ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 500, № 2, с. 155–160

ПЕТРОЛОГИЯ

УДК 548.4 + 552.111

ПРИЗНАКИ ГРАНИТОИДНОГО МАГМАТИЗМА И СОСТАВ КИСЛОГО РАСПЛАВА В ГАББРОИДНОЙ АССОЦИАЦИИ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА НА 13° С.Ш.: НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО РАСПЛАВНЫМ ВКЛЮЧЕНИЯМ

© 2021 г. К. Н. Шолухов[1, *], В. Ю. Прокофьев[1], И. П. Соловова[1], А. Н. Перцев[1], член-корреспондент РАН Л. Я. Аранович[1], С. Е. Борисовский[1], академик РАН Н. С. Бортников[1]

Поступило 30.03.2021 г.
После доработки 20.06.2021 г.
Принято к публикации 23.06.2021 г.

Несмотря на локальный характер кислого магматизма при формировании океанической коры, генезис лейкократовых жил гранитоидного состава (“океанических плагиогранитов”) остается важной дискуссионной проблемой дифференциации вещества в глобальной системе срединно-океанических хребтов. До настоящего времени реальные составы гранитоидных расплавов в современной океанической коре остаются малоизученными, что затрудняет петрогенетическую интерпретацию. Структурные особенности и вариации состава минералов во внутреннем океаническом комплексе на 13° с.ш. Срединно-Атлантического хребта позволяют обосновать последовательность магматической дифференциации: грубозернистый габбронорит → жильное микрогаббро, обогащенное Fe–Ti-оксидами и апатитом → биотит-плагиогранитные прожилки. Переход к кислому магматизму соответствует локальной кристаллизации кварца и циркона в жильном микрогаббро при дальнейшем фракционировании Zr/Hf цирконом. В результате экспериментального изучения расплавных включений в цирконе, гомогенизированных при 850–910°C, реконструирован состав гранитоидного расплава с K_2O > 1.8 мас. %, при SiO_2 75–76 мас. %. Такое соотношение K/Si в кислом расплаве наряду с признаками генетической связи с дифференцированными габброидами, позволяет отдать предпочтение модели происхождения плагиогранит-габбровой ассоциации в результате высокой степени дифференциации расплава типа MORB во внутреннем океаническом комплексе.

Ключевые слова: океанический плагиогранит, циркон, габбронорит, оксид-габбро, расплавные включения, внутренний океанический комплекс, Срединно-Атлантический хребет

DOI: 10.31857/S2686739721100157

Одним из крайних проявлений дифференциации вещества при формировании океанической коры являются плутонические породы ферро-базальтового состава: габброиды, резко обогащенные Fe–Ti-оксидами и апатитом, часто ассоциирующие с локально развитыми низко-калиевыми гранитоидными жилами и прожилками (“океаническими плагиогранитами”, ОПГ) как в быстро-, так и в медленно-спрединговых обстановках [15, 19]. Значительный интерес к генезису таких габбро-гранитоидных ассоциаций обусловлен их ключевым значением в понимании процессов формирования базитовой коры при литосферно-гидросферном тепло- и массообмене. Петрогенетические модели, объясняющие локальные проявления ОПГ в срединно-океанических хребтах (высокая степень кристаллизационного фракционирования магм типа MORB и различные механизмы частичного гидроплавления габброидов), в разной степени обоснованы структурно-геологическими, геохимическими, расчетными и, отчасти, экспериментальными данными (см. обзор [2, 10, 12, 14]). Вместе с тем точные данные о составе дифференцированных расплавов современной океанической коры крайне скудны (например, [7]), и это затрудняет приложение существующих моделей к реальным геологическим объектам. Упрощенные представления о жильных ОПГ как о “замороженных” кислых расплавах, [10, 13] не дают возможность оценить по валовому составу жил генетически важные параметры состава расплава (например, K/Si или содержание H_2O). Потенциальным источником более точных сведений о составе гранитоидного

