

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 552.3: 552.333.4: 552.113

doi: 10.17223/25421379/34/3

ГЕНЕЗИС ГРАНАТА И КЛИНОПИРОКСЕНА МЕГАКРИСТОВОЙ АССОЦИАЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ БАЗАЛЬТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ



Вера Вячеславовна Егорова¹, Роман Аркадиевич Шелепаев², Андрей Эмильевич Изох³

^{1,2,3} *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *verae@igm.nsc.ru*

² *rshel@igm.nsc.ru*

³ *izokh@igm.nsc.ru*

Аннотация. Приведенные в работе данные по составам гранатов и клинопироксенов мегакристовой ассоциации из щелочных базальтов различных регионов Центральной и Юго-Восточной части Азии позволили восстановить состав расплавов соответствующих очагов щелочнобазальтоидного магматизма и определить глубину их становления.

Ключевые слова: щелочные базальты, мегакристовая ассоциация, клинопироксен, гранат, магматическая камера, Монголия, Вьетнам, Киргизия

Источник финансирования: Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400044-2) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Егорова В.В., Шелепаев Р.А., Изох А.Э. Генезис граната и клинопироксена мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Центральной и Юго-Восточной Азии // Геосферные исследования. 2025. № 1. С. 32–50. doi: 10.17223/25421379/34/3

Original article

doi: 10.17223/25421379/34/3

GENESIS OF GARNET AND CLINOPYROXENE MEGACRYSTS FROM ALKALINE BASALTS OF THE CENTRAL AND SOUTHEASTERN ASIA

Vera V. Egorova¹, Roman A. Shelepaev², Andrey E. Izokh³

^{1,2,3} *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia*

¹ *verae@igm.nsc.ru*

² *rshel@igm.nsc.ru*

³ *izokh@igm.nsc.ru*

Abstract. In Central and Southeastern Asia Cenozoic intraplate alkaline basalts covered vast areas, where basalts made up of huge lava flows with various safety a dome. Alkaline basalts contain megacrysts of pyroxenes, garnet, amphiboles, feldspars, phlogopite, crustal and mantle xenoliths. The study of megacrysts from alkaline basalts allows reconstructing the chemical evolution of parental magmas and determining the depth of magmatic chambers. For this purpose, megacrysts of clinopyroxene and garnet from alkaline basalts of Central (Mongolia, Kyrgyzstan) and Southeastern Asia (Vietnam) and were investigated.

Clinopyroxenes of the megacryst assemblage from all localities compositionally correspond to high-alumina augites, its Mg number varies from 64 to 83 at. %. Compared to clinopyroxenes from lherzolite and websterite xenoliths (Mg number 90–92) transported with the same basalts, the studied ones have lower Mg number and Cr₂O₃ contents and higher TiO₂ content. Garnets of the megacryst assemblage correspond in composition to pyrope-almandine and show Mg number 60–78 at. %. In contrast to garnets of lherzolite xenoliths, the studied megacrysts lack Cr₂O₃ but have high TiO₂ contents. Comparing the clinopyroxene and garnet compositions from different localities shows the dependence of megacrysts and host basalts composition. So, more magnesian megacrysts of Vietnam are in more magnesian basaltoids, while the basalts of Mongolia and Kyrgyzstan contain minerals with relatively lower Mg number. This relationship is also evident with respect to sodium, aluminum and REE. Using the mineral–melt partition coefficients for alkaline-basaltoid systems, compositions of melts equilibrated with the clinopyroxene and garnet of the megacryst assemblage were estimated. The calculated REE contents are close to composition of the host alkaline basalts. Along

with the positive correlations between the compositions of clinopyroxene and garnet and the host basalts, this confirms the genetic relationship between the megacrysts and alkaline basalts.

Clinopyroxenes and garnets of the megacryst assemblage crystallized from alkaline-basaltic magma in the deep-seated intermediate chamber at 13–16 kbar (44–54 km) for Mongolian and 11–14 kbar (37–47 km) for Kyrgyzstan megacrysts. In Central Asia, these depths are close to the crust–lithospheric mantle boundary. Formation of Vietnamese megacrysts was at 13–17 kbar, which corresponds to a depth of 44–58 km. In Central and Southeastern Asia deep-seated magma chambers were located at different levels of the lithospheric mantle, and also close to the crust–lithospheric mantle boundary. At depths of >50 km, these magma chambers were, most likely, long-living sources of heat and fluids that influenced the rocks of the Earth's crust lower horizons.

Keywords: alkaline basalts, megacrysts, clinopyroxenes, garnet, magma chambers, Mongolia, Vietnam, Kyrgyzstan

Source of financing: Work is done on state assignment of IGM SB RAS (№ 122041400044-2).

For citation: Egorova V.V., Shelepaev R.A., Izokh A.E. (2025) Genesis of garnet and clinopyroxene megacrysts from alkaline basalts of the central and southeastern Asia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 32–50. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/34/3

Введение

Внутриплитный щелочнобазальтоидный вулканизм охватил огромные территории Центральной и Юго-Восточной Азии и продолжался на протяжении всего кайнозоя. В результате этого явления образовалось множество ареалов вулканических пород [Кеппежинская, 1979; Геншафт и др., 2006; Изох и др., 2010; Litasov, 2000; Garnier et al., 2005]. Нередко щелочные базальты, поднимающиеся с больших глубин, выносят на поверхность фрагменты пород с различных уровней земной коры и верхней мантии, а также включения крупных одиночных кристаллов клинопироксена, граната, амфибола, флогопита, полевых шпатов, ильменита, титаномагнетита, циркона, апатита [Litasov, 2000; Shaw, Eyzaguirre, 2000; Dobosi et al., 2003; Garnier et al., 2005; Upton et al., 2009]. Чаще всего в мегакристовой ассоциации щелочных базальтов отмечается клинопироксен. Существуют различные гипотезы происхождения мегакристаллов клинопироксена:

1. Они рассматриваются как ранние фазы (фенокристы), кристаллизовавшиеся при большом давлении на значительной глубине из тех щелочных базальтовых расплавов, которые выносят их на поверхность [Dobosi, Jenner, 1999; Shaw, Eyzaguirre, 2000; Akinin et al., 2005].

2. Они кристаллизуются при высоких давлениях не из расплавов, их выносящих, но имеющих с ними генетическое родство; состав этого вида мегакристаллов позволяет определять состав расплавов, никогда не достигавших поверхности [Rankenburg et al., 2004; Roberts et al., 2019; Liu, Ying, 2020; Matusiak-Malek et al., 2021; Linlin et al., 2022].

3. Мегакристаллы также рассматриваются как ксенокристы, генетически не связанные с вмещающими базальтоидами и представляющие собой фрагменты дезинтегрированных пород верхней мантии и коры [Richter, Carmichael, 1993; Dobosi et al., 2003; Akinin et al., 2005; Liu, Ying, 2020].

4. Они также рассматриваются как продукты метасоматоза при взаимодействии глубинных флюидов с перидотитами мантии [Pivin et al., 2009; He et al., 2013].

5. Мегакристаллы могут быть продуктами глубинной кристаллизации не базальтоидной магмы, а расплавов, возникающих в коре под воздействием базальтоидов [Изох и др., 2010].

Нередко в одном и том же проявлении щелочных базальтов отмечают клинопироксены, имеющие разный генезис (например, [Matusiak-Malek et al., 2021]). Но каков бы ни был генезис мегакристаллов, они являются ценным источником информации о составе земной коры и верхней мантии и процессах, происходящих в глубинных магматических очагах (кристаллизационная дифференциация, контаминация, смешение и т.д.).

Мегакристаллы клинопироксена описаны почти во всех известных проявлениях щелочных базальтов, выносящих глубинные включения, а вот мегакристаллы граната довольно редки. Их присутствие отмечается в базанитах Шотландии, Северной Нигерии, Восточного Китая, Новой Зеландии, Витимского плато, Таиланда и Вьетнама [Frisch, Wright, 1971; Chapman, 1976; Barr, Dostal, 1986; Xiao Senhong, 1991; Upton et al., 1999; Litasov, 2000; Fulmer et al., 2010; Изох и др., 2010; Linlin et al., 2022]. Нами была изучена большая коллекция глубинных включений граната и клинопироксена из кайнозойских щелочных базальтов различных вулканических областей Центральной и Юго-Восточной Азии (Монголия, Вьетнам и Киргизия) с целью определения генезиса мегакристаллов и оценки параметров кристаллизации расплавов в промежуточных камерах, расположенных на разных уровнях литосферной мантии.

Методы исследования

Исследование химического состава минералов проводилось методом электронно-зондового микроанализа на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL JXA-3200 (ускоряющее напряжение составляло 20 кВ) и рентгеноспектральном микроанализаторе Cameca Camebax-Micro с током зонда 30–40 нА при диаметре пучка 2–3 мм в ЦКП многоэлементных и

изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Концентрации редких элементов в клинопироксенах и гранатах определялись методом ICP MS с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan MAT, Германия) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), а также на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT в Университете Гёте (Франкфурт-на-Майне, Германия). Каждая съемка сопровождалась контрольным измерением стандартов стекол Национального института стандартов и технологий (NIST 612, 614). Погрешность анализа при съемке в ЦКП ИГМ СО РАН по величине стандартного отклонения многоэлементных и изотопных исследований не превышала 15–25 % для содержаний менее 1 ppm и 1–10 % для содержаний более 1 ppm. Пределы обнаружения элементов в ppm: La – 0,06; Ce – 0,06; Pr – 0,03; Nd – 0,03; Sm – 0,01; Eu – 0,005; Gd – 0,02; Tb – 0,005; Dy – 0,01; Ho – 0,005; Er – 0,02; Yb – 0,02; Lu – 0,005; Hf – 0,05; Ta – 0,05; Rb – 0,5; Sr – 3; Y – 0,1; Zr – 0,1;

Nb – 0,09; Rb – 0,5; Ba – 3; Th – 0,03; U – 0,02. Диапазон пределов обнаружения при съемке в Университете Гёте составлял от 10 до 20 ppb, погрешность по величине стандартного отклонения не превышала 1–10 %. Содержание CaO в минералах, определенное методом электронно-зондового микроанализа, использовалось как внутренний стандарт. Анализы в табл. 1–5 приведены с учетом пределов обнаружений элементов.

Геологическое положение

Кайнозойские щелочные базальтоиды широко распространены в пределах Центральной и Юго-Восточной Азии. На всей этой территории базальты составляют обширные поля, среди которых встречаются различной сохранности вулканические аппараты.

В Монголии на основании геоморфологических и геохронологических данных были выделены 18 ареалов кайнозойского вулканизма (рис. 1, а) [Кеппежинский, 1979; Генштафт и др., 2006].

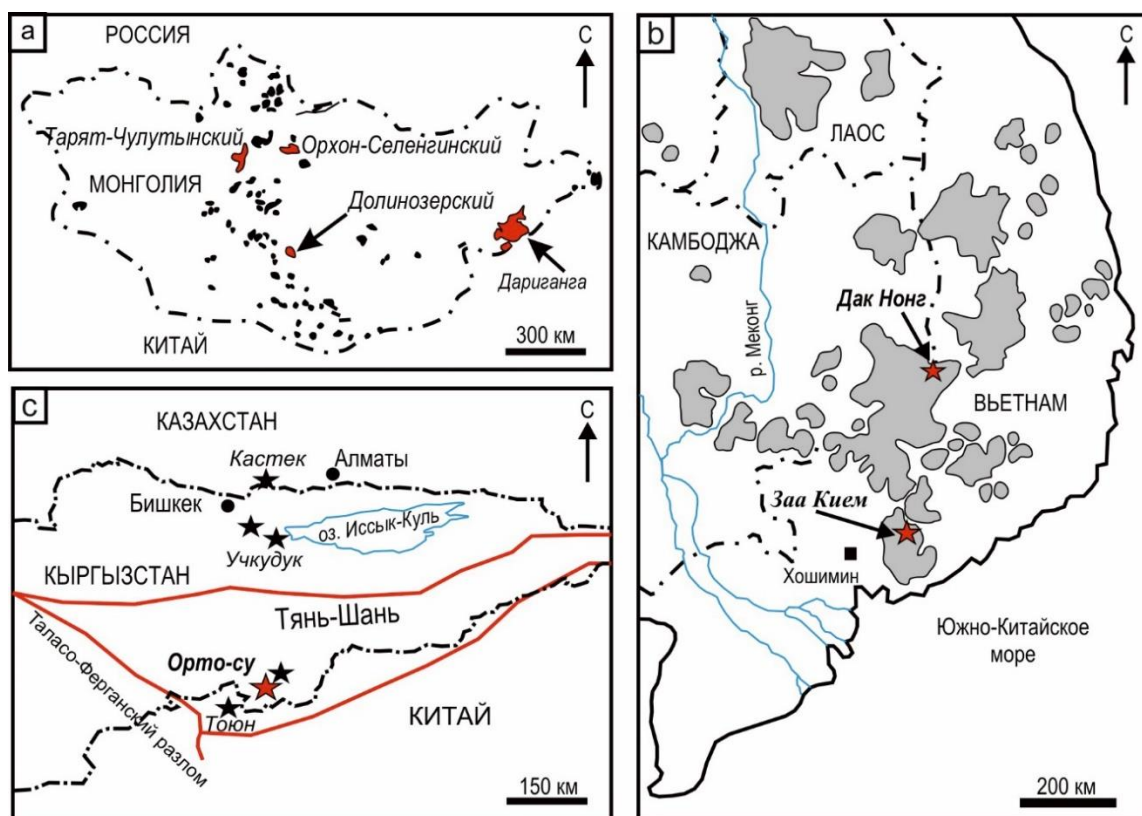


Рис. 1. Схема расположения вулканических полей щелочнобазальтоидного магматизма Монголии, Вьетнама и Киргизии

