

УДК 551.24

**АРХЕЙСКИЕ ГАББРО-АМФИБОЛИТЫ ЭКЛОГИТОВОГО УЧАСТКА
КУРУ-ВААРА, БЕЛОМОРСКАЯ ПРОВИНЦИЯ: ГЕОЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ,
ГЕОХИМИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ***

В. В. Балаганский^{1,2}, М. Ю. Рауд¹, М. Ю. Сидоров¹

¹ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

²ФГБОУ Мурманский государственный технический университет

Аннотация

Габбро-амфиболиты Куру-Ваары являются метаморфизованными габброноритами толеитовой серии, внедрившимися на последних этапах архейской истории Беломорской провинции. По ряду геохимических черт они схожи с другими неоархейскими интрузиями базитов этой провинции и, скорее всего, внедрились вместе с ними 2,69–2,73 млрд лет назад. Данные по редким землям и ряду рассеянных элементов противоречат корреляции всех этих пород с базальтами срединно-океанических хребтов и указывают на то, что наиболее вероятно их образование в условиях, связанных с дугами. Вместе с архейскими эклогитами и офиолитами они маркируют архейскую зону субдукции.

Ключевые слова:

габбро-амфиболиты, эклогиты, архей, Беломорская провинция, Балтийский щит.

**ARCHAEAN GABBRO-AMPHIBOLITES OF THE KURU-VAARA ECLOGITE STUDY AREA,
BELOMORIAN PROVINCE: GEOLOGY, PETROGRAPHY, GEOCHEMISTRY AND ORIGIN**

Victor V. Balagansky^{1,2}, Margarita Yu. Raud¹, Mikhail Yu. Sidorov¹

¹Geological Institute of the KSC of the RAS

²Murmansk State Technical University

Abstract

The Kuru-Vaara gabbro-amphibolites represent metamorphosed gabbro-norites of the tholeiitic magma series which formed at the final stages of Archaean history of the Belomorian Province. According to some geochemical features, these rocks are similar to other Neoarchaean basic intrusions of the Province and, more likely, intruded along with them 2,69–2,73 Ga ago. Data on rare earth and some trace elements contradict correlation of these rocks with mid-oceanic ridge basalts and suggest that the arc-related setting of their formation is most probable. These together with Archaean eclogites and ophiolites can trace an Archaean subduction zone.

Keywords:

gabbro-amphibolite, eclogite, Archaean, Belomorian Province, Baltic Shield.



Введение

Беломорская провинция является одной из главнейших тектонических структур Балтийского щита, которая почти полностью сложена архейскими породами, деформированными и глубоко метаморфизованными в результате неоархейской коллизионной орогении [1, 2]. В палеопротерозое она была юго-

* Каменный материал был собран в рамках проекта РФФИ 16-05-01031А (полевые работы в 2016 г.) и подготовлен для исследований согласно плану НИР Ги КНЦ РАН (тема № 0231-2015-0004), аналитические данные были получены и обобщены при финансовой поддержке РФФИ проектов 16-05-00479А (геохимические исследования) и 16-05-01031А (петрографические исследования и обсуждение результатов).

западным форландом Лапландско-Кольского коллизионного орогена и претерпела неоднородную деформационную и метаморфическую переработку [1, 3]. Одной из особенностей геологической истории Беломорской провинции являются разные масштабы plutонического базитового магматизма в палеопротерозое и неогархее. Если начало палеопротерозоя в Беломорье ознаменовалось внедрением в архейские тоналит-грандьемит-гранодиоритовые гнейсы и амфиболиты (далее — амфиболитосерогнейсовая матрица) многочисленных основных интрузий с коронитовыми структурами, широко известными как друзиты [1, 4], то в неогархее проявления plutонического основного магматизма были единичными. В настоящее время архейские базитовые интрузии известны в районах губы Тупой оз. Ковдозеро [5], оз. Нотозеро [6] и с. Гридино [7], а также на участке Куру-Ваара [8, 9] (рис. 1, а).

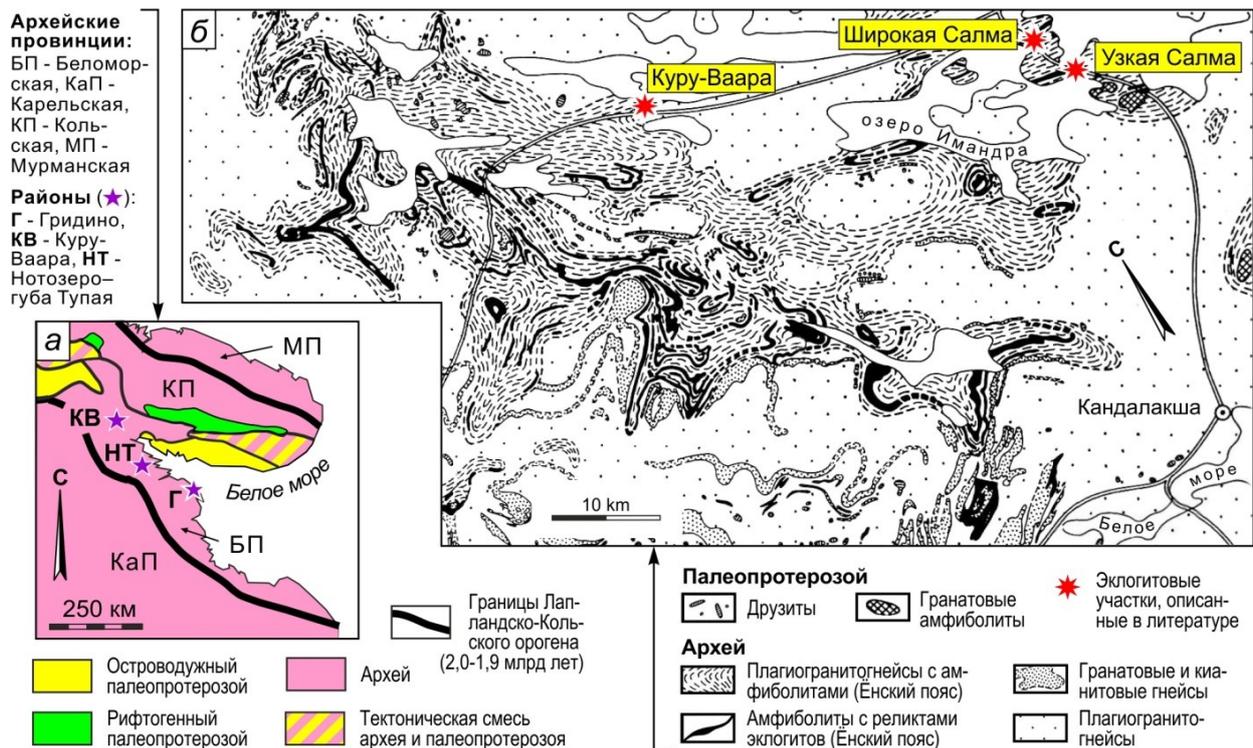


Рис. 1. Схема геологического строения северо-восточной части Балтийского щита (а) (по работе [10], с упрощениями) и геологическая карта Ёнско-Риколатвинской зоны Ёнского сектора Беломорского провинции, изобилующей пластовыми телами архейских амфиболитов (б) (по работе [11], с упрощениями)

Возраст тупогубских габбро и гридинских габброидов, определенный по циркону, составляет $2692 \pm 1,4$ и 2711 ± 25 млн лет соответственно [7, 12], то есть внедрение этих пород, учитывая аналитические погрешности, произошло практически одновременно. Аналогичная датировка (2694 ± 11 млн лет) была получена для нотозерских габбро, но она интерпретируется как возраст метаморфизма, а кристаллизация габбро отнесена к периоду 2,71–2,73 млрд лет [6]. Эти интрузии являются индикаторами тектонической обстановки в Беломорской провинции 2,7 млрд лет назад, которая пока остается не до конца ясной. В предлагаемой статье приводятся новые данные о геологии, петрографии, геохимии и происхождении архейских основных интрузий Куру-Ваары, информация о которых была очень краткой. Повышенное внимание к куру-ваарским интрузиям также связано с тем, что они располагаются в амфиболитосерогнейсовой матрице, содержащей реликты эклогитов, и их возраст оценивается как пост-эклогитовый [8, 9]. Эклогиты являются важным индикатором тектонического режима и крайне редки в раннем докембрии, поэтому новая информация о породах, пространственно тесно связанных с беломорскими эклогитами, представляет интерес.

Общая геологическая характеристика

Участок Куру-Ваара находится в северной части Беломорской провинции (рис. 1, *a*), которая заметно отличается от других ее частей и выделяется как Ёнский сектор провинции [1]. Главные отличия Ёнского сектора состоят в изобилии в Ёнско-Риколатвинской зоне его северо-восточной части пластов амфиболитов при очень незначительном количестве (кианит)-гранат-биотитовых и небольшом количестве палеопротерозойских друзитов [1, 13] (рис. 1, *б*). Эти особенности Ёнско-Риколатвинской зоны вместе с наличием в амфиболитах гипербазитов привели к ее выделению в качестве архейского Ёнского зеленокаменного пояса [11, 14]. Считается, что для Ёнского сектора, как и для всего Беломорья, характерны тектонические покровы, при этом весь Ёнский пояс интерпретируется как покров палеопротерозойского возраста, надвинутый на архейские покровы [1]. Очень важным отличием Ёнского пояса является обилие реликтов пород эцлогитовой фации метаморфизма в пластах архейских амфиболитов [8, 9, 15–18] (рис. 1, *б*). Находки в гранате и клинопироксене в этих породах микровключений алмаза, в т. ч. и в реликтах эцлогитов на участке Куру-Ваара, свидетельствуют об уникальных для раннего докембрия ультравысокобарических условиях эцлогитового метаморфизма [19, 20]. Возраст эцлогитового метаморфизма, реликты минеральных парагенезисов которого сохранились в пластах амфиболитов, дискуссионен. Одни исследователи приводят данные в пользу архейского возраста этого метаморфизма [9, 15, 16, 21, 22], а другие — палеопротерозойского [23–27].