[1] *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: kote1155708@gmail.com*

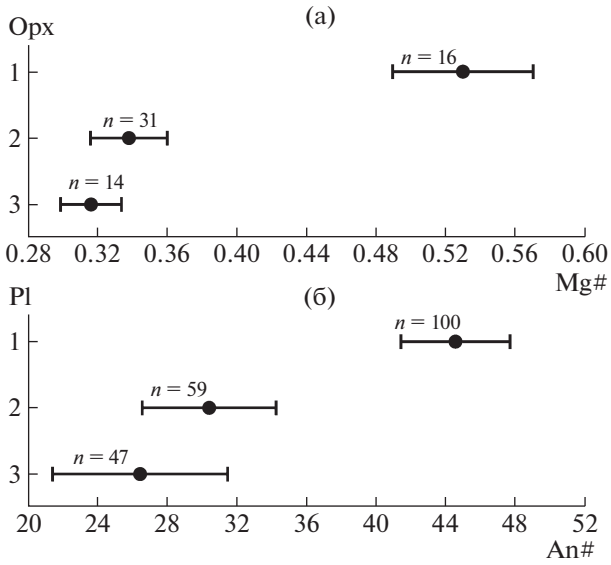

Рис. 1. Средние значения Mg# = Mg/(Mg + Fe) в ортопироксене (а) и An# = 100·Ca/(Ca + Na + K) в плагиоклазе (б) и интервалы стандартных отклонений (±1σ) в выделяемых магматических ассоциациях: (1) грубозернистый габбронорит; (2) микро-оксид-габбро; (3) лейкократовые гранитоидные микропрожилки. *n* – количество анализов в каждой ассоциации.

расплава могут быть включения силикатного расплава в минералах. В океанических габбро-гранитоидных ассоциациях неоднократно отмечались расплавные микровключения в цирконе, представленные альбитом, кварцем, калиевым полевым шпатом и, предположительно, стеклом кислого состава [3, 11]. По сравнению с породообразующими минералами циркон, как контейнер расплавных включений, более удобен, поскольку какими-либо обменными реакциями циркон/расплав в отношении главных элементов (Si, Al, Fe, Ca, Na, K) можно пренебречь. Тем не менее данные анализа гомогенизированных включений в цирконе из океанических пород до настоящего времени в литературе почти неизвестны, за редким исключением [18]. Нами получены новые данные для ассоциации дифференцированных габброидов Срединно-Атлантического хребта (САХ), где удалось выделить три циркон-содержащие ассоциации. В одной из выделенных ассоциаций в цирконе экспериментально гомогенизированы и проанализированы микровключения кислого расплава.

Геология района 13° с.ш. САХ привлекла повышенное внимание исследователей после открытия в 2003 и 2005 г. активных сульфидных гидротермальных полей Ашадзе-1 и -2, развитых на габбро-перидотитовом субстрате [9]. В дальнейшем по комплексным геолого-геофизическим данным структура, вмещающая гидротермальные поля Ашадзе-1 и -2, была интерпретирована как габбро-перидотитовый внутренний океанический комплекс (“oceanic core complex”), т.е. тектонический выход глубинных пород в лежачем боку долгоживущего высокоамплитудного разлома растяжения, контролирующего гидротермальную активность [16, 17]. Позднее этот внутренний океанический комплекс стал обозначаться как “комплекс Ашадзе” [17]. Комплекс Ашадзе простирается на 30–40 км вдоль западного борта Срединно-Атлантического хребта в широтном интервале 12°55′ с.ш.–13°14′ с.ш. [16]. Донное опробование в рейсах НИС “Профессор Логачев” и “Pourquoi Pas?” показало, что габбровые тела представлены преимущественно дифференцированными разностями, неравномерно обогащенными оксидами Fe и Ti [6]. ОПГ в комплексе Ашадзе впервые обнаружены в виде жил и прожилков в габброидах в рейсе НИС “Pourquoi Pas?” и рассматривались как продукты частичного плавления габброидов при взаимодействии с крупной гидротермальной системой [6]. U–Pb-изотопное датирование циркона из плагиогранит-габбровой ассоциации комплекса Ашадзе показало возраст соответствующего магматизма 1–1.5 млн лет [5].

