

УДК 552.48; 552.31 (234.851)

ГЕОХИМИЯ АМФИБОЛИТОВ ХАРБЕЙСКОГО ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)

Н. С. Уляшева

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

Изучены особенности распределения редких и редкоземельных элементов в амфиболитах харбейского метаморфического комплекса Полярного Урала – одного из крупнейших выступов нижнедокембрийского фундамента в пределах Уральской складчатой области. Среди паргасит-гастингситовых амфиболитов, распространенных в центральных частях комплекса, наблюдаются умеренно- и высокотитанистые породы с повышенным содержанием LILE и LREE $((La/Yb)_n - 1,33-3,80)$, схожие по составу с базальтами континентальных рифтов и островных дуг, а также низкотитанистые метавулканисты с низким содержанием LILE и LREE $((La/Yb)_n - 0,61-1,32)$, близкие по геохимическим особенностям к толеитам островных дуг и задуговых бассейнов. Впервые изученные барроизитовые амфиболиты западной части харбейского метаморфического комплекса отличаются по содержанию редких и редкоземельных элементов от паргасит-гастингситовых разновидностей. Для них характерны умеренные концентрации титана и более низкие концентрации LILE и LREE $((La/Yb)_n - 0,37-0,53)$. По составу они схожи с базальтами N-MORB, образовавшимися из деплетированного источника. Различия в химическом составе metabasalts связаны, скорее всего, с эволюцией магматического расплава в результате изменения глубины магмогенерации, степени частичного плавления материнского источника и влияния водного флюида.

Ключевые слова: амфиболиты; геохимия; харбейский метаморфический комплекс; Полярный Урал.

N. S. Ulyasheva. GEOCHEMISTRY OF AMPHIBOLITES OF THE KHARBEY METAMORPHIC COMPLEX (POLAR URALS)

The features of the distribution of trace and rare-earth elements were studied in amphibolites of the Kharbey metamorphic complex of the Polar Urals, one of the largest protrusions of the Lower Precambrian basement within the Urals folded region. Among the pargasite-hastingsite amphibolites in the central parts of the complex, there occur moderate and high-titanium rocks with elevated contents of LILE and LREE $((La/Yb)_n - 1.33-3.80)$, similar in composition to basalts of continental rifts and island arcs, as well as low-titanium metavolcanites with low contents of LILE and LREE $((La/Yb)_n - 0.61-1.32)$, which are geochemically similar to tholeiites of arcs and back-arc basins. The barroisitic amphibolites of the western part of the Kharbey metamorphic complex, which were studied for the first time, differ in the content of rare and rare-earth elements from the pargasite-hastingsite varieties. They contain moderate concentrations of titanium, lower amounts of LILE and LREE $((La/Yb)_n - 0.37-0.53)$, and are similar in composition to N-MORB basalts formed from a depleted source. The differences in the geochemical composition

of metabasalts are most likely associated with the evolution of magmatic melt as a result of changes in the depth of magma generation, the degree of partial melting of the mother source, and the influence of aqueous fluid.

Key words: amphibolites; geochemistry; Kharbey metamorphic complex; Polar Urals.

Введение

Харбейский метаморфический комплекс представляет собой выступ фундамента древней платформы, обрамляющийся верхнепротерозойскими и фанерозойскими толщами Полярного Урала. Комплекс состоит в основном из амфиболитов и гнейсов, уровень метаморфизма которых достигал высокотемпературной амфиболитовой фации умеренных и повышенных давлений [Уляшева, 2011]. Изучение условий формирования субстрата комплекса, основанное в первую очередь на геологических наблюдениях и частично на интерпретации петрогеохимических данных метаморфитов, не дало однозначного решения этой проблемы. Согласно работам разных исследователей, протолиты метаморфитов могли формироваться в трапповой провинции [Душин и др., 1983], в континентальной рифтогенной обстановке [Душин, 1997] или в островодужной системе [Голубева, Афонькин, 2006]. Ранее проведенное нами изучение содержания редких и редкоземельных элементов в паргасит-гастингситовых амфиболитах харбейского метаморфического комплекса показало, что породы могли образоваться в области задугового бассейна [Кузнецова, 2008].

Одним из надежных методов выявления геодинамических обстановок формирования субстрата метаморфических комплексов является изучение геохимических особенностей имеющихся среди них базитов или метабазитов, не претерпевших метасоматические изменения. Несовместимые редкие (литофильные (LILE), высокозарядные (HFSE)) и редкоземельные (REE) элементы ведут себя инертно при изохимическом метаморфизме [Макрыгина, 1981], а содержание их в породах основного состава является хорошим индикатором различных тектонических обстановок [Pearce, 1982; Condie et al., 2002].

В данной работе приводятся результаты изучения геохимических особенностей амфиболитов харбейского метаморфического комплекса, сформировавшихся по базальтам и андезибазальтам, значения содержания редких и редкоземельных элементов в которых получены с помощью ICP-MS метода. Впервые рассматриваются барруазитовые амфиболиты

западной части харбейского комплекса. Эти исследования позволили уточнить геодинамическую обстановку формирования субстрата пород, тем самым расширив представления о тектоническом развитии древних платформ.

Геологическая позиция харбейского метаморфического комплекса

Харбейский метаморфический комплекс находится в южной части одноименного блока в пределах Центрально-Уральского поднятия западной тектонической зоны Полярного Урала. С запада и северо-запада комплекс по надвиговой зоне граничит с верхнепротерозойскими отложениями няровейской серии, а с севера, востока и юга – с палеозойскими породами восточной тектонической зоны (рис. 1).

Согласно схеме IV Уральского межведомственного стратиграфического совещания снизу вверх в харбейском метаморфическом комплексе выделяют ханмейхойскую (амфиболиты, плагиогнейсы и кварциты), лапатюганскую (амфиболиты, гнейсы и мраморы) и париквасьшорскую (гнейсы, кристаллические сланцы и амфиболиты) свиты раннепротерозойского возраста [Стратиграфические..., 1994; Пыстина, Пыстин, 2002]. Переходы между свитами тектонические, иногда постепенные. Возраст комплекса принимается раннепротерозойским согласно имеющимся изотопным датировкам по цирконам из гранат-амфиболового гнейса – 1730 и 2220 млн лет [Краснобаев, 1986], а также по цирконам из гранат-двуслюдяного и гранат-биотитового гнейсов – 1765 и 2071 млн лет [Пыстина, Пыстин, 2002].

Ханмейхойская свита мощностью 1500–2000 м обнажается в бассейнах рек Лонготъеган, Большой и Малый Ханмей, Большой Харбей, а также их притоков (рис. 1) и представлена амфиболитами с прослоями биотитовых, амфиболовых и гранат-двуслюдяных гнейсов. Породы дислоцированы в брахиформные складки, осложненные дизъюнктивными нарушениями [Душин, 1997]. Нами установлено, что ханмейхойская свита в центральной части комплекса в бассейне р. Б. Харбей и ее притоков представлена эденит-паргасит-гастингситовыми и паргасит-гастингситовыми амфиболитами, а в западной части комплекса

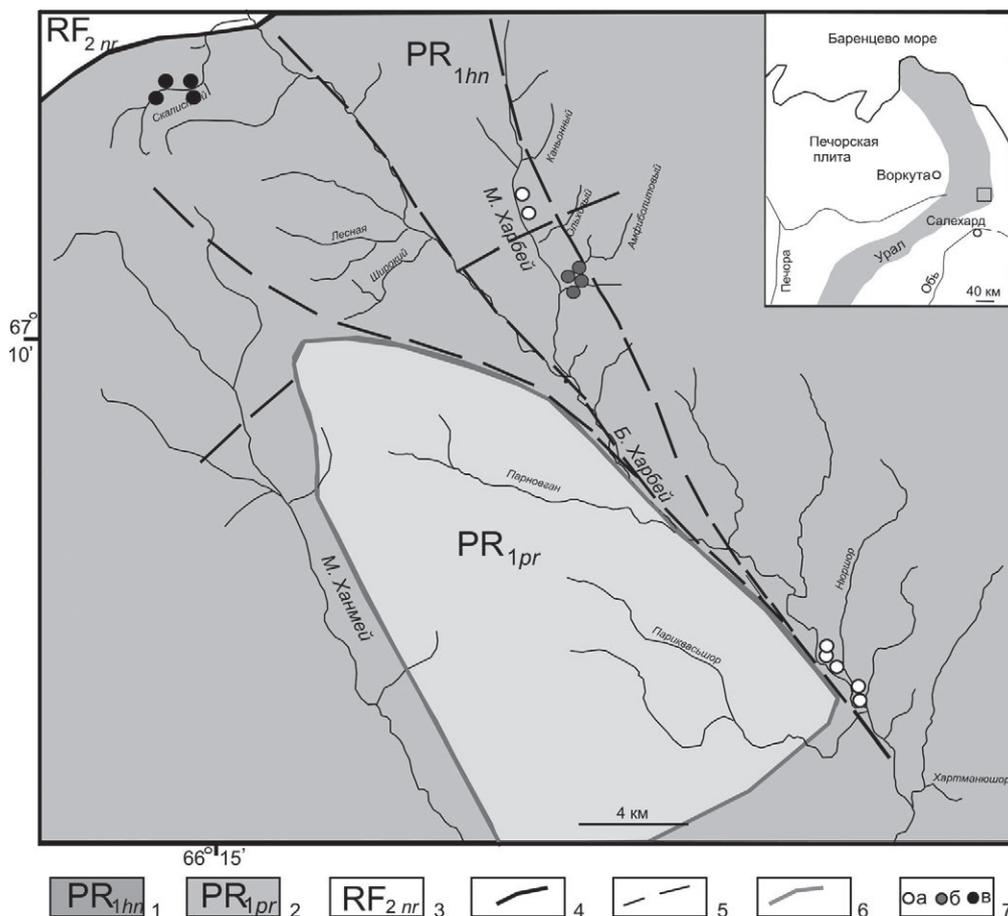


Рис. 1. Схематическая геологическая карта бассейна р. Б. Харбей [по: Охотников, 1975].

Палеопротерозой: 1 – ханмейхойская свита, 2 – париквасьшорская свита. Рифей: 3 – няроевская серия, 4 – граница между харбейским комплексом и няроевской серией, 5 – тектонические нарушения, 6 – граница между ханмейхойской и париквасьшорской свитами, 7 – точки отбора проб: а – обогащенных LREE, б – низкотитанистых паргасит-гастингситовых амфиболитов, в – обедненных LREE барруазитовых амфиболитов

Fig. 1. Schematic geological map of the B. Kharbey river basin (according to [Okhotnikov, 1975]).

Palaeoproterozoic: 1 – Khanmeykhoy suite, 2 – Parikvasshor suite. Riphean: 3 – Nyarovey series, 4 – border between the Kharbey complex and Nyarovey series, 5 – tectonic disturbances, 6 – border between the Khanmeykhoy and Parikvasshor suites, 7 – sampling points: a – LREE-enriched, b – low-titanium pargasite-hastingsite amphibolites; c – LREE-depleted barroisite amphibolites

в бассейне руч. Скалистого – барруазитовыми разновидностями.

Материалы и методы

Образцы амфиболитов были отобраны в бассейне р. Б. Харбей и по ее притокам (руч. Малый Харбей, Амфиболитовый и Скалистый, рис. 1) в местах, где они не подвержены поздним метасоматическим процессам. Все они принадлежат ханмейхойской свите.

Величины содержания породообразующих оксидов получены с помощью комплексного метода мокрой химии с рентгенофлуоресцент-

ным методом в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Определение концентраций редких и рассеянных элементов в этих породах осуществлялось путем кислотного разложения и дальнейшего анализа с помощью секторного (SF) масс-спектрометра с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP-MS) в Институте геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого (г. Екатеринбург, масс-спектрометр ELEMENT 2, аналитик Ронкин Ю. Л.), а также в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, ЦКП «Геонаука», масс-спектрометр Agilent 7700x, аналитик Игнатъев Г. В.). Предварительно образцы проходили тщательную

подготовку с контролем качества истирания и квартования для обеспечения соответствующей гомогенности разлагаемого материала.

Химические процедуры, выполненные в ИГ Коми НЦ УрО РАН для подготовки исследуемого материала к масс-спектрометрическому анализу, включали следующие операции. Навеска исходного материала (около 100 мг) помещалась в штатный фторопластовый сосуд микроволновой системы серии MDS (Sineo, КНР), и в зависимости от основного состава пробы добавлялась смесь концентрированных плавиковой, азотной, соляной, хлорной кислот и перекиси водорода (если присутствовала органика). В зависимости от минералогического состава и количества проб устанавливалась соответствующая мощность микроволнового излучения (контроль и регулировка: температуры до 270 °С с точностью 1 °С; давления до 10 МПа ± 0,01/0,1 МПа) и его продолжительность согласно встроенной библиотеке методик разложения. Далее полученные растворы переводились в хлориды путем трехкратного выпаривания соляной кислотой. Затем полученный сухой остаток переводили в 5% раствор азотной кислоты с последующим многократным разбавлением для уменьшения влияния матричных элементов. Перед измерением в пробу добавлялся внутренний стандарт (In) для контроля возможного дрейфа аналитического сигнала в процессе измерения. Все разбавления велись весовым методом для уменьшения неопределенностей измерений. Для минимизации степени загрязнения растворение в смеси кислот, разбавление и непосредственно измерение на приборе выполняли в одноразовых сосудах. В процессе пробоподготовки использовались особо чистые кислоты (ОСЧ), дополнительно очищенные путем глубокой перегонки (sub-boiling), и деионизированная вода. Вместе с анализируемыми образцами выполнялось разложение холостых проб и стандартов. При разложении анализируемые пробы группировались таким образом, чтобы химический состав соответствующего стандарта был максимально близок к составам анализируемых пород. В случае, если такая группировка не представлялась возможным, использовались несколько стандартных образцов. Контроль полноты кислотного разложения осуществлялся контролем прозрачности конечного раствора, отсутствием осадка и выполнением параллельных измерений одной и той же пробы.

Детали мультиэлементного ICP-MS анализа, осуществляемого в ИГГ УрО РАН, описаны в работе [Ронкин и др., 2005]. Результаты анализов двух лабораторий хорошо сопоставимы (табл.).

Результаты и обсуждение

Паргасит-гастингситовые амфиболиты, изученные в бассейне р. Б. Харбей и ее притоков (руч. М. Харбей и Амфиболитовый), образуют пластовые тела, имеют массивную и сланцеватую текстуру, нематогранобластовую структуру (рис. 2, а, б). Кроме амфибола в породах содержатся альбит, иногда олигоклаз, а также в переменном количестве – клиноцоизит, биотит, гранат, мусковит и кварц. Акцессорные минералы представлены цирконом, титанитом и апатитом. Изучение геохимических особенностей этих пород показало, что они отличаются по содержанию редких и редкоземельных элементов.

Амфиболиты, обнажающиеся в бассейнах рек Б. и М. Харбей, имеют умеренное и высокое содержание титана (TiO_2 – 1,07–2,59 %), а также умеренное и повышенное содержание LILE (Ba – 29–687 ppm, Rb – 1,3–37 ppm, K_2O – 0,22–0,99 %) и LREE (La – 10–17 ppm, $\Sigma LREE$ – 56–91 ppm) и в дальнейшем будут характеризоваться как обогащенные LREE метабазаальты (рис. 3). Породы образуют слабодифференцированные тренды ($(La/Yb)_n$ – 2,3–3,8) содержания редкоземельных элементов относительно их содержания в хондрите (рис. 3, а). Спектры распределения REE характеризуются слабо выраженной европиевой аномалией (Eu/Eu^* – 0,89–1,08). На спайдер-диаграмме (рис. 3, б) спектры распределения редких и редкоземельных элементов также имеют дифференцированный характер с отрицательными аномