

УДК 552.11:550.4

АССИМИЛЯЦИЯ КАРБОНАТОВ БАЗИТОВЫМИ МАГМАМИ: ФАССАИТОВЫЕ ГАББРО ОЛЬХОНСКОГО ТЕРРЕЙНА (ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© 2024 г. Член-корреспондент РАН Е. В. Скляров^{1,*}, А. В. Лавренчук^{2,3**},
Д. В. Семенова²

Поступило 13.06.2024 г.

После доработки 25.06.2024 г.

Принято к публикации 27.06.2024 г.

В статье охарактеризованы специфические габброиды, главным породообразующим минералом которых является фассаит – богатый глинозёмом (до 12 мас. % Al_2O_3) кальциевый пироксен, типичный для высокотемпературных метасоматических пород. Фассаитовые габбро по geoхимическим характеристикам близки к субщелочным монцогаббро устькрестовского комплекса, широко распространённым в пределах Крестовского субтеррейна Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье). В то же время они резко отличаются от последних по более высокому содержанию CaO и MgO и пониженному – SiO_2 и Al_2O_3 . Фассаитовые габбро слагают несколько небольших массивов в обрамлении Усть-Крестовского массива монцогаббро, не контактируя с последними. Предложена модель образования фассаитовых габбро за счёт ассилияции карбонатного материала (коровьи карбонатные выплавки) субщелочными базитовыми магмами.

Ключевые слова: габбро, фассаит, ассилияция, карбонаты, Ольхонский террейн

DOI: 10.31857/S2686739724110093

Проблемы взаимодействия силикатных магм с коровыми карбонатными комплексами широко обсуждаются уже более столетия, начиная с предположения Дэли [1] об образовании щелочных пород в результате ассилияции карбонатных пород гранитной магмой. Выделяется два механизма такого взаимодействия: скарнообразование и ассилияция. В первом случае взаимодействие проявляется в достаточно узких контактных зонах магматических тел или в ксенолитах карбонатов и хорошо изучено. Ассилияция карбонатного материала силикатными магмами разного состава, которая активно обсуждается два последних десятилетия, приводит к изменениям минерального и химического состава интрузивных пород и обоснована, главным образом, для вулканических [2–4], в меньшей

степени для плутонических [5, 6] систем. Но в целом, гипабиссальные и абиссальные магматические тела, ассилирующие первично осадочные карбонаты, достаточно редки. Один из возможных объектов с признаками ассилияции карбонатного материала базитовой магмой обнаружен в пределах Ольхонского композитного террейна (Западное Прибайкалье).

Ольхонский террейн является одним из раннепалеозойских террейнов с высокой степенью метаморфизма, непосредственно примыкающих к Сибирскому кратону. Его строение достаточно сложное, обусловленное комбинацией фрагментов разного состава и природой их протолитов [7, 8], среди которых наиболее крупным является Крестовский субтеррейн, сложенный преимущественно мраморами и амфиболитами с массивами габбро, составляющими более 50% всего объёма субтеррейна. Остальная часть террейна более пёстрая: резко преобладают гнейсы, гранито-гнейсы, граниты и пегматиты, но в то же время в достаточном количестве присутствуют амфиболиты, мраморы и кварциты, а также габброиды, сиениты и ультрабазиты.

В результате предыдущих исследований в пределах субтеррейна было выделено два комплекса

¹ Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск, Россия

² Институт геологии и минералогии Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: skl@crust.irk.ru

**E-mail: alavr@igm.nsc.ru, alavr@mail.ru

субщелочных габброидов разного возраста, имеющие разные геохимические характеристики: бирхинский (500 млн лет) и устькрестовский (470 млн лет) [9]. Большинство изученных массивов габбро относятся к бирхинскому комплексу, в то время как монцогаббро устькрестовского комплекса слагают всего один небольшой одноимённый массив. Многочисленные дайки в пределах Крестовского субтеррейна имеют близкий химический состав. В краевой части Усть-Крестовского массива картируется зона минглинга габброидов с гранитами и сиенитами (рис. 1). В обрамлении Усть-Крестовского массива выявлено несколько мелких тел габбро, которые по ряду признаков схожи с монцогаббро, но показывают и серьезные отличия, в частности, по

присутствию фассаита в качестве главного пордообразующего минерала. Эти тела прорывают метапорфириты бирхинской вулканоплутонической ассоциации или метаморфизованную кремнисто-доломитовую толщу и не контактируют с породами Усть-Крестовского массива монцогаббро.

Фассаитовые габбро обычно среднезернистые, сложены фассаитом – пироксеном с высоким содержанием кальция и алюминия, битовитом, паргаситом, реже в них появляются флогопит, калишпат или шпинель. Аксессории – ильменит, титанит и апатит, реже циркон или бадделейт. На позднемагматической или постмагматической стадии минералы первичной ассоциации замещаются диопсидом, роговой обманкой,

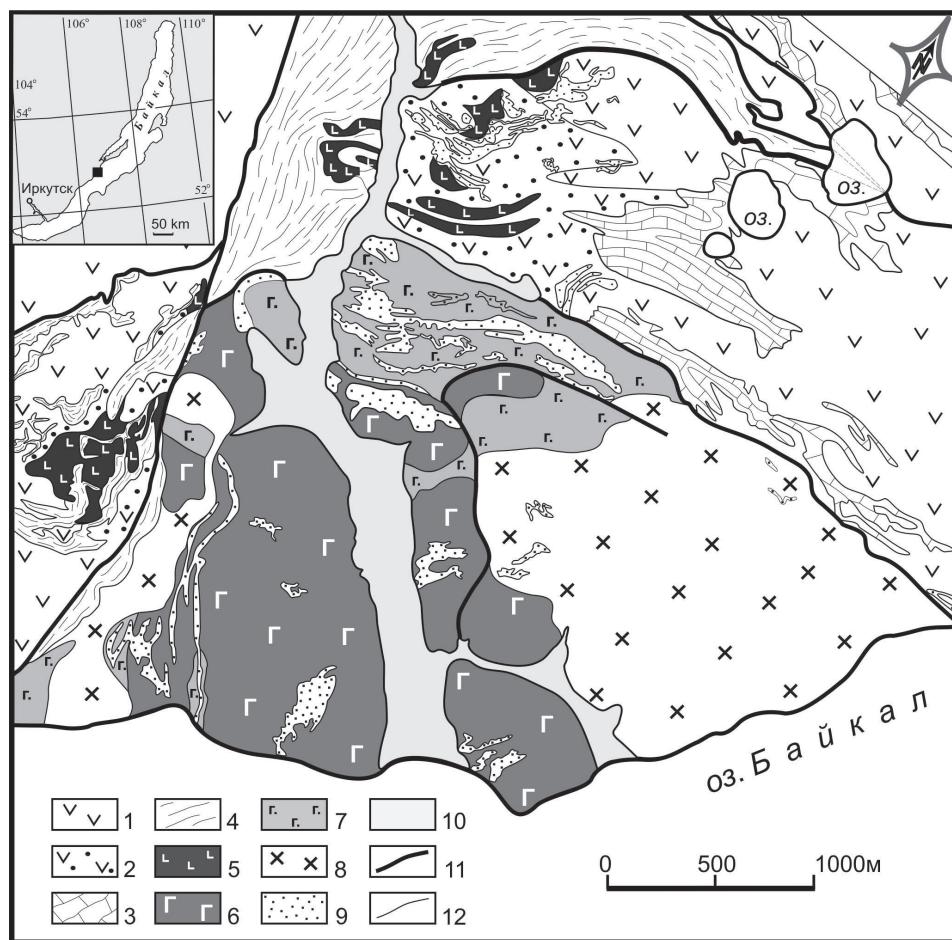


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Ольхонского террейна (по [10] с изменениями и дополнениями). 1 – порфиры бирхинской вулкано-плутонической ассоциации и амфиболиты по ним; 2 – высокотемпературные роговики по порфиритам; 3 – кальцитовые мраморы; 4 – доломитовые и кальцит-доломитовые мраморы, диопсид-кальцитовые породы, диопсидиты, кварц-диопсидовые породы, кварциты; 5–7 – устькрестовский комплекс габброидов: фассаитовые габбро (5), монцогаббро и кварцевые сиениты (6), зона минглинга монцогаббро с гранитами, сиенитами и лейкогаббро (7); 8 – граниты; 9 – инъекционные мраморы и кальцифиры; 10 – четвертичные отложения; 11 – вязко-пластические срывы; 12 – геологические границы. На врезке показано местоположение карты.

скаполитом и более кислым плагиоклазом. Характерной особенностью является присутствие кальцита, реже доломита. Карбонаты, главным образом, кальцит, реже доломит, обнаруживают признаки совместной кристаллизации с силикатными минералами, присутствуя в интерстиях между силикатными минералами (рис. 2 А), и виде включений в амфиболе (рис. 2 Б) или плагиоклазе. В большинстве случаев карбонаты образуют небольшие скопления с плагиоклазом и/или микроклином. Эти скопления относительно равномерно “рассредоточены” по породе, их размеры не превышают 3–4 мм.

Фассаит образует короткостолбчатые кристаллы с отчётливым плеохроизмом от коричневого до светло-зеленоватого цвета. Содержание глинозёма в нём варьирует от 8.6 до 12.4 мас.% (табл. 1). Концентрация TiO_2 обычно повышенная, составляя 1.8–3.2 мас.%, реже опускаясь до 1.1 мас.%. Поздний диопсид содержит низкие концентрации TiO_2 , Al_2O_3 и характеризуется более высокой магнезиальностью (см. табл. 1).

Фассаитовые габбро имеют близкий микроэлементный состав с монцогаббро, но существенно отличаются от последних более низкими содержаниями SiO_2 , Al_2O_3 и щелочей, при более высоких концентрациях CaO и MgO (табл. 2, 3, рис. 2).

Возраст монцогаббро устькрестовского комплекса составляет 470 ± 3 млн лет [9]. Дополнительно было проведено U/Pb-датирование цирконов из фассаитовых габбро и субщелочных габброидов устькрестовского комплекса из зоны минглинга методом LA-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR

(“Thermo Fisher Scientific”) с системой лазерной абляции New Wave Research UP 213 в ЦКП МИИ ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). По результатам датирования для фассаитовых габбро получен возраст (по 42 точкам) 484 ± 3 млн лет (проба SE4608), для субщелочных габброидов из зоны минглинга (по 36 точкам) – 458 ± 3 млн лет (проба SE4609) (рис. 3). Составы пироксенов из датированных пород приведены в таблице 1.

Существенное обогащение фассаитовых габбро CaO и MgO наряду с обеднением SiO_2 , Al_2O_3 по сравнению с монцогаббро, как и кристаллизация фассаита вместо диопсида или авгита, объяснимо контаминацией кальцит-доломитового материала базитовой магмой, что вполне вероятно, учитывая широкое распространение мраморов доломитового и кальцит-доломитового состава в Крестовском субтеррейне. Оценка изменения состава монцогаббро устькрестовского комплекса при контаминации кальцитом и доломитом, проведённая массбалансовым расчётом, показывает, что вариации концентраций основных компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) проанализированных фассаитовых габбро соответствуют ассимиляции кальцита и доломита в разных пропорциях при выносе щелочей (см. рис. 3). Количество ассимилированных карбонатов составляет более 50%, что, казалось бы, входит в противоречие с экспериментальными данными об их очень низкой растворимости в силикатных расплавах (например, [11]), однако более поздние эксперименты показали, что при условии удаления CO_2 из системы, растворимость карбонатов повышается на порядок [4], составляя более 60%.

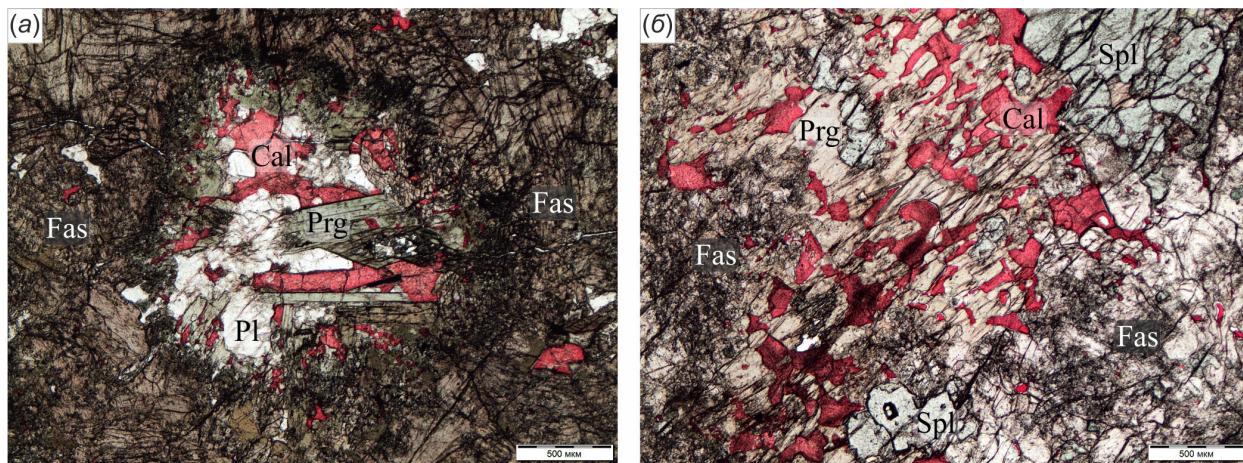


Рис. 2. Кальцит в скоплении с плагиоклазом и паргаситом (А) и во включениях в паргасите (Б). Микрофотографии в проходящем свете, кальцит окрашен ализарином. Cal – кальцит, Fas – фассаит, Pl – плагиоклаз, Prg – паргасит, Spl – шпинель.

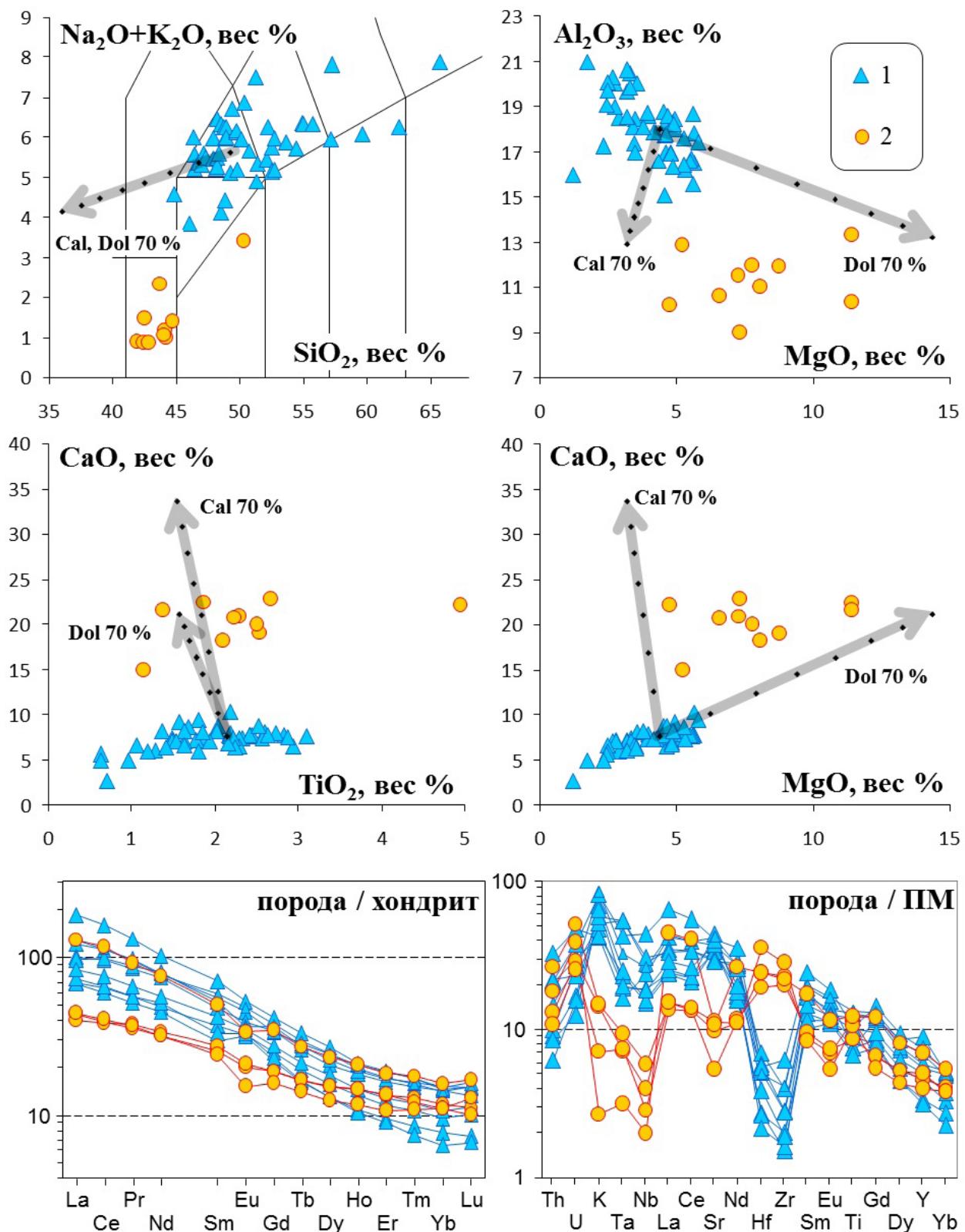


Рис. 3. Вариационные петрохимические диаграммы и спектры РЗЭ пород Усть-Крестовского массива и фассаитовых габбро. Стрелками показано изменение среднего состава монцогаббро Усть-Крестовского массива при ассилияции до 70% кальцита (Cal) и доломита (Dol).

Принципиально важным является вопрос о состоянии карбонатного материала, поступающего в базитовый расплав. Барнс с соавторами [5] на основании изучения магматического комплекса Хортавэр (Hortavaer) пришли к выводу о том, что контаминация расплава “твёрдыми” карбонатными ксенолитами будет приводить к проявлению продуктов контаминации в виде отдельных разноразмерных фрагментов, в то время как ассимиляция низковязкого карбонатного расплава приводит к относительно равномерному насыщению силикатных пород карбонатным материалом без концентрации в значительных объёмах на отдельных участках. Кроме того, результаты экспериментов [12] свидетельствуют,

что добавление карбонатов в базальтовый расплав увеличивает ликвидусную температуру гибридного расплава. Возможность же плавления мраморов первично-осадочного происхождения в относительно низкотемпературных коровых условиях в присутствии водного флюида обоснована экспериментально [13, 14] и показана при изучении природных объектов [15], в том числе и нашими исследованиями [16].

Таким образом, можно предполагать, что на ранних стадиях (484 млн лет) внедрение мантийных субщелочных базитовых расплавов в нижнюю кору приводило к плавлению карбонатной толщи с последующей ассимиляцией карбонатного расплава базитовым в промежуточном