Изученная нами коллекция габброидов драгирована вместе с перидотитами в 26-м рейсе НИС “Профессор Логачев” [9] в юго-восточной части комплекса Ашадзе на 12°58′ с.ш., 44°54′ з.д. Габброиды представлены преимущественно грубозернистыми габброноритами с инъекциями более дифференцированных микрозернистых габбро (микро-оксид-габбро), обогащённых Fe–Ti-оксидами (главным образом ильменитом) и апатитом. Также в грубозернистых габброноритах локально развиты лейкократовые биотит-содержащие гранитоидные прожилки мощностью до 5 мм вне видимой связи с дифференцированными микро-оксид-габбро.

По составу сквозных минералов – ортопироксена и плагиоклаза – грубозернистые габбронориты и микро-оксид-габбро отвечают разной степени магматической дифференциации. Микро-оксид-габбро характеризуются заметно менее магнезиальными (Mg# = Mg/(Mg + Fe)) составами ортопироксена и более кислым (An# = = 100Ca/(Ca + Na + K)) плагиоклазом по сравнению с вмещающими грубозернистыми габброноритами (рис. 1). Относительно высокая степень дифференциации микро-оксид-габбро подтверждается также кристаллизацией апатита и циркона. Гранитоидные прожилки по составам ортопироксена и плагиоклаза очень близки к микро-оксид-габбро, но в целом отвечают менее магнезиальным и более кислым составам этих минералов соответственно (рис. 1).

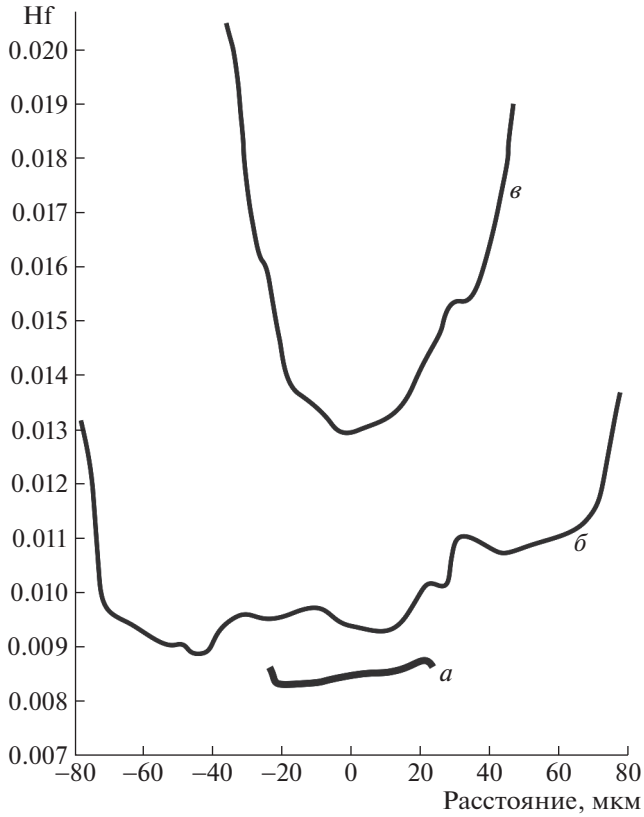

Рис. 2. Примеры зональности по гафнию (формульные единицы) трех выделяемых разновидностей циркона: а) однородный агрегат микро-оксид-габбро; б) локальные ассоциации с кварцем в прожилках микро-оксид-габбро; в) лейкократовые биотит-содержащие гранитоидные микропрожилки.

