

## МЕГАКРИСТАЛЛЫ АМФИБОЛА В ПИРОКЛАСТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ ПОБОЧНЫХ ЭРУПТИВНЫХ ЦЕНТРОВ КРОНОЦКОГО ВУЛКАНА

© 2025 Г.Н. Овсянников<sup>1,2</sup>, Н.В. Горбач<sup>1</sup>, А.Н. Рогозин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;  
e-mail: george\_ovs@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119991

Поступила в редакцию 18.11.2024; после доработки 14.10.2025; принята в печать 25.12.2025

Приведена информация о морфологии и составе мегакристаллов амфибола, обнаруженных в пирокластическом материале двух эруптивных центров на южных склонах Кроноцкого вулкана. Мегакристаллы, размером от 1 до 8 см, присутствуют как в матриксе вулканических бомб, так и формируют округлые лапилли в виде отдельных кристаллов либо их сростков. Составы мегакристаллов принадлежат ряду ферричермакит — магнезиогастингсит с высокими содержаниями  $Al_2O_3$  (14.8–16 масс. %) при средней магнезиальности  $Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+}) = 0.67$ . Состав вулканических бомб, вмещающих мегакристаллы, отвечает низко-К толеитовым базальтам ( $SiO_2 = 49.32–50.50$  масс. %,  $K_2O = 0.24–0.27$  масс. %,  $FeO^*/MgO = 1.7–2.1$ ). Среди пирокластического материала были найдены также ксенолиты оливиновых пироксенитов, крупно- и среднезернистых амфибол-плагиоклазовых сростаний. Предложены гипотезы происхождения данной ассоциации, крайне необычной для толеитовых островодужных базальтов.

*Ключевые слова:* мегакристаллы, амфибол, толеитовые базальты, ксенолиты, вулкан Кроноцкий, Камчатка.

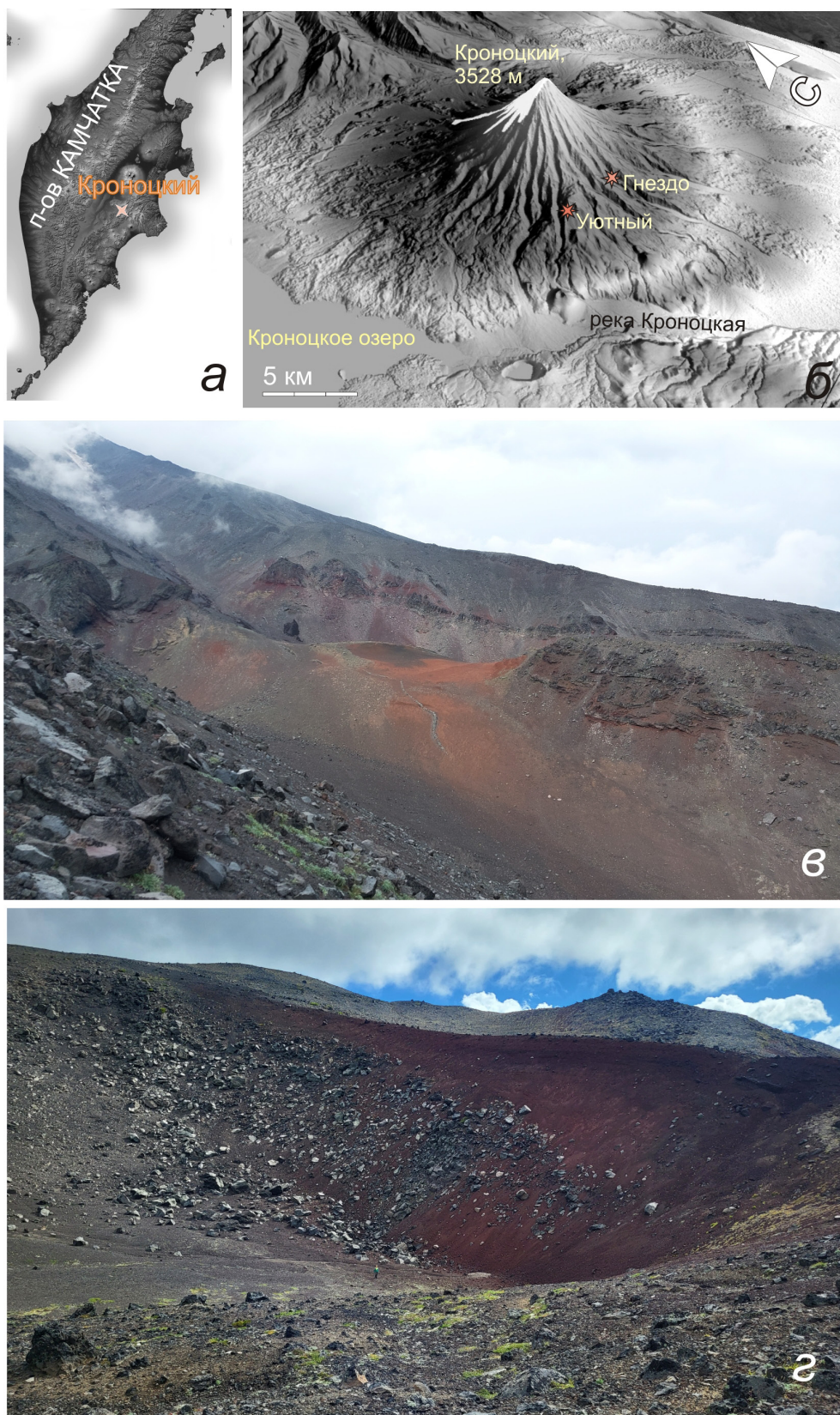
### ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Кроноцкий (рис. 1) — один из крупнейших стратовулканов среди действующих вулканов Восточного вулканического пояса Камчатки (Гущенко, 1991). Склоны стратовулкана, высота которого достигает 3528 м, прорезаны глубокими и крутыми ущельями-барранкосами с многочисленными скальными останцами неков, фрагментов даек и разрушенных лавовых потоков. В нижней трети постройки стратовулкана сосредоточены побочные эруптивные центры — шлаковые конусы, кратеры и многочисленные неки (Горбач, Рогозин, 2023). Наши предшествующие исследования охватывали юго-западный и западный сектор стратовулкана и его северные склоны (Горбач и др., 2023). В августе 2024 г. нам удалось выполнить маршруты в пределах одного из наиболее труднодоступных и эродированных участков южного склона стратовулкана. Информация об этом секторе стратовулкана была приведена только в отчете геолого-съёмочной Кроноцкой партии, про-

водившей работы в этом районе в 1968–1972 гг.<sup>1</sup> В частности, в отчете упоминалось о находке ксенолитов основных и ультраосновных пород в начале одного из южных барранкосов. Эта находка была выполнена в ходе совместного маршрута М.Л. Фроловой и Ф. Ш. Кутыева в 1970 г. В кратком полевом описании ими отмечены ксенолиты верлитов, лерцолитов, шприсгеймитов, горнблендитов, а также монокристаллы амфибола, обнаруженные в туфах. Кроме краткого описания в геологическом отчете, мегакристаллы и ассоциирующие с ними ксенолиты упоминаются в работах (Петрогенезис..., 1979; Фролова, 1973), однако подробной характеристики

<sup>1</sup>Цикунов А.Г., Олейник В.И., Зименко С.И., Селиверстов В.А. Геологическое строение и полезные ископаемые листа N-57-XI. (Окончательный отчет о геологической съёмке м-ба 1:200 000, проведенной Кроноцкой партией в 1968-1970 гг. г. Петропавловск-Камчатский, Камчатский филиал ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по Дальневосточному федеральному округу»), 1971. 489 с.

## МЕГАКРИСТАЛЛЫ АМФИБОЛА



**Рис. 1.** Объекты исследования: *а* — положение Кроноцкого вулкана на карте Камчатки; *б* — положение эруптивных центров Гнездо и Уютный на южном склоне Кроноцкого вулкана; *в* — эродированный центр Гнездо с ярко-красной пирокластикой сечется маломощной дайкой базальтов; *г* — кратер центра Уютный.

**Fig. 1.** Research objects: *a* — position of Kronotsky volcano on the map of Kamchatka; *b* — position of the Gnezdo and Uyutnyj eruptive centers on the southern slope of the Kronotsky volcano; *v* — eroded center of Gnezdo with bright red pyroclastic is cut by a thin basalt dike; *z* — crater of the Uyutnyj center.

## УСЛОВИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ, МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ МЕГАКРИСТАЛЛОВ

мегакристаллов, ксенолитов и условий их проявления в перечисленных литературных источниках не приведено. Нам удалось не только повторить находку геологов, но и обнаружить эруптивный центр Гнездо, пирокластический материал которого содержит большое количество мегакристаллов амфибола и ассоциирующих с ними ксенолитов. Мегакристаллы со средним размером от 2 до 5 см присутствуют как в составе крупных (>10 см) вулканических бомб, так и в виде кристаллолапилли ( $\geq 6.4$  см) в оторочке вмещающей лавы. Кроме того, единичные мегакристаллы мы обнаружили в пирокластическом материале эруптивного центра Уютный в юго-западном секторе вулканической постройки. Мы описываем морфологию и состав мегакристаллов и обсуждаем проблему их происхождения.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для морфологических исследований нами была отобрана коллекция из 40 представительных кристаллов и их сростков. Часть из них была распилена вдоль кристаллографических направлений и помещена в эпоксидную заливку. Из фрагментов мегакристаллов, ксенолитов и вмещающих пород были изготовлены прозрачно-полированные шлифы. Фотографирование петрографических шлифов в проходящем поляризованном свете выполнено при помощи цифровой камеры DS-Fi3 на оптическом микроскопе Nikon ECLIPSE LV100N POL в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН.

Моделирование морфологии кристаллов амфибола производилось в программе VESTA (Momma, Izumi, 2011) на основании визуальных наблюдений с использованием параметров ячейки и координат атомов природного чермакитового горнблендита из работы (Phillips et al., 1989, образец Н-1)

Химический состав мегакристаллов амфибола, минералов ксенолитов и вмещающих пород определен при помощи электронно-зондового микроанализа в ИВиС ДВО РАН (Tescan Vega 3, оснащенный ЭДС Oxford Instruments Xmax80, аналитик Т.М. Философова) и Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Jeol JSM IT-500, оснащенный ЭДС Oxford Instruments XmaxN, аналитик Н.Н. Коротаева), выполнены фотографии в отраженных электронах.

Содержания главных элементов в породах, вмещающих мегакристаллы и ксенолиты были определены рентгенофлуоресцентным методом в Институте геохимии им А.П. Виноградова, г. Иркутск по методике, изложенной в работе (Amosova et al., 2016).

**Эруптивные центры и их пирокластические продукты, вмещающие мегакристаллы.** Изученные эруптивные центры изображены на рис. 1б. Эруптивный центр, названный нами Гнездо (рис. 1б), расположен на гребне между двумя барранкосами, которые берут начало на высоте около 2700 м и распространяются на юг от вершины стратовулкана. Центр Гнездо находится на высоте 1150 м, а его склоны, сложенные вулканическими бомбами и лапилли, прорваны дайкой субафировых базальтов, мощностью 0.5 м (рис. 1б). В центре проявлено понижение, вероятно, соответствующее существовавшему ранее кратеру диаметром около 70 м. Очертания склонов сглажены и частично эродированы, вероятно, под воздействием позднеплейстоценовых ледников. Вулканические бомбы, слагающие склоны эруптивного центра, имеют размер от 10 до 30–40 см, бурюю или кирпично-красную окраску; темно-серые разности встречаются гораздо реже. Породы вулканических бомб порфиновые и состоят из вкрапленников плагиоклаза (~20–25 об. %), оливина и пироксенов (~10 об. %), а их химический состав отвечает низкокалийевому толеитовому базальту (табл. 1, образцы 1–3).

**Таблица 1.** Химический состав базальтовой пирокластике эруптивных центров южного сектора Кроноцкого вулкана (масс. %)

**Table 1.** Chemical composition of basic pyroclastic from eruptive centers of the southern sector of the Kronotsky volcano (wt. %)

Окислы	Номер образца			
	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	49.32	50.26	50.50	49.42
TiO <sub>2</sub>	0.85	0.89	0.94	0.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.22	17.92	18.19	19.39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.67	12.35	12.42	10.71
MnO	0.19	0.20	0.20	0.17
MgO	5.50	6.35	6.06	6.25
CaO	10.27	10.12	9.56	10.64
Na <sub>2</sub> O	2.16	2.30	2.29	2.25
K <sub>2</sub> O	0.26	0.26	0.27	0.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.07	0.08	0.08
П.п.п.	-0.10	-0.13	-0.21	-0.40
Сумма	99.41	100.62	100.30	99.62

Примечание. Образцы 1–3 характеризуют состав вулканических бомб эруптивного центра Гнездо; состав образца 4 (Горбач, Rogozin, 2023), характеризует продукты извержения центра Уютный.

Note. Samples 1–3 characterize the composition of volcanic bombs from the Gnezdo eruptive center; the composition of sample 4 (Gorbach and Rogozin, 2023) characterizes the eruption products of the Uyujutny center.

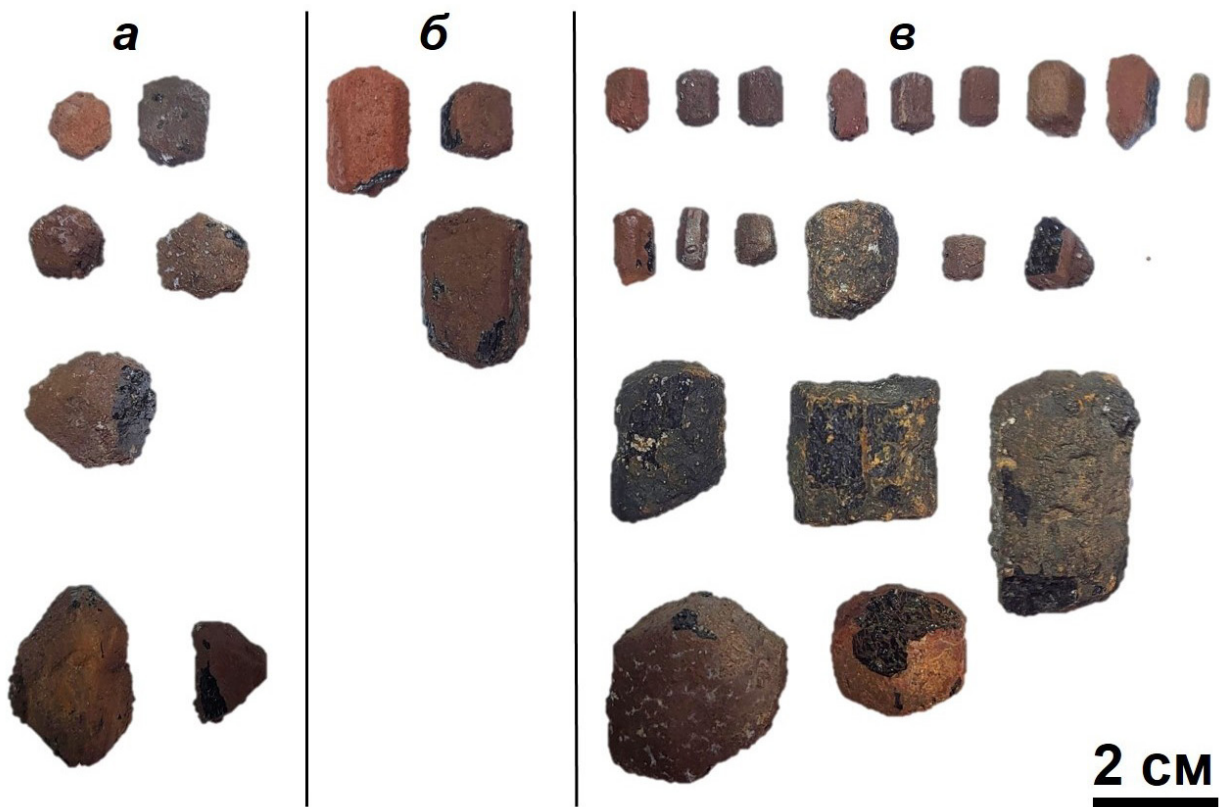
Мегакристаллы амфибола, обнаруженные нами в составе крупных бомб, имеют размер от 1 до 4 см (рис. 2–4). Помимо мегакристаллов в матриксе вулканических бомб, на склонах эруптивного центра обильны кристаллолапилли, размером до 5 см, состоящие из отдельных кристаллов или их сростков в окружении тонкой корочки базальта.

Мегакристаллы были обнаружены нами в вулканических бомбах и лапилли кратера Уютный (рис. 1а). Кратер, диаметр которого составляет 300 м, а глубина около 40 м, расположен на юго-западном гребне стратовулкана. В стенках кратера обнажены слои базальтовых вулканических бомб и агглютинатов, (табл. 1, образец 4). В отличие от обильно-порфировых базальтов эруптивного центра Гнездо, породы кратера Уютного субафировые и содержат около 5 об. % фенокристаллов оливина и пироксенов, а также единичные зерна плагиоклаза. Мегакристаллы в бомбах единичны, однако, как и в базальтах центра Гнездо, встречаются совместно с включениями амфибол-плагиоклазовых пород,

ксенолитами пироксенитов, а, кроме того, и оскольчатыми фрагментами осадочных пород.