а – схема расположения вулканических полей щелочнобазальтоидного магматизма Монголии составлена по [Генштафт и др., 2006]; б – Схема расположения вулканических полей щелочных базальтов Вьетнама составлена по [Изох и др., 2010]; в – Схема расположения выходов щелочных базальтов, содержащих глубинные включения, на территории Киргизии составлена по [Bagdassarov et al., 2011]

Fig. 1. The location scheme of alkaline basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan

а – The location scheme of alkaline basalts of Mongolia modified after [Genshaft et al., 2006]; б – The location scheme of alkaline basalts of Vietnam modified after [Izokh et al., 2010]; в – The location scheme of alkaline basalts of Kyrgyzstan modified after [Bagdassarov et al., 2011]

Большая их часть располагается в субмеридиональной полосе шириной до 600 км, простирающейся от Байкальской рифтовой зоны до Гобийского Алтая, а также выделяется большой ареал на юго-востоке Монголии – плато Дариганга. Базальты выносятся на поверхность мегакристы граната, высокоглиноземистых пироксенов, амфибола, флогопита, циркона, К-На полевых шпатов [Кебезинский, 1979; Генштафт, Салтыковский, 1990]. Нами были исследованы мегакристаллы клинопироксена и граната из вулканических центров четырех ареалов – Тарят-Чулутынского (включая вулкан Шаварын-Царам), Долинноозерского, Орхон-Селенгинского и плато Дариганга.

В Центральном и Южном Вьетнаме кайнозойские базальтовые плато часто превышают 100 км в диаметре при мощности до нескольких сотен метров, причем общая площадь покровов превышает 23 тыс. км² [Hoang, Flower, 1998] (см. рис. 1, *b*). Большую часть объема базальтовых потоков занимают толлитовые базальты, щелочные породы развиты в подчиненном количестве [Hoang, Flower, 1998]. Именно в последних найдены глубокие включения пироксенов, граната, амфиболов, К-На полевых шпатов, флогопитов, а также ксенолитов мантийных пород [Hoang, Flower, 1998]. Нами были исследованы мегакристаллы клинопироксена и граната из россыпных месторождений Дак Нонг (провинция Дак Лак) и Заа-Кием (провинция Донг Най), которые разрабатываются в связи с добычей сапфира, циркона и граната (рис. 1, *b*). Месторождения приурочены к элювиальным латеритам, развивающимся по покровам щелочных базальтов [Garnier et al., 2005].

Мезо-кайнозойские базальтоиды Тянь-Шаня распространены на территории от складчатого обрамления Ферганского бассейна и до Джунгарского Алатау (рис. 1, *c*). Они образуют дайки, штоки и силлы среди мел-палеогеновых отложений, выполняющих неотектонические впадины Тянь-Шаня. В щелочных базальтах из участков Байламтал, Кастек, Тоюн, Учкудук установлены ксенолиты ультраосновных пород [Sobel, Arnaud, 2000; Simonov et al., 2008]. Нами было изучено новое проявление щелочных базальтов с мантийными ксенолитами в Центральном Тянь-Шане шток Орто-су, который находится на юге Кыргызстана, на северо-восточном склоне хребта Каракырк-Кокшаал-Тау, в верховьях р. Орто-су. Базальты штока содержат существенное количество ксенолитов шпинелевых лерцолитов, пироксенитов и габбро, а также мегакристаллов клинопироксена.

Мегакристовая ассоциация

Монголия

Состав клинопироксенов

Клинопироксены мегакристовой ассоциации из различных ареалов Монголии выглядят одинаково –

это черные округлые или слегка вытянутые кристаллы со стекляннным блеском размером от 1 до 5 см, мегакристаллы из вулканического центра Шаварын-Царам Тарят-Чулутынского ареала могут достигать 15 см. Это незональные кристаллы, по составу отвечающие высокоглиноземистому авгиту. Магнезиальность клинопироксенов варьирует в широких пределах от 64 до 83 ат. % (рис. 2, табл. 1). При этом наиболее магнезиальные клинопироксены ($Mg\#$ до 80–82 ат. %) отмечаются в базальтах плато Дариганга, в тех вулканических аппаратах, где были найдены и мегакристаллы граната.

Все изученные клинопироксены Монголии практически не содержат хрома (до 0,09 мас. %). Содержания Al_2O_3 варьируют от 6,6 до 9,6 мас. %, при этом наиболее глиноземистыми являются клинопироксены Орхон-Селенгинского ареала (до 9,63 мас. %), тогда как, в остальных содержание Al_2O_3 не превышает 8,7 мас. %. Наряду с Al_2O_3 в клинопироксенах Орхон-Селенгинского ареала отмечаются и наиболее высокие содержания Na_2O (2,8–3,4 мас. %) и TiO_2 (1–2,13 мас. %). Тогда как в других ареалах количество Na_2O варьирует от 1 до 3 мас. %, а TiO_2 от 0,6 до 1,6 мас. %.

Для клинопироксенов Тарят-Чулутынского, Долинноозерского и плато Дариганга характерно увеличение содержаний Al_2O_3 , TiO_2 и Na_2O с уменьшением магнезиальности минерала (рис. 2). Однако такая корреляция не наблюдается в клинопироксенах Орхон-Селенгинского ареала. Содержание TiO_2 в клинопироксенах этого ареала незначительно снижается с уменьшением магнезиальности минерала, а содержания Al_2O_3 и Na_2O остаются практически постоянными.

Спектры распределения редких элементов в клинопироксенах различных ареалов Монголии однотипны. Суммарное содержание редкоземельных элементов (REE) в клинопироксенах составляет 52–147 хондритовых единиц и растет с уменьшением магнезиальности минерала (рис. 2; 4, *a*). Такая же зависимость наблюдается и Sr (рис. 2). Клинопироксены обогащены MREE ((Ce/Sm)_n = 0,67–0,73) относительно легких и тяжелых лантаноидов и имеют отрицательный наклон в области тяжелых лантаноидов ((Sm/Yb)_n = 4–11) без европиевой аномалии. Для них также характерна небольшая отрицательная аномалия по Zr и Nb, а также обеднение LIL элементами (Ba, Th, U) (рис. 4, *b*).

Состав гранатов

Мегакристаллы граната были обнаружены в базальтах вулкана Шаварын-Царам Тарят-Чулутынского ареала и нескольких вулканических центрах плато Дариганга.

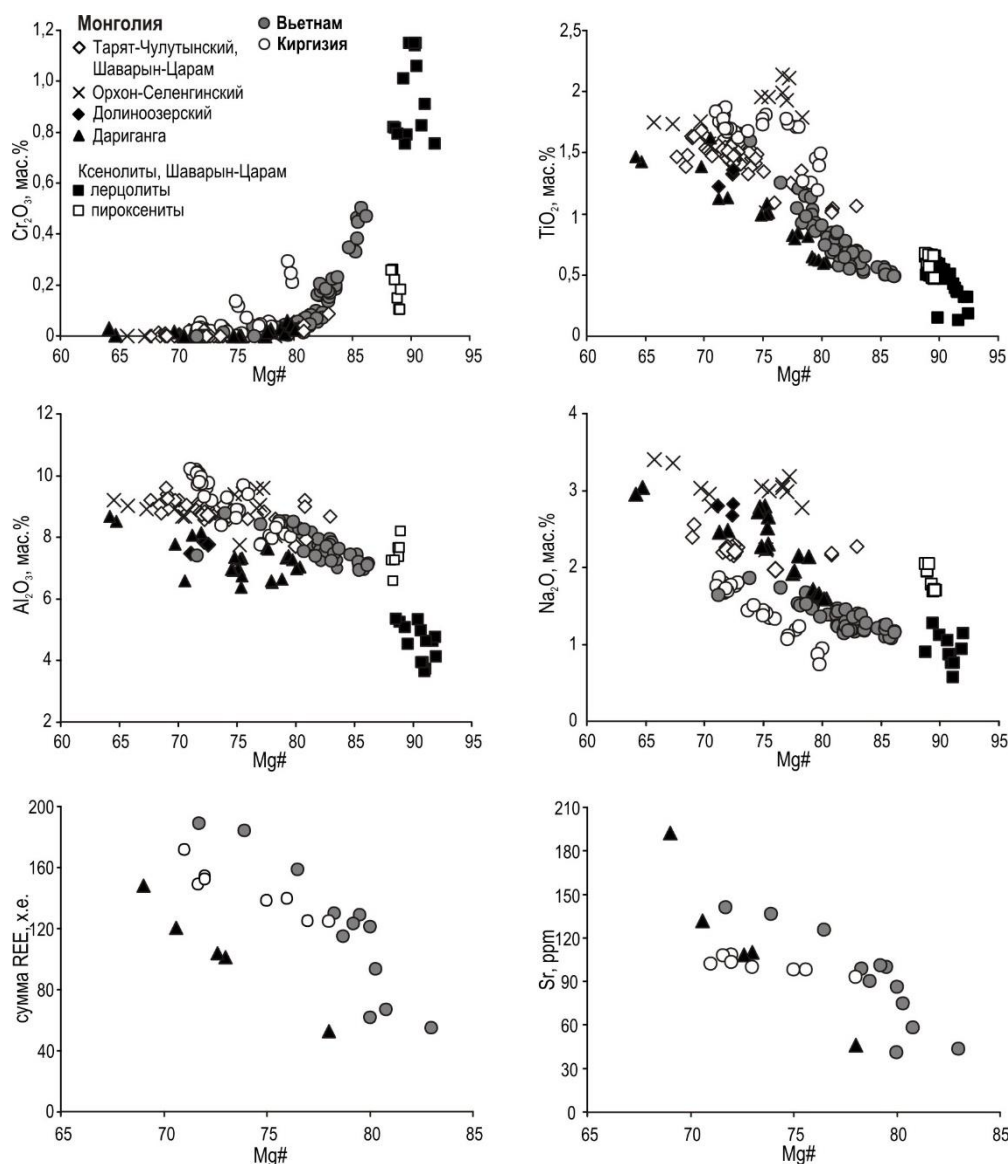


Рис. 2. Вариации химического состава клинопироксенов мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии

Данные по составам клинопироксенов из ксенолитов лерцолитов вулкана Шаварын-Царам из [Kopylova et al., 1995], из ксенолитов гранатовых пироксенитов вулкана Шаварын-Царам – собственные данные

Fig. 2. Composition variation of clinopyroxenes of megacryst association from alkaline basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan

Data of clinopyroxene composition from lherzolite xenoliths of Shavaryn-Tsaram [Kopylova et al., 1995], from garnet pyroxenite xenoliths – own data

Мегакристаллы граната из вулкана Шаварын-Царам описывались и ранее [Кеппежинская, 1979; Асеева и др., 2014], а вот гранаты из базальтоидов плато Дариганга изучены впервые. Наиболее крупные мегакристаллы граната обнаружены в базанитах вулкана Шаварын-Царам, их размер колеблется от первых сантиметров до 10–15 см, в базальтах плато Дариганга гранаты более мелкие (1–2 см). Зерна граната округлые, овальные, в большинстве образцов окруженные коричневым келифитовым агрегатом. Иногда келифит образует каймы

вокруг граната, в некоторых случаях почти полностью замещает его по трещинам. Образование таких келифитовых кайм обычно объясняют тепловым воздействием вмещающих магм или (и) декомпрессией во время подъема [Rudnick, Jackson, 1995; Асеева и др., 2014]. Гранаты мегакристовой ассоциации по составу отвечают пироп-альмандину с магнезиальностью варьирующей в пределах от 62 до 63,3 ат. % в гранатах из вулкана Шаварын-Царам и 64–73 ат. % из базальтов плато Дариганга (рис. 3, табл. 2).