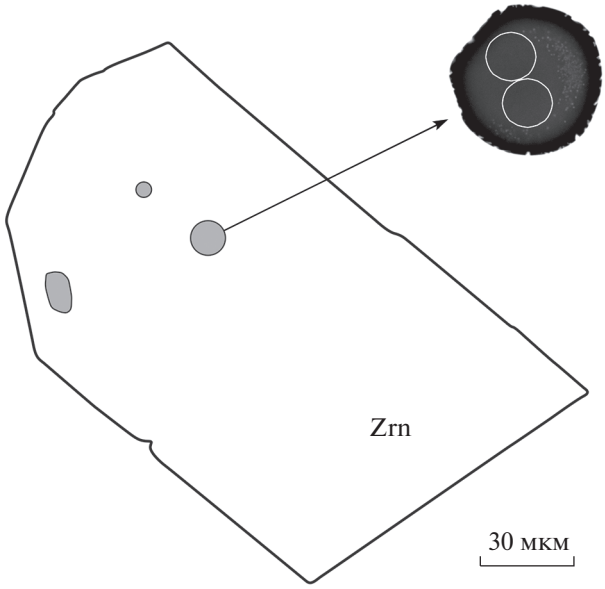

Рис. 3. Схема сечения зерна циркона (Zrn) с вскрытыми гомогенизированными расплавными включениями, показанными серым цветом. В правом верхнем углу крупным планом показаны места количественного анализа расплавного включения методом РСМА с диаметром электронного зонда 5 мкм.

Другим признаком генетического родства микро-оксид-габбровых и лейкократовых гранитоидных прожилков могут служить вариации примеси Hf в цирконе. Циркон в изученных породах встречен в трех петрографических ассоциациях: (а) в жильном агрегате микро-оксид-габб-

Таблица 1. Результаты анализа стекла гомогенизированного расплавного включения (рис. 3), мас.%

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cl	P_2O_5	SO_3	Сумма
76.09	0.13	12.48	1.81	0.02	0.05	0.46	3.3	1.87	0.06	0.04	0.12	96.84
74.72	0.14	13.02	2.36	0.06	0.05	0.64	2.76	1.85	0.06	0	0.11	96.37

ро, зерна размером <70 мкм, содержания Hf < < 0.009 ф.е., без признаков закономерной зональности (рис. 2 а); (б) в локальных ассоциациях с кварцем в прожилках микро-оксид-габбро, зерна до 200 мкм, концентрации Hf > 0.008 ф.е. с зональным обогащением краев зерен Hf до 0.013–0.014 ф.е. (рис. 2 б); (в) в пространственно обособленных микропрожилках ОПГ – самые высокие содержания Hf (0.013–0.020 ф.е.) в сочетании с сильно выраженным зональным обогащением Hf к краям зерен (рис. 2 в).

В соответствии с закономерностями фракционирования Zr и Hf между силикатными расплавами и цирконом [4] приведенные выше особенности состава позволяют предположить, что циркон второй разновидности кристаллизовался из расплава, оставшегося непосредственно после образования жильных микро-оксид-габбро, тогда как обособленные биотит-содержащие микропрожилки ОПГ соответствуют еще более высокой степени дифференциации этого остаточного расплава. Обнаруженные нами расплавные включения в цирконе второй разновидности (рис. 3) дают редкую возможность оценить состав остаточного расплава после кристаллизации оксид-габбро.