Структурное положение

Габбро-амфиболиты слагают пластообразные тела с хорошо сохранившейся габбровой текстурой [8]. Наши исследования выявили 26 тел этих пород, в 2 из которых были найдены реликты исходных пород с магматическими минералами. Все они расположены к северу от Центральной сдвиговой зоны, разделяющей две архейские тектонические пластины [15], каждая из которых содержит реликты эцлогитов, принадлежащих присущему только ей типу [8, 9]. Крупные тела имеют ярко выраженную пластообразную форму, тогда как мелкие тела уплощены или их форма близка к изометричной (рис. 2, *a*). Как сильно, так и слабо уплощенные тела габбро-амфиболитов залегают согласно мигматитовой полосчатости и сланцеватости в амфиболито-серогнейсовой матрице, при этом только краевые части этих тел сильно рассланцованы параллельно их контактам и слабо проявленной сланцеватости по амфиболу в центральных частях. В одном случае наблюдался секущий контакт габбро-амфиболитов с сильно рассланцованными серыми гнейсами (рис. 2, *б, в*). Очень редко на контактах габбро-амфиболиты слабо мигматизированы. Архейские пластовые тела амфиболитов и вмещающие их серые гнейсы, а также их деформационные плоскостные текстуры секутся оливинowymi габброноритами с возрастом 2,44 млрд лет [25], имеющими друзитовые структуры (рис. 2, *a*). Внутри самого крупного тела габбро-амфиболитов выделяются два тела средних пород, по химическому составу отвечающие санукитоидам; предполагается, что они генетически связаны с габбро-амфиболитами [8, 9].

Петрография

Габбро-амфиболиты имеют черный цвет, обычно массивны и только вдоль их контактов полностью преобразованы в сланцеватые амфиболиты. Последние изредка наблюдаются в мелких сдвиговых зонах и в центральных частях габбро-амфиболитовых тел. Реликты исходных габбро имеют отчетливый красный оттенок, вызванный большим содержанием кайма и отдельных скоплений граната, практически полностью уничтоженных при преобразовании этих пород в габбро-амфиболиты. Реликтовые магматические минералы представлены орто- и клинопироксеном, а также плагиоклазом (рис. 3, *a-e*), химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав минералов из реликтов метагаббро в габбро-амфиболите карьера Куру-Ваара (шифт Р-14-7-8-1)

Минерал	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO* ²	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Сумма	Минералы граната		
													Alm+Sps ⁴	Prp	Grs
Орх ¹ (1)	54,59	0	1,71	0,41	14,78	0,21	27,70	0,72	0	0	0,06	100,18	-	-	-
Орх (2)	54,89	0	1,48	0,32	14,68	0,19	27,75	0,26	0	0	0,07	99,64	-	-	-
Срх (1)	55,44	0	1,53	0,53	12,56	0,13	28,23	1,69	0,12	0	0,09	100,32	-	-	-
Срх (2)	55,48	0	1,55	0,34	13,27	0,17	28,80	1,36	0	0	0,09	101,06	-	-	-
Pl (1)	54,04	0	28,05	0	0,09	0	0	11,03	4,90	0,02	-	98,13	-	-	-
Pl (2)	54,27	0	28,44	-	0,03	-	-	11,07	4,88	-	-	98,69	-	-	-
Grt-1 (1) край	39,97	0	22,35	0	20,48	0,59	10,76	5,87	0	0	-	100,02	44	40	16
Grt-2 (1) центр	40,10	0	22,37	0	18,40	0,48	9,11	9,60	0	-	-	100,06	40	34	26
Grt-3 (1) край	39,91	0	22,63	0,03	19,75	0,53	11,11	5,61	0	-	-	99,57	43	42	15
Grt-4 (2) край	39,39	0	21,93	0	22,03	0,81	8,37	7,74	0	-	-	100,27	47	32	21
Grt-5 (2) центр	39,52	0,06	22,03	0	20,84	0,70	8,77	8,22	0	-	-	100,14	45	33	22
Grt-6 (2) край	39,34	0	21,66	0	22,68	0,80	8,97	5,91	0	-	-	99,36	49	34	16
Am (1) центр	47,84	1,39	10,63	0,59	6,20	0,07	16,51	12,27	0,84	0,66	0,06	97,09³	-	-	-
Am (1) край	48,28	0,83	10,46	0,09	6,03	0,06	17,02	12,54	0,95	0,84	0,10	97,20	-	-	-
Bt (1)	38,41	2,09	16,65	0	8,18	0	19,71	0,06	0,43	8,94	0,19	94,94	-	-	-
Rt (1)	0,18	98,96	0,11	0,38	0,07	0	0	0,04	-	-	-	100,03	-	-	-

Окончание таблицы 1

Минерал ¹	Формульные единицы (ф. е.)											Минералы граната ⁴			
	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Alm+Sps	Pgr	Grs
Орх (1)	1,97	0,03	0,03	—	0,01	—	0,44	0,01	1,49	0,01	—	—	—	—	—
Орх (2)	1,93	0,03	0,03	—	0,01	—	0,37	—	1,49	0,06	0,01	—	—	—	—
Срх (1)	1,96	0,04	0,02	—	0,01	—	0,39	0,01	1,52	0,05	—	—	—	—	—
Срх (2)	2,48	0,52	1,00	—	—	—	—	—	—	0,54	0,44	—	—	—	—
Pl (1)	2,47	0,53	1,00	—	—	—	—	—	—	0,54	0,43	—	—	—	—
Grt-1 (1) край	3,01	—	1,98	—	—	0,02	1,27	0,04	1,21	0,47	—	44	40	16	16
Grt-2 (1) центр	3,02	—	1,98	—	—	0,02	1,14	0,03	1,02	0,77	—	40	34	26	26
Grt-3 (1) край	3,00	—	2,01	—	—	0,01	1,23	0,03	1,25	0,45	—	43	42	15	15
Grt-4 (2) край	3,00	—	1,97	—	—	0,03	1,37	0,05	0,95	0,63	—	47	32	21	21
Grt-5 (2) центр	3,00	—	1,97	—	—	0,03	1,29	0,05	0,99	0,67	—	45	33	22	22
Grt-6 (2) край	3,02	—	1,96	—	—	0,04	1,42	0,05	1,03	0,49	—	49	34	16	16
Am (1) центр	6,81	1,04	0,74	0,15	0,07	0,03	0,71	0,01	3,50	1,87	0,16	0,12	—	—	—
Am (1) край	6,86	1,05	0,70	0,09	0,01	0,05	0,72	0,01	3,60	1,91	0,26	0,15	—	—	—
Bt (1)	2,74	1,26	0,14	0,11	—	—	0,89	—	2,10	0,01	0,06	0,81	—	—	—
Rt (1)	—	—	—	0,99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания. 1. Аббревиатуры минералов: Rt — рутил, остальные те же, что и на рис. 3 (цифры в скобках — номера зерен). 2. FeO* — здесь и далее в таблицах и тексте суммарное железо. 3. В сумме, написанной жирным курсивом, учтено содержание: V₂O₃ — в Alm (0,03 %), BaO — в Bt-1 (0,28 %), Nb₂O₅ и SrO — в Rt (0,17 и 0,12 % соответственно). 4. Alm — альмандин, Sps — спессартин, Pgr — пироп, Grs — гроссуляр. 5. Препараты были изучены под сканирующим электронным микроскопом LEO-1450, затем на изображениях в обратно-отраженных электронах были выбраны участки для электронно-зондового анализа минералов. Анализы были выполнены на микроанализаторе MS-46 САМЕСА при ускоряющем напряжении 22 кВ и токе зонда 30–40 нА в лаборатории физических методов исследования пород, руд и минералов ГИ КНЦ РАН.

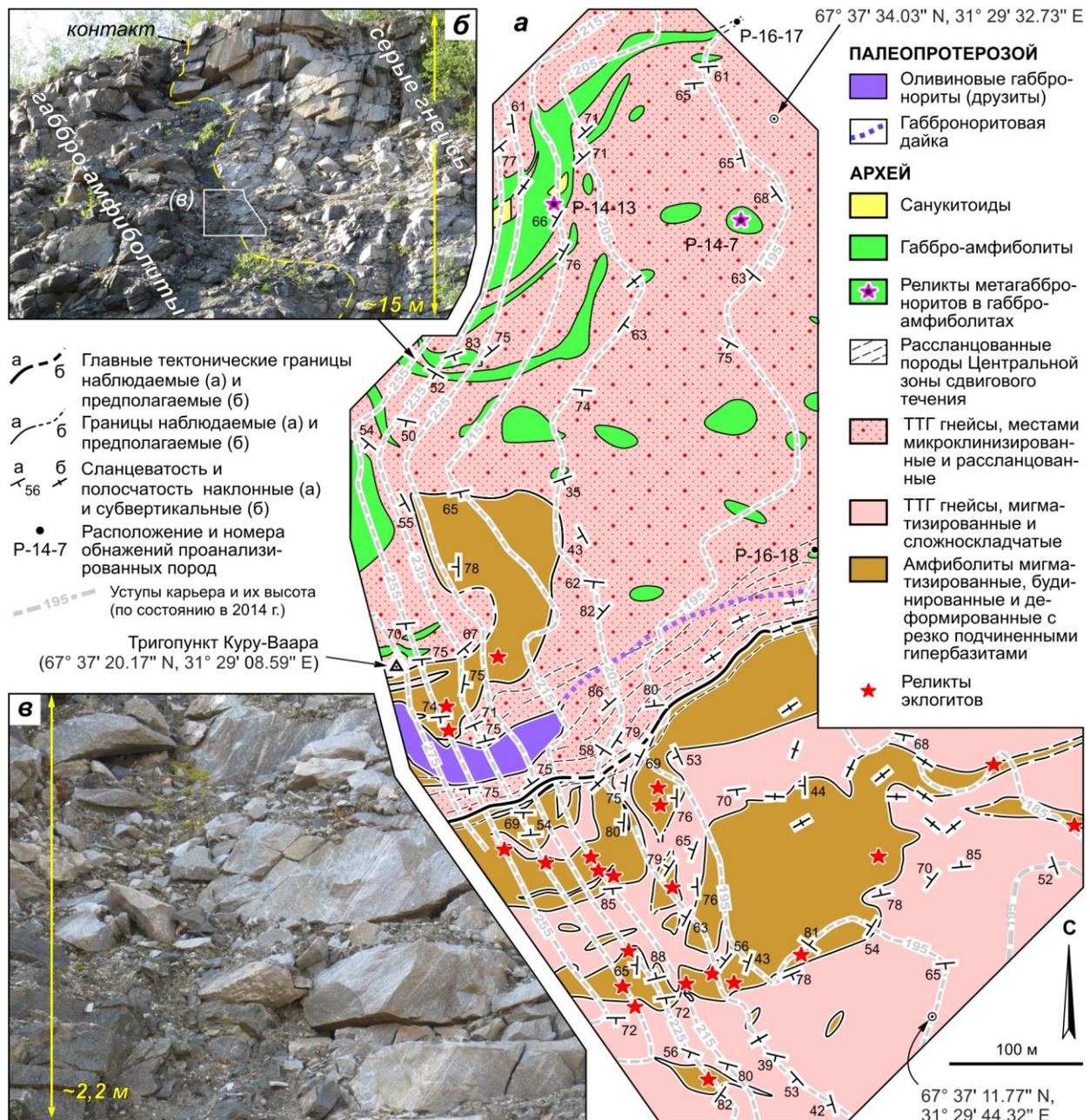


Рис. 2. Геологическая карта карьера Куру-Ваара (а) (пегматиты не показаны; по работе [15], с упрощениями) и несогласные взаимоотношения габбро-амфиболитов с сильно рассланцованными серыми гнейсами (б, в)