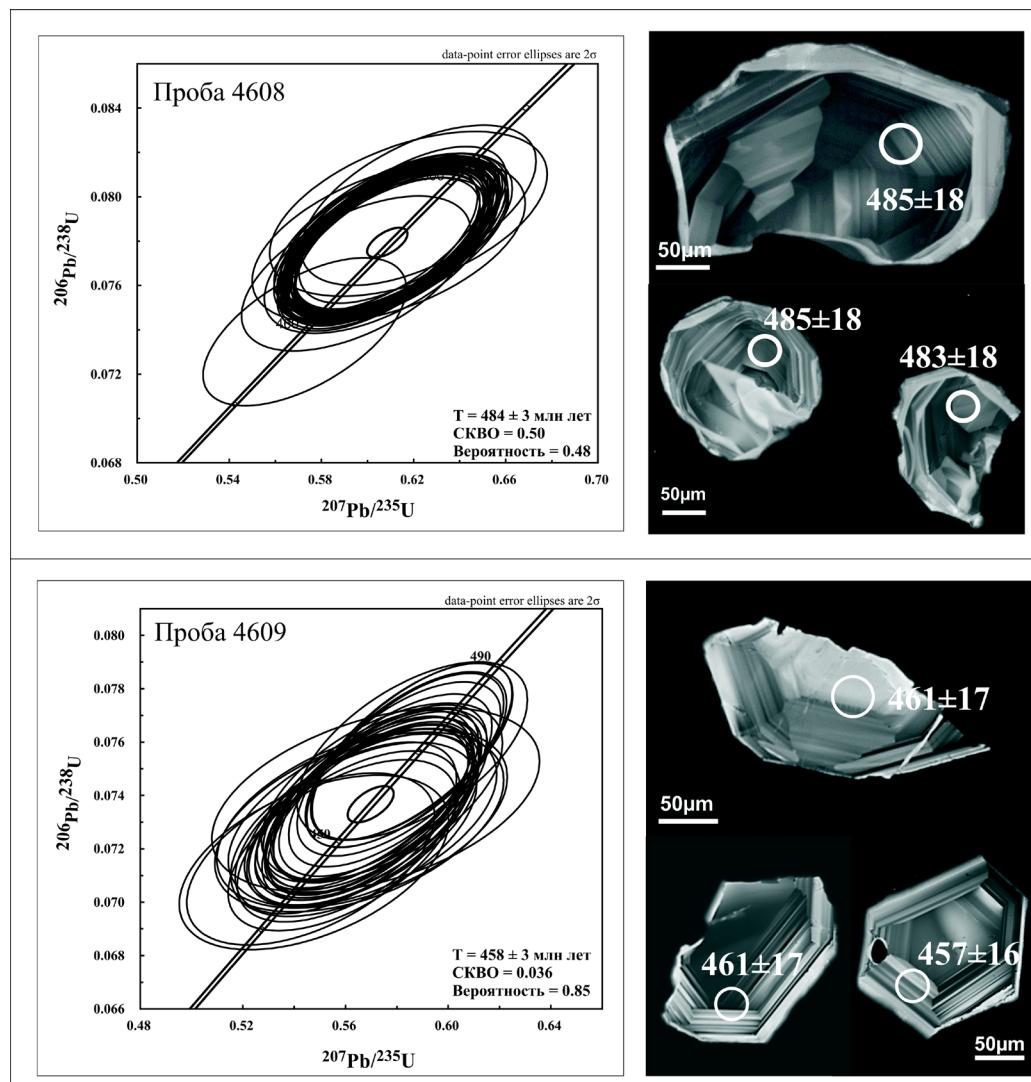


Рис. 4. Диаграммы с конкордией и катодолюминесцентные изображения цирконов из фассаитовых габбро (проба 4608) и субщелочных габброидов из зоны минглинга (проба 4609). Кружком обозначены точки, где проводились U–Pb-изотопные исследования с вынесенными значениями возраста (млн лет) по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ с погрешностью 2σ .

