vklyucheniya. Moscow: Nauka; 1979. 312 s. (In Russ.).
3. Allègre C.J., Turcotte D.L. Implications of a two-component marble-cake mantle. *Nature*. 1986;323:123-127. DOI: 10.1038/323123a0.
4. Chaussidon M., Albarède F., Sheppard S.M.F. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulfide inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*. 1989;92(2):144-156. DOI: 10.1016/0012-821X(89)90042-3.
5. Ionov D.A. Compositional variations and heterogeneity in fertile lithospheric mantle: Peridotite xenoliths in basalts from Tariat, Mongolia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2007;154:455-477. DOI: 10.1007/S00410-007-0203-Y.
6. Yu X., Zeng G., Chen L.H., Hu S.L., Yu Z.Q. Magma-magma interaction in the mantle recorded by megacrysts from Cenozoic basalts in eastern China. *International Geology Review*. 2019;61(6):675-691. DOI: 10.1080/00206814.2018.1446190.
7. Yudalevich Z.A., Vapnik E.A. Ksenokristy i megakristy shchelochnoĭ olivin-bazal't-bazanit-nefelinitovoĭ assotsiatsii Makhtesh Ramon (Izrail'), ikh petrokhimicheskie vzaimodeistviya s vynosyashchimi rasplavami i kristallograficheskie preobrazovaniya. *Lithosphere*. 2018;5:718-742. (In Russ.). DOI:10.24930/1681-9004-2018-18-5-718-742.
8. Aseeva A., Avchenko O., Karabtsov A., Chashchin A., Vysotskiy S., Yakovenko V., Zarubina N., Kharitonova N. Melt pockets in garnet megacrysts from cenozoic alkali basalts of the Savaryn-Tsaram vicinity, Mongolia. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2022;96(1):111-122. DOI: 10.1111/1755-6724.14768.
9. Sharkov E.V., Prokofiev V.Y., Chistyakov A.V., Bogina M.M., Gornostaeva T.A. Megacrysts of "bubbly" kaersutite in Neogene-Quaternary volcanic rocks of Northwestern Syria: Evidence for crystallization in a boiling melt/fluid. *Journal of volcanology and seismology*. 2022;16(3):221-238. DOI: 10.1134/S0742046322030046.
10. Pearson D.G., Canil D., Shirey S.B. Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds. *Treatise on Geochemistry*. 2014;3:169-253. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00216-3.
11. Barns S.J., Roeder P.L. The range of spinel composition in Terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42:2279-2302. DOI: 10.1093/petrology/42.12.2279.
12. Ashchepkov I.V., André L., Downes H., Belyatsky B.A. Pyroxenites and megacrysts from Vitim picrite-basalts (Russia): polybaric fractionation of rising melts in the mantle? *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011;42(1-2):14-37. DOI: 10.1016/j.jseae.2011.03.004.
13. Bali E., Szabo C., Vaselli O., Török K. Significance of silicate melt pockets in upper mantle xenoliths from the Bakony-Balaton Highland volcanic field, western Hungary. *Lithos*. 2002;61(1-2):79-102. DOI: 10.1016/S0024-4937(01)00075-5.
14. Aliani P., Ntaflou T., Bjerg E. Origin of melt pockets in mantle xenoliths from southern Patagonia, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. 2009;28(4):419-428. DOI: 10.1016/j.jsames.2009.04.009.
15. Ionov D.A., Hoefs J., Wedepohl K.H., Wiechert U. Content and isotopic composition of sulfur in ultramafic xenoliths from central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*. 1992;111(2-4):269-286. DOI: 10.1016/0012-821X(93)90067-J.
16. Berman R.G. WinTWQ (version 2.3): A software package for performing internally-consistent thermobarometric calculations. *Geological Survey of Canada*. 2007. Open File 5462. 41 p. DOI: 10.4095/223228.
17. Genshaft Yu.S., Saltykovskii A.Ya. Katalog vklyucheniĭ glubinnyykh porod i mineralov v bazal'takh Mongolii. Moscow: Nauka; 1990. 72 s. (In Russ.).
18. Lesnov F.P., Palesskii S.V., Nikolaeva I.V., Koz'menko O.A., Kuchkin A.M., Korolyuk V.N. De-tailed mineralogical-geochemical study of a large spinel Lherzolite xenolith in alkali basalt of Shavaryn Tsaram paleovolcano, Mongolia. *Geochemistry International*. 2009;47:18-40. DOI: 10.1134/S0016702909010029.
19. Vysotskii S.V., Budnitskii S.Yu., Rasskazov S.V., Ignat'ev A.V., Velivetskaya T.A., Karabtsov A.A. Preservation of radiogenic argon in mantle micas in situ: Dating of deep seated inclusions from the Sha-

varyn-Tsaram Paleovolcano, Mongolia. *Doklady Earth Sciences*. 2011;440:1423-1426. DOI: 10.1134/S1028334X11080216.

20. Volokhov I.M. Oblomki osnovnykh i ul'traosnovnykh porod v bazal'takh i kimberlitakh – rodstvennye vklyucheniya ili ksenolity porod verkhnei mantii? Novosibirsk: Nauka; 1972. 72 s. (In Russ.).

21. Koval' P.V., Evsig V., Sapozhnikov A.N. Sosushchestvuyushchie titanovye oksibiotity 3T i 2M1 megakristov v bazal'toidakh Shavaryn-Tsarama (MNR). *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1988;302(2):430-433. (In Russ.).

22. Farquhar J., Wing B.A. Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;213:1-13. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00296-6.

23. Vysotskiy S.V., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Slabunov A.I., Aseeva A.V. Multiple sulfur isotope evidence for bacterial sulfate reduction and sulfate disproportionation operated in mesoarchaeal rocks of the Karelian craton. *Minerals*. 2022;12:1143. DOI: 10.3390/min12091143.

24. Mathey D.P., Lowry D., Macpherson C.G., Chazot G. Oxygen isotope composition of mantle minerals by laser fluorination analysis: Homogeneity in peridotites, heterogeneity in eclogites. *Mineralogical Magazine*. 1994;58A:57-574.

25. Korzhinskii D.S. Teoriya metasomatičeskoj zonal'nosti. Moscow: Nauka; 1969. 114 s. (In Russ.).

26. Mutch E.J.F., MacLennan J., Holland T.J.B., Buisman I. Millennial storage of near-Moho magma. *Science*. 2019;365(6450):260-264. DOI: 10.1126/science.aax4092.