Исходные габбро

Ортопироксен образует слабо удлиненные идиоморфные зерна размером до 1 мм (рис. 3, а, б), для которых характерны обилие различных минеральных микровключений, вызывающих его замутненность (рис. 3, а), и нескольких систем цепочек включений амфибола, замещающего ортопироксен по определенным кристаллографическим плоскостям (рис. 3, б). Кроме этого, очень характерны амфиболовые каймы. Согласно номенклатуре пироксенов [28], по химическому составу он отвечает энстатиту и отличается присутствием NiO (0,06–0,07 %), что обычно для ортопироксенов из магматических пород и не отмечается в метаморфических [29].

Клинопироксен представлен клиноэнстатитом с содержанием жадеитового минала всего 0,85 % (номенклатура по работе [28]), слагающим короткопризматические идиоморфные зерна длиной до 1,2 мм. В них наблюдаются ориентированные по определенным кристаллографическим направлениям цепочки вторичного амфибола, а также хорошо развитые амфиболовые каймы

(рис. 3, в, з). Зерна клиноэнстатита при значительном их замещении амфиболом сохраняют субидiomорфный облик, но приобретают мозаичное строение, в котором субзерна сохраняют единую для них ориентировку кристаллооптических элементов (рис. 3, д, субзерна имеют одинаковые зеленые цвета интерференции, тогда как зерна амфибола имеют разную ориентировку и не образуют симплектитов с клинопироксеном). Как и ортопироксен, клиноэнстатит содержит характерную для магматических пироксенов примесь NiO (0,09 %) [29].

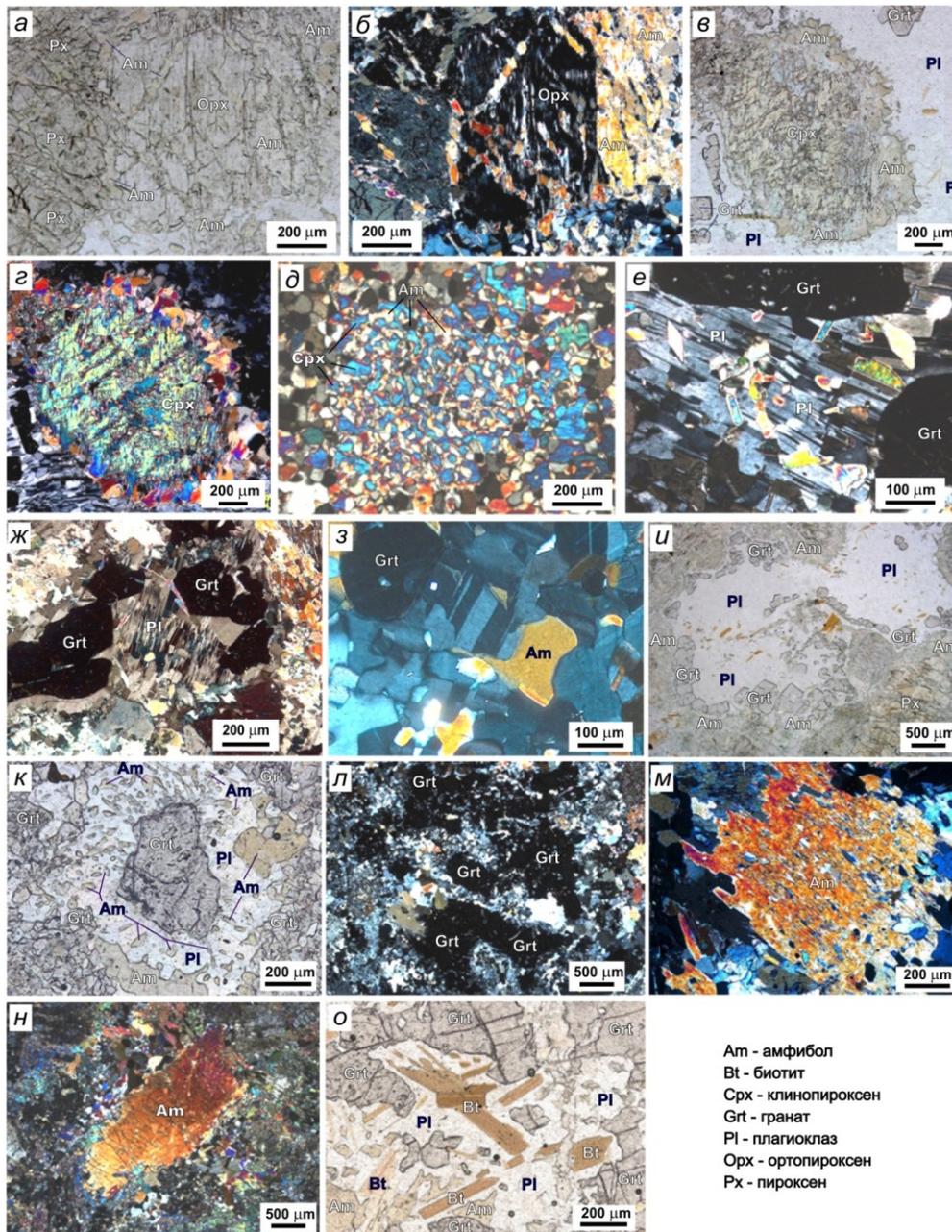


Рис. 3. Микрофото магматических (а-е) и метаморфических (ж-о) минералов в габбро, наблюдаемых в виде реликтов в габбро-амфиболитах (а-б — ортопироксен, в-д — клинопироксен, е-ж — плагиоклаз, и-л — гранат, м-н — амфибол, о — биотит; б, з-з, л-н — фото с анализатором; а, в, ж, и, к, о — без анализатора)

В отличие от пироксенов, магматический **плагиоклаз** сохранился только в виде отдельных слабо удлинённых зерен, которые обнаруживают меньшую степень идиоморфизма. Они состоят из субзерен с почти единым удлинением и погасанием тонких полисинтетических двойников (рис. 3, е, ж). По химическому составу плагиоклаз отвечает лабрадору (An 54 %), который

типичен для габбро [29]. Его метаморфические преобразования выражены не только в распаде первичных зерен на субзерна, но и в появлении в них включений амфибола и биотита (рис. 3, *е*). Реликты плагиоклаза частично или почти целиком окружены цепочками кристаллов граната (рис. 3, *е, ж*). Многие кристаллы полностью преобразованы в агрегаты мелких и обычно несдвойникованных зерен метаморфического плагиоклаза. Эти агрегаты содержат включения амфибола и биотита и в целом сохраняют контуры исходных кристаллов плагиоклаза (рис. 3, *з*).

Метаморфические минералы в исходных габбро, сохранивших их первичную габбровую структуру и массивную текстуру, представлены гранатом, амфиболом, биотитом и плагиоклазом (рис. 3, *е-о*). Они принадлежат к главным минералам, за исключением биотита, который является второстепенным. Их химический состав дан в табл. 1.

Гранат является доминирующим по его содержанию в породе (до 30 %). Он обычно слагает близкие к изометричным кристаллы, некоторые из которых имеют контуры почти правильных шестигранников (рис. 3, *ж, з*). Как правило, они образуют цепочки вокруг магматического плагиоклаза (рис. 3, *ж*) и агрегатов метаморфического плагиоклаза, причем в последнем случае цепочки зерен местами образуют сплошные каймы шириной от 0,1 до 0,5 мм (рис. 3, *и*). Отсюда следует, что метаморфический гранат развивался на границах между плагиоклазом и темноцветными минералами. В единичных случаях в центре агрегатов плагиоклазовых зерен, окруженных гранатовой каймой, располагаются зерна граната до 0,5 мм в поперечнике. Эти агрегаты насыщены мелкими червеобразными и удлинёнными зернами амфибола и представляют собой плагиоклаз-амфиболовые симплектиты, замещавшие гранат (рис. 3, *к*). Симплектиты такого состава развиваются по гранату альмандинового состава [30]. Нередко наблюдаются многочисленные крупные скопления граната, которые имеют неправильную форму и местами образуют каймы шириной до 1 мм (рис. 3, *л*).

По химическому составу гранат принадлежит к пиральспитам (Alm + Sps — от 40 до 49 %, Prp — от 32 до 42 %) и содержит от 15 до 26 % гроссулярового минала. Этот состав граната и отсутствие метаморфогенного клинопироксена позволяет исключить его связь с эклогитовым метаморфизмом. Гранат обнаруживает слабую зональность: центры его зерен, по сравнению с краями, незначительно обеднены пироповым миналом и слабо обогащены гроссуляровым и альмандин-спессартиновым миналами (табл. 1).