**Морфология мегакристов.** Хорошо ограненные индивиды представлены пинакоидально-ромбопризматическим габитусом, имеют изометричный или слегка удлинённый облик (удлинение от 1.1 до 1.9, в среднем, 1.5, рис. 2 б, 2в). Редко встречаются сильно удлинённые или уплощенные кристаллы (среднее удлинение 4 и 0.4 соответственно (рис. 2а, 2в). В составе крупной пирокластики обнаружены, предположительно, автоэпитаксические срастания (рис. 3): на крупные кристаллы нарастают более мелкие идиоморфные; кроме того, проявлена регенерация кристаллов — округлые монокристаллические ядра кристаллизуются до субидиоморфного состояния.

Облик кристаллов эруптивного центра Гнездо (рис. 4) сформирован комбинацией двух ромбических призм (110) и (011) и двух пинакоидов (010) и (10 $\bar{1}$ ). Иногда в кристаллах проявлены грани призмы (120). (Дир и др., 1965). Сечение, перпендикулярное оси С, псевдогексагональное.



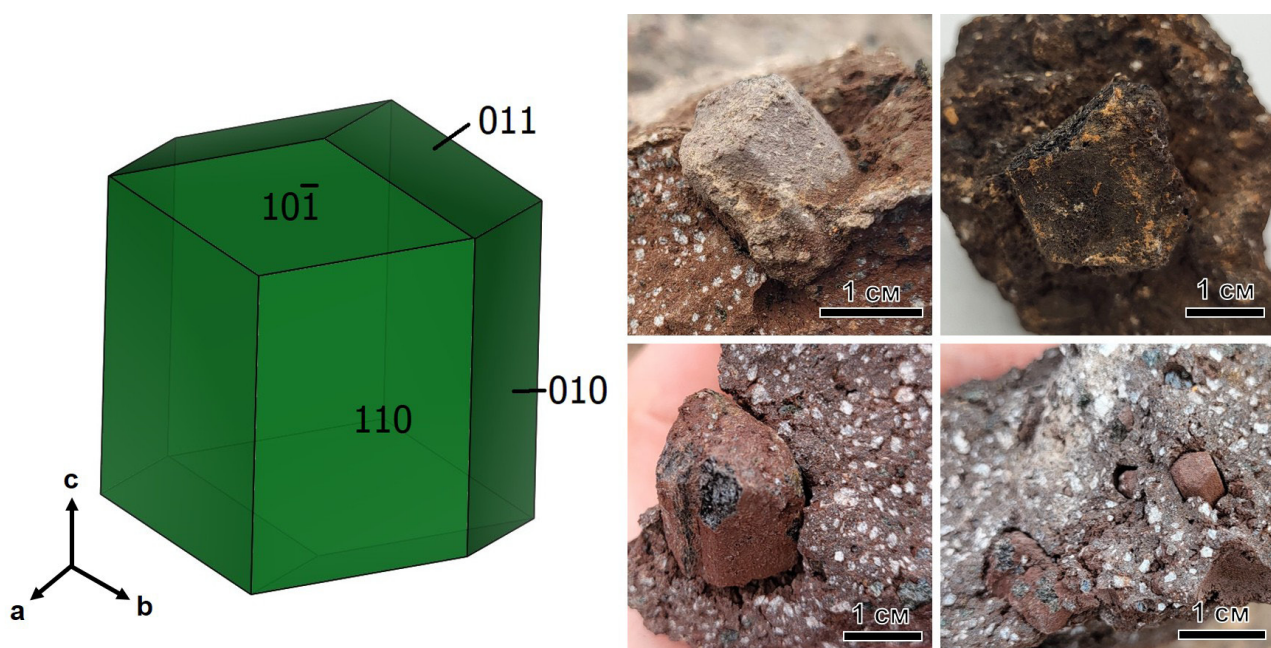
**Рис 2.** Фотографии представительных мегакристаллов амфибола Кроноцкого вулкана: *а* — уплощенные кристаллы из пород центра Гнездо; *б* — удлиненные и изометричные кристаллы из пород конуса Уютный; *в* — удлиненные и изометричные кристаллы из пород центра Гнездо. На *а* — оси С кристаллов ориентированы перпендикулярно плоскости рисунка; на *б*, *в* — оси С кристаллов ориентированы параллельно плоскости рисунка, снизу вверх.

**Fig. 2.** Photographs of representative amphibole megacrysts from the Kronotsky volcano: *a* — flatted crystals from the Gnezdo center; *b* — elongated and isometric crystals from rocks of the Uytutnyj center; *v* — elongated and isometric crystals from rocks of the Gnezdo center. In *a* — C axes of the crystals are oriented perpendicular to the plane of the image, in *b* and *v* — C axes are oriented parallel to the plane of the image, from bottom to top.



**Рис 3.** Фотографии закономерных сростков, лапилли и фрагментов мегакристаллов амфибола с характерной спайностью из пород центра Гнездо.

**Fig. 3.** Photographs of regular intergrowths, lapilli, and fragments of large megacrystals of amphibole with characteristic cleavage from the Gnezdo center.

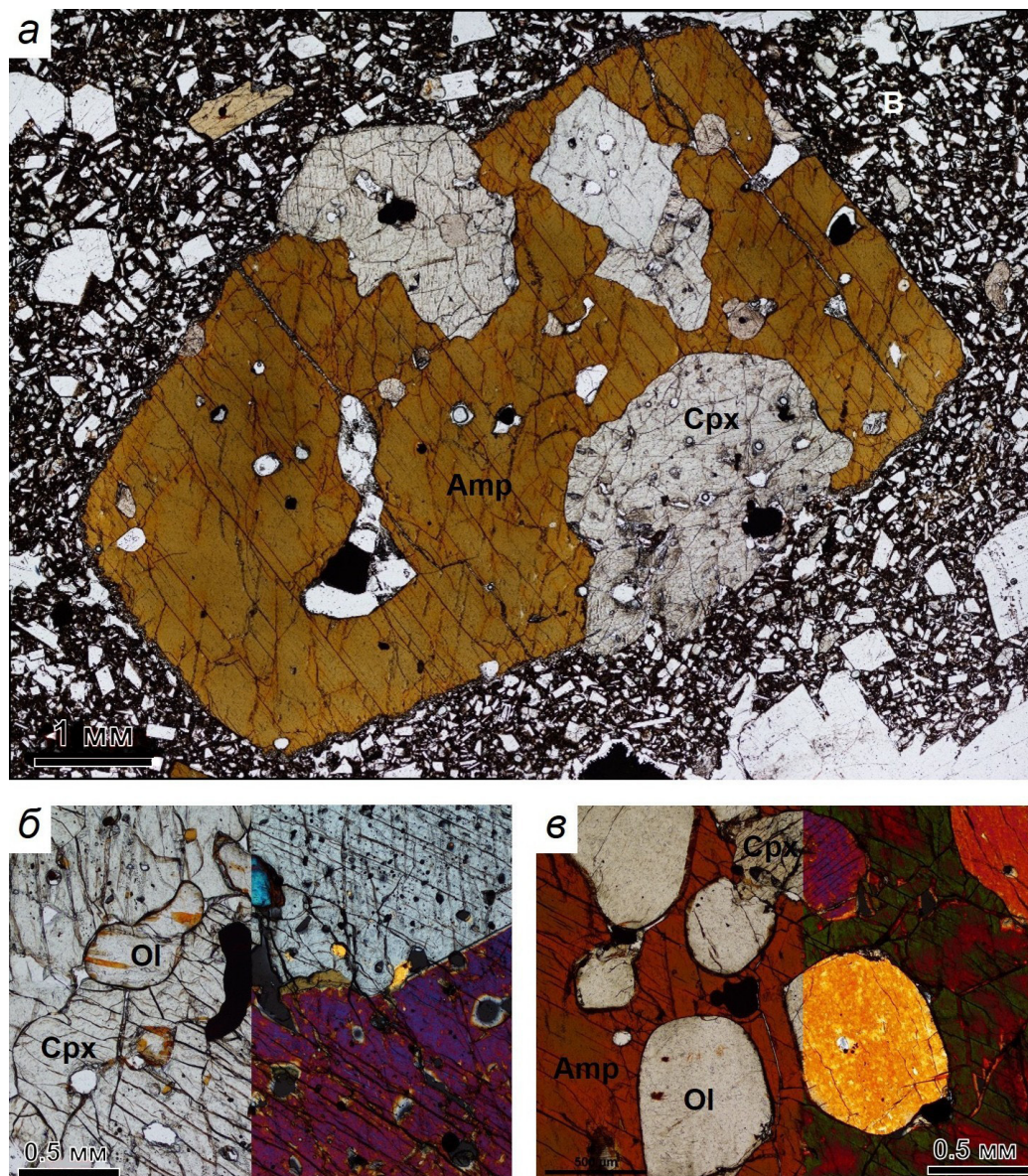


**Рис 4.** Модель мегакристалла амфибола из центра Гнездо Кроноцкого вулкана (слева) и фото реальных кристаллов в породе (справа). Слева стрелками показаны кристаллографические оси модельного кристалла. Псевдогексагональный облик кристалла сформирован комбинацией двух ромбических призм (110) и (011) и двух пинакоидов (010) и (101). Иногда в кристаллах проявлены грани призмы (120).