очаге. Затем внедрялись неконтаминированные базитовые расплавы (470 млн лет). При дальнейшем развитии событий наряду с карбонатами плавились и гнейсы, что привело к проявлению габбро-гранитного и даже карбонатно-габбро-гранитного минглинга (458 млн лет). Источником тепла для достаточно длительного проявления субшелочного базитового магманизма (более 20 млн лет) и разогрева коры могла быть аномально горячая мантия, или крупная низкоскоростная мантийная провинция (Large Low Shear Velocity Province – LLVP) под структурами Саяно-Байкальской складчатой области, существование которой с венда до мезозоя предполагается В. В. Ярмолюком с соавторами [17].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках госзаданий ИЗК СО РАН и ИГМ СО РАН (проекты №№ 12204140044-2, 122041400171-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Daly R.A. Origin of the alkaline rocks. // Geological Society of America Bulletin. 1910. 21. 87– 118.
2. Gaeta M., Di Rocco T., Freda C. Carbonate assimilation in open magmatic systems: The role of melt-bearing skarns and cumulate-forming processes. // J. Petrol. 2009. 50. 361–385.
3. Carter L.B., Dasgupta R. Hydrous basalt–limestone interaction at crustal conditions: Implications for generation of ultracalcic melts and outflux of CO₂ at volcanic arcs // Earth and Planetary Science Letters. 2015. 427. 202–214
4. Carter L.B., Dasgupta R. Effect of melt composition on crustal carbonate assimilation: Implications for the transition from calcite consumption to skarnification and associated CO₂ degassing, // Geochem. Geophys. Geosyst. 2016. 17. 3893–3916.
5. Barnes C., Prestvik T., Sundvoll, et al. Pervasive assimilation of carbonate and silicate rocks in the Horta-vaer igneous complex, north-central Norway // Lithos. 2016. 80. 179–199.
6. Wenzel T., Baumgartner L.P., Brugmann G.E., et al. Partial melting and assimilation of dolomitic xenoliths by mafic magma: the Ioko-Dovryen intrusion (North Baikal Region, Russia) // Journal of Petrology. 2002. 43. 2049–2074.
7. Федоровский В.С., Скляров Е.В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 331–418.
8. Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., et al. Pre-collisional (0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (Southern Siberia) as an echo of events in the central Asian Orogenic Belt // Gondwana Res. 2017. V. 42. P. 243–263.
9. Лавренчук А.В., Скляров Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М. Особенности состава габброидов Крестовской зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) как отражение взаимодействия надсубдукционной литосферной мантии с мантийным плюром // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 10. С. 1439–1458.
10. Аэрокосмическая геологическая карта юго-западной части Ольхонского региона (Байкал). Зона Крестовский - Широкая. Ольхонский геодинамический полигон. Скляров Е.В. (отв. ред.), Федоровский В.С. (отв. ред.) Москва. 2012. Изд-во: Группа компаний А1 TIS.
11. Spera F.J., Bergman S.C. Carbon dioxide in igneous petrogenesis: I. Aspects of the dissolution of CO₂ in silicate liquids // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1980. 74. 55– 66.
12. Mollo S., Gaeta M., Freda C., et al. Carbonate assimilation in magmas: A reappraisal based on experimental petrology // Lithos. 2010. V. 114. P. 503–514.
13. Wyllie P.J., Tuttle O.F. The system CaO-CO₂-H₂O and the origin of carbonatites // Journal of Petrology. 1960. V. 1. No. 1. P. 1–46.
14. Fanelli M.T., Cava N., Wyllie P.J. Calcite and dolomite without portlandite at a new eutectic in CaO–MgO–CO₂–H₂O with applications to carbonatites / In: Morphology and Phase Equilibria of Minerals, Proceedings of the 13th General Meeting of the International Mineralogical Association, Bulgarian Academy of Science: Sofia. 1986. P. 313–322.
15. Lentz D.R. Carbonatite genesis: A reexamination of the role of intrusion-related pneumatolytic skarn processes in limestone melting // Geology. 1999. V. 27. P. 335–338.
16. Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М. Дайки мраморов и кальцифиров Ольхонского композитного террейна (Западное Прибайкалье, Россия) // Геодинамика и тектонофизика. 2022.13(5).
17. Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А. Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2013. Т. 54 (12). С. 1831–1850.

ASSIMILATION OF CARBONATES BY MAFIC MAGMA: FASSAITE GABBRO OF THE OLKHON TERRANE (WESTERN BAIKAL REGION)

Corresponding member of the RAS E. V. Sklyarov^{a, #}, A. V. Lavrenchuk^{b,c, ##}, D. V. Semenova^b

^a*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

^b*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^c*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: skl@crust.irk.ru*

^{##}*E-mail:alavr@igm.nsc.ru, alavr@mail.ru*

The paper characterizes specific gabbro, the main rock-forming mineral of which is fassaite – alumina-rich (up to 12% Al_2O_3) calcium pyroxene, typical for high-temperature metasomatic rocks. In terms of geochemical characteristics, the fassaite gabbro are close to the subalkaline monzogabbro of the Ust-Krestovsky complex, which are widely distributed within the Krestovsky subterrane of the Olkhon terrane (Western Baikal region). At the same time, they differ sharply from the latter in terms of higher content of CaO and MgO and lower content of SiO_2 and Al_2O_3 . Fassaite gabbro form several small massifs framed by the Ust-Krestovsky monzogabbro massif, without contacting the latter. A model of the formation of fassaite gabbros due to the assimilation of carbonate material (crustal carbonate melting) by subalkaline mafic magma is proposed.

Keywords: gabbro, fassaite, assimilation, carbonates, Olkhon terrane

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Анализы пироксенов из фассаитовых габбро и монцогаббро Усть-Крестовского массива

№	S2061b		SE2062		SE2104B		SE2128A		SE4608		SE4609	
	Минерал	Fas	Fas	Di	Fas c	Fas r	Di	Fas1	Fas2	Fas c	Fas r	Di
SiO ₂	45.29	44.07	51.89	42.68	43.79	51.13	42.30	43.62	45.46	46.74	53.55	52.78
TiO ₂	1.70	2.60	0.33	1.82	2.49	0.43	4.15	3.77	1.15	1.47	0.23	нпо
Al ₂ O ₃	11.17	9.75	1.91	11.00	9.13	2.29	10.15	8.63	12.43	9.66	1.59	0.74
FeO _{tot}	7.67	10.64	9.19	9.67	12.53	6.01	11.31	10.73	3.85	3.25	3.14	11.03
MnO	0.31	нпо	нпо	нпо	0.26	0.21	нпо	0.26	нпо	нпо	нпо	0.26
MgO	9.62	8.79	12.27	9.00	7.30	14.53	8.06	8.49	12.02	13.07	16.00	12.21
CaO	23.97	22.69	23.42	23.00	22.33	23.42	22.88	22.65	25.63	25.61	25.65	23.31
Na ₂ O	нпо	нпо	0.47	0.51	0.86	0.43	0.50	0.43	0.28	0.22	нпо	нпо
Сумма	99.75	98.54	99.48	97.68	98.69	98.45	99.35	98.58	100.83	100.01	100.16	100.31
Si	1.702	1.698	1.951	1.639	1.691	1.912	1.622	1.685	1.652	1.711	1.955	1.986
Ti	0.048	0.075	0.009	0.053	0.072	0.012	0.120	0.109	0.031	0.040	0.006	0.000
Al	0.495	0.443	0.085	0.498	0.416	0.101	0.459	0.393	0.532	0.417	0.068	0.033
Fe ³⁺	0.005	0.011	0.028	0.156	0.123	0.081	0.096	0.051	0.117	0.096	0.009	0.000
Fe ²⁺	0.236	0.332	0.261	0.154	0.282	0.107	0.267	0.295	0.000	0.004	0.087	0.347
Mn	0.010	0.000	0.000	0.000	0.009	0.007	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.008
Mg	0.539	0.505	0.688	0.515	0.420	0.810	0.460	0.489	0.651	0.713	0.871	0.685
Ca	0.965	0.937	0.944	0.947	0.924	0.939	0.940	0.937	0.998	1.004	1.003	0.940
Na	0.000	0.000	0.034	0.038	0.064	0.031	0.037	0.032	0.020	0.015	0.000	0.000
Сумма	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.998
X _{Ca}	0.55	0.53	0.50	0.59	0.57	0.50	0.56	0.54	0.61	0.58	0.51	0.47
X _{Mg}	0.70	0.60	0.73	0.77	0.60	0.88	0.63	0.62	1.00	0.99	0.91	0.35
Al ^{IV}	0.298	0.302	0.049	0.361	0.309	0.088	0.378	0.315	0.348	0.289	0.045	0.014
Al ^{VI}	0.197	0.141	0.036	0.137	0.106	0.013	0.080	0.077	0.184	0.128	0.023	0.019

Примечание: Содержание Cr₂O₃ и K₂O ниже порога обнаружения; Fas – фассаит, Di – диопсид, нпо - ниже порога обнаружения. Анализы выполнены на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ).

Таблица 2. Содержания петрогенных оксидов (вес.%) в фассанитовых габбро и габбройдах Усть-Крестовского массива

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
sample	12A014	16A175	16A178	21A041	21A043	SE1501A	SE4003A	SE4008A	SE4608	SE5055A	10A004A	11A181	11A182A	11A182C
SiO ₂	50.25	42.81	44.22	41.87	42.51	44.69	44.12	42.35	44.04	43.71	48.15	52.1	49.39	57.15
TiO ₂	1.14	2.67	2.54	4.95	2.51	2.23	2.30	1.38	1.86	2.09	2.87	1.63	2.29	0.96
Al ₂ O ₃	12.88	8.98	11.88	10.21	11.95	10.62	11.51	13.33	10.34	11.02	16.55	19.85	18.45	20.95
Fe ₂ O ₃	3.00	2.57	3.64	2.46	2.20	3.91	2.62	2.25	1.21	2.56	2.78	2.31	2.39	1.31
FeO	7.42	8.58	6.00	8.78	7.83	7.56	7.69	3.37	4.92	7.12	8.56	6.16	8.25	3.91
MnO	0.19	0.17	0.10	0.16	0.12	0.20	0.18	0.09	0.07	0.13	0.16	0.11	0.15	0.06
MgO	5.22	7.31	8.78	4.74	7.76	6.58	7.28	11.42	11.39	8.08	4.31	3.29	3.49	1.72
CaO	14.91	22.85	19.01	22.14	19.95	20.77	20.87	21.55	22.34	18.22	7.52	7.08	6.52	4.90
Na ₂ O	2.94	0.79	0.84	0.79	1.02	1.26	0.72	0.64	0.84	1.51	3.94	4.00	4.41	6.07
K ₂ O	0.47	0.08	0.15	0.11	0.43	0.13	0.45	0.23	0.21	0.80	2.53	1.43	2.31	1.76
P ₂ O ₅	0.33	2.05	0.14	2.29	0.25	0.47	0.19	0.09	0.15	0.15	0.64	0.44	0.89	0.30
H ₂ O-	0.08	0.09	0.07	0.12	0.03	0.08	0.07	0.05	0.03	0.08	0.07	0.10	0.04	0.06
LOI	0.97	0.58	1.27	0.77	1.15	0.84	1.35	1.25	0.78	3.06	1.48	1.43	1.54	0.88
Total	100.26	100.21	100.32	99.75	100.21	100.31	100.34	99.96	100.19	100.39	99.91	99.93	100.12	100.03
CO ₂	0.45	0.68	1.68	0.36	2.50	0.89	0.99	1.96	2.00	1.86	0.18	НПО	НПО	НПО

Таблица 2. Окончание

N	15	16	17	18	19	20
sample	11A182D	12A183A	12A183C	12A184B	16A191	SE4609
SiO ₂	50.32	49.69	46.96	46.68	65.65	57.12
TiO ₂	2.25	1.95	2.60	2.74	0.7	1.19
Al ₂ O ₃	18.1	19.66	18.28	18.59	15.97	19.72
Fe ₂ O ₃	1.88	4.05	3.38	4.38	1.22	0.70
FeO	8.55	6.59	8.74	8.28	3.47	5.86
MnO	0.15	0.12	0.17	0.16	0.09	0.09
MgO	3.38	3.16	4.63	3.95	1.19	2.45
CaO	6.33	7.00	8.00	7.85	2.71	5.96
Na ₂ O	4.43	4.14	3.57	3.83	4.16	5.25
K ₂ O	2.44	2.04	1.73	1.55	3.72	0.70
P ₂ O ₅	0.87	0.72	0.61	0.63	0.22	0.52
H ₂ O-	0.04	0.06	0.06	0.07	0.03	0.08
LOI	1.41	1.11	1.69	1.33	0.71	0.49
Total	100.15	100.4	100.42	100.12	99.84	100.21
CO ₂	нпо	0.11	нпо	0.08	нпо	0.09

Примечание. 1-10 – фассаитовые габбро, 11-20 – габброиды Усть-Крестовского массива. нпо – содержание ниже предела обнаружения. Жирным шрифтом выделены датированные пробы. Анализы в таблицах 2, 3 выполнены в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (г. Иркутск).

Таблица 3. Содержания редких и редкоземельных элементов (г/т) в фасцитовых габбро и габбройдах Усть-Крестовского массива

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
sample	21A043	SE4608	SE4003A	16A175	11A181	SE1503C	12A184A	12A184B	12A183C	11A186	11A182D	10A004A	12A183A
Rb	27.8	30	17.7	21.4	20.2	30.8	51.9	47	26.2	8.6	4.5	16.5	3.1
Sr	914	775	724	634	600	787	853	882	715	204	113	239	225
Ba	596	366	486	585	498	411	1086	642	679	141	81	154	68
La	16.5	28.8	16.2	24	23	19.8	43.9	30.2	17.3	10.4	9.4	10.5	30.4
Ce	39.6	69.4	36.9	59.8	60.6	46.7	98.2	69	40.4	23.8	23.7	24.8	71.7
Pr	5.4	9.22	4.91	8.07	8.45	6.2	12.31	8.96	5.4	3.37	3.56	3.5	8.71
Nd	22.8	36.7	21.3	35	37.5	26.4	48	36.6	24.1	15	15.7	15	35.7
Sm	5.61	8.57	4.5	7.34	7.98	6.45	10.79	8.92	5.09	3.9	4.23	3.72	7.68
Eu	1.9	2.62	1.85	2.28	2.1	2.05	3.07	2.79	1.94	1.17	1.23	0.89	1.94
Gd	5.11	6.96	4.49	7.09	7.45	5.63	8.55	7.69	4.82	3.87	3.9	3.28	7.09
Tb	0.73	1.08	0.61	0.98	1.03	0.81	1.25	1.11	0.63	0.62	0.62	0.53	1
Dy	4.03	6.26	3.33	5.34	5.66	4.53	6.91	6.21	3.32	3.87	3.87	3.18	5.89
Ho	0.75	1.18	0.61	1.03	1.08	0.83	1.2	1.12	0.59	0.82	0.83	0.66	1.17
Er	1.89	3.16	1.59	2.74	2.82	2.14	3.12	2.88	1.49	2.2	2.27	1.79	3.04
Th	0.27	0.44	0.22	0.38	0.41	0.3	0.43	0.4	0.19	0.33	0.31	0.28	0.45
Yb	1.63	2.48	1.34	2.43	2.57	1.84	2.55	2.4	1.11	1.99	1.89	1.89	2.66
Lu	0.26	0.39	0.19	0.34	0.38	0.29	0.41	0.38	0.17	0.28	0.26	0.33	0.42
Y	20.4	40.4	15.2	24.9	26.7	23	33.8	30.6	14.2	21.1	22.9	18	31.1
Zr	17	44.8	22.4	21	31.5	31	69.3	46.7	18.2	251.3	221	314.5	241.7
Hf	0.84	2.14	0.82	1.21	1.78	1.57	1.73	1.54	0.66	7.43	5.91	10.86	7.41
Ta	0.78	0.66	0.96	2.24	2.23	0.81	1.76	1.33	1.01	0.29	0.3	0.38	0.13
Nb	13.5	16.7	10.8	20	21.6	13.1	31.4	18.7	11.2	2.8	2	4.2	1.4
Pb	3.47	10.9	3.6	2.7	2.67	5.14	4.19	3.37	2.62	1.67	3.01	3.69	
Th	1.83	2.77	1.77	0.84	0.53	0.72	1.79	1.28	0.77	1.12	0.92	2.25	1.53
U	0.49	1	0.62	0.56	0.33	0.26	0.79	0.55	0.36	0.6	0.53	1.07	0.81

Примечание. 1-4 – фасцитовые габбро, 5-13 – габбройды Усть-Крестовского массива.