Амфибол также принадлежит к количественно преобладающим минералам: его содержание варьирует от 10 до 30 %. Он представлен несколькими морфологическими типами, которые, скорее всего, отвечают разным его генерациям. Прежде всего, это мелкие (первые сотые доли миллиметра) слабо окрашенные в зеленоватые тона зерна с желтыми и красными цветами интерференции, которые замещают пироксены по некоторым кристаллографическим направлениям. Такие же, но более крупные зерна (до 0,1 мм) слагают каймы вокруг пироксенов (рис. 3, *а-г*). По-видимому, к этому же типу принадлежат кристаллы размером до 0,05 мм с аналогичными характеристиками, которые наблюдаются внутри реликтов магматического плагиоклаза (рис. 3, *е, ж*). Множество сходных (в том числе и по размерам) кристаллов амфибола в крупных реликтах клинопироксена разделяют этот минерал на субзерна и определяют его мозаичное строение (рис. 3, *д*). В отдельный тип выделяются червеобразные и удлинённые выделения амфибола бледно-зеленого цвета в симплектитовых сростках с плагиоклазом, окаймляющих крупные зерна граната (рис. 3, *к*).

Основная масса амфибола представлена магнезиальной роговой обманкой (номенклатура по работе [31]), содержание которой резко преобладает над суммарным количеством описанных выше типов амфибола. Наблюдаются две разновидности этого амфибола: относительно мелкие зерна, достаточно равномерно рассеянные в основной ткани породы, и короткопризматические порфиробласты с изрезанными границами и длиной до 3 мм (рис. 3, *м, н*). Эти порфиробласты отличаются изрезанными границами и нередко большим содержанием минеральных включений (рис. 3, *м*). Они по краям местами неравномерно замещены сине-зеленой роговой обманкой.

Биотит обычно встречается внутри агрегатов плагиоклаза в виде чешуек длиной до 0,7 мм, и почти не соприкасается с зернами амфибола внутри этих агрегатов и зернами граната, окаймляющего агрегаты (рис. 3, *o*). Он относится к ряду аннит-флогопит (классификация по работе [32]) при преобладании Mg над Fe²⁺ (X_{Pbl} 0,70–0,72). В нем отмечается повышенное содержание Ti в октаэдрической позиции (0,11–0,14 ф. е.).

Акцессорные минералы — титанит, рутил и рудный минерал. Рутил отвечает его идеальной формуле TiO₂ и содержит примесь Cr₂O₃ (0,38 мас. %) и Nb₂O₅ (0,17 мас. %), а также примеси Al, Fe, V, и Sr (табл. 1). Отдельные зерна рутила частично замещены ильменитом.

Габбро-амфиболиты и амфиболиты

Габбро-амфиболиты связаны с массивными метагаббро постепенными переходами, при этом ширина зон перехода не превышает 30 см. В целом габбро-амфиболиты массивны и обнаруживают слабо выраженную сланцеватость по амфиболу. В краевых частях тел габбро-амфиболитов и в редких зонах рассланцевания внутри тел эти породы постепенно переходят в сланцеватые амфиболиты. Главные минералы в них представлены амфиболом, плагиоклазом и биотитом; их химический состав дан в табл. 2. Содержание амфибола составляет 60–70 %, плагиоклаза — 25–30 % и биотита — 5–10 %. Кварц является второстепенным минералом, а среди аксессуаров отмечены титанит, рутил, пентландит и халькопирит. В переходной зоне от метагаббро к габбро-амфиболитам наблюдаются реликты пироксенов и граната. По степени сохранности магматических минералов среди габбро-амфиболитов можно выделить разности с реликтами магматических минералов и без таковых, причем первые из них были встречены только в ореолах вокруг реликтов массивного исходного метагаббро. Амфиболиты, в свою очередь, подразделяются на биотито- и гранатосодержащие разности, в которых биотит и гранат могут быть как главными, так и второстепенными минералами при максимальном их содержании не более 10 %. Их отличительной чертой является сланцеватый облик, и по внешнему виду они не отличаются от аналогичных петрографических разностей архейских амфиболитов пластовых тел.

Таблица 2

Химический состав минералов из амфиболитов по габбро-амфиболитам
карьера Куру-Ваара (шл. P-14-7-1-1)

Оксид	Am		Bt	Pl		Элемент	Am		Bt	Pl	
	край	центр		край	центр		край	центр		край	центр
SiO ₂	44,77	43,98	36,45	60,07	58,91	Na ₂ O	1,21	1,23	0,52	7,41	7,93
TiO ₂	0,63	0,86	2,52	0	0	K ₂ O	0,24	0,46	8,94	0,06	0,06
Al ₂ O ₃	10,74	11,34	16,70	24,83	25,15	NiO	0,06	0,04	0,07	0	0
Cr ₂ O ₃	0,05	0,33	0,18	0	0	V ₂ O ₃	0,05	0,03	0	0	0
FeO*	10,90	11,30	12,04	0,06	0,04	CeO ₂	0	0	0,05	0	0
MnO	0,15	0,16	0,03	0	0	Cl	0,21	0,23	0,32	0	0
MgO	14,97	14,41	17,76	0	0	Сумма	96,07	96,24	95,58	99,26	98,96
CaO	12,09	11,87	0	6,83	6,87						
Элемент	Формульные единицы										
Si	6,60	6,51	2,69	2,69	2,66	Mg	3,29	3,29	1,95	–	–
Al ^{VI}	0,50	0,49	0,14	1,00	1,00	Ca	1,91	1,91	–	0,33	0,33
Al ^{IV}	1,37	1,39	1,31	0,31	0,34	Na	0,35	0,35	0,08	0,64	0,69
Ti	0,07	0,10	0,14	–	–	K	0,04	0,04	0,84	–	–
Cr	0,01	0,04	–	–	–	Ni	0,01	0,01	–	–	–
Fe ³⁺	0,16	0,16	–	–	–	V	0,01	0,01	–	–	–
Fe ²⁺	1,18	1,18	0,74	–	–	Cl	0,04	0,04	0,32	–	–
Mn	0,02	0,02	–	–	–						

Примечания те же, что и в табл. 1.

Геохимия

Содержания главных, рассеянных и редкоземельных элементов в габбро-амфиболитах приведены в табл. 3 и 4, в которых для сравнительного анализа также приводятся концентрации этих элементов в других архейских интрузиях Беломорья. Согласно диаграмме TAS, эти габбро-амфиболиты являются породами основного состава нормального ряда щелочности (рис. 4, а). На диаграмме А-Ф-М данные породы, включая образец реликтового метагаббро, образуют компактный кластер в магнезиальной части поля пород толеитовой серии, только один образец попадает в поле известково-щелочной серии (рис. 4, б). Этот образец отличается низким содержанием MgO — 5,47 мас. %, тогда как во всех остальных образцах оно варьирует от 11,72 до 15,78 мас. % и снижается с увеличением количества SiO₂ (рис. 4, в). Концентрация Al₂O₃ незначительно возрастает с увеличением SiO₂ (рис. 4, з) и уменьшается с возрастанием количества MgO (рис. 4, д). Количество же MgO снижается при увеличении суммы щелочей (рис. 4, е). Содержания FeO* и TiO₂ во всех образцах составляют 7,85–9,24 и 0,41–0,86 мас. % соответственно и не зависят от количества SiO₂ (рис. 4, ж, з). Концентрация CaO также не зависит от количества SiO₂ и лежит в интервале 8,02–10,20 мас. %.

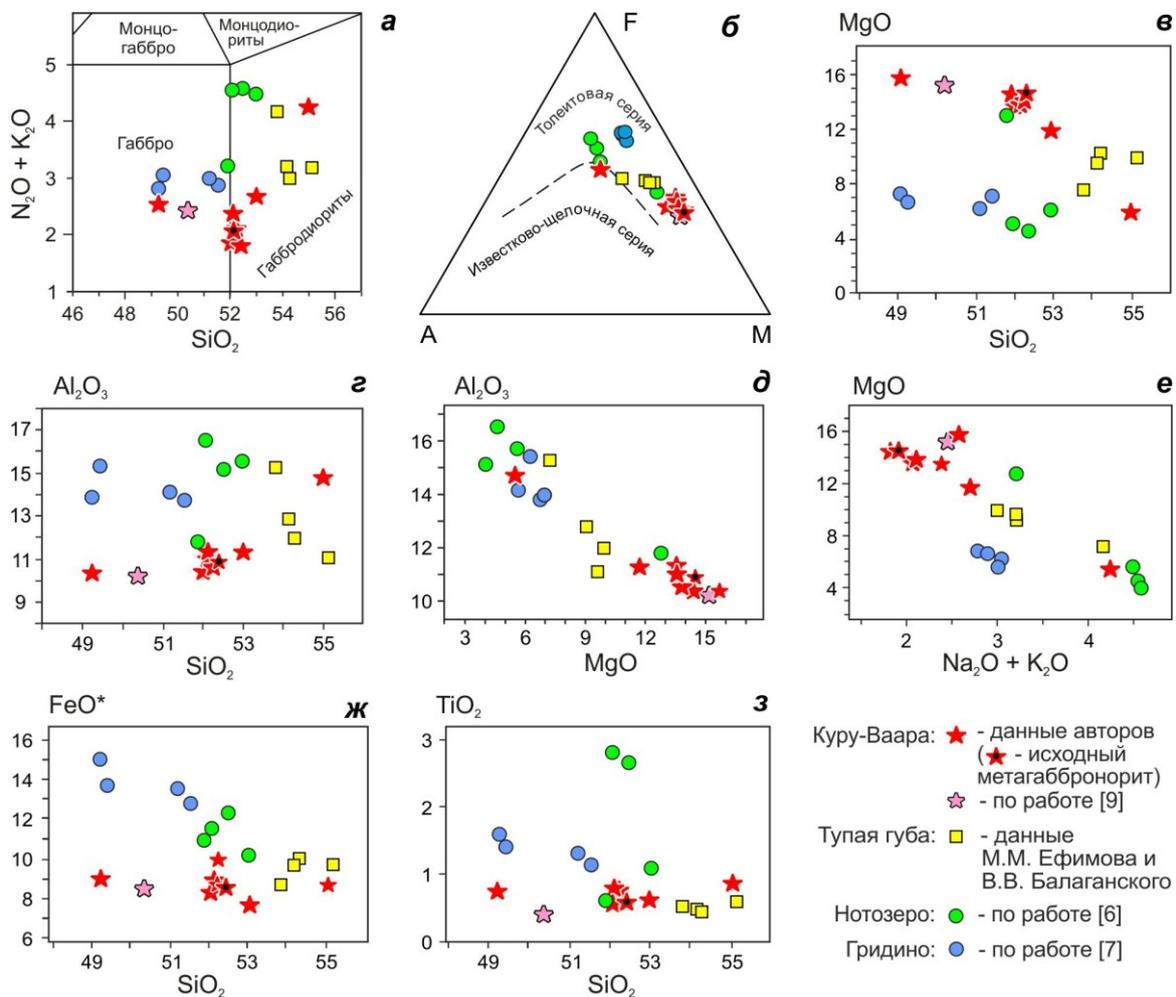


Рис. 4. Петрохимические дискриминационные (а–б) и вариационные (в–з) диаграммы для архейских интрузивных пород Беломорья (мас. %): а — TAS (по работе [33]); б — А-Ф-М (по работе)