**Fig. 4.** A model of amphibole megacrystal from the Gnezdo center of the Kronotsky Volcano (left figure) and photo of real crystals in tephra (right figures). The arrows on the left indicates crystallographic axes of the model crystal. The pseudohexagonal shape of the crystal is formed by a combination of two rhombic prisms (110) and (011) and two pinacoids (010) and (101). Sometimes prism faces (120) are visible in the crystals.

В петрографических шлифах амфибол проявляет отчетливый плеохроизм в оранжево-бурых тонах (рис. 5а). Обнаружены амфиболовые каймы вокруг ксенолитов пироксенитов и тонкие вроски амфибола в крупных кристаллах пироксенов (рис. 5б). Изученные фрагменты мегакристаллов амфиболов содержат округлые пироксены, плагиоклазы и оливины от единичных вросок до 40 об. % (рис. 5а, 5в).

**Состав мегакристаллов и твердофазных включений в них.** Определены составы различных участков кристаллов из двух исследованных центров, вросков и кайм в пироксенитах, а также мегакристаллов амфиболов с обильными включениями пироксенов и плагиоклазов. Согласно классификации (Hawthorne et al., 2012) данные составы относятся к ряду ферричермакит — магнезиогастингсит с высокими содержаниями



**Рис 5.** Микрофотографии ксенолитов и крупных кристаллов амфибола из пород центра Гнездо. *a* — оливиновый клинопироксенит замещается амфиболом (темно-коричневое) по границам зерен и трещинам спайности клинопироксена; *б* — округлые включения оливина и клинопироксена в амфиболом; *в* — крупный кристалл амфибола в базальтовой тефре с включениями клинопироксенов. Фотографии в проходящем свете: *б*, *в* — слева — при 1 николе, справа — николи скрещены, *a* — при 1 николе; Ol — оливин, Cpx — клинопироксен, Amp — амфибол, Pl — плагиоклаз, B — вмещающий базальт.

**Fig. 5.** Microphotographs of xenoliths and large amphibole crystals from rocks of the Gnezdo center. *a* — olivine clinopyroxenite is replaced by amphibole (dark brown) along grain boundaries and cleavage cracks of clinopyroxene; *б* — rounded inclusions of olivine and clinopyroxene in amphibole; *в* — a large single crystal of amphibole in basaltic tephra with inclusions of clinopyroxenes; Photos in transmitted light: *б*, *в*, on the left — PPL, on the right — XPL, *a* — PPL. Ol — olivine, Cpx — clinopyroxene, Amp — amphibole, Pl — plagioclase, B — host basalt.

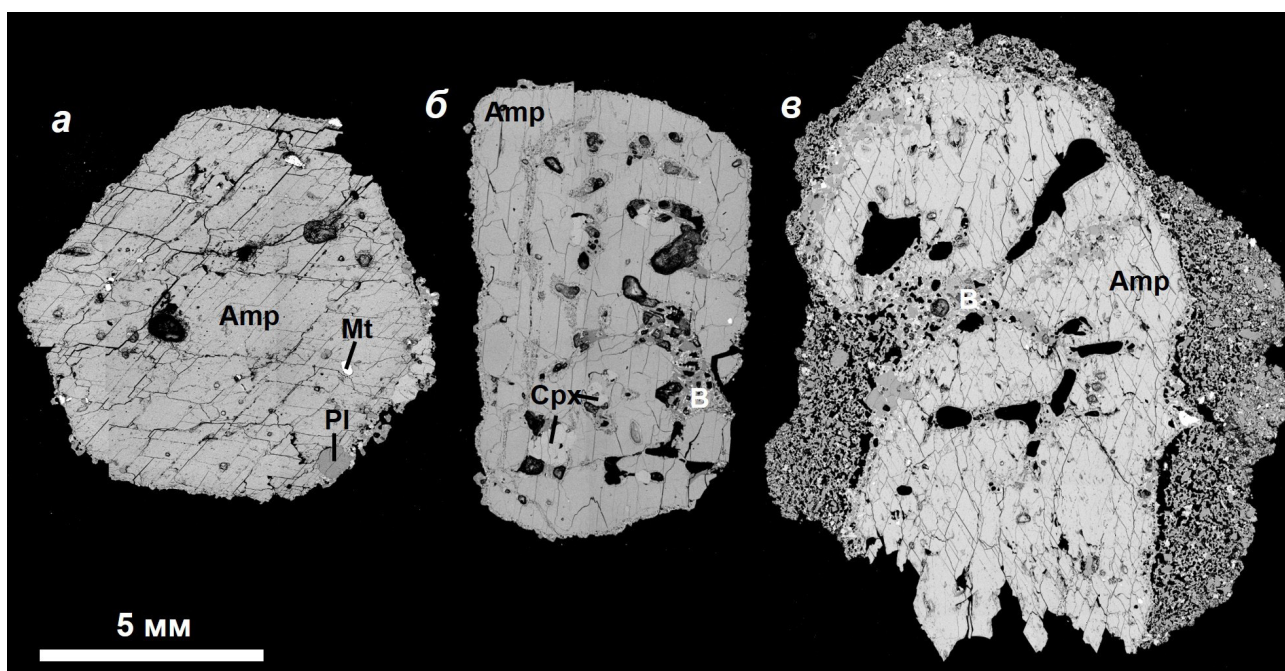
$\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.8–16 масс. %) и  $\text{Al}^{\text{IV}}$  (более 2 apfu) при средней магнезиальности  $\text{Mg}\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 0.67$ .

Исследованы кристаллы, размером 5–15 мм, в сечениях, параллельном и перпендикулярном оси С (рис. 6). Как в центре Гнездо, так и в центре Уютный, химический состав кристаллов схожий (табл. 2), кроме того, кристаллы не проявляют какой-либо зональности. Кристаллы окружены каймой базальта, толщиной 50–100 мкм. Их края слегка резорбированы, а внутри встречаются червеобразные сообщающиеся поры и заливы, частично заполненные базальтовым стеклом и микролитами плагиоклаза, близкими по составу к таковым из вмещающих пород. В кристаллах встречаются редкие округлые (0.5–2 мм) кристаллы клинопироксена-авгита ( $\text{Mg}\#73\text{--}74$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  6.8–7.5 масс. %) и плагиоклаза анортитового состава (An94). Также в качестве включений присутствует округлый магнетит (до 0.5 мм) с низким содержанием титана (<1 масс. %  $\text{TiO}_2$ ) и субмикронным распадом твердых растворов.

В изученном кристалле из центра Уютный также обнаружены округлые (0.05–0.1 мм) включения шпинели с ламелями распада тита-

номагнетита (до 1 мкм). В кристаллах амфибола центра Гнездо включения шпинели не обнаружены.

Исследован фрагмент крупного (4 см) кристалла амфибола с округлыми включениями (рис. 7). Среди них преобладает клинопироксен-авгит (0.5–2 мм,  $\text{Mg}\#74$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  4.6–6.5 масс. %), реже встречается оливин (до 0.5 мм,  $\text{Mg}\#73\text{--}75$ ) и плагиоклаз анортитового состава (An92–93). Ортопироксен (до 0.1 мм,  $\text{Mg}\#73\text{--}74$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  2.8–5 масс. %) присутствует в подчиненных количествах в виде мелких округлых включений в клинопироксене. Довольно много округлых включений титаномангнетита (до 0.2 мм,  $\text{TiO}_2 \leq 4$  масс. %) с очень тонкими, субмикронными решетками распада твердых растворов. Для описанного парагенезиса оценены РТ-параметры кристаллизации по двупироксеновому (Putirka, 2008) и амфиболовому (Ridolfi, 2021) термобарометрам. По равновесной паре клинопироксен-ортопироксен ( $\text{Mg}\#73\text{--}74$ , фактор равновесия 1.07) получены параметры давления  $5.5 \pm 2.8$  Кбар и температуры  $985 \pm 20$  °С. Параметры кристаллизации вмещающего амфибола оценены в  $5.5\text{--}6.3 \pm 0.7$  Кбар и  $950 \pm 22$  °С.



**Рис. 6.** Мегакристаллы амфибола в базальтовой оторочке: *a* — кристалл амфибола (Amp) с единичными включениями магнетита (Mt) и плагиоклаза (Pl). Центр Гнездо. Сечение, перпендикулярное оси С; *б* — кристалл с редкими включениями клинопироксенов (Cpx), порами и заливами базальтового (B) расплава. Центр Гнездо. Сечение, параллельное оси С; *в* — резорбированный кристалл с порами, заливами базальтового расплава и мелкими включениями плагиоклаза и клинопироксена. Центр Уютный. Панорамы в отраженных электронах.

**Fig. 6.** Single crystals of amphibole in basaltic rim: *a* — an amphibole (Amp) crystal with single inclusions of magnetite (Mt) and plagioclase (Pl). The Gnezdo center. Cross section perpendicular to the C axis; *б* — amphibole crystal with rare inclusions of clinopyroxene (Cpx), pores and bays filled with basalt (B) melt. The Gnezdo center. Cross section parallel to the C axis; *в* — resorbed crystal with pores, bays with basalt melt and minor inclusions of plagioclase and clinopyroxene. The Uyutnyj center. BSE panoramas.

МЕГАКРИСТАЛЛЫ АМФИБОЛА

Таблица 2. Химический состав (масс. %) амфибола центров Гнездо и Уютный Кроноцкого вулкана.

Table 2. Amphibole chemical composition (wt. %), the Gnezdo and the Uyjutny centers of Kronotsky volcano.

Окислы	Номер анализа						
	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	39.98	39.43	40.12	40.38	41.67	42.02	40.39
TiO <sub>2</sub>	2.14	2.15	1.78	1.82	1.67	1.2	1.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.95	16.06	15.32	15.2	14.79	14.93	15.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	0.1	—
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.15	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1
FeO*	11.64	11.45	11.37	11.21	11.7	8.68	10.57
MnO	0.13	0.12	0.14	0.12	0.14	0.13	0.13
MgO	13.45	13.25	13.91	13.87	14.33	15.76	14.12
CaO	11.75	11.56	11.34	11.4	11.14	11.34	11.4
Na <sub>2</sub> O	2.4	2.37	2.28	2.3	2.32	2.37	2.34
K <sub>2</sub> O	0.21	0.23	0.15	0.18	0.14	0.18	0.19
Сумма	97.79	96.88	96.51	96.58	98.08	96.8	96.12

Примечание. 1, 3 — центральные части мегакристаллов; 2, 4 — краевые части мегакристаллов; 5 — мегакристалл с обильными включениями пироксенов и плагиоклазов; 6 — микроросток амфибола в клинопироксене оливинового клинопироксенита; 7 — кайма амфибола вокруг оливинового клинопироксенита. 1, 2 — амфиболы из пород центра Уютный, 3–6 — амфиболы из пород центра Гнездо. «—» — ниже предела обнаружения.

Note. 1, 3 — cores of megacrysts; 2, 4 — rims of megacrysts; 5 — megacryst with abundant inclusions of pyroxenes and plagioclases; 6 — amphibole microgrowth in clinopyroxene of olivine clinopyroxenite; 7 — amphibole rim around olivine clinopyroxenite. 1, 2 — amphiboles from the Uyjutny center, 3–6 — amphiboles from the Gnezdo center. «—» — below the detection limit.

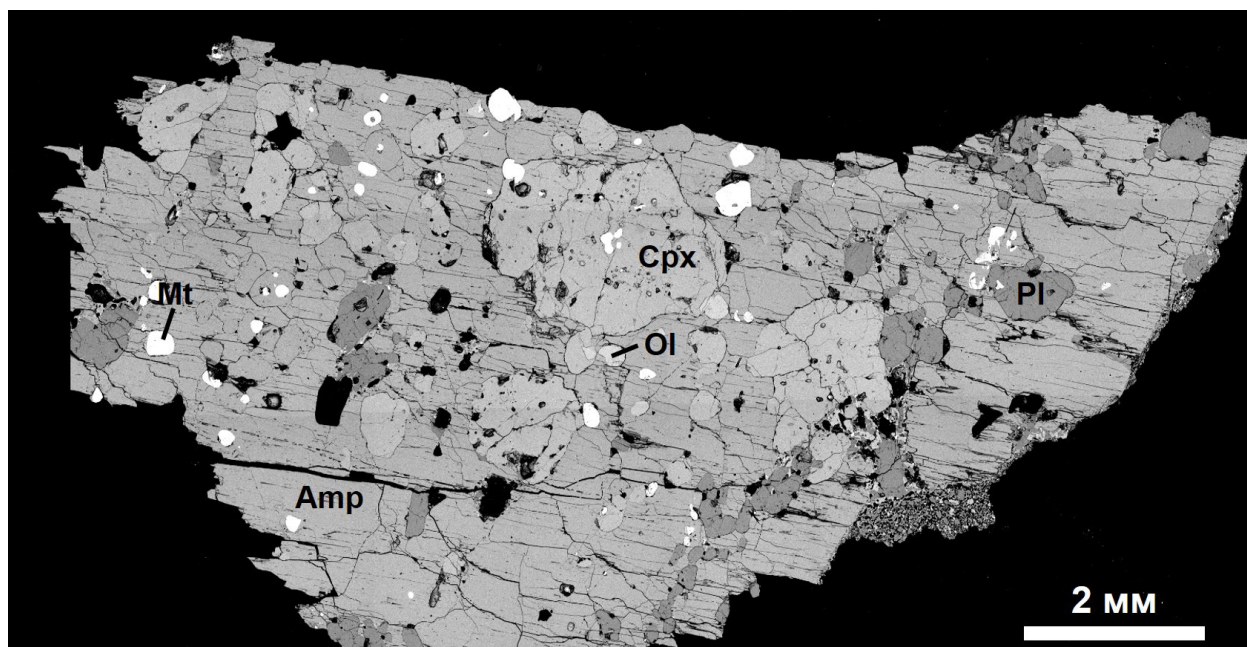


Рис. 7. Фрагмент мегакристалла амфибола с обильными включениями клинопироксена (Cpx), оливина (Ol) и плагиоклаза (Pl). Присутствуют округлые включения магнетита и титаномагнетита (Mt) (0.5–4 масс. % TiO<sub>2</sub>). Центр Гнездо. Панорама в отраженных электронах.

Fig. 7. Fragment of an amphibole megacrystal with abundant inclusions of clinopyroxene (Cpx), olivine (Ol) and plagioclase (Pl). Rounded inclusions of magnetite and titanomagnetite (Mt) contains 0.5–4 wt. % TiO<sub>2</sub>. The Gnezdo center. BSE panorama.

**Ксенолиты, ассоциирующие с мегакристаллами.** В пирокластических продуктах обоих эруптивных центров были найдены немногочисленные ксенолиты пироксенитов (от 1 до 3 см) и средне-крупнозернистых плагиоклаз-амфиболовых сростаний, со средним размером до 5 см, в редких случаях — до 12 см. Угловатые обломки среднезернистых амфибол-плагиоклазовых сростаний в полевых условиях были определены как мезократовые и лейкократовые габброиды. Вулканические бомбы из пород центра Уютный помимо ксенолитов пироксенитов и обломков амфибол-плагиоклазовых сростаний содержат также вспененные и массивные включения (до 10 см) коровых осадочных и гидротермально-измененных магматических пород. Такие включения представляют собой вытянутые или остроугольные фрагменты, сильнопористые, бежевого или светло-серого цвета. Некоторые массивные обломки имеют белые таблитчатые включения, напоминающие замещенный плагиоклаз и могут быть фрагментами магматических пород.

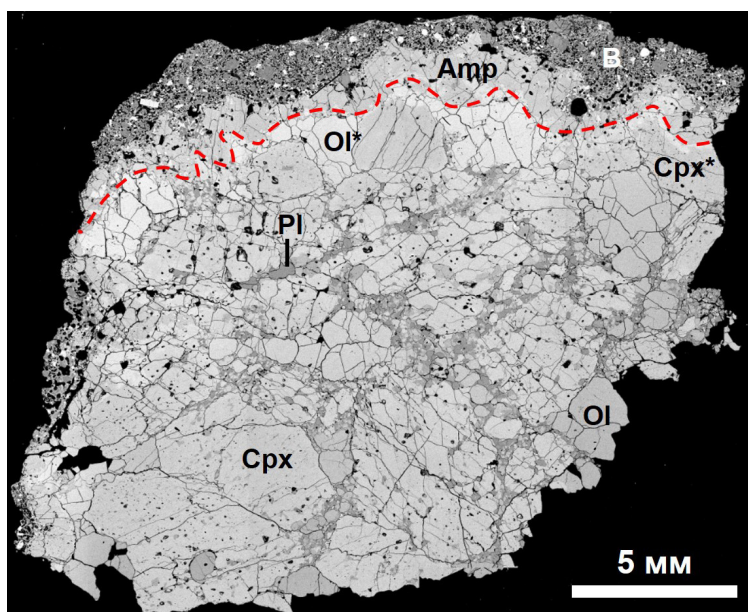
Изученный при помощи сканирующего электронного микроскопа оливиновый клинопироксенит из центра Гнездо (рис. 8) состоит из сростаний клинопироксена-авгита (65 об. %, до 5 мм, Mg#82–85), оливина (25 об. %, до 3 мм, Mg#80–83) и округлого плагиоклаза, распределенного по пересекающимся линейным областям (10 об. %,  $\leq 1$  мм, An90–91). Ортопироксен и рудные минералы в данном образце не обнаружены. На контакте с вмещающим базальтом вокруг ксенолита формируется оторочка амфиболовых зерен, шириной 1–2 мм (рис. 8; табл. 2, ан. 7). Амфибол также присутствует в виде тонких вростков в клинопироксене (до 0.5 мм, табл. 2, ан. 6) и ассоциирует с ксеноморфным плагиоклазом, формирующим вытянутые зоны.

Амфибол-плагиоклазовые сростания, изученные при помощи оптической микроскопии, представлены двуминеральным агрегатом субидiomорфных кристаллов сдвойникового плагиоклаза (40–70 об. %), помещенного в матрицу моно- или поликристаллического амфибола (30–60 об. %).

**Реакционные структуры.** Мегакристаллы амфибола, как и некоторые ксенолиты, несут следы реакции с расплавом. Все изученные кристаллы содержат червеобразные сообщающиеся поры и заливы, частично заполненные продуктами кристаллизации вмещающего базальтового расплава. Стекло в таких заливах содержится в подчиненных количествах, а большая часть занята ортопироксен-плагиоклазовыми (Mg#74 в ассоциации с An73) сростаниями (рис. 9а). На контакте с амфиболом данные структуры представлены субмикронными сростками, область реакции не превышает 0.1 мм (рис. 9б). В кристалле из центра Уютный обнаружен залив (около 0.5 мм), выполненный оливин-плагиоклазовыми (Mg#70 в ассоциации с An75) сростаниями (рис. 9в, 9д), на границе с амфиболом также присутствует 0.1 мм кайма с субмикронными сростками.

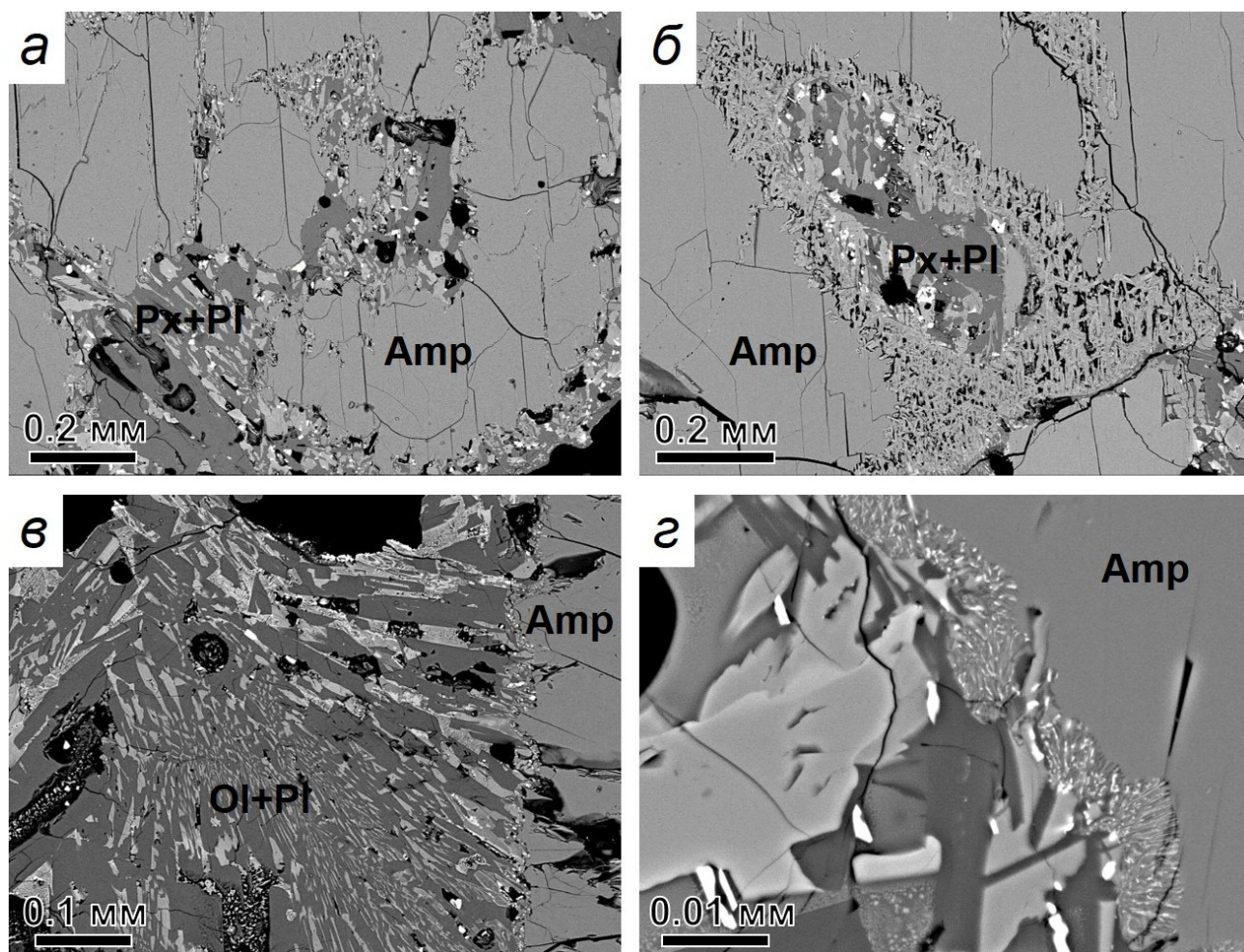
К реакционным структурам относятся и амфиболовые оторочки вокруг ксенолитов пироксенитов в базальтовой пирокластике центра Гнездо (рис. 8). Примечательно, что оливин и клинопироксен ксенолита на границе с амфиболовой оторочкой имеют пониженную магнезиальность Mg#78 относительно зерен в центре ксенолита.

Ксенолиты тех же пироксенитов в базальтах центра Уютный не имеют амфиболовой оторочки и не несут следов реакции с вмещающим базальтом.



**Рис. 8.** Оливиновый клинопироксенит из центра Гнездо. Амфибол (Amp) присутствует в виде тонких вростков в клинопироксене (Cpx, Mg#82–85) и формирует кайму вокруг ксенолита (отмечена красной пунктирной линией). Присутствует оливин (Ol, Mg#80–83). Ксеноморфный плагиоклаз (Pl, An92) формирует вытянутые зоны. На краю ксенолита присутствуют оливин (Ol\*, Mg#78) и клинопироксен (Cpx\*, Mg#78) пониженной магнезиальности. Панорама в отраженных электронах.

**Fig. 8.** Olivine clinopyroxenite from the Gnezdo center. Amphibole (Amp) forms thin intergrowths in clinopyroxene (Cpx, Mg#82–85) and a rim around the xenolith (marked with a red dotted line). Olivine is present (Ol, Mg#80–83). Xenomorph plagioclase (Pl, An92) forms elongated zones. Olivine (Ol\* Mg#78) and clinopyroxene (Cpx\* Mg#78) are present at the edge of the xenolith. BSE panorama.



**Рис. 9.** Реакционные структуры на границе амфибола и вмещающего базальта: *а, б* — червеобразные заливывы в монокристаллах амфибола (Amp) из пород центра Гнездо, выполненные пироксен-плагиоклазовыми (Px+Pl) срастаниями с небольшим количеством стекла и микролитов. Присутствует кайма (до 0.1 мм) очень тонких пироксеновых срастаний; *в* — крупный залив в монокристалле амфибола из пород центра Уютный с оливин-плагиоклазовыми срастаниями (Ol+Pl); *г* — детальное изображение тонких пироксеновых (?) срастаний на границе базальта и амфиболовой оторочки ксенолита оливиновых клинопироксенитов центра Гнездо. Фотографии в отраженных электронах.