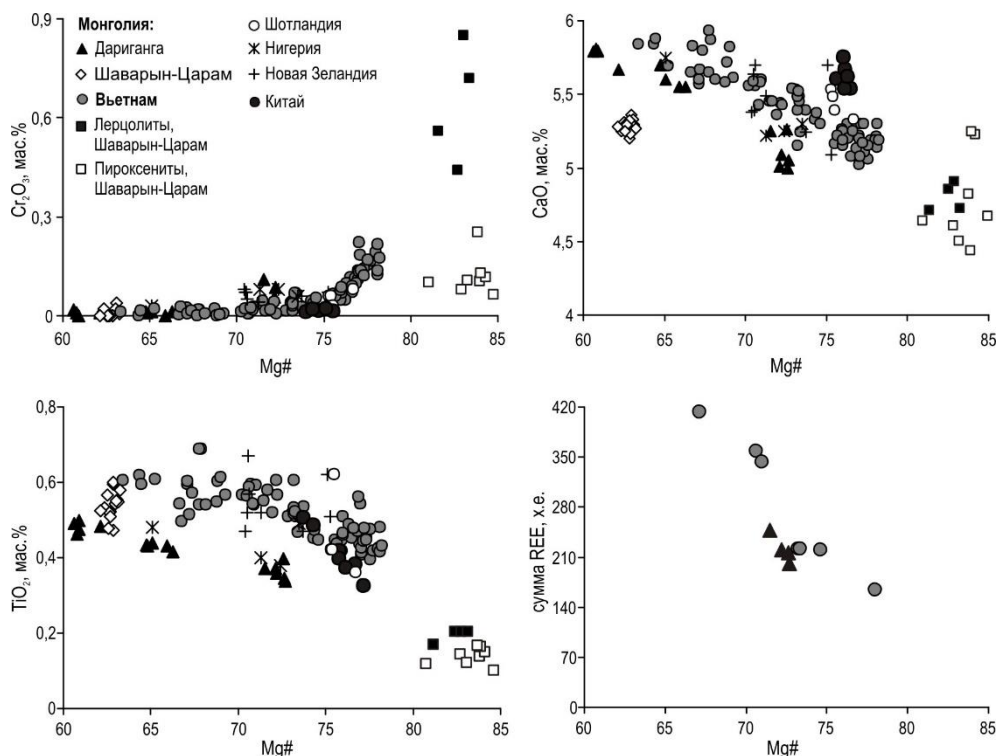


Рис. 3. Вариации химического состава гранатов мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии

Данные по составам гранатов из базанитов Нигерии из [Frisch, Wright, 1971], Шотландии [Chapman, 1976], Новой Зеландии [Fulmer et al., 2010], из ксенолитов лерцолитов вулкана Шаварын-Царам из [Kopylova et al., 1995], из ксенолитов гранатовых пироксенитов вулкана Шаварын-Царам – собственные данные

Fig. 3. Composition variation of garnets of megacryst association from alkaline basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan

Data of garnets composition from basanite of Nigeria from [Frisch, Wright, 1971], Scotland [Chapman, 1976], New Zealand [Fulmer et al., 2010], from lherzolite xenoliths of Shavaryn-Tsaram [Kopylova et al., 1995], from garnet pyroxenite xenoliths own data

Содержание CaO колеблется в очень узких пределах – от 5 до 5,8 мас. % в гранатах плато Дариганга и 5,2–5,36 мас. % в гранатах из вулкана Шаварын-Царам.

Количество TiO₂ составляет 0,34–0,6 мас. %, при этом гранаты из вулкана Шаварын-Царам более титанистые в сравнении с гранатами из базальтов плато Дариганга. Содержание Cr₂O₃ в гранатах ничтожно мало, не превышает 0,11 мас. %. Гранаты не обнаруживают зональности. Также были обнаружены сростки граната и клинопироксена в базальтах плато Дариганга, состав которых не отличается от состава одиночных мегакристаллов (табл. 1, 2). В целом состав гранатов плато Дариганга схож с составом гранатов из базанитов Нигерии (рис. 3).

По магнезиальности они отличаются от гранатов из мантийных перидотитов и пироксенитов (рис. 3). Именно это позволяет отличать мегакристаллы граната от гранатов из дезинтегрированных ксенолитов. В последних гранаты более магнезиальные (Mg# 80–85), содержат меньше CaO (4,5–4,8 мас. %) и TiO₂ (0,1–0,15 мас. %) (рис. 3).

Для гранатов характерно обеднение легкими лантаноидами и резкое обогащение HREE ((Sm/Yb)_n = 0,14–0,22) (см. рис. 4, с; табл. 4). Содержание REE составляет 160–247 хондритовых единиц и увеличивается с уменьшением магнезиальности гранатов. В гранатах наблюдается обогащение Zr, Hf и Nb, а также минимум по Sr (рис. 4, d).

Вьетнам

Состав клинопироксенов

Клинопироксены мегакристовой ассоциации россыпи Дак Нонг и Заа-Киём представляют собой черные кристаллы со стекляннным блеском размером от 2 до 4 см.

Состав клинопироксенов из этих полей одинаковый, они отвечают высокоглиноземистым авгитам, магнезиальность которых варьирует от 74 до 86 ат. % (см. рис. 2, табл. 1). Содержания Al₂O₃ составляют 7–8,6 мас. %, TiO₂ (0,5–1,8 мас. %) и Na₂O (1–1,72 мас. %) и возрастают по мере уменьшения маг-

незиальности. Содержание хрома во всех клинопироксенах колеблется от 0,03 до 0,46 мас. % и уменьшается при падении магнезиальности минерала. От моноклинных пироксенов из ксенолитов лерцолитов и вебстеритов (Mg# 90–92), вынесенных теми же базальтами, они отличаются меньшей магнезиальностью, большими содержаниями титана и меньшими хрома (см. рис. 2).

Содержание REE в клинопироксенах составляет 54–187 хондритовых единиц и увеличивается с уменьшением магнезиальности минерала (см. табл. 3). Спектры распределений РЗЭ, нормированные на хондрит, отражают обогащение клинопироксенов MREE ((Ce/Sm) n = 0,68–0,81) и имеют отрицательный наклон в области тяжелых лантаноидов ((Sm/Yb) n = 2–2,6) без европиевой аномалии (см. рис. 4, а). Клинопироксены обеднены Nb, Zr, Hf, а также LIL элементами (рис. 4, б).

Состав гранатов

Гранаты мегакристовой ассоциации из базальтов Вьетнама представляют собой округлые или слабо вытянутые зерна малинового цвета размером от 1 до 3 см. По составу гранаты полей Дак Нонг и Заа-Киём не отличаются. Они отвечают пироп-альмандину с магнезиальностью 63–78 ат. % (см. рис. 3, табл. 2).

Содержание CaO составляет 5,02–5,93 %, количество TiO₂ колеблется от 0,39 до 0,69 мас. %. Содержания Cr₂O₃ в гранатах очень низкие, колеблются от нулевых значений и достигают 0,22 мас. % в самых магнезиальных образцах. Содержание CaO и TiO₂ увеличивается, а Cr₂O₃ наоборот падает с уменьшением магнезиальности минерала. От гранатов из ксенолитов лерцолитов мегакристы отличаются меньшей магнезиальностью, повышенным содержанием титана и кальция, а также низким содержанием хрома (рис. 3). В целом состав гранатов Вьетнама не отличается от состава гранатов мегакристовой ассоциации из щелочных базальтов Шотландии и Новой Зеландии (рис. 3).

Общее содержание лантаноидов в гранатах составляет 164–413 хондритовых единиц. Для них характерно дифференцированное распределение редкоземельных элементов. Спектры редкоземельных элементов отражают обеднение гранатов легкими лантаноидами и резкое обогащение HREE ((Sm/Yb) n = 0,10–0,26) (рис. 4, с). На мультиэлементных спектрах гранатов выделяются минимумы по Sr, Ba и небольшое обогащение Zr и Hf (рис. 4, d). С уменьшением магнезиальности содержание редких элементов в минерале растет (табл. 3).

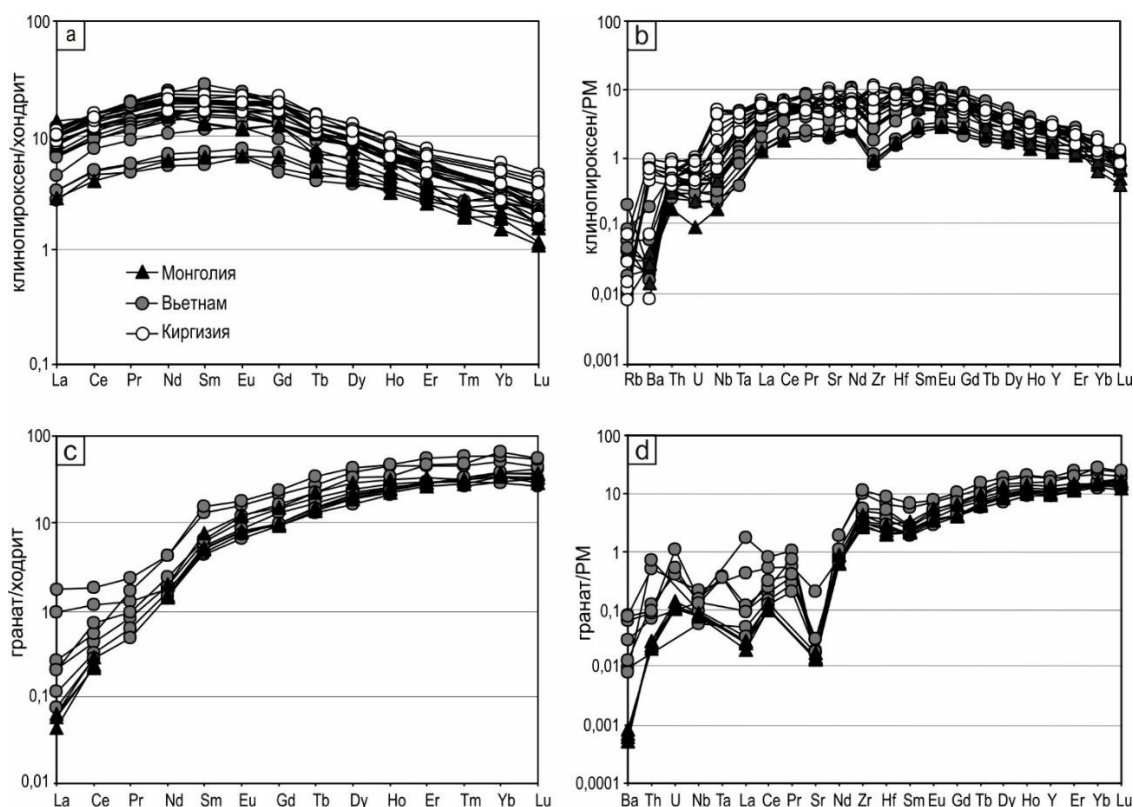


Рис. 4. Спектры распределения редкоземельных (а, с) и редких элементов (б, d) в клинопироксенах и гранатах мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии
Данные нормированы на хондрит (а, с) [Boynnton, 1984] и на примитивную мантию (б, d) [Sun, McDonough, 1989]

Fig. 4. Composition variation of garnets of megacryst association from alkaline basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan

Data are normalized to chondrite [Boynnton, 1984] and PM [Sun, McDonough, 1989]

Таблица 1
 Представительные анализы химического состава (мас. %) клинопироксенов метакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии
 Table 1
 Representative major element data (wt %) for clinopyroxenes of megacryst association from alkali basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan

	Монголия																		
	Тарят-Чулутынский				Тарят-Чулутынский (вулкан Шаварын-Царам)				плато Дариганга					Долиноозерский					
	E27-1	E35	E27-2	E36	E27-4	2005-1	2005-3	2005-4	2005-5	E40-1	E127	7/03	10/03	10/04	E127/8	E127/9*	B06-1	B06-2	B06-3
Образец	50,13	48,69	50,31	50,71	50,54	48,49	49,50	49,46	50,15	49,10	48,69	51,24	50,19	50,17	49,98	51,74	50,60	49,57	49,97
SiO ₂	1,46	1,62	1,47	1,34	1,04	1,63	1,09	1,02	1,06	1,74	1,46	0,604	1,12	1,13	1,38	0,849	1,19	1,33	1,36
TiO ₂	9,24	9,63	9,09	8,68	7,94	9,25	8,62	9,24	8,71	9,04	8,71	7,06	8,09	8,18	7,8	6,56	7,54	7,91	7,84
Al ₂ O ₃	0,13	0,18	0,12	0,11	0,14	0,15	0,17	0,08	0,06	0,15	0,13	0,163	0,161	0,157	0,157	0,137	0,12	0,15	0,14
MnO	10,28	10,94	11,34	12,80	15,92	11,70	14,27	12,71	12,79	10,25	10,22	16,45	12,78	13,18	8,59	15,84	12,24	12,61	12,62
MgO	8,76	8,76	8,37	7,58	6,70	9,39	8,05	5,37	4,68	9,53	10,27	7,15	9,2	9,15	11,12	7,96	8,90	8,59	8,56
FeO	17,53	17,50	17,28	17,30	15,90	16,25	15,56	19,35	19,73	15,98	16,39	15	15,18	15,31	19,48	14,07	16,38	16,46	16,26
CaO	2,91	2,74	2,63	2,21	1,75	2,40	1,99	2,17	2,28	3,41	2,96	1,59	2,46	2,48	1,03	2,15	2,81	2,68	2,82
Na ₂ O	–	–	–	–	0,07	–	–	0,04	0,09	–	0,03	0,031	–	–	0,016	0,026	0,03	v.	0,04
Cr ₂ O ₃	100,5	100,1	100,7	100,8	100,1	99,3	99,3	99,5	99,6	99,2	98,9	99,3	99,19	99,76	99,94	99,35	99,9	99,3	99,6
Сумма	67,7	69,0	70,7	75,1	80,9	68,9	76,0	80,8	83,0	65,7	64,2	80,4	71,2	72,0	69,1	78,0	71,0	72,3	72,4
Mg#	190	182	190	199	200	176	181	209	227	177	188	212	188	187	250	214	217	208	207
CAN																			

	Вьетнам																		
	Монголия				Киргизия														
	Орхон-Селенгинский				Дак Нонг				Зая-Кием					Орто-су					
Образец	E40-2	E40-4	E40-5	288/2	288/4	288/10	287/10	IR35-7	IR35a-6	P1751-1	P1751-6	IR35-6	2619d	2619b	OCB7	OCB3	OCB11	OCB9	B2
SiO ₂	49,64	49,27	50,31	49,48	50,10	50,63	51,03	48,75	48,48	49,11	49,57	50,63	51,37	51,30	47,46	47,44	48,15	48,72	49,59
TiO ₂	1,55	2,13	1,78	1,03	0,80	0,52	0,50	1,80	1,59	1,25	0,92	0,64	0,56	0,49	1,83	1,75	1,99	1,73	1,19
Al ₂ O ₃	8,70	9,60	8,07	8,18	8,12	7,00	7,04	7,58	8,84	8,45	8,60	8,00	7,45	7,17	10,24	10,09	9,31	7,79	8,03
MnO	0,15	0,07	0,13	0,15	0,18	0,18	0,17	0,13	0,11	0,12	0,15	0,16	0,15	0,15	8,38	8,33	7,56	7,32	6,56
MgO	12,24	12,41	13,70	15,22	16,12	18,19	18,27	12,94	12,69	13,85	14,53	16,19	18,66	19,30	11,54	11,61	12,22	13,87	0,14
FeO	9,08	6,73	6,76	7,11	6,96	6,37	5,42	9,09	7,97	7,57	7,16	6,36	5,74	5,50	0,17	0,16	0,12	0,09	14,41
CaO	15,18	16,25	15,92	16,21	15,88	14,69	15,31	16,37	17,27	16,63	15,92	15,44	15,29	15,00	18,56	18,54	19,10	18,70	17,92
Na ₂ O	2,80	3,08	2,78	1,49	1,38	1,18	1,09	1,61	1,87	1,72	1,62	1,31	1,24	1,17	1,76	1,87	1,51	1,11	1,69
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	0,04	0,18	0,50	–	–	0,04	–	0,07	0,33	0,47	–	–	–	0,05	0,26
Сумма	99,3	99,6	99,5	98,9	99,6	98,9	99,3	98,3	98,8	98,7	98,5	98,8	100,8	100,6	99,9	99,8	100,0	99,4	100,0
Mg#	70,6	76,7	78,3	79,2	80,1	83,1	85,7	71,7	73,9	76,5	78,3	81,9	85,3	86,2	71,0	71,3	74,2	77,2	79,7
CAN	174	169	197	198	196	210	217	216	195	197	185	193	205	209	181	184	205	240	223

Примечание. Mg# = 100*(Mg_{Fe,c}/(Mg_{Fe,c}+Fe_{Fe,c})) %, ф.е. при перерасчете состава клинопироксена на 6 атомов кислорода. CAN = 100*(CaO/Al₂O₃), клинопироксен в сростке с гранатом.

Note. Mg# = 100*(Mg_{Fe,c}/(Mg_{Fe,c}+Fe_{Fe,c})) %, f.n. was estimated by recalculation of clinopyroxene composition on 6 atoms of oxygen. CAN = 100*(CaO/Al₂O₃), *intergrowth of clinopyroxene and garnet.

Таблица 2

Представительные анализы химического состава (мас. %) гранатов мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии и Вьетнама

Table 2

Representative major element data (wt %) for garnets of megacryst association from alkali basalts of Mongolia and Vietnam

	Монголия														Вьетнам			
	Таргат-Чулуутынский (вулкан Шаварын-Царам)						плато Дариганга								Дак Нонг			
	35	37	40	41	44	65	E127/1	E127/5	E127/6	E127/3	E127/7	E127/2	E127/8*	E127/9*	6-2	6-3	6-4	6-1
Образец	39,95	40,01	40,04	40,01	40,11	39,97	41,22	40,44	40,71	41,17	41,48	41,54	42,03	40,97	39,80	39,99	39,43	41,84
SiO ₂	0,60	0,47	0,54	0,55	0,58	0,53	0,34	0,46	0,48	0,42	0,37	0,36	0,35	0,398	0,61	0,54	0,60	0,41
TiO ₂	22,26	22,47	22,38	22,47	22,41	22,41	22,71	21,93	21,90	22,13	22,51	22,74	22,80	22,11	23,16	22,81	22,75	23,25
Al ₂ O ₃	16,07	16,22	16,30	16,16	16,08	16,44	12,17	16,66	16,03	14,58	12,27	12,21	12,13	12,29	13,57	14,52	15,53	10,08
FeO	0,38	0,40	0,47	0,39	0,45	0,43	0,37	0,44	0,39	0,42	0,36	0,36	0,37	0,382	0,44	0,45	0,45	0,35
MnO	15,26	15,40	15,54	15,48	15,54	15,13	18,18	14,49	14,77	16,09	17,31	17,81	18,06	18,25	16,96	16,28	15,82	18,97
MgO	5,32	5,20	5,36	5,33	5,27	5,28	5,05	5,81	5,67	5,55	5,25	5,09	5,00	5,26	5,82	5,65	5,88	5,02
CaO	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,05	0,12	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04
Na ₂ O	—	—	—	0,04	—	—	—	—	—	—	0,11	0,09	0,08	0,10	—	—	—	0,22
Cr ₂ O ₃	99,9	100,2	100,7	100,5	100,5	100,2	100,2	100,3	100,0	100,4	99,8	100,3	100,9	99,81	100,4	100,3	100,5	100,2
Сумма	62,9	62,9	62,9	63,1	63,3	62,1	72,6	60,8	62,1	66,3	71,5	72,2	72,7	72,6	69,0	66,6	64,5	77,0
Mg#																		

Образец	Вьетнам												Зая-Кием					
	Дак Нонг						2619a-1						2619b-1					
	7-3	7-2	285	285	285	285	2619a-1	2619a-2	2619a-3	2619b-1	2619b-2	2619b-3	2619b-4	2619d	2619c	IR35a-1	IR35-11	IR35a-2
SiO ₂	41,90	41,70	40,69	41,13	40,64	41,22	40,49	41,43	40,85	40,83	40,09	39,32	39,32	40,40	40,98	39,73	41,20	41,18
TiO ₂	0,45	0,39	0,53	0,46	0,45	0,43	0,60	0,42	0,57	0,43	0,57	0,61	0,61	0,51	0,45	0,60	0,59	0,59
Al ₂ O ₃	23,06	23,06	22,80	22,90	22,79	23,07	23,42	23,14	23,55	22,87	22,55	22,87	22,71	22,74	22,93	22,44	22,64	22,71
FeO	10,65	9,76	11,88	10,56	10,50	9,82	11,84	9,95	12,19	9,79	13,38	15,02	15,71	11,80	11,27	14,17	12,34	12,63
MnO	0,34	0,35	0,39	0,33	0,35	0,30	0,34	0,35	0,39	0,33	0,40	0,36	0,49	0,36	0,39	0,91	0,36	0,35
MgO	18,45	18,94	18,21	19,06	19,20	19,63	18,15	19,81	17,81	19,75	16,92	15,83	15,27	18,20	18,57	16,23	16,96	17,04
CaO	5,16	5,06	5,39	5,30	5,08	5,21	5,15	5,19	5,43	5,19	5,61	5,69	5,84	5,45	5,30	5,57	5,60	5,56
Na ₂ O	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,06	0,01	0,04	0,01	0,03	0,02	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
Cr ₂ O ₃	0,07	0,15	0,05	0,05	0,12	0,12	–	0,19	–	0,18	–	0,02	0,02	–	0,05	–	0,03	0,00
Сумма	100,1	99,5	100,0	99,8	99,2	99,8	100,1	100,5	100,8	99,4	99,6	99,7	100,0	99,5	100,0	99,7	99,8	100,1
Mg#	75,5	77,6	73,2	76,3	76,5	78,1	73,2	78,0	72,2	78,2	69,3	65,3	63,4	73,3	74,6	67,1	71,0	70,6

Примечание. Mg# = 100*Mg_{Fe,c}/(Mg_{Fe,c}+Fe_{Fe,c}) %, ф.е. получены при перерасчете состава граната на 12 атомов кислорода. * гранат в сростке с клинопироксеном.Note. Mg# = 100*Mg_{Fe,n}/(Mg_{Fe,n}+Fe_{Fe,n}) %, f.n. was estimated by recalculation of garnet composition on 12 atoms of oxygen. *intergrowth of garnet and clinopyroxene.

Представительные анализы редкоземельного состава клинопироксенов метакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии, ppm
 Таблица 3
 Representative trace element data for clinopyroxene of megacryst association from alkali basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan, ppm
 Table 3

Образец	Монголия					Вьетнам					Киргизия								
	плато Дариганга					Дак-Нонг		Заа-Кием					Орто-су						
	10/03	10/04	A02	E127/8	E127/9*	288/4	288/10	IR36-1	P1751-1	IR35-4	P1751-6	IR35a-6	IR35-7	OCB2	OCB5	OCB7	OCB9	OCB10	OCB12
Rb	–	–	–	–	–	–	–	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,04	–	–	–	–	–	–
Ba	0,11	0,20	0,30	0,20	0,21	0,12	0,14	0,46	0,22	0,14	1,37	0,23	0,19	0,09	0,11	0,07	0,54	0,06	0,22
Th	0,03	0,04	0,03	0,06	0,02	0,031	0,022	0,05	0,06	0,03	0,05	0,07	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,05	0,07
U	–	0,01	0,01	0,01	–	–	–	0,01	0,01	–	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Nb	0,47	0,80	0,34	0,90	0,13	0,21	0,16	0,37	0,51	0,18	0,32	0,70	0,34	0,34	0,53	0,74	0,72	0,49	0,72
Ta	–	–	–	–	–	–	–	0,06	0,10	0,02	0,06	0,14	0,05	0,07	0,12	0,21	0,10	0,12	0,20
La	2,51	4,12	2,76	3,54	0,87	1,03	0,85	2,23	3,04	1,03	2,16	3,70	2,95	2,62	3,02	3,43	2,77	3,10	3,17
Ce	9,65	11,50	9,30	12,58	3,24	3,96	3,67	8,80	11,41	4,06	7,46	12,48	12,31	9,82	11,15	12,57	9,49	10,86	11,59
Pr	–	–	–	–	–	0,68	0,58	1,66	2,21	0,69	1,35	2,44	2,34	–	–	–	–	–	–
Sr	134	110	112	196	47	42	45	101	128	59	100	139	143	95	100	110	101	100	110
Nd	10,76	9,01	8,80	12,88	3,61	3,69	3,24	9,41	12,84	4,15	8,61	14,74	14,11	9,90	11,43	13,76	9,71	12,17	12,31
Zr	54,4	50,0	55,0	62,6	10,6	13,0	8,9	33,4	52,94	10,1	32,0	68,8	51,8	34,9	51,4	74,3	42,3	62,8	65,3
Hf	2,35	2,01	2,00	2,77	0,53	0,59	0,48	1,59	2,47	0,50	1,53	3,14	2,58	1,62	2,17	3,57	1,79	2,78	3,19
Sm	3,50	2,45	2,50	4,14	1,25	1,22	1,09	3,22	3,96	1,39	3,54	4,78	5,40	3,14	3,66	4,40	3,17	3,84	3,86
Eu	1,28	0,83	0,84	1,63	0,48	0,49	0,47	1,19	1,47	0,56	1,22	1,72	1,77	1,20	1,35	1,61	1,16	1,37	1,42
Gd	4,16	3,19	3,22	5,00	1,65	1,34	1,24	3,28	4,29	1,83	3,70	4,79	5,30	4,25	4,76	5,68	4,21	4,88	5,04
Tb	0,49	0,32	0,36	0,57	0,23	0,21	0,19	0,49	0,57	0,24	0,51	0,69	0,73	0,50	0,55	0,70	0,50	0,56	0,61
Dy	2,45	1,67	1,96	2,92	1,31	1,38	1,2	2,64	3,09	1,53	2,94	3,55	3,93	2,86	3,11	4,03	2,94	2,96	3,51
Ho	0,35	0,27	0,31	0,42	0,23	0,26	0,24	0,45	0,49	0,31	0,50	0,57	0,66	0,48	0,50	0,68	0,49	0,46	0,59
Y	8,47	6,41	6,93	9,80	5,71	6,30	5,40	10,12	11,36	6,96	12,24	13,89	14,27	10,56	12,46	15,02	12,21	10,92	13,45
Er	0,67	0,60	0,75	0,80	0,54	0,62	0,56	1,05	1,02	0,77	1,21	1,24	1,32	1,10	1,16	1,62	1,13	0,97	1,38
Yb	0,32	0,45	0,56	0,39	0,41	0,62	0,52	0,73	0,53	0,63	0,77	0,73	0,62	0,76	0,79	1,21	0,79	0,57	1,03
Lu	0,03	0,05	0,07	0,04	0,05	0,07	0,05	0,07	0,06	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,09	0,15	0,10	0,06	0,13
Σ REE (n)	120,0	103,2	101,0	147,4	52,3	61,2	54,5	128,1	158,0	66,5	129,5	183,6	187,8	123,7	138,6	170,8	123,9	137,7	151,1
Mg#	71	72,6	73	69	78	80	83	80	77	81	78	74	72	78	76	71	77	75	72