Таблица 3

Содержание главных элементов (мас. %) в архейских плутонических основных породах Беломорской провинции

Номер образца	анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	H ₂ O	п.п.л.	Сумма
		P-14-7-1	1	52,13	0,81	11,00	0,14	8,84	—	0,21	13,59	8,15	1,77	0,61	0,04	0,41	—
P-14-7-3	2	52,25	0,77	10,54	0,33	9,74	—	0,19	13,83	8,31	1,48	0,63	0,05	0,24	—	1,02	99,38
P-14-7-7	3	52,05	0,57	10,44	0,86	7,65	—	0,20	14,49	8,93	1,54	0,32	0,04	0,16	—	2,34	99,59
P-14-7-10	4	52,43	0,60	10,86	0,86	7,92	—	0,18	14,54	8,79	1,40	0,41	0,02	0,28	—	1,00	99,20
P-14-13-1	5	53,02	0,61	11,30	1,64	6,37	—	0,17	11,72	9,43	2,18	0,50	0,01	0,23	—	2,34	99,59
P-14-13-7	6	52,15	0,56	11,34	1,55	7,57	—	0,21	13,56	9,42	1,64	0,43	0,02	0,16	—	0,92	99,53
P-16-17-2	7	49,28	0,75	10,37	1,53	7,86	—	0,18	15,78	8,08	1,58	0,96	0,07	0,17	—	2,64	99,25
P-16-18-1	8	55,01	0,86	14,76	2,15	6,82	—	0,13	5,47	8,02	3,40	0,86	0,15	0,12	—	1,48	99,23
KV-711/1	9	50,40	0,41	10,20	—	—	8,63	0,18	15,20	10,20	1,58	0,85	0,04	—	—	1,00	98,69
T-252	10	54,18	0,48	12,77	1,46	8,59	—	0,22	9,17	7,46	2,54	0,66	0,10	0,28	—	1,63	99,54
T-264	11	55,14	0,59	11,06	2,46	7,68	—	0,15	9,67	7,85	2,47	0,71	0,10	0,35	—	1,52	99,75
T-266	12	54,29	0,44	11,94	2,41	7,83	—	0,17	9,92	8,13	2,31	0,68	0,09	0,22	—	1,54	99,97
T-277	13	53,81	0,53	15,27	1,19	7,74	—	0,15	7,23	8,22	3,33	0,84	0,09	0,17	—	0,87	99,44
3B	14	52,09	2,79	16,49	—	11,60	—	0,16	4,61	7,67	3,66	0,89	0,14	—	—	—	100,10
2	15	52,49	2,64	15,13	—	—	12,47	0,11	4,01	7,13	3,71	0,87	—	—	—	—	98,56
3	16	53,00	1,09	15,71	—	—	10,23	0,18	5,62	8,03	3,80	0,68	—	—	—	—	98,34
4	17	51,92	0,61	11,79	—	—	11,02	0,17	12,77	6,85	2,43	0,78	—	—	—	—	98,34
SUP-3-12	18	51,22	1,27	14,12	3,42	10,48	—	0,22	5,63	8,94	2,42	0,57	0,16	—	0,05	1,02	99,52
SUP-6-1	19	51,56	1,14	13,84	1,22	11,73	—	0,23	6,68	9,43	2,37	0,50	0,03	—	0,04	1,10	99,87
Gr-70/04-1	20	49,28	1,59	13,91	2,50	12,78	—	0,24	6,85	8,15	2,25	0,56	0,21	—	0,15	1,13	99,60
Gr-69/04-5	21	49,46	1,41	15,32	4,10	10,05	—	0,24	6,24	8,44	2,63	0,42	0,22	—	0,19	1,09	99,81

Примечания. Районы отбора образцов: 1–9 — карьер Куру-Ваара; 1, 2, 4–6 — габбро-амфиболит, 3 — реликтовый метагаббронорит в габбро-амфиболите (1–8 — авторские данные), 9 — габбро-амфиболит (данные из работы [9]); 10–13 — район губы Тулой; 10 — гранатовый амфиболит по габбро, 11–13 — метагаббро (данные М. М. Ефимова и В. В. Балаганского); 14–17 — район оз. Нотозеро; 14 — метагаббро, 15, 16 — кварцевое габбро, 17 — высокомагнетизальное габбро (15–17 — средние значения для 3, 8 и 4 анализов соответственно, данные из работы [6]); 18–21 — район с. Гридино, габброиды и амфиболиты по ним (данные из работы [7]).

Анализы 1–8 и 10–13 выполнены в химико-аналитической лаборатории ГИ КНЦ РАН соответственно в 2014–2016 и 1983 гг. атомно-абсорбционным (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, MnO), эмиссионным (K₂O, Na₂O), колориметрическим (TiO₂, P₂O₅), объемным (CO₂, FeO) и весовым (H₂O, п.п.л.) методами по одной навеске породы после разложения путем ее сплавления с бурой и содой. Аналитическая погрешность для Fe₂O₃ при содержании в породе 0,10–1,00 мас. % составляла ~17 %, при содержании 1,00–10,0 мас. % — 7 %, аналитическая погрешность для FeO равнялась ~6,5 %, у всех остальных элементов: для концентрации 1–10 % — 3,5 %, для концентрации >10 % — 1,5 %.

Содержание рассеянных и редкоземельных элементов (ppm)
в архейских плутонических основных породах Беломорской провинции

Элемент	P-14-7-7	P-14-7-10	KV-711/1	Зв	2	3	4	SUP-3-12	SUP-6-1	Gr-70/04-1	Gr-69/04-5
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cr	–	–	1570	134	109	211	983	111	111	293	198
Ni	–	–	391	49	31	72	282	161	182	198	139
Co	–	–	–	43	45	43	58	62	64	56	41
Sc	29	25,3	30,2	–	–	–	–	45	43	39	33
V	–	–	161	304	340	189	164	419	436	347	279
Cu	–	–	–	–	–	–	–	128	143	167	37
Pb	7,08	4,71	–	15	10	10	12	5	16	6	4
Zn	–	–	–	–	–	–	–	115	109	107	272
Mo	–	–	–	–	–	–	–	2,89	3,52	3,67	1,02
As	–	–	–	–	–	–	–	0,6	0,97	0,85	0,88
Ag	–	–	–	–	–	–	–	0,3	1,2	0,5	0,4
Rb	8,82	11,1	21	14	8	10	31	18	14	14	10
Cs	4,26	0,54	–	–	–	–	–	0,49	0,21	0,32	0,23
Ba	100	134	223	141	<147	<171	262	238	203	196	154
Sr	125	125	143	388	396	361	217	203	184	169	172
Ga	12,7	13,2	–	–	–	–	–	23	21	19	17
Ta	0,19	0,31	0,14	–	–	–	–	0,41	0,34	0,56	0,33
Nb	0,31	0,56	2,27	7	10	7	6	6,5	5,5	8,3	5,8
Hf	1,07	0,93	1,00	–	–	–	–	2,46	2,11	2,93	1,93
Zr	28,7	24,4	34,2	97	106	76	74	82	72	112	76
Y	8,84	9,12	9,00	16	23	17	14	35	29	35	28
Th	1,74	1,57	1,05	5	–	–	–	3,15	2,67	2,12	2
U	0,33	0,35	0,29	–	–	–	–	0,20	0,78	–	–
La	6,74	6,33	3,79	–	–	–	–	13,38	11,15	13,99	10,46
Ce	14,3	14,2	8,38	–	–	–	–	30,81	26,57	32,4	27,37
Pr	1,77	1,74	1,13	–	–	–	–	4,04	3,31	4,21	3,72
Nd	7,79	7,24	4,91	–	–	–	–	17,68	14,62	18,35	16,38
Sm	1,79	1,75	1,23	–	–	–	–	4,64	3,91	4,27	3,61
Eu	0,55	0,56	0,42	–	–	–	–	1,49	1,27	1,23	1,03
Gd	2,04	2,00	1,45	–	–	–	–	5,17	4,37	4,77	3,91
Tb	0,35	0,34	0,22	–	–	–	–	0,90	0,75	0,80	0,68
Dy	2,13	2,09	1,53	–	–	–	–	5,66	4,85	5,35	4,30
Ho	0,46	0,46	0,33	–	–	–	–	1,27	1,05	1,11	0,9
Er	1,36	1,38	0,92	–	–	–	–	3,34	2,78	3,19	2,63
Tm	0,20	0,20	0,13	–	–	–	–	0,48	0,39	0,47	0,39
Yb	1,29	1,30	0,86	–	–	–	–	3,09	2,60	3,08	2,46
Lu	1,19	0,20	0,14	–	–	–	–	0,46	0,40	0,49	0,39

Примечания. 1–3 — карьер Куру-Ваара: 1 — габбро-амфиболит, 2 — реликтовый метагаббронорит в габбро-амфиболите (авторские данные, анализ выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ELAN 9000 DRC-е в ИХТРЭМС КНЦ РАН), 3 — габбро-амфиболит (данные из работы [9]); 4–7 — район оз. Нотозеро: 4 — метагаббро, 5, 6 — кварцевое габбро, 7 — высокомагнезиальное габбро (5–7 — средние значения для 6, 13 и 7 анализов соответственно (данные из работы [6])); 8–11 — район с. Гридино, габброиды и амфиболиты по ним (данные из работы [7]).

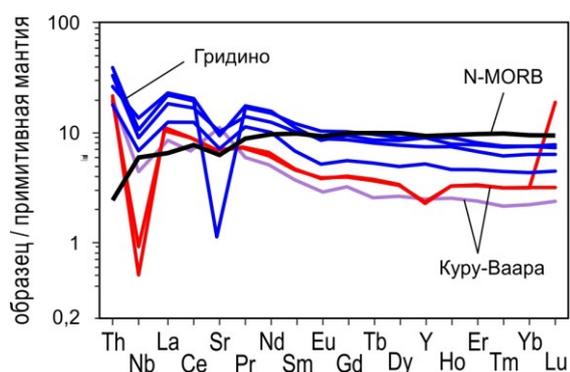


Рис. 5. Распределение редких земель и некоторых рассеянных элементов в архейских плутонических породах Беломорья и базальтах срединно-океанических хребтов (N-MORB; базальты и нормирование по работе [39])

Распределения редкоземельных и некоторых рассеянных элементов в метагаббро и габбро-амфиболите в целом одинаковы (рис. 5), за исключением Lu (0,20 и 1,19 мас. % соответственно, табл. 4). Учитывая, что содержания Lu во всех других анализах архейских плутонических пород Беломорья, включая габбро-амфиболит Куру-Ваары из работы [9], лежат в интервале 0,14–0,49 мас. %, мы склонны считать количество 1,19 мас. % завышенным в результате аналитической ошибки. График распределения в целом слабонаклонный и ровный при отношении La_N/Yb_N , равном 5,2 в габбро-амфиболите и 4,9 в метагаббро. Он нарушен только сильной отрицательной ниобиевой аномалией и слабой отрицательной иттриевой. В габбро-амфиболите (из работы [9]) при таком же характере распределения ($La_N/Yb_N = 4,41$)

наблюдается слабая отрицательная ниобиевая и слабая положительная стронциевая аномалии, а иттриевая аномалия отсутствует. Габбро-амфиболиты обогащены редкими землями относительно примитивной мантии примерно в 10 раз по La и в три раза по Lu (рис. 5).

Обсуждение

Петрографическая классификация. Реликты магматического парагенезиса клиноэнстатит + энстатит + лабрадор в породах, исходных для габбро-амфиболитов, позволяют определить их, согласно работе [35], как габбронориты. Магматический генезис пироксенов подтверждается тем, что они содержат примесь NiO (до 0,09 мас. %), характерную для магматических разностей и отсутствующую в метаморфических [29, 30]. Кристаллы этих пироксенов, и особенно ортопироксена, отличаются большой степенью идиоморфизма и большим содержанием в их отдельных внутренних частях мельчайших включений, которые делают эти части замутненными. По нашим многолетним наблюдениям, эти черты принципиально отличают магматические пироксены от метаморфических: последние образуют незамутненные прозрачные зерна при отсутствии или слабом их идиоморфизме.

Возраст. Уплотненные тела габбро-амфиболитов и наблюдаемая в них слабо развитая сланцеватость залегают согласно с плоскостными текстурами серых гнейсах и конформных им пластовых телах амфиболитов. Эти рассланцованные гнейсы и амфиболиты прорваны оливиновыми габброноритами (рис. 2, а) с возрастом 2,44 млрд лет [25], что определяет возраст их рассланцевания как архейский. В архейской истории амфиболито-серогнейсовой матрицы выделяется два периода деформации, сопряженной с метаморфизмом, причем второй из них характеризуется сильным рассланцеванием и милонитизацией [15]. Нами было установлено текущее положение габбро-амфиболитов относительно именно сильно рассланцованных и милонитизированных серых гнейсов (рис. 2б, в), поэтому внедрение габбро-амфиболитов отнесено к заключительным этапам второго архейского периода деформации и метаморфизма.

Таким образом, габбро-амфиболиты должны быть моложе вмещающих их серых гнейсов с возрастом 2,80 млрд лет [9]. В последних установлено термальное событие с возрастом 2,69 млрд лет [9], который в пределах аналитических погрешностей идентичен возрасту метаморфизма габбро Нотозера [6]. Определения времени внедрения архейских габброидов Тупой губы, Нотозера и Гридино укладываются в интервал 2,69–2,73 млрд лет [6, 7, 12], который

отвечает завершающей стадии архейского развития парагнейсов и серых гнейсов Беломорья, образовавшихся и испытавших первый метаморфизм 2,76–2,88 млрд лет назад [1, 12, 16, 36–38]. Поэтому мы предполагаем, что габбро-амфиболиты внедрились в то же время, что и остальные архейские базитовые интрузии Беломорья, то есть 2,69–2,73 млрд лет назад.

Метаморфизм. Одни из первых метаморфических преобразований габброноритов выразились в развитии гранатовых кайм вокруг пироксенов на их границах с плагиоклазом первичного магматического минерального парагенезиса. Второй этап метаморфизма привел к преобразованию архейских коронитовых метагабброноритов в габбро-амфиболиты при полном замещении коронитового граната амфиболом и биотитом, но при сохранении в целом габбровой структуры породы. Последнее указывает на протекание этого метаморфизма в условиях, близких к статическим. Учитывая согласованность уплощенных габбро-амфиболитовых тел с архейской структурой амфиболитосерогнейсовой матрицы, первый и второй этапы метаморфизма следует отнести к архею. Самые поздние преобразования, сопряженные с деформацией, были связаны с развитием рассланцевания вдоль контактов тел габбро-амфиболитов и в редких зонах внутри тел. Эта деформационно-метаморфическая переработка привела к последующему преобразованию габбро-амфиболитов в обычные по внешнему виду амфиболиты без каких-либо следов габбровой структуры. Важно подчеркнуть, что в хорошо рассланцованных разностях амфиболитов отсутствует гранат. Мы предполагаем, что этот третий этап метаморфизма следует связывать с палеопротерозойскими событиями (скорее всего, самыми поздними).

Химический состав. Наши данные по рассматриваемым породам Куру-Ваары и их сравнение с архейскими плутоническими базитами Беломорья подтверждают вывод о том, что они являются магнезиальными разностями базитов [8, 9]. По содержанию кремнезема и щелочей они определяются как основные породы нормального ряда щелочности. На диаграмме TAS (рис. 4, а) почти все они, а также габброиды Нотозера лежат в переходной зоне между габбро и габброидоритами. При этом к габброидоритам относятся все габброиды Тупой губы, которые по содержанию главных элементов наиболее близки габбро-амфиболитам Куру-Ваары (рис. 4, а–з). Архейские базиты каждого участка в целом группируются в отдельные кластеры.

Все архейские базиты Беломорья принадлежат толеитовой серии, и на диаграмме А-Ф-М габбро-амфиболиты являются крайними, наиболее магнезиальными разностями (рис. 4, б). Количество MgO в 8 из 9 образцов габбро-амфиболитов лежат в интервале 11,72–15,78 мас. % (табл. 3) при среднем 14,09 мас. % ($n = 8$). Габброиды же Тупой губы содержат 7,23–9,92 мас. % ($n = 4$, среднее 9,00 мас. %), Гридино — 5,63–6,85 мас. % ($n = 4$, среднее 6,35 мас. %) и Нотозера — 4,01–5,62 мас. % (интервал средних значений). Единственным исключением является кумулятивное габбро Нотозера с концентрацией MgO, равной 12,77 мас. % (табл. 3).

Габбро-амфиболиты отличает низкое содержание в них Al_2O_3 — в среднем 11,20 мас. % ($n = 9$) при колебаниях от 10,20 до 14,76 мас. % — в других архейских базитах оно варьирует от 11,06 до 16,49 мас. % (рис. 4, в). Количество суммарного железа также более низкое — в среднем 8,94 мас. % при вариациях 8,01–10,07 мас. %, тогда как в других породах оно меняется от 8,81 до 15,03 мас. %. Концентрации Al_2O_3 , FeO^* и TiO_2 в габбро-амфиболитах практически не меняются при увеличении SiO_2 . Общим для всех рассматриваемых пород является уменьшение количества алюминия с возрастанием магния (рис. 4, г). В то же время для них отмечается уменьшение количества магния с увеличением суммы щелочей, при этом габброиды Гридино лежат в стороне от тренда, образованного породами Куру-Ваары, Тупой губы и Нотозера (рис. 4, з).

По распределению редких земель и рассеянных элементов габбро-амфиболиты принципиально отличаются от базальтов срединно-океанических хребтов (согласно работе [39], последние имеют $La_N/Yb_N = 0,67$ при 4,4–5,2 в габбро-амфиболитах). По сравнению с этими

базальтами они обогащены Th и очень незначительно La, на порядок обеднены Nb и в меньшей степени редкими землями, начиная с Nd (рис. 5). Схожее распределение имеют и архейские габброиды Гридино [7], отличающиеся более слабыми отрицательными аномалиями по Nb и Sr при большей степени обогащения всеми другими элементами (рис. 5), а также меньшей степенью дифференциации редких земель ($La_N/Yb_N = 2,9-3,1$). Данные по другим интрузиям отсутствуют.

Тектоническая обстановка

Для раннедокембрийских структур при отсутствии надежных геологических реперов данные по редким землям и рассеянным элементам изверженных пород часто являются единственными индикаторами возможных тектонических условий их образования. Для архейских габбро-амфиболитов важным указанием на условия образования материнского расплава является их связь с санукитоидами, слагающими два тела внутри самой крупной габбро-амфиболитовой интрузии (рис. 2, *a*) и, согласно работе [8], внедрившимися одновременно с габбро-амфиболитами. Относительно слабое расщепление и почти полное отсутствие мигматизации этих пород согласуется с их внедрением на одном и том же заключительном этапе архейской истории региона. Формирование санукитоидов обычно связывается с субдукцией [40], что позволяет предполагать эту тектоническую обстановку и для габбро-амфиболитов. Формирование санукитоидов на Балтийском щите относится к интервалу $\sim 2,72-2,74$ млрд лет [2], которому отвечают наиболее ранние проявления плутонического базитового магматизма Беломорья и, скорее всего, внедрение габбро-амфиболитов Куру-Ваары.