**Fig. 9.** Reaction structures at the boundary of amphibole and host basalt. *a, b* — worm-like pores in single crystals of the amphibole (Amp) from the Gnezdo center, filled with pyroxene-plagioclase (Px+Pl) intergrowths with a small amount of glass and microliths. There is a rim (up to 0.1 mm) of very thin pyroxene intergrowth. *в* — a large bay in the amphibole monocrystal with olivine-plagioclase intergrowth (Ol+Pl). The Uytunyj center; *г* — detail image of fine pyroxene (?) intergrowth at the boundary of basalt and amphibole rim of the olivine clinopyroxenite xenolith. The Gnezdo center. BSE images.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мегакристаллы амфибола в пирокластике базальтового состава — чрезвычайно редкая находка для продуктов извержений островодужных вулканов. Такие находки чаще встречаются в продуктах внутриплитного вулканизма и обычно приурочены к субщелочным и щелочным породам или же породам лампрофирового ряда континентальных обстановок и чаще всего интерпретируются как ксенокристаллы мантийного происхождения (Carmichael, 2013; Mayer et al., 2014; Richter, Serre et al., 2020).

Среди опубликованных данных, посвященных составу амфиболсодержащих продуктов извержений вулканов Камчатки и Курил четвертичного возраста авторам удалось найти единственное упоминание о присутствии мегакристаллов амфибола. Так, в работе (Taran et al., 1997), основанной на представительной коллекции пород различных вулканических зон Курило-Камчатской островодужной системы, упоминаются мегакристаллы, размером до 4 см, в андезибазальтовой пирокластике Авачинского вулкана. Для плиоценовых андезитовых даек Камчатки описаны кристаллы амфибола

до 2 см (Бояринова и др. 1999). Мегакристаллы были подробно изучены в лавах и пирокластике вулканов Суфриер-Хилл (Монсеррат) и Мерапи (Индонезия), где они являются продуктами кристаллизации глубинных уровней магматических систем, питающих андезитовые вулканы (Higgins, Roberge, 2003; Peters et al., 2017). Для продуктов островодужного базальтового вулканизма в литературе нам удалось найти единичные описания. Например, присутствие кристаллов, размером до 2 см, зафиксировано в оливиновых базальтах одного из подводных вулканов Малой Антильской островной дуги (Sigurdsson, Shepherd, 1974); ксенокристаллы паргасита описаны в ювенильных андезибазальтах одного из мааров Транс-Мексиканского вулканического пояса (Lucci et al., 2024).

Мегакристаллы в продуктах извержений Кроноцкого вулкана уникальны не только обилием и крупными размерами, но и проявлением в виде отдельных фрагментов пирокластике — кристаллы либо их сростки часто формируют изометричные вулканические бомбы или лапилли (рис. 3). Кроме того, хорошо ограненные кристаллы среднего размера (рис. 4) непрочно «впаяны» в лаву и окружены лишь тонкой, до нескольких мм, оторочкой базальта, что, наиболее вероятно, служит признаком чрезвычайно быстрой транспортировки к поверхности.

Ассоциация мегакристаллов и ксенолитов, идентичность состава амфиболов в ксенолитах и в отдельных кристаллах (табл. 2), отсутствие зональности, признаки реакции с базальтовым расплавом (рис. 6, 9) позволяют предполагать ксеногенную природу амфиболов по отношению к вмещающим пирокластическим продуктам. Ответ на вопрос о том, на какой глубине и при каких условиях происходило формирование и захват мегакристаллов — в коровых условиях при подъеме магмы к поверхности или же на мантийных глубинах в области генерации базальтовых расплавов — не является очевидным. В работе (Петрогенезис..., 1979) было высказано предположение об образовании мегакристаллов за счет реакции базальтового расплава и гипербазитовых ксенолитов — от начальной переработки по трещинам и развития тонкой реакционной каймы, через наполовину замещенные ксенолиты до полных псевдоморфоз амфибола по перидотитам/пироксенитам. Действительно, экспериментальные работы (Wang et al., 2021) воспроизводят процесс реакции базальтовых и андезибазальтовых расплавов и мантийных перидотитов при давлениях 10–8 КБар и температурах 1200–880 °С с формированием амфибола. Состав амфибола, полученного при экспериментах (Wang et al., 2021) близок к составу изученных нами мегакристаллов, а также к

составам амфибола во внутренних реакционных каймах в ксенолитах гарцбургитов в продуктах извержений Авачинского вулкана, подробно охарактеризованных в работе (Bénard, Ionov, 2013).

Вместе с тем, рассчитанные нами РТ-параметры кристаллизации двух пироксенов и ассоциирующего с ними амфибола (рис. 7) (~5.3–6.3 КБар), соответствуют глубинам около 16–19 км, тогда как глубина раздела Мохоравичича под Кроноцким вулканом оценивается в 29–31 км (Гонтовая и др., 2010; Levin et al., 2002). Это означает, что оливиновые клинопироксениты, с которыми ассоциируют мегакристаллы, могут представлять собой нижнекоровые кумулятивные образования. В пользу этого свидетельствуют пойкилитовые структуры, невысокая магнезиальность оливина и клинопироксена, отсутствие рудных минералов. По нашему мнению, амфибол-плагиоклазовые сростания, которые ассоциируют с мегакристаллами и ксенолитами пироксенитов в обоих эруптивных центрах, вряд ли представляют собой мантийные образования и могли образоваться, к примеру, в периферийных зонах магматической системы. Вероятно, что при реакции магматического расплава и клинопироксенитовых ксенолитов произошло не только образование амфибола, но и изменение состава пироксенов и оливина. Об этом может свидетельствовать близость оценок РТ-параметров пироксенов и вмещающего их амфибола, а также снижение магнезиальности пироксена и оливина на контакте с амфиболовой оторочкой клинопироксенита (рис. 8). Можно предположить, что расплав описанных базальтов являлся только переносчиком ксенолитов и мегакристаллов, а реакция происходила в расплаве другого состава, так как амфибол претерпел лишь малозначительные изменения (рис. 9)

Если предположение о кумулятивной природе ксенолитов пироксенитов и амфибол-плагиоклазовых сростаний верно, то важно установить, являются ли они продуктами питающей магматической системы Кроноцкого вулкана или же относятся к предшествующим этапам вулканизма. Имеющиеся на сегодняшний день геохимические данные (Gorbach et al., 2025) не предполагают участие амфибола в эволюции серии пород Кроноцкого вулкана. Вместе с тем, в работе (Davidson et al., 2007) продемонстрирована возможность процесса скрытой кристаллизации («cryptic crystallization») амфибола в процессе эволюции островодужных магм, который приводит к накоплению богатых амфиболом кумулятивных горизонтов в низах островодужной коры. По мнению (Davidson et al., 2007), скрытая кристаллизация амфибола является важным петрогенетическим процессом, поскольку обогащенные амфиболом нижнекоровые кумуляты

могут служить эффективным фильтром для воды, растворенной в мантийных магмах; являться источником внутрикоровых расплавов и флюидов; а в случае рециклинга этих образований в мантию могут привести к ее обогащению водой и несовместимыми микроэлементами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пирокластических продуктах побочных эруптивных центров Кронцового вулкана обнаружены мегакристаллы амфибола, размером до 8 см — редкая находка для островодужных лав. Мегакристаллы ассоциируют с ксенолитами пироксенитов и амфибол-плагиоклазовых сростаний и являются ксеногенными для вмещающих базальтов. Предполагаемым механизмом образования мегакристаллов представляется реакция базальтового расплава и нижнекоровых кумулятивных образований.

Авторы благодарны анонимному рецензенту, чьи критические замечания позволили улучшить качество настоящего сообщения.

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00053 «Условия происхождения и эволюции магм во фронтальной зоне островной дуги на примере вулкана Кронцового (Восточная Камчатка)» <https://rscf.ru/project/23-27-00053>.

## Список литературы [References]

- Бояринова М.Е., Вешняков Н.А., Коркин А.Г. и др.* Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1: 200 000, серия Восточно-Камчатская. листы О-58-XXVI, XXXI, XXXII. 1999. СПб [Boyarinova M.E., Veshnyakov N.A., Korkin A.G. et al. Explanatory note to the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 200 000, East Kamchatka series. sheets O-58-XXVI, XXXI, XXXII. 1999. SPb (in Russian)].
- Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В.* Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29 [Gontovaya L.I., Popruzhenko S.V., Nizkous I.V. The Geological Structure and Rock Compositions of Kronotsky Volcano, the Largest Stratovolcano in the Frontal Zone of the East Volcanic Belt of Kamchatka // Volcanology and Seismology. 2010. № 4. С. 374–392].
- Горбач Н.В., Rogozin A.N.* Особенности геологического строения и состава пород вулкана Кронцового — крупнейшего стратовулкана фронтальной зоны Восточного вулканического пояса Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 26–45. <https://doi.org/10.1134/S074204632370029X> [Gorbach N.V., Rogozin A.N. Features of the geological structure and rock composition of the Kronotsky volcano — the largest stratovolcano of the frontal zone of the Eastern volcanic belt of Kamchatka // Volcanology and Seismology. 2023. V. 15. № 5. P. 26–45 <https://doi.org/10.1134/S074204632370029X>].
- Горбач Н.В., Rogozin A.N., Ovsyannikov G.N.* Полевые работы на северных склонах Кронцового вулкана в июле-августе 2023 г. // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2023. № 4. Вып. 60. С. 114–121. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-114-121> [Gorbach N.V., Rogozin A.N., Ovsyannikov G.N. Field work at the northern flank of Kronotsky volcano at July-August 2023 // Vestnik KRAUNTs. V. 60 (4). P. 114–121 (in Russian)].
- Гущенко И.И.* Вулкан Кронцовый. Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 52–61 [Gushchenko I.I. Kronotsky volcano // Active volcanoes of Kamchatka. V. 2. P. 52–61. Moscow: Nauka, 1991 (in Russian)].
- Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Д.* Породообразующие минералы. Т. 2. Цепочечные силикаты. М.: Мир, 1965. 406 с. [Deer U.A., Howie R.A., Zuzman D. Rock-forming minerals. V. 2. Chain silicates. Moscow: Mir, 1965. 406 p. (in Russian)].
- Кутыев Ф.Ш., Шаранов В.Н.* Петрогенезис под вулканами (в свете изучения базит-гипербазитовых включений в базальтах) М.: Недра, 1979. 197 с. [Kutiev F.Sh., Sharapov V.N. Petrogenesis under volcanoes (in the light of the study of basite-hyperbasite inclusions in basalts) Moscow: Nedra, 1979. 197 p. (in Russian)].
- Фролова М.Л.* Район Кронцовкой сопки и вулкана Крашенинникова // Вулканы и геотермы Камчатки. Материалы IV Всесоюзного вулканологического совещания / Отв. ред. Эрлих Э.Н. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 193–223 [Frolova M.L. Area of Kronotsky Sopka and Krashenninnikov volcano // Volcanoes and geotherms of Kamchatka. Proceedings of the IV All-Union Volcanological Meeting / Edited by E.N. Ehrlich Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences, 1974. P. 193–223 (in Russian)].
- Amosova A.A., Panteeva S.V., Chubarov V.M. et al.* Determination of major elements by wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and trace elements by inductively coupled plasma mass spectrometry in igneous rocks from the same fused sample (110mg) // Spectrochim Acta. Part B. 2016. V. 122. P. 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.06.001>
- Bénard A., Ionov, D.A.* Melt– and fluid–rock interaction in supra-subduction lithospheric mantle: Evidence from andesite-hosted veined peridotite xenoliths // Journal of Petrology. 2013. V. 54. № 11. P. 2339–2378. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/egt050>
- Davidson J., Turner S., Handley H. et al.* Amphibole «sponge» in arc crust? // Geology. 2007. V. 35. № 9. P. 787–790. <http://dx.doi.org/10.1130/G23637A.1>
- Gorbach N., Tobelko D., Ovsyannikov G. et al.* Kronotsky Volcano — A low-K end-member frontal volcano in Kamchatka: Geological structure and composition of rocks and minerals // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2025. V. 467. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108430>
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E. et al.* Nomenclature of the amphibole supergroup // American Mineralogist. 2012. V. 97. № 11–12, P. 2031–2048. <http://dx.doi.org/10.2138/am.2012.4276>
- Higgins M.D., Roberge J.* Crystal Size Distribution of Plagioclase and Amphibole from Soufrière

- Hills Volcano, Montserrat: Evidence for Dynamic Crystallization—Textural Coarsening Cycles // *Journal of Petrology*. 2003. V. 44. № 8. P. 1401–1411. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/44.8.1401>
- Levin V., Park J., Brandon M. et al. Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions // *Tectonophysics*. 2002. V. 358. № 1–4. P. 233–265. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00426-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00426-2)
- Lucci F., Cavazos-Alvarez J.A., White J. Ch. et al. A window on the lithospheric mantle beneath the eastern Trans-Mexican volcanic belt: Insights from pargasite-bearing mantle xenocrysts from the Holocene Ocotenco maar volcano // *Journal of South American Earth Sciences*. 2024. V. 138. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104867>
- Mayer B., Jung S., Romer R.L. et al. Amphibole in alkaline basalts from intraplate settings: implications for the petrogenesis of alkaline lavas from the metasomatised lithospheric mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2014. V. 167. №3 P. 1–22. <http://dx.doi.org/10.1007/s00410-014-0989-3>
- Momma K., Izumi F. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data // *Applied Crystallography*. 2011. V. 44. № 6 P. 1272–1276. <http://dx.doi.org/10.1107/S0021889811038970>
- Peters S.T., Troll V.R., Weis et al. Amphibole megacrysts as a probe into the deep plumbing system of Merapi volcano, Central Java, Indonesia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2017. V. 172. № 4 P. 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00410-017-1338-0>
- Phillips M.W., Draheim J.E., Popp R.K. et al. Effects of oxidation-dehydrogenation in tschermakitic hornblende // *American Mineralogist*. 1989. V. 74. № 7–8. P. 764–773.
- Putirka K.D. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Reviews in mineralogy and geochemistry*. 2008. V. 69. № 1. P. 61–120. <http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Richter K., Carmichael I.S.E. Mega-xenocrysts in alkali olivine basalts: Fragments of disrupted mantle assemblages // *American Mineralogist*. 1993. V. 78 №11–12. P. 1230–1245. <http://dx.doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-5-718-742>
- Ridolfi F. Amp-TB2: an updated model for calcic amphibole thermobarometry. // *Minerals*. 2021. V. 11. № 3. P. 324. <http://dx.doi.org/10.3390/min11030324>
- Serre S.H., van der Meer Q.H.A., Waight T.E. et al. Petrogenesis of amphibole megacrysts in lamprophyric intraplate magmatism in southern New Zealand // *Journal of Geology and Geophysics*. 2020. V. 63. № 4. P. 489–509. <https://doi.org/10.1080/00288306.2020.1801771>
- Sigurdsson, H., Shepherd, J.B. Amphibole-bearing basalts from the submarine volcano Kick'em-Jenny in the Lesser Antilles Island arc // *Bull Volcanol*. 1974. V. 38. P. 891–910. <https://doi.org/10.1007/BF02597097>
- Taran Yu., Pokrovsky B., Volynets O. Hydrogen isotopes in hornblendes and biotites from Quaternary volcanic rocks of the Kamchatka-Kurile arc // *Geochemical Journal*. 1997. V. 31. № 4. P. 203–221. <http://dx.doi.org/10.2343/geochemj.31.203>
- Wang C., Liang Y., Xu W. Formation of amphibole-bearing peridotite and amphibole-bearing pyroxenite through hydrous melt-peridotite reaction and in situ crystallization: An Experimental Study // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. V. 126. Iss. 3 <https://doi.org/10.1029/2020JB019382>

## AMPHIBOLE MEGACRYSTS IN PYROCLASTIC MATERIAL FROM SECONDARY ERUPTIVE CENTERS OF KRONOTSKY VOLCANO

G.N. Ovsyannikov<sup>1,2</sup>, N.V. Gorbach<sup>1</sup>, A.N. Rogozin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;*

*e-mail: george\_ovs@mail.ru*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 119234*

Received November 18, 2024; revised October 14, 2025; accepted December 25, 2025

Here we present data on the morphology and composition of amphibole megacrysts found in pyroclastic material from two eruptive centers on the southern slopes of Kronotsky Volcano. The megacrysts, ranging in size from 1 to 8 cm, occur both within the matrix of volcanic bombs and as rounded lapilli in the form of single crystals or tier intergrowths. Compositionally, the megacrysts belong to the ferri-tschermakite–magnesian-hastingsite series with high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents (14.8–16 wt.%) and average magnesian index of Mg# = Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) = 0.67. The host volcanic bombs are low-K tholeiitic basalts (SiO<sub>2</sub> = 49.32–50.50 wt.%, K<sub>2</sub>O = 0.24–0.27 wt.%, FeO/MgO = 1.7–2.1). In addition, the pyroclastic material contains xenoliths of olivine pyroxenites as well as coarse- and medium-grained amphibole–plagioclase intergrowths. Several hypotheses are proposed to explain the origin of this association, which is highly unusual for tholeiitic island arc basalts.

*Keywords: megacrystals, amphibole, tholeiitic basalts, xenoliths, Kronotsky volcano, Kamchatka.*