Расплавные включения размером 3–20 мкм неравномерно распределены в крупных (до 200 мкм) зернах циркона. Включения представлены как изометричными, так и удлиненными формами, с плоскими границами, параллельными граням кристалла-хозяина (рис. 3). В составе вскрытых в шлифах раскристаллизованных включений обнаружены микрокристаллы неоднородного по составу кислого плагиоклаза и небольшое количество калиевого полевого шпата. Изучение включений выполнено методом ступенчатого нагрева с шагом 50°C в муфеле конструкции Наумова и последующей закалкой на воздухе. В результате установлено, что гомогенизация включений происходит при температурах 850–910°C ± 25°C. Энерго-дисперсионные спектры пяти вскрытых полировкой гомогенизированных в стекло включений в двух зернах циркона показали однотипный состав K-содержащего кислого стекла с низким содержанием Fe. Для наиболее крупного включения размером 15 мкм (рис. 3), гомогенизированного при 910°C, был выполнен количественный рентгеноспектральный микроанализ. Условия анализа: микроанализатор “JEOL” JXA-8200 (ИГЕМ РАН), ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 10 нА, диаметр зонда 5 мкм. В качестве стандарта для Si, Al, K использовался санидин, для Na – чкаловит ($Na_2BeSi_2O_6$). Поправка на потерю натрия сделана по методике [1]. Результаты анализа (табл. 1) показывают кислый состав расплава при содержании H_2O около 3 мас. %, судя по сумме 96.6 ± 0.3 мас. % [8]. Влияние циркона-хозяина на результаты анализа несущественно: 0.3–0.6 мас. % ZrO_2.

Пространственная и генетическая связь изученных микропроявлений кислого магматизма с дифференцированными оксид-габбро указывает на то, что проанализированный во включениях гранитоидный расплав мог образоваться в результате высокой степени дифференциации магмы типа MORB. Это подтверждается вариациями состава породообразующих минералов (рис. 1). В цирконе примесь Hf последовательно возрастает от первой выделяемой разновидности этого акцессорного минерала к третьей (рис. 2а→б→в), что соответствует зональности минерала при фракционной кристаллизации [4] и подтверждает комагматичность микро-оксид-габбро и гранитоидных микропрожилков. Формирование остаточного гранитоидного расплава и соответствующих жильных ОПГ может быть связано со значительным фракционированием Fe–Ti-оксидов вместе с плагиоклазом и пироксенами (оксид-габбро) (например, [14, 15]).

Проанализированный расплав содержит K_2O > 1.8 мас. %, при SiO_2 75–76 мас. %. Соответствующее атомное отношение K/Si: 3.1×10^{-2}–3.2×10^{-2}. Гранитоидные расплавы (60–79 мас. % SiO_2), экспериментально генерируемые при частичном плавлении типичных океанских габбро (K_2O < < 0.1 мас. %) имеют заметно более низкие отношения K/Si: 3.7×10^{-3}–1.9×10^{-2} [12, 20]. Следовательно, полученный состав расплавного включения не подтверждает роль частичного плавления океанских габброидов. Это, а также явные признаки генетической связи с дифференцированными оксид-габбро, позволяют в данном случае отдать предпочтение модели происхождения плагиогранит-габбровой ассоциации в результате высокой степени дифференциации расплава типа MORB.

Таким образом, получены первые данные о химическом составе остаточного кислого расплава, соответствующего завершению кристаллизации наиболее дифференцированных жильных

оксид-габбро и началу кристаллизации кварца и циркона в плутонической ассоциации внутреннего океанического комплекса. Они позволяют отдать предпочтение модели происхождения плагиогранит-габбровой ассоциации в результате высокой степени дифференциации расплава типа MORB во внутреннем океаническом комплексе. Эти данные еще раз подчеркивают многообразие механизмов образования гранитоидных расплавов при становлении океанической коры.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы госзадания 121041500220-0 ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А., Борисовский С.Е.* Магматическая эволюция вулкана Чанбайшань Тяньчи (Китай – Северная Корея) по данным расплавных и флюидных включений // Петрология. 2018. Т. 26. № 5. С. 535–566.
2. *Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Серебряков Н.С., Шарков Е.В.* Условия образования плагиогранитов впадины Маркова, Срединно-Атлантический хребет, 5°52′–6°02′ с.ш. // ДАН. 2010. Т. 434. № 3. С. 372–377.
3. *Аранович Л.Я., Зингер Т.Ф., Бортников Н.С., Шарков Е.В., Антонов А.В.* Циркон из габброидов осевой зоны Срединно-Атлантического хребта (впадина Маркова, 6° с.ш.): корреляция геохимических особенностей с петрогенетическими процессами // Петрология. 2013. Т. 21. № 1. С. 4–19.
4. *Аранович Л.Я., Бортников Н.С.* Новый Zr-Hf геотермометр для магматических цирконов // Петрология. 2018. Т. 26. № 2. С. 109–115.
5. *Костицын Ю.А., Силантьев С.А., Белоусова Е.А., Бортников Н.С., Краснова Е.А., Каннат М.* Время формирования внутреннего океанического комплекса гидротермального поля Ашадзе (Срединно-Атлантический хребет, 12°58′ с.ш.) по результатам исследования циркона // ДАН. 2012. Т. 447. № 4. С. 424–428.
6. *Силантьев С.А., Краснова Е.А., Каннат М., Бортников Н.С., Конокова Н.Н., Бельтенев В.Е.* Перидотит-габбро-трондьемитовая ассоциация пород Срединно-Атлантического хребта в районе 12°58' – 14°45′с.ш. гидротермальные поля Ашадзе и Логачев // Геохимия. 2011. № 4. С. 399–372.
7. *Симонов В.А., Шарков Е.В., Ковязин С.В., Бортников Н.С.* Расплавные включения в хромшпинелидах из Fe-Ti-оксидных интрузивных комплексов центральной Атлантики – ключ к познанию физико-химических параметров гидротермально-магматических систем медленно-спрединговых океанических хребтов // ДАН. 2008. Т. 418. № 5. С. 679–682.
8. *Aranovich L.Y., Newton R.S., Manning C.E.* Brine-assisted Anatexis: Experimental Melting in the System Haplogranite–H_2O–NaCl–KCl at Deep-crustal Conditions // Earth and Planetary Science Letters. 2013. V. 374. P. 111–120. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.027
9. *Beltenev V., Ivanov V., Shagin A., Segeyev M., Rozhdestvenskaya I., Shilov V., Debretzova I., Cherkashev G., Samovarov M., Poroshina I.* New Hydrothermal Sites at 13° N, Mid-Atlantic Ridge // InterRidge News. 2005. V. 14. P. 14–16.
10. *Chen Y., Niu Y., Wang X., et al.* Petrogenesis of ODP Hole 735B (Leg 176) Oceanic Plagiogranite: Partial Melting of Gabbros or Advanced Extent of Fractional Crystallization? // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. P. 2717–2732.
11. *Grimes C.B., John B.E., Cheadle M.J., Mazdab F.K., Wooden J.L., Swapp S., Schwartz J.J.* On the Occurrence, Trace Element Geochemistry, and Crystallization History of Zircon from in situ Ocean Lithosphere // Contrib Mineral Petrol. 2009. V. 158. P. 757–783. https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2
12. *Koepke J., Feig S.T., Snow J., Freise M.* Petrogenesis of Oceanic Plagiogranites by Partial Melting of Gabbros: An Experimental Study // Contrib Mineral Petrol 2004. V. 146. P. 414–432.
13. *Koepke J., Berndt J., Feig S.T., Holtz F.* The Formation of SiO_2-rich Melts within the Deep Oceanic Crust by Hydrous Partial Melting of Gabbros // Contrib Mineral Petrol. 2007. V. 153. P. 67–84.
14. *Koepke J., Botcharnikov R.E., Natland J.H.,* Crystallization of Late-stage MORB under Varying Water Activities and Redox Conditions: Implications for the Formation of Highly Evolved Lavas and Oxide Gabbro in the Ocean Crust // Lithos. 2018. 323. P. 58–77.
15. *Niu Y., Gilmore T., Mackie S., Greig A., Bach W.* Mineral Chemistry, Whole-rock Compositions, and Petrogenesis of Leg 176 Gabbros: Data and Discussion. // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 2002. V. 176. P. 1–60. College Station, TX: Ocean Drilling Program.
16. *Ondréas H., Cannat M., Fouquet Y., Normand A.* Geological Context and Vents Morphology of the Ultramafic-hosted Ashadze Hydrothermal Areas (Mid-Atlantic Ridge 13N) // Geochem. Geophys. Geosyst. 2012.
17. *Peirce C., Reveley G., Robinson A.H., Funnell M.J., Searle R.C., Simao N.M., MacLeod C.J., Reston T.J.* Constraints on Crustal Structure of Adjacent OCCs and Segment Boundaries at 13°N on the Mid-Atlantic Ridge // Geophys. J. Int. 2019. V. 217. P. 988–1010.
18. *Pertsev A.N., Aranovich L.Y., Prokofiev V.Y., Solovova I.P., Ageeva O.A., Borisovskiy S.E., Shatagin K.N., Zhilicheva O.M.* Potassium-rich Granite Melt Inclusions in Zircon from Gabbro-hosted Felsic Stringers, Mid-Atlantic Ridge at 13°34′N: E-MORB Connection // Lithos. 2021. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106300
19. *Wilson D.S., Teagle D.A., Alt J.C., Banerjee N.R., Umino S., Miyashita S., Acton G.D., Anma R., Barr S.R., Belghoul A. and Carlut J.* Drilling to Gabbro in Intact Ocean Crust // Science. 2006. 312 (5776). P. 1016–1020.
20. *Wolff P.E., Koepke J., Feig S.T.* The Reaction Mechanism of Fluid-induced Partial Melting of Gabbro in the Oceanic Crust // Eur. J. Mineral. 2013. V. 25. P. 279–298.

TRACES OF GRANITOID MAGMATISM AND THE COMPOSITION OF THE SILICIC MELT IN GABBROIC ASSEMBLAGE OF THE MID-ATLANTIC RIDGE AT 13°N: NEW DATA ON MELT INCLUSIONS

K. N. Sholukhov[a, #], V. Y. Prokofiev[a], I. P. Solovova[a], A. N. Pertsev[a],
Corresponding Member of the RAS L. Y. Aranovich[a], S. E. Borisovsky[a],
and Academician of the RAS N. S. Bortnikov[a]

[a] *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[#] *E-mail: kote1155708@gmail.com*

Despite the local occurrence of silicic magmatism during the formation of the oceanic crust, the nature of felsic granitoid veins ("oceanic plagiogranites") remains an important debatable problem of chemical differentiation in the global system of mid-oceanic ridges. To date, actual compositions of granitoid melts in the modern oceanic crust are still poorly constrained, and this prevents petrogenetic interpretations. Structural features and mineral chemistry of plutonic rocks from the oceanic core complex at 13°N on the Mid-Atlantic Ridge show the sequence of magmatic differentiation: coarse-grained gabbronorite → vein microgabbro enriched in Fe-Ti oxides and apatite → biotite-plagiogranite veins. The transition to silicic magmatism corresponds to the local crystallization of quartz and zircon in the vein microhabbro with further Zr/Hf fractionation by zircon. Experimental study of melt inclusions in zircon demonstrated homogenization at 850–910°C and the granitoid composition of the melt with K_2O > 1.8 wt.% and SiO_2 75–76 wt.%. Such K/Si ratio of the silicic melt, along with the genetic connection to highly differentiated gabbroids allows to prefer the model of a high degree differentiation of MORB-type magma in oceanic core complex for the studied plagiogranite-gabbro association.

Keywords: oceanic plagiogranite, zircon, gabbronorite, oxide-gabbro, melt inclusions, oceanic core complex, Mid-Atlantic Ridge