С этим предположением согласуются данные по редким землям и рассеянным элементам в габбро-амфиболитах и других архейских плутонических базитах Беломорья. Изученные нами габбро-амфиболиты на диаграмме Nb/Y–Zr/Y попадают в область неплюмовых источников, а внутри нее в поле нормальных базальтов срединно-океанических хребтов (рис. 6, *a*). Точка габбро-амфиболита из работы [9] располагается на этой же диаграмме на границе между областями плюмовых и неплюмовых источников в сочленении полей нормальных базальтов срединно-океанических хребтов, платобазальтов и базальтов островных и магматических дуг. При этом она находится на середине тренда, образованного базитами Гридино и Нотозера, причем основная часть тренда проходит по полю платобазальтов, а меньшая — по полю дуговых базальтов (рис. 6, *a*). Однако данные по редким землям и некоторым рассеянным элементам для этих пород (табл. 4, рис. 5) противоречат их происхождению из расплава, кристаллизация которого дает базальты срединно-океанических хребтов.

На диаграмме Ti–Zr габбро-амфиболиты Куру-Ваары лежат в поле низкокальциевых базальтов, а базиты Гридино и Нотозера — в поле известково-щелочных (рис. 6, *b*). Все эти базиты образуют три группы, лежащие на одной линии, и, согласно работе [36], для них наиболее вероятно происхождение в обстановках, связанных с магматическими и островными дугами. На дискриминационной диаграмме Th–Hf–Ta из работы [37] они ложатся в поле дуговых известково-щелочных базальтов (рис. 6, *в*). Если указанные выше диаграммы построены по данным для современных тектонических обстановок, то три из используемых ниже диаграмм (рис. 6, *г–е*) базируются на данных для палео- и мезопротерозоя и более подходят для анализа неархейских базитов. На диаграммах отношений U/Nb, Th/Nb и Nb/Yb против La/Nb неархейские базиты Куру-Ваары и Гридино образуют тренды, совпадающие с трендом и наращивающие его для палеопротерозойских базитов, происхождение которых связывается с субдукцией (рис. 6, *г–е*). Мезопротерозойские базиты рифтогенной же природы образуют на этих диаграммах отдельные изолированные поля. Наконец, на диаграмме Th/La–Sm/La базиты Куру-Ваары и Гридино образуют группу, лежащую в полях базитов острова Ява и Алеутских островов, связанных с субдукцией (рис. 6, *ж*). При этом куру-ваарские базиты располагаются далеко в стороне от базитов, которые являются производными плавления мантии при отсутствии

связи плавления с субдукцией. Интересно, что габбро-амфиболиты Куру-Ваары образуют на этой диаграмме компактную группу рядом с точкой для осадков зон субдукции.

Наконец, наиболее подходящей является диаграмма Th/Yb-Nb/Yb (рис. 6, з), предназначенная для интерпретации именно архейских основных пород. На ней все базиты Куру-Ваары и Гридино располагаются выше тренда основных пород, являющихся результатом плавления мантии вне связи с зонами субдукции. Устанавливаемое на этой диаграмме обогащение базитов Th и обеднение Nb относительно океанических базальтов также фиксируется на диаграмме распределения редких земель и рассеянных элементов (рис. 5) и является, согласно работе [45], свидетельством контаминации мантийных расплавов материалом континентальной коры. В свою очередь, это прямо указывает на рециклинг континентальной коры — возвращение ее обратно в мантию и смешивание с мантийным веществом, единственным удовлетворительным механизмом которого является субдукция.

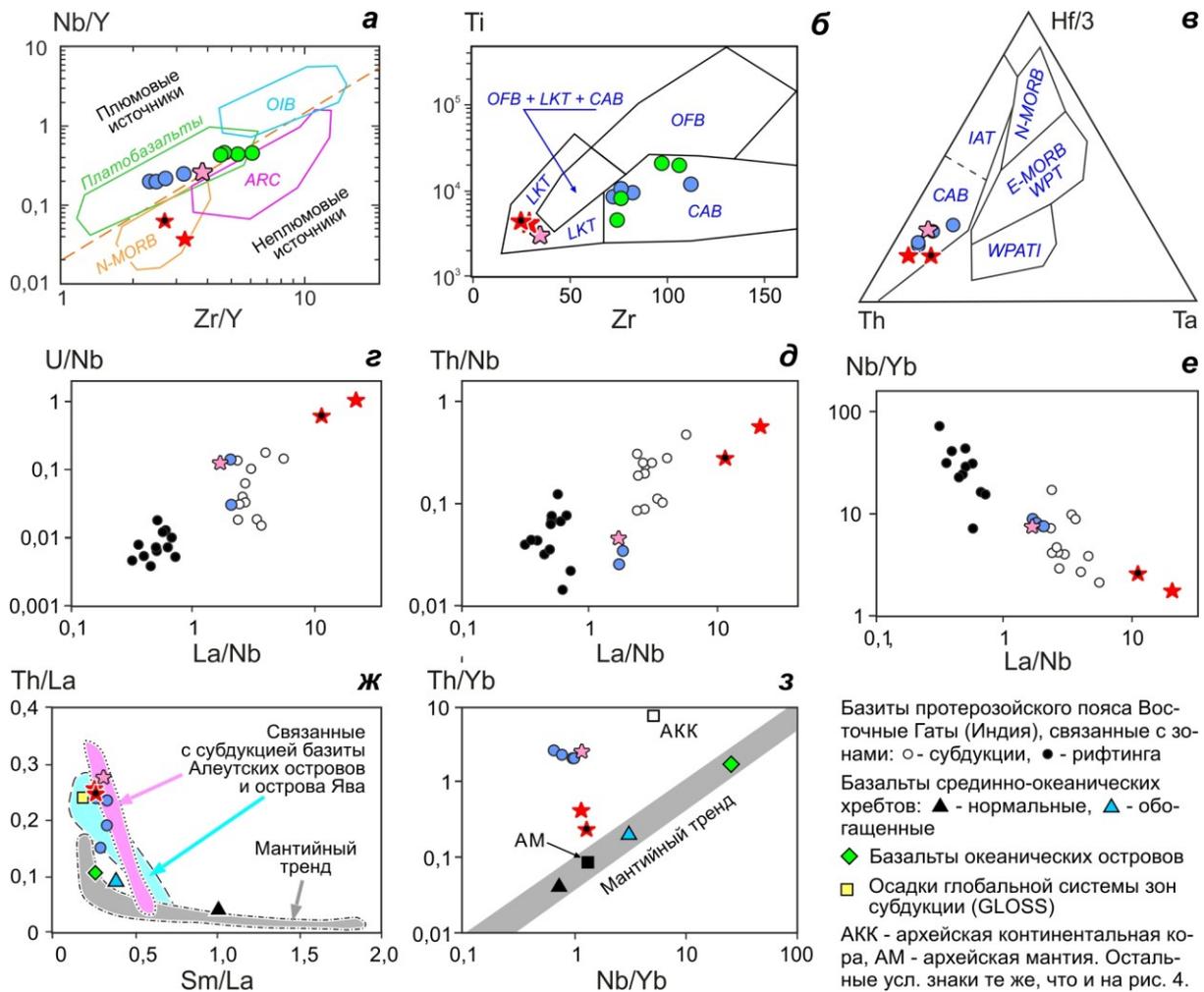


Рис. 6. Геохимические дискриминационные диаграммы (ppm):

- (а) — Nb/Y-Zr/Y (по работе [41]); (б) Ti-Zr (по работе [42]); (в) — Th-Hf/3-Ta (по работе [43]);
 (г) — U/Nb-La/Nb; (д) Th/Nb-La/Nb; (е) — Nb/Yb-La/Nb; (ж) Th/La-Sm/La; (з-ж) — по работе [44];
 (з) — Th/Yb-Nb/Yb (по работе [45]). АКК — архейская континентальная кора, АМ — архейская мантия,
 ARC — базальты, связанные с магматическими и островными дугами, CAB — известково-щелочные базальты,
 E-MORB и N-MORB — соответственно, обогащенные и нормальные базальты срединно-океанических хребтов,
 LKT — низкокальциевые толеиты, OFB — базальты океанического дна, OIB — базальты океанических островов;
 WPT и WPATI — толеитовые и щелочные внутриплитные базальты и их дифференциаты соответственно

Таким образом, наиболее вероятной обстановкой образования архейских базитов Куру-Ваары и Гридино является обстановка магматической или островной дуги, которая существовала на заключительных стадиях субдукционно-аккреционного становления континентальной коры Беломорской провинции [2]. Базиты Нотозера и Тупой губы, скорее всего, также образовались в дуговой обстановке и в таком случае все эти интрузии маркируют зону субдукции. Эта зона расположена параллельно северо-западному простиранию Беломорской провинции (рис. 1, *a*) и слагающих ее архейских толщ. Ее существование уже обосновывалось в литературе, причем не только на основе геохимических данных, но и на находках архейских офиолитов и эклогитов [2, 8, 9, 16, 17, 19, 21, 22].

Выводы

1. Структурное положение интрузий габбро-амфиболитов принципиально отличается от такового интрузии оливиновых габброноритов (друзитов) Куру-Ваары с возрастом 2,44 млрд лет и говорит об их становлении на последних этапах архейской истории Беломорской провинции.

2. Породами, исходными для габбро-амфиболитов Куру-Ваары, являются габбронориты. Одно из первых метаморфических преобразований габброноритов выразилось в формировании гранатовых кайм вокруг темноцветных минералов в статических условиях, которые сохранялись в центральных частях интрузий при последующем преобразовании габброноритов в габбро-амфиболиты. Рассланцевание краевых частей интрузий, а также в редких узких зонах внутри интрузий отвечает заключительным этапам их деформации и метаморфизма.

3. Сопоставление габбро-амфиболитов с другими архейскими плутоническими базитами Беломорья позволяет ограничить их возраст рамками 2,69 и 2,73 млрд лет, при этом они являются наиболее магнезиальными и наименее глиноземистыми разновидностями этих пород.

4. По главным элементам габбро-амфиболиты и другие архейские плутонические базиты принадлежат толеитовой серии. Данные по редкоземельным и рассеянным элементам противоречат происхождению габбро-амфиболитов и базитов Гридино из основных расплавов срединно-океанических хребтов. Скорее всего, они возникли в обстановке магматической или островной дуги, существовавшей на заключительных стадиях субдукционно-аккреционного становления континентальной коры Беломорской провинции. Такая же обстановка наиболее вероятна и для других архейских плутонических базитов Беломорья. Все эти породы, а также архейские эклогиты и офиолиты Беломорской провинции маркируют архейскую зону субдукции.

Благодарности

Полевые работы в карьере Куру-Ваара проводились с любезного разрешения С. Н. Халлиуловой в 2014 году и А. Ю. Орлова и И. В. Калинко в 2016 году. И. А. Горбунов, Т. В. Картушинская и С. В. Мудрук оказали большую помощь во время полевых работ и при подготовке рукописи. Л. Г. Балашова, Л. И. Константинова, А. В. Саргасова и М. Г. Тимофеева выполнили силикатный химический анализ пород (обр. 1–8 в табл. 2), а Е. Э. Савченко и Е. А. Селиванова — микронзондовый и рентгеноструктурный анализ минералов. А. В. Степанова высказала конструктивные замечания к материалам, положенным в основу работы. В. И. Пожиленко и О. С. Сибелев внимательно прочитали рукопись и сделали предложения по уточнению отдельных ее положений и терминологии. Всем им авторы глубоко благодарны. Авторы особо признательны А. А. Щипанскому за постоянное плодотворное обсуждение вопросов геологии как участка Куру-Ваара, так и всей Беломорской провинции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с. 2. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки / А. И. Слабунов [и др.] // Геотектоника. 2006. № 6. С. 1–29. 3. The Lapland-Kola Orogen: Palaeoproterozoic collision and accretion of the northern Fennoscandian lithosphere / J. S. Daly [et al.] // European Lithosphere Dynamics. Geol. Soc. London, Memoirs, 2006. Vol. 32. P. 579–598. 4. Степанов В. С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука. 1981. 216 с. 5. U-Pb геохронология беломорид

- района Тупой губы оз. Ковдозеро (северная Карелия) / В. В. Балаганский [и др.] // Известия АН СССР. Сер. геол. 1990. № 6. С. 40–51. **6.** Архейский магматизм района оз. Нотозера северо-западного Беломорья: изотопная геохронология и петрология / С. Б. Лобач-Жученко [и др.] // Петрология. 1995. Т. 3, № 6. С. 593–621. **7.** Неоархейские габброиды Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: геология, состав, геохронология / А. И. Слабунов [и др.] // ДАН. 2008. Т. 422, № 6. С. 793–797. **8.** Эклогиты Беломорского пояса (Кольский полуостров): геология и петрология / А. А. Щипанский [и др.] // Геология и геофизика. 2012а. Т. 53, № 1. С. 3–29. **9.** Щипанский А. А., Ходоревская Л. И., Слабунов А. И. Геохимия и изотопный возраст эклогитов Беломорского пояса (Кольский полуостров): свидетельства о субдуцировавшей архейской океанической коре // Геология и геофизика. 2012б. Т. 53, № 3. С. 341–364. **10.** Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 5–11. **11.** Пожиленко В. И. Метагипербазиты Енско-Риколатвинской зоны северо-западного Беломорья // Базит-гипербазитовый магматизм главных структурно-формационных зон Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1987. С. 83–87. **12.** Геохронология беломорид: интерпретация многостадийной геологической истории / Е. В. Библикова [и др.] // Геохимия. 1993. № 10. С. 1393–1411. **13.** Беломорский комплекс северной Карелии и юго-запада Кольского полуострова / К. А. Шуркин [и др.]. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 308 с. **14.** Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / F. P. Mitrofanov [et al.]. Apatity: GI KSC RAS, 1995. 144 p. **15.** Archaean Kuru-Vaara eclogites in the northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield: Crustal architecture, timing, and tectonic implications / V. Balagansky [et al.] // Inter. Geol. Rev. 2015. Vol. 57, no. 11–12. P. 1543–1565. **16.** Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia / M. V. Mints [et al.] // Geology. 2010. Vol. 38. P. 739–742. **17.** The Salma Eclogites of the Belomorian Province, Russia: HP/UHP Metamorphism Through the Subduction of Mesoarchean Oceanic Crust / A. N. Konilov [et al.] // Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 25 Years after the Discovery of Coesite and Diamond. Amsterdam, etc.: Elsevier, 2011. P. 623–670. **18.** Пожиленко В. И., Кониллов А. Н., Ван К. В. Эклогиты северо-восточной части Ёнского сегмента Беломорья: новые данные // Региональная геология, минералогия и полезные ископаемые Кольского полуострова: тр. XIII Всерос. Ферсмановской науч. сессии Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2016. С. 118–122. **19.** Сидоров М. Ю., Щипанский А. А. Фазы углерода в УНР эклогитах и эклогитовых породах Беломорской провинции: результаты исследований методом рамановской спектроскопии // Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем: материалы науч. конф. и путеводитель науч. экскурсий. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. 2017. С. 224–228. **20.** Щипанский А. А., Сидоров А. А., Балаганский В. В. УНР эклогитовые породы Беломорского пояса Балтийского щита: доказательства глубокой субдукции в архее // Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем: материалы науч. конф. и путеводитель науч. экскурсий. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. 2017. С. 283–286. **21.** Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит / О. И. Володичев [и др.] // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631. **22.** Metamorphic PT path and zircon U-Pb dating of Archean eclogite association in Gridino complex, Belomorian province, Russia / X. Li [et al.] // Precam. Res. 2015. Vol. 268. P. 74–96. **23.** U-Pb-возраст и геохимия цирконов из салминских эклогитов (месторождение Куру-Ваара, Беломорский пояс) / С. Г. Скублов [и др.] // ДАН. 2010. Т. 432, № 5. С. 668–675. **24.** Первые определения Lu-Hf-возраста гранатов из эклогитов Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит, Россия) / Д. Хервартиц [и др.] // ДАН. 2012. Т. 443, № 2. С. 221–224. **25.** Мельник А. Е. Эклогиты северо-западной части Беломорского подвижного пояса: геохимическая характеристика и время метаморфизма: дис. ... к. г.-м. н. СПб., 2015. 196 с. **26.** Neoproterozoic granulite-facies metamorphism in Uzkaia Salma eclogite-bearing mélange, Belomorian Province (Russia) / X. Li [et al.] // Precam. Res. 2017. Vol. 294. P. 257–283. **27.** The metamorphic evolution of Paleoproterozoic eclogites in Kuru-Vaara, northern Belomorian Province, Russia: Constraints from P–T pseudosections and zircon dating / F. L. Liu [et al.] // Precam. Res. 2017. Vol. 289. P. 31–47. **28.** Nomenclature of pyroxenes / N. Morimoto [et al.] // Am. Mineralogist. 1988. Vol. 73. P. 1123–1133. **29.** Дур У. А., Хауи Р. А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 2. М.: Мир, 1965. 406 с. **30.** Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. Rock-forming Minerals: Double-Chain Silicates // The Geological Society. London. 1997. Vol. 2B. 764 p. **31.** Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names / E. Leake [et al.] // Mineral. Mag. Vol. 61. 1997. P. 295–321. **32.** True and brittle micas: composition and solid-solution series / G. Tischendorf [et al.] // Mineral. Mag. 2007. Vol. 713. P. 285–320. **33.** Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system // Earth Science Reviews. 1994. Vol. 37. P. 215–224. **34.** Irvine T. N., Baragar W. R. A. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks // Can. J. Earth Sci. 1971. P. 523–548. **35.** Магматические горные породы / Е. Д. Андреева [и др.] // Классификация, номенклатура, петрография. Ч. 1. М.: Наука, 1985. 368 с. **36.** Balashov Yu. A., Mitrofanov F. P., Balagansky V. V. New geochronological data on Archaean rocks of the Kola Peninsula // Correlation of Precambrian Formations in the Kola-Karelian Region and Finland. Apatity: KSC RAS, 1992. P. 3–34. **37.** Ранний магматизм Беломорского подвижного пояса, Балтийский щит: латеральная зональность и изотопный возраст / Е. В. Библикова [и др.] // Петрология. 1999. Т. 7, № 2. С. 115–140. **38.** Морозова Л. Н., Баянова Т. Б., Серов П. А. Основные этапы гранитообразования в архее северо-востока Балтийского щита (на примере полигона Воче-Ламбина) // Литосфера. 2011. № 6. С. 14–26. **39.** Hofmann A. W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // Earth Planet. Sci. Lett. 1988. Vol. 90. P. 297–314. **40.** Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective / J. Halla [et al.] // Crust–Mantle Interactions and Granitoid Diversification: Insights from Archaean Cratons.

Geol. Soc., London, Spec. Publ. 2017. Vol. 449. P. 1–18. **41.** *Condie K. C.* High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 491–504. **42.** *Pearce J. A., Cann J. R.* Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1973. Vol. 19. P. 290–300. **43.** *Wood D. A.* The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1980. Vol. 50. P. 11–30. **44.** *Kumar K. V., Rathna K., Leelanandam C.* Proterozoic subduction-related and continental rift-zone mafic magmas from the Eastern Ghats Belt, SE India: geochemical characteristics and mantle sources // *Current Science*. 2015. Vol. 108, no. 2. P. 184–197. **45.** *Pearce J. A.* Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. Vol. 100. P. 14–48.

Сведения об авторах

Балаганский Виктор Валентинович — доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геологического института КНЦ РАН; профессор Мурманского государственного технического университета

E-mail: balagan@geoksc.apatity.ru

Рауд Маргарита Юрьевна — инженер Геологического института КНЦ РАН

E-mail: mar-raud@yandex.ru

Сидоров Михаил Юрьевич — младший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru

Author Affiliation

Victor V. Balagansky — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Head of Laboratory of the Geological Institute of the KSC of the RAS, Professor at the Murmansk State Technical University

E-mail: balagan@geoksc.apatity.ru

Margarita Yu. Raud — Engineer of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: mar-raud@yandex.ru

Mikhail Yu. Sidorov — Junior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: sidorov@geoksc.apatity.ru

Библиографическое описание статьи

Балаганский, В. В. Архейские габбро-амфиболиты эколгитового участка Куру-Ваара, Беломорская провинция: геология, петрография, геохимия и происхождение / *В. В. Балаганский, М. Ю. Рауд, М. Ю. Сидоров* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 5–23.

Reference

Balagansky Victor V., Raud Margarita Yu., Sidorov Mikhail Yu. Archaean Gabbro-Amphibolites of the Kuru-Vaara Eclogite Study Area, Belomorian Province: Geology, Petrography, Geochemistry and Origin. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 3 (9), pp. 5–23. (In Russ.).