Примечание. Σ REE (n) – суммарное содержание редкоземельных элементов в хондритовых единицах. *клинопироксен в сростке с гранатом.

Note. Σ REE (n) – total content of rare earth elements in chondrite units. *intergrowth of clinopyroxene and garnet.

Таблица 4

Представительные анализы редкоземельного состава гранатов мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии и Вьетнама, ppm

Table 4

Representative trace element data for garnets of megacryst association from alkali basalts of Mongolia and Vietnam, ppm

Образец	Монголия				Вьетнам						
	Плато Дариганга				Заа-Кнем						
	E127/8*	E127/1	E127/7	E127/2	2619a	2619a-1	2619c	2619d	IR-5a-2	IR-5a-1	IR-5-11
Rb	—	—	—	—	—	—	—	—	0,25	0,15	0,36
Ba	0,01	0,01	—	—	0,56	0,21	0,07	0,06	0,44	0,09	0,54
Th	—	—	—	—	0,04	0,01	—	0,06	0,01	0,01	0,01
U	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,01	0,01
Nb	0,05	0,06	0,06	0,06	0,15	0,09	0,04	0,07	0,11	0,11	0,09
Ta	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,02
La	0,01	0,02	0,02	0,02	0,29	0,06	0,03	0,02	1,20	0,08	0,06
Ce	0,19	0,18	0,23	0,17	0,92	0,34	0,26	0,22	1,44	0,43	0,56
Pr	—	—	—	—	0,15	0,10	0,08	0,06	0,28	0,20	0,11
Sr	0,30	0,31	0,38	0,29	4,20	0,64	0,64	0,40	0,38	0,37	0,39
Nd	0,83	0,84	1,18	0,88	1,05	1,14	0,96	0,85	2,52	2,50	1,44
Zr	31,6	34,6	46,6	29,8	34,0	55,0	46,0	37,0	112,8	124,9	61,2
Hf	0,61	0,71	0,90	0,62	0,82	1,36	1,11	0,90	2,03	2,67	1,63
Sm	0,96	0,99	1,48	0,99	0,84	1,17	1,06	0,88	2,53	3,03	1,24
Eu	0,59	0,59	0,90	0,58	0,48	0,77	0,62	0,54	1,16	1,30	0,87
Gd	2,42	2,55	3,85	2,56	2,42	3,73	3,35	2,51	5,37	6,15	4,21
Tb	0,66	0,72	1,05	0,71	0,61	0,92	0,79	0,69	1,30	1,63	1,05
Dy	6,11	6,68	9,29	6,74	5,30	7,88	7,25	6,22	12,45	13,70	10,76
Ho	1,60	1,74	2,26	1,77	1,52	2,01	1,86	1,69	3,24	3,31	2,47
Y	44,0	47,6	59,9	47,3	41,0	53,0	50,0	48,0	82,2	87,0	71,6
Er	5,47	5,97	7,05	6,05	1,86	6,23	6,12	5,87	9,63	11,66	9,64
Yb	7,16	7,66	7,12	7,85	6,22	6,06	6,89	7,95	10,69	12,36	13,60
Lu	1,08	1,17	0,92	1,20	1,03	0,86	1,04	1,32	1,43	1,70	1,79
ΣREE	200	216	247	220	164	221	221	222	356	413	343
Mg#	72,7	72,6	71,5	72,2	78,0	73,2	74,6	73,3	70,6	67,1	71,0

Примечание. Σ REE (n) – суммарное содержание редкоземельных элементов в хондритовых единицах. *гранат в сростке с клинопироксеном.

Note. Σ REE (n) – total content of rare earth elements in chondrite units. *intergrowth of garnet and clinopyroxene.

Киргизия

Состав клинопироксенов

Мегакристаллы клинопироксена из базальтов штока Орто-су в Киргизии представляют собой черные вытянутые кристаллы размером 2–3 см. По своему составу они отвечают высокоглиноземистым авгитам, магнезиальность которых варьирует от 71 до 80 ат. % (см. рис. 2, табл. 1). Содержания алюминия, натрия и титана в клинопироксенах Киргизии варьируют в широких пределах, Al_2O_3 от 7,8 до 10,2 мас. %, TiO_2 от 1,2 до 2 мас. % и Na_2O от 1,1–1,87 мас. %. Для клинопироксенов Киргизии четко прослеживается корреляция содержаний этих компонентов с магнезиальностью минерала, с уменьшением Mg# увеличивается содержание Al_2O_3 , TiO_2 и Na_2O (рис. 2). Содержание Cr_2O_3

составляет 0–0,32 мас. % и падает с уменьшением магнезиальности клинопироксенов (рис. 2).

Содержание REE в клинопироксенах составляет 124–170 хондритовых единиц. Клинопироксены обогащены MREE ((Ce/Sm)_n = 0,66–0,75) относительно легких и тяжелых лантаноидов и имеют отрицательный наклон в области тяжелых лантаноидов ((Sm/Yb)_n = 4–7,2) без европиевой аномалии (см. рис. 4, а, табл. 3).

В клинопироксенах отмечается небольшая отрицательная аномалия по Zr и Nb, а также обеднение LIL элементами (Ba, Th, U) (рис. 4, b). Уровень содержания редких элементов увеличивается при понижении магнезиальности минералов (см. табл. 3).

Температуры и давления образования мегакристаллов

Давление

Давление образования мегакристаллов клинопироксена было рассчитано с помощью клинопироксенового барометра [Nimis, 1999]. Этот барометр основан на зависимости между давлением, объемом элементарной ячейки и полиэдра M1 в структуре клинопироксена. Метод расчета основывается на экспериментальных данных по клинопироксенам, кристаллизующимся из различных типов расплавов (базаниты, пикритовые базальты, высокоглиноземистые базальты) от безводных до водонасыщенных, при давлениях от 0 до 24 кбар и при разных значениях фугтивности кислорода.

Определенные таким образом давления образования клинопироксенов различных ареалов Монголии составляют 13–16,5 кбар (табл. 5). При этом наибольшие давления были определены для клинопироксенов плато Дариганга и Орхон-Селенгинского ареала (15–16,5 кбар). Чуть меньшее давление определено для клинопироксенов Тарят-Чулутынского ареала

13–15 кбар (табл. 5, рис. 5). Давления для клинопироксенов Вьетнама варьируют от 14 до 17 кбар. Наименьшие давления определены для клинопироксенов мегакристовой ассоциации Киргизии, они составляют 11–14 кбар.

Г.В. Нестеренко и А.А. Арискиным [1993] было предложено использовать параметр CAN ($CAN = 100 \times (CaO/Al_2O_3)$ в клинопироксене в качестве индикатора глубин эволюции базальтовых расплавов и кристаллизации в них клинопироксена. Авторами, на основе анализа значительного объема экспериментальных данных по составам авгитов, синтезированных в опытах с образцами базальтов и перидотитов, установлено, что концентрация CaO в клинопироксене понижается, а Al_2O_3 возрастает с ростом давления. Высокобарные клинопироксены, образовавшиеся в интервале давлений 8–30 кбар характеризуются значениями $CAN < 400$, а пироксены, образовавшиеся при давлениях 0–5 кбар, имеют CAN в интервале значений 500–1000 [Нестеренко, Арискин, 1993]. Для всех исследованных в этой работе клинопироксенов значения CAN составляют 169–250 (см. табл. 1), что указывает на их кристаллизацию при давлениях больше 8 кбар.

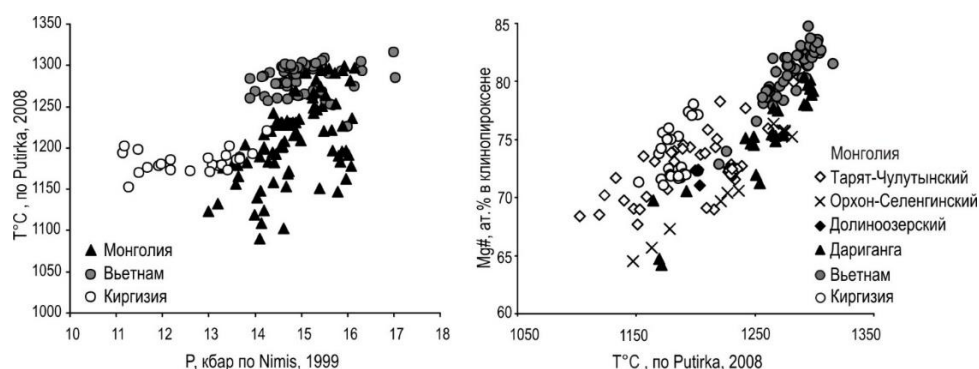


Рис. 5. Результаты термобарометрических расчетов для клинопироксенов мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии

Fig. 5. Thermobarometric estimates for clinopyroxene of megacryst association from alkaline basalts of Mongolia, Vietnam and Kyrgyzstan

Таблица 5

Результаты расчета равновесных температур и давлений для клинопироксенов мегакристовой ассоциации щелочных базальтов Монголии, Вьетнама и Киргизии

Table 5

P–T calculations for clinopyroxenes of megacryst association from alkaline basalts of Mongolia, Vietnam, Kyrgyzstan

	T, °C			P, кбар
	[Nimis, Taylor, 2000]	[Putirka, 2008]	[Wang et al., 2021]	[Nimis, 1999]
Монголия				
Тарят-Чулутынский	1080–1294	1090–1261	1194–1292	13–15
Орхон-Селенгинский	1058–1267	1147–1281	1185–1233	15–16,5
Долиноозерский	1208	1200–1203	1149–1263	14
Дариганга	1296–1384	1249–1300	1259–1371	14–16
Вьетнам				
Дак Нонг	1290–1380	1260–1308	1220–1297	14–16
Заа Кем	1217–1381	1252–1306	1213–1319	14–17
Киргизия				
Орто-су	1175–1260	1152–1220	1149–1200	11–14

Температура

Для определения температуры образования мегакристаллов клинопироксена было использовано три клинопироксеновых геотермометра [Nimis, Taylor, 2000; Putirka, 2008; Wang et al., 2021] (табл. 5). Так как в расчетах учитывается давление, были использованы значения давления по Nimis, 1999.

Наиболее высокие температуры образования характерны для наиболее магнезиальных клинопироксенов из базальтов плато Дариганга и Вьетнама (рис. 4). Рассчитанные температуры по трем геотермометрам колеблются в диапазоне 1249–1384 °C (табл. 4). Температуры для клинопироксенов из других ареалов Монголии чуть ниже 1102–1282 °C [Putirka, 2008] и 1194–1276 °C [Wang et al., 2021] (табл. 4). Расчеты температур для клинопироксенов Киргизии по термометрам дали сходный результат 1175–1260 °C (табл. 5). Температура образования для сростка граната и клинопироксена мегакристовой ассоциации плато Дариганга, определенная с использованием гранат-клинопироксенового геотермометра [Nakamura, 2009], составила 1309 °C.

Обсуждение результатов

Связь с вмещающими базальтами и оценка состава родоначального расплава

При сравнении составов мегакристаллов клинопироксена и граната различных регионов обнаруживается взаимосвязь состава минералов и состава базальтоидов, в которых они обнаружены. Наиболее магнезиальные гранаты и клинопироксены Вьетнама выносятся и более магнезиальными базальтами в сравнении с базальтами других ареалов (рис. 6, а, рис. 2). Кроме того, содержание редких элементов и в гранатах, и в клинопироксенах коррелирует с содержанием REE в базальтах их выносящих (рис. 6, а, рис. 2). Например, более обогащенные REE базальты Вьетнама выносят мегакристаллы с более высоким суммарным содержанием редкоземельных элементов (рис. 6, а). Однако следует отметить, что формы спектров распределения редких элементов во всех изученных клинопироксенах и гранатах однотипны, разница только в уровне содержаний, что указывает на сходный генезис этих мегакристаллов.

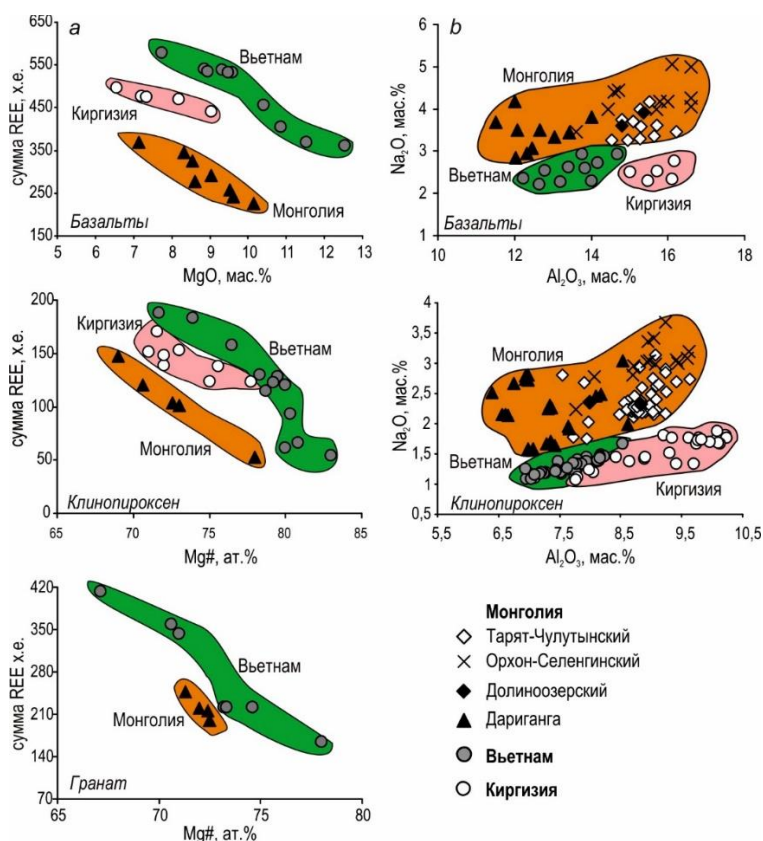


Рис. 6. Сравнение составов клинопироксенов и гранатов мегакристовой ассоциации и выносящих их щелочных базальтов

Данные по составам вмещающих щелочных базальтов из [Hoang, Flower, 1998; Генштафт и др., 2006; Simonov et al., 2008], а также собственные данные

Fig. 6. Comparison of composition of clinopyroxene and garnet of megacryst association and host alkaline basalts

Data of basalt composition from [Hoang, Flower, 1998; Genshaft et al., 2006; Simonov et al., 2008] and original data

Такая взаимосвязь прослеживается и по другим компонентам в клинопироксенах (см. рис. 6, *b*). Например, более глиноземистые и натровые клинопироксены Орхон-Селенгинского ареала выносятся базанитами с повышенным содержанием этих элементов относительно базальтоидов остальных исследованных ареалов Монголии (рис. 6, *b*, табл. 1). Щелочные базальты Киргизии и Вьетнама содержат меньше натрия и выносят клинопироксены с наименьшим количеством Na_2O в сравнении с клинопироксенами из ареалов Монголии (рис. 6, *b*). В работе В.В. Кепежинскас [1979] отмечается, что такая зависимость прослеживается и при сравнении мегакристаллов граната с гранатами из базанитов Шотландии, Нигерии и Новой Зеландии.

Положительные корреляции составов клинопироксенов и гранатов и выносящих их пород позволяет предполагать генетическое родство между мегакристаллами и щелочными базальтами. Используя коэффициенты рас-

пределения минерал-расплав для щелочнобазальтоидных систем [Fujimaki et al., 1984; Hauri et al., 1994], мы провели оценку состава расплава равновесного с изученными клинопироксенами и гранатами мегакристовых ассоциаций для всех изученных районов. Оценка проведена по содержанию РЗЭ по формуле $CL = \text{CCrx}/K$, где CL – концентрация элемента в расплаве; CCrx – концентрация элемента в клинопироксене; K – коэффициент распределения элемента между расплавом и минералом.

Полученные расчетным путем содержания REE в клинопироксенах и гранатах мегакристовой ассоциации всех изученных районов близки к содержаниям REE в щелочных базальтах, выносящих мегакристаллы на поверхность [Hoang et al., 1996, 1998; Garnier et al., 2005; Геншафт и др., 2006; Simonov et al., 2008] (рис. 7). Таким образом, мегакристаллы клинопироксенов и гранатов могли кристаллизоваться из щелочнобазальтоидных расплавов близких по составу к базальтам, выносящим мегакристаллы.

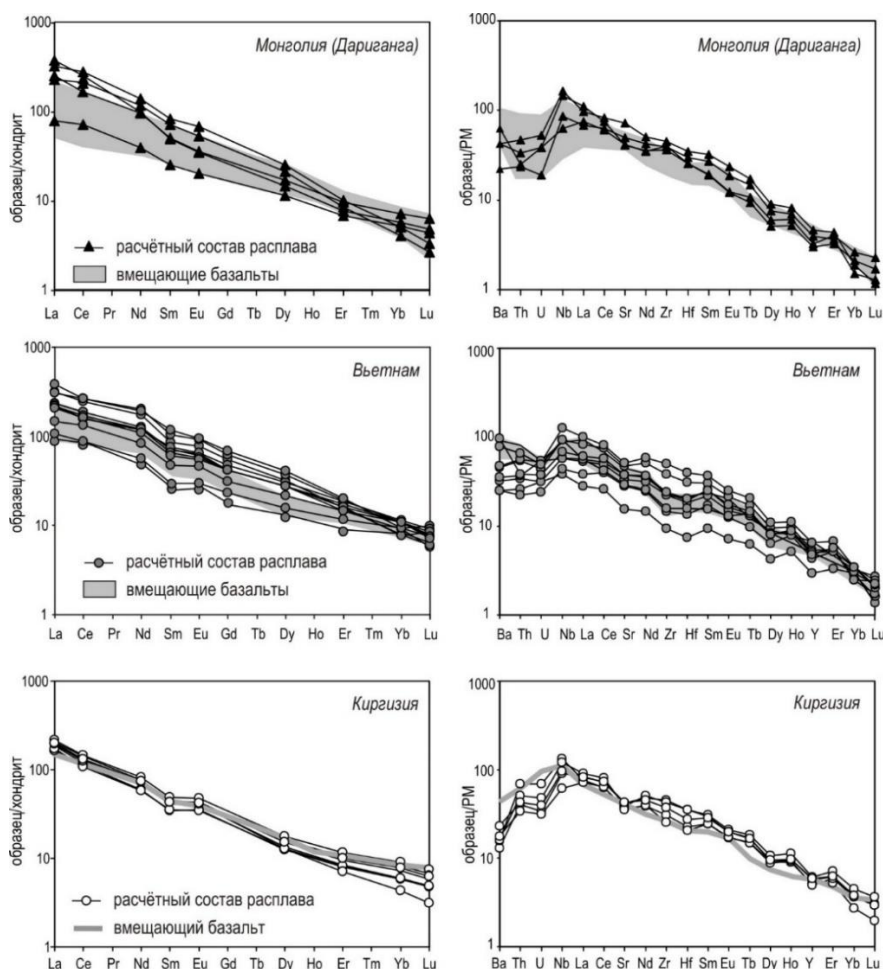


Рис. 7. Рассчитанные составы расплавов, находящихся в равновесии с клинопироксенами и гранатами мегакристовой ассоциации в сравнении с выносящими их щелочными базальтами

Данные по составам вмещающих щелочных базальтов из [Hoang, Flower, 1998; Геншафт и др., 2006; Simonov et al., 2008], а также собственные данные

Fig. 7. Calculated compositions of melts in equilibrium with clinopyroxene and garnet megacrysts in comparison with the host basalts

Data of basalt composition from [Hoang, Flower, 1998; Genshaft et al., 2006; Simonov et al., 2008] and original data

Условия образования мегакристаллов клинопироксена и граната

Температуры образования мегакристаллов клинопироксена, определенные с помощью разных геотермометров, в целом дают сходные результаты. Наиболее магнезиальные мегакристаллы образовались при температурах 1250–1380 °С, менее магнезиальные кристаллизовались при снижении температуры до 1150–1230 °С (см. рис. 4), что, вероятнее всего, отражает процесс внутрикамерной дифференциации расплава. Температуры и магнезиальность клинопироксенов и гранатов из Тарят-Чулуутынского ареала Монголии и Киргизии меньше. Это позволяет предполагать, что они образовались из более фракционированных расплавов, чем мегакристаллы плато Дариганга и Вьетнама. Экспериментальные данные [Green, Hibberson, 1970; Thompson, 1975] показали следующее: близкие по составу к мегакристам клинопироксены кристаллизуются из расплава природного щелочного базальта при давлении 14–16 кбар и температуре 1200 °С, что согласуется с нашими оценками.

В работе [Асеева и др., 2014] при изучении мегакристаллов граната и их сростков с клинопироксеном из вулкана Шаварын-Царам (Монголия) было показано, что парагенезис граната и клинопироксена устойчив при давлении свыше 10 кбар и температуре более 1300 °С. Наши оценки температуры для сростка граната и клинопироксена дают сходный результат 1309 °С. В процессе подъема вмещающих магм с понижением давления и температуры гранат становится неустойчив [Асеева и др., 2014]. При взаимодействии граната с вмещающим его базальтом наблюдается частичное плавление граната с образованием келифитовой каймы, а внутри кристалла вследствие декомпрессии происходит формирование симлектитовых сростаний [Асеева и др., 2014], что наблюдается и в наших образцах.

Глубинные магматические камеры в структуре литосферы Центральной и Юго-Восточной Азии

Приведенные в данной работе составы клинопироксенов и гранатов из щелочных базальтов позволили восстановить состав расплавов соответствующих очагов базальтового магматизма, а также определить глубину их становления. Давления образования клинопироксеновых мегакристаллов различных ареалов Монголии составляют 13–16 кбар, что соответствует глубинам расположения промежуточных магматических камер 44–56 км. По геофизическим данным для Центральной Монголии эти глубины близки к границе коры и литосферной мантии (48–56 км) [Zorin et al., 1990]. Для базальтов Тарят-Чулуутынского ареала (Хангайского нагорья) было показано, что их образование происходило при небольшой степени плавления гранатовых лерцолитов на

глубинах больше 70 км [Barry et al., 2003; Hunt et al., 2012]. Таким образом, оценки расположения промежуточных магматических камер на глубинах 44–56 км, где могли кристаллизоваться мегакристаллы клинопироксена и граната, выглядят достоверно.

Клинопироксены мегакристовой ассоциации Дак Нонг и Заа-Кием кристаллизовались из щелочнобазальтоидной магмы в глубинных промежуточных очагах при давлении 14–17 кбар, что соответствует глубинам 47–58 км. По геофизическим данным граница Мохо для Юго-Восточной Азии определяется на глубинах 36–40 км [Баранов, 2010]. Соответственно, магматические очаги, в которых образовались мегакристаллы, располагались на различных уровнях литосферной мантии, а также близко к границе кора–литосферная мантия. Вероятнее всего, эти магматические очаги на глубинах > 50 км представляли собой долгоживущие источники тепла и флюидов, воздействующие на породы нижних горизонтов земной коры [Изох и др., 2010].

Образование клинопироксенов из штока Орто-су в Киргизии происходило при давлениях 11–14 кбар, что соответствует глубинам 37–47 км. Исследование коровых и мантийных ксенолитов из штока Орто-су показало, что на время внедрения щелочных базальтов граница Мохо была на глубине около 35–40 км [Bagdassarov et al., 2011]. Таким образом, промежуточные камеры, в которых происходила кристаллизация клинопироксена, располагались на уровне границы кора – литосферная мантия.

Промежуточные очаги в литосфере, где происходит дифференциация расплава, как правило, приурочены к неоднородностям литосферы (фазовые границы, зоны глубинных надвигов, границы чехла и фундамента, граница Мохо и др.). Самой устойчивой и наиболее удобной для формирования магматических очагов является граница Мохо, именно с этим разделом связывают процессы андерплейтинга (underplating) или нарастания вглубь континентальных масс. Полученные данные позволяют сделать вывод, что магматические очаги в структуре литосферы Центральной и Юго-Восточной Азии располагались на глубинах от 36 до 58 км. Большинство из них тяготеет к разделу кора–литосферная мантия, и, скорее всего, их образование связано с процессом андерплейтинга щелочнобазальтоидных расплавов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что образование изученных мегакристаллов клинопироксена и граната из различных регионов Азии во многом сходно и являлось результатом кристаллизации щелочнобазальтоидного расплава, близкого по составу к вмещающим базальтам, в глубинных промежуточных магматиче-

ских камерах. Захват мегакристаллов и вынос их к поверхности осуществлялись при повторных внедрениях новых порций щелочнобазальтоидной магмы.

Изучение клинопироксена и граната мегакристовой ассоциации щелочных базальтоидов Монголии, Вьет-

нама и Киргизии позволило определить уровни становления глубинных магматических камер, в которых происходит фракционирование щелочнобазальтоидных магм, в пределах значительного сегмента Центральной и Юго-Восточной Азии в позднекайнозойское время.

Список источников

- Асеева А.В., Высоцкий С.В., Карабцов А.А., Александров И.А., Чувашова И.С.** Трансформация гранатовых мегакристов под воздействием щелочных базальтовых магм // Тихоокеанская геология. 2014. Вып. 33, № 2. С. 53–63.
- Баранов А.А.** Новая модель коры Центральной и Южной Азии // Физика Земли. 2010. № 1. С. 37–50.
- Геншафт Ю.С., Грачев А.Ф., Салтыковский А.Я.** Геохимические особенности кайнозойских базальтов Монголии: проблема природы мантийных источников // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 3. С. 377–389.
- Геншафт Ю.С., Салтыковский А.Я.** Каталог включений глубинных пород и минералов в базальтах Монголии // Труды совместной Советско-Монгольской научно-исследовательской геологической экспедиции. М.: Наука, 1990. Вып. 46. 271 с.
- Изох А.Э., Смирнов С.З., Егорова В.В., Чанг Туан Ань, Ковязин С.В., Нго Тхи Фьонг, Калинин В.В.** Условия образования сапфира и циркона в областях щелочно-базальтоидного вулканизма Центрального Вьетнама // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 7. С. 925–943. doi: 10.1016/j.rgg.2010.06.001
- Кеппежинкас В.В.** Кайнозойские щелочные базальтоиды Монголии и их глубинные включения // Труды. М.: Наука, 1979. Вып. 25. 312 с.
- Нестеренко Г.В., Арискин А.А.** Глубины кристаллизации базальтовой магмы // Геохимия. 1993. № 1. С. 77–88.
- Akinin V.V., Sobolev A.V., Ntaflou T., Richter W.** Clinopyroxene megacrysts from Enmelen melanephelinitic volcanoes (Chukchi Peninsula, Russia): application to composition and evolution of mantle melts // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. V. 150. P. 85–101.
- Bagdassarov N., Batalev V., Egorova V.** State of lithosphere beneath Tien Shan from petrology and electrical conductivity of xenoliths // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. b01202. doi: 10.1029/2009jb007125, 2011
- Barr S.M., Dostal J.** Petrochemistry and origin of megacrysts in Upper Cenozoic Basalts, Thailand // Journal of Southeast Asian Earth Sciences. 1986. V. 1, № 2. P. 107–116.
- Barry T.L., Saunders A.D., Kempton P.D., Windley B.F., Pringle M.S., Dorjnamjaa D., Saandar S.** Petrogenesis of cenozoic basalts from Mongolia: Evidence for the role of asthenospheric versus metasomatized lithospheric mantle sources // Journal of Petrology. 2003. V. 44, № 1. P. 55–91.
- Boynton W.V.** Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in Rare Earth Element Geochemistry / ed. by P. Henderson. New York: Elsevier, 1984. P. 63–114.
- Chapman N.A.** Inclusion and megacrysts from under-saturated tuffs and basanites. East Fife, Scotland // Journal of Petrology. 1976. V. 17, № 4. P. 472–499.
- Dobosi G., Downes H., Embey-Isztin A., Jenner G.A.** Origin of megacrysts and pyroxenite xenoliths from the Pliocene alkali basalts of the Pannonian Basin (Hungary) // Neues Jahrbuch für Mineralogie. 2003. V. 178. P. 217–237.
- Dobosi G., Jenner G.A.** Petrologic implications of trace element variation in clinopyroxene megacrysts from the Nograd volcanic province, North Hungary: a study by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry // Lithos. 1999. V. 46. P. 731–749.
- Frisch T., Wright J.B.** Chemical composition of high-pressure megacrysts from Nigerian Cenozoic lavas // Journal of Mineralogy and Geochemistry. 1971. V. 7. P. 283–304.
- Fujimaki H., Tatsumo M., Aoki K.** Partition coefficients for Hf, Zr REE between phenocrysts and groundmasses // Journal of Geophysical Research. 1984. V. 89. P. 662–672.
- Fulmer E.C., Nebel O., Westrenen W.** High-precision high field strength element partitioning between garnet, amphibole and alkaline melt from Kakanui, New Zealand // Geochimica and Cosmochimica Acta. 2010. V. 74. P. 2741–2759.
- Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Fallick A.E., Phan Trong T., Hoang Quang V., Pham Van L., Schwarz D.** Basalt petrology, zircon ages and sapphire genesis from Dak Nong, Southern Vietnam // Mineral Magazine. 2005. V. 69. P. 21–38.
- Green T.H., Hibberson W.** Experimental duplication of conditions of precipitation of high-pressure phenocrysts in a basaltic magma // Physics Earth Planetary Interiors. 1970. V. 3. P. 247–254.
- Hauri E.H., Wagner T.P., Grove T.L.** Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts // Chemical Geology. 1994. V. 117, Iss. 1–4. P. 149–166. doi: 10.1016/0009-2541(94)90126-0
- He D., Liu Y., Tong X., Zong K., Hu Z., Gao S.** Multiple exsolutions in a rare clinopyroxene megacrysts from the Hannuoba basalt, North China: Implications for subducted slab-related crustal thickening and recycling // Lithos. 2013. V. 177. P. 136–147.
- Hoang N., Flower M., Carlson R.W.** Major, trace element and isotopic composition of Vietnamese basalts: Interaction of hydros EM1-rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1996. V. 60, № 22. P. 4329–4351.
- Hoang N., Flower M.** Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: implication for origins of a 'Diffuse igneous province' // Journal of Petrology. 1998. V. 39, № 3. P. 369–395.
- Hunt A.C., Parkinson J., Harris N.B.W., Barry T.L., Rogers Y.N.W., Yondon M.** Cenozoic volcanism on the Hangai Dome, Central Mongolia: geochemical evidence for changing melt sources and implications for mechanisms of melting // Journal Of Petrology. 2012. V. 53, № 9. P. 1913–1942.
- Kopylova M.G., O'Reilly S.Y., Genshaft Yu.S.** Thermal state of the lithosphere beneath Central Mongolia: evidence from deep-seated xenoliths from Shavaryn Saram volcanic centre in the Tariat depression, Hangai, Mongolia // Lithos. 1995. V. 36. P. 243–255. doi: 10.1016/0024-4937(95)00020-8

Linlin Hu, Shaokui Pan, Ren Lu, Jianping Zheng, Hongkun Dai, Anqi Guo, Li Yu, Haiqi Sun. Origin of gem-quality megacrysts in the Cenozoic alkali basalts from the Muling area, northeastern China // *Lithos*. 2022. V. 422–423. 106720. doi: 10.1016/j.lithos.2022.106720

Litasov K.D. Petrology of a megacryst assemblage in Pliocen-Pleistocene basanites from the Vitim Plateau (Transbaikalie) // *Volcanology and Seismology*. 2000. V. 22. P. 35–53.

Liu Y.-D., Ying J.-F. Origin of clinopyroxene megacrysts in volcanic rocks from the North China Craton: a comparison study with megacrysts worldwide // *International Geology Review*. 2020. V. 62, Iss. 15. P. 1845–1861. doi: 10.1080/00206814.2019.1663766

Matusiak-Malek M., Puziewicz J., Ntaflou T., Woodland A., Uenver-Thiele L., Buchner J., Gregoire M., Aulbach S. Variable origin of clinopyroxene megacrysts carried by Cenozoic volcanic rocks from the eastern limb of Central European Volcanic Province (SE Germany and SW Poland) // *Lithos*. 2021. V. 382–383. 105936. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105936

Nakamura D. A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set // *Journal of Metamorphic Geology*. 2009. V. 27. P. 495–508.

Nimis P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1999. V. 135. P. 62–74. doi: 10.1007/s004100050498, 1999

Nimis P., Taylor W.R. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139. P. 541–554. doi: 10.1007/s004100000156, 2000

Pivin M., Femenias O., Demaiffe D. Metasomatic mantle origin for Mbuji-Mayi and Kundelungu garnet and clinopyroxene megacrysts (Democratic Republic of Congo) // *Lithos*. 2009. V. 112. P. 951–960. doi: 10.1016/j.lithos.2009.03.050

Putirka K.D. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008. V. 69. P. 61–120. doi: 10.2138/rmg.2008.69.3, 2008

Rankenburg K., Lassiter J.C., Brey G. Origin of megacrysts in volcanic rocks of the Cameroon volcanic chain- constraints on magma genesis and crustal contamination // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2004. V. 147. P. 129–144.

Righter K., Carmichael I.S.E. Mega-xenocrysts in alkali olivine basalts: Fragments of disrupted mantle assemblages // *American Mineralogist*. 1993. V. 78. P. 1230–1245.

Roberts R.J., Lehong K.D., Botha A.E.J., Costin G., De Beer F.C., Hoffman W.J., Hetherington C.J. Clinopyroxene megacrysts from Marion Island, Antarctic Ocean: evidence for a late stage shallow origin // *Mineralogy and Petrology*. 2019. V. 113. P. 155–167.

Rudnick R.L., Jackson I. Measured and calculated elastic wave speeds in partially equilibrated mafic granulite xenoliths: implication for the properties of an underplated lower continental crust // *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100. P. 10211–10218.

Shaw C.S.J., Eyzaguirre J. Origin of megacrysts in the mafic alkaline lavas of the West Eifel Volcanic Field, Germany // *Lithos*. 2000. V. 50. P. 75–95.

Simonov V.A., Mikolaichuk A.V., Rasskazov S.V., Kovyazin S.V. Cretaceous-Paleogene within-plate magmatism in Central Asia: data from the Tien Shan basalts // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. Iss. 7. P. 520–533. doi: 10.1016/j.rgg.2008.06.009

Thompson R.N. Primary basalts and magma genesis II. Snake river plain, Idaho, U.S.A. // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1975. V. 52, № 13. P. 213–232.

Upton B.G.J., Hinton R.W., Aspen P. Megacrysts and associated xenoliths: evidence for migration of geochemically enriched melts in the upper mantle beneath Scotland // *Journal of Petrology*. 1999. V. 40. P. 935–956.

Upton B.G.J., Finch A.A., Slaby E. Megacrysts and salic xenoliths in Scottish alkali basalts: derivatives of deep crustal intrusions and small-melt fractions from the upper mantle. // *Mineralogical Magazine*. 2009. V. 73. P. 943–956.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle compositions and processes // *Magmatism in oceanic basins* / eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geological Society Special Publication. 1989. V. 42. P. 313–345.

Xiao Senhong REE abundances in megacrysts and host basalts: REE behavior of magma at high pressures // *Chinese Journal of Geochemistry*. 1991. V. 10, № 1. P. 11–20.

Xudong Wang, Tong Hou, Meng Wang, Chao Zhang, Zhaozhong Zhang, Ronghao Pan, Felix Marxer, Hongluo Zhang. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems // *European Journal of Mineralogy*. 2021. V. 33. P. 621–637. doi: 10.5194/ejm-33-621-2021

Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.K., Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere of the Mongolian-Siberian Mountainous Province // *Journal of Geodynamics*. 1990. V. 11. P. 327–342.

References

Aseeva A.V., Vysotskiy S.V., Karabtsov A.A., Alexandrov I.A., Chuvashov I.S. *Transformaciya granatovykh megakrystov pod vozdeistviem schelochnykh bazaltovykh magm* [Transformation of garnet megacrysts captured by alkali mafic magma] // *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology]. 2014. V. 8. No. 2. pp. 116–125. In Russian

Baranov A. A. *Novaya model' kory Zentrāl'noi I Yuzhnoi Azii* [New model of Central and South Asia crust] // *Phizika Zemli* [Physics of the Earth]. 2010. No. 1. pp. 37–50. In Russian

Genshaft Yu.S., Grachev A.F., Saltykovsky A.Ya. *Geokhimicheskie osobennosti kainozoiskikh bazal'tov Mongolii: problema prirody mantiinykh istochnikov* [Geochemistry of Cenozoic basalts of Mongolia: the problem of genesis of mantle sources] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2006. V. 47. No. 3. pp. 377–389. In Russian

Genshaft Yu.S., Saltykovsky A.Ya. *Katalog vklucheniĭ glubinykh porod I mineralov v bazaltakh Mongolii* [Catalogue of inclusions of deep rocks and minerals in the basalts of Mongolia]. Moscow: Publishing house “Nauka”. 1990. 271 p.

Izokh A.E., Smirnov S.Z., Egorova V.V., Tran Tuan Anh, Kovyazin S.V., Ngo Thi Phuong, Kalinina V.V. *Usloviya obrazovaniya sapfira I zirkona v oblastiakh schelochno-bazaltovogo magmatizma Zentrāl'nogo V'etnama* [The conditions of formation of sapphire and zircon in the areas of alkali-basaltoid volcanism in Central Vietnam Russian] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2010. V. 51. No. 7. pp. 719–733. doi: 10.1016/j.rgg.2010.06.001. In Russian

Kepezhinskas V.V. *Kainozoiskie schelochnye bazal'ty i ih glubinye vklucheniya* [Cenozoic alkaline basaltoids of Mongolia and related deep inclusions]. Moscow: Publishing house “Nauka”, 1979. 312 p. In Russian

- Nesterenko G.V., Ariskin A.A. *Glubiny krystallizatsii bazaltovoi magmy* [Crystallization depths of basaltic magma] // *Geokhimiya* [Geochemistry]. 1993. No. 1. pp. 77–88. In Russian
- Akinin V.V., Sobolev A.V., Ntaflou T., Richter W. Clinopyroxene megacrysts from Enmelen melanephelinitic volcanoes (Chukchi Peninsula, Russia): application to composition and evolution of mantle melts // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2005. V. 150. pp. 85–101.
- Bagdassarov N., Batalev V., Egorova V. State of lithosphere beneath Tien Shan from petrology and electrical conductivity of xenoliths // *Journal of Geophysical Research*. 2011. V. 116. b01202. doi: 10.1029/2009jb007125
- Barr S.M., Dostal J. Petrochemistry and origin of megacrysts in Upper Cenozoic Basalts, Thailand // *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*. 1986. V. 1. No. 2. pp. 107–116.
- Barry T.L., Saunders A.D., Kempton P.D., Windley B.F., Pringle M.S., Dorjnamjaa D., Saandar S. Petrogenesis of cenozoic basalts from Mongolia: Evidence for the role of asthenospheric versus metasomatized lithospheric mantle sources // *Journal of Petrology*. 2003. V. 44. No. 1. pp. 55–91.
- Boynton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in *Rare Earth Element Geochemistry*, edited by P. Henderson. Elsevier, New York. 1984. pp. 63–114.
- Chapman N.A. Inclusion and magacrysts from under-saturated tuffs and basanites East Fife, Scotland // *Journal of Petrology*. 1976. V. 17. No. 4. pp. 472–499.
- Dobosi G., Downes H., Embey-Isztin A., Jenner G.A. Origin of megacrysts and pyroxenite xenoliths from the Pliocene alkali basalts of the Pannonian Basin (Hungary) // *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. 2003. V. 178. pp. 217–237.
- Dobosi G., Jenner G.A. Petrologic implications of trace element variation in clinopyroxene megacrysts from the Nograd volcanic province, North Hungary: a study by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry // *Lithos*. 1999. V. 46. pp. 731–749.
- Frisch T., Wright J.B. Chemical composition of high-pressure magacrysts from Nigerian Cenozoic lavas // *Journal of Mineralogy and Geochemistry*. 1971. V. 7. pp. 283–304.
- Fujimaki H., Tatsumo M., Aoki K. Partition coefficients for Hf, Zr REE between phenocrysts and groundmasses // *Journal of Geophysical Research*. 1984. V. 89. pp. 662–672.
- Fulmer E.C., Nebel O., Westrenen W. High-precision high field strength element partitioning between garnet, amphibole and alkaline melt from Kakanui, New Zealand // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. V. 74. pp. 2741–2759.
- Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Fallick A. E., Phan Trong T., Hoang Quang V., Pham Van L., Schwarz D. Basalt petrology, zircon ages and sapphire genesis from Dak Nong, Southern Vietnam // *Mineral Magazin*. 2005. V. 69. pp. 21–38.
- Green T.H., Hibberson W. Experimental duplication of conditions precipitation of high-pressure phenocrysts in a basaltic magma // *Physics Earth Planetary Interiors*. 1970. V. 3. pp. 247–254.
- Hauri E.H., Wagner T.P., Grove T.L. Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts // *Chemical Geology*. 1994. V. 117. Is. 1–4. pp. 149–166. doi: 10.1016/0009-2541(94)90126-0
- He D., Liu Y., Tong X., Zong K., Hu Z., Gao S. Multiple exsolutions in a rare clinopyroxene megacrysts from the Hannuoba basalt, North China: Implications for subducted slab-related crustal thickening and recycling // *Lithos*. 2013. V. 177. pp. 136–147.
- Hoang N., Flower M., Carlson R.W. Major, trace element and isotopic composition of Vietnamese basalts: Interaction of hydros EM1-rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. V. 60. No. 22. pp. 4329–4351.
- Hoang N., Flower M. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: implication for origins of a ‘Diffuse igneous province’ // *Journal of Petrology*. 1997. V. 39. No. 3. pp. 369–395.
- Hunt A.C., Parkinson J., Harris N.B.W., Barry T.L., Rogers Y.N.W., Yondon M. Cenozoic volcanism on the Hangai Dome, Central Mongolia: geochemical evidence for changing melt sources and implications for mechanisms of melting // *Journal Of Petrology*. 2012. V. 53. No. 9. pp. 1913–1942.
- Kopylova M.G., O'Reilly S.Y., Genshaft Yu.S. Thermal state of the lithosphere beneath Central Mongolia: evidence from deep-seated xenoliths from Shavaryn Saram volcanic centre in the Tariat depression, Hangai, Mongolia // *Lithos*. 1995. V. 36. pp. 243–255. doi: 10.1016/0024-4937(95)00020-8
- Linlin Hu, Shaokui Pan, Ren Lu, Jianping Zheng, Hongkun Dai, Anqi Guo, Li Yu, Haiqi Sun. Origin of gem-quality megacrysts in the Cenozoic alkali basalts from the Muling area, northeastern China // *Lithos*. 2022. V. 422–423, 106720. doi: 10.1016/j.lithos.2022.106720
- Litasov K.D. Petrology of a megacryst assemblage in Pliocen-Pleistocene basanites from the Vitim Plateau (Transbaikalie) // *Volcanology and Seismology*. 2000. V. 22. pp. 35–53.
- Liu Y.-D., Ying J.-F. Origin of clinopyroxene megacrysts in volcanic rocks from the North China Craton: a comparison study with megacrysts worldwide // *International Geology Review*. 2020. V. 62. No. 15. pp. 1845–1861. doi: 10.1080/00206814.2019.1663766
- Matusiak-Malek M., Puziewicz J., Ntaflou T., Woodland A., Uenver-Thiele L., Buchner J., Gregoire M., Aulbach S. Variable origin of clinopyroxene megacrysts carried by Cenozoic volcanic rocks from the eastern limb of Central European Volcanic Province (SE Germany and SW Poland) // *Lithos*. 2021. V. 382–383, 105936. doi: 10.1016/j.lithos.2020.105936
- Nakamura D. A new formulation of garnet–clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analysis of a large experimental data set // *Journal of Metamorphic Geology*. 2009. V. 27. pp. 495–508.
- Nimis P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1999. V. 135. pp. 62–74. doi: 10.1007/s004100050498
- Nimis P., Taylor W.R. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139. pp. 541–554. doi: 10.1007/s004100000156
- Pivin M., Femenias O., Demaiffe D. Metasomatic mantle origin for Mbuji-Mayi and Kundelungu garnet and clinopyroxene megacrysts (Democratic Republic of Congo) // *Lithos*. 2009. V. 112. pp. 951–960. doi: 10.1016/j.lithos.2009.03.050
- Putirka K.D. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008. V. 69. pp. 61–120. doi: 10.2138/rmg.2008.69.3

- Rankenburg K., Lassiter J.C., Brey G. Origin of megacrysts in volcanic rocks of the Cameroon volcanic chain- constraints on magma genesis and crustal contamination // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2004. V. 147. pp. 129–144.
- Righter K., Carmichael, I.S.E. Mega-xenocrysts in alkali olivine basalts: Fragments of disrupted mantle assemblages // *American Mineralogist*. 1993. V. 78. pp. 1230–1245.
- Roberts R.J., Lehong K.D., Botha A.E.J., Costin G., De Beer F.C., Hoffman W.J., Hetherington C.J. Clinopyroxene megacrysts from Marion Island, Antarctic Ocean: evidence for a late stage shallow origin // *Mineralogy and Petrology*. 2019. V. 113. pp. 155–167.
- Rudnick R.L., Jackson I. Measured and calculated elastic wave speeds in partially equilibrated mafic granulite xenoliths: implication for the properties of an underplated lower continental crust // *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100. pp. 10211–10218.
- Shaw C.S.J., Eyzaguirre J. Origin of megacrysts in the mafic alkaline lavas of the West Eifel Volcanic Field, Germany // *Lithos*. 2000. V. 50. pp. 75–95.
- Simonov V.A., Mikolaichuk A.V., Rasskazov S.V., Kovyazin S.V. Cretaceous-Paleogene within-plate magmatism in Central Asia: data from the Tien Shan basalts // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. No. 7. pp. 520–533. doi: 10.1016/j.rgg.2008.06.009
- Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle compositions and processes // *Magnetism in oceanic basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geological Society Special Publication. 1989. V. 42. pp. 313–345.
- Thompson R.N. Primary basalts and magma genesis II. Snake river plain, Idaho, U.S.A. // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1975. V. 52. No. 13. pp. 213–232.
- Upton B. G. J., Hinton R. W., Aspen P. Megacrysts and associated xenoliths: evidence for migration of geochemically enriched melts in the upper mantle beneath Scotland // *Journal of Petrology*. 1999. V. 40. pp. 935–956.
- Upton B.G.J., Finch A.A., Slaby E. Megacrysts and salic xenoliths in Scottish alkali basalts: derivatives of deep crustal intrusions and small-melt fractions from the upper mantle // *Mineralogical Magazine*. 2009. V. 73. pp. 943–956.
- Xiao Senhong REE abundances in megacrysts and host basalts: REE behavior of magma at high pressures // *Chinese Journal of Geochemistry*. 1991. V. 10. No. 1. pp. 11–20.
- Xudong Wang, Tong Hou, Meng Wang, Chao Zhang, Zhaochong Zhang, Ronghao Pan, Felix Marxer, Hongluo Zhang. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems // *European Journal of Mineralogy*. 2021. V. 33. pp. 621–637. doi: 10.5194/ejm-33-621-2021
- Zorin Yu.A., Novoselova M.R., Turutanov E.K., Kozhevnikov V.M. Structure of the lithosphere of the Mongolian-Siberian Mountainous Province // *Journal of Geodynamics*. 1990. V. 11. pp. 327–342.

Информация об авторах:

Егорова В.В., PhD, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: verae@igm.nsc.ru

Шелепаев Р.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: rshel@igm.nsc.ru

Изох А.Э., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Egorova V.V., PhD, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: verae@igm.nsc.ru

Shelepaev R.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: rshel@igm.nsc.ru

Izokh A.E., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Major Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk, Russia.

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 30.10.2023; принята к публикации 03.03.2025

The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 30.10.2023; accepted for publication 03.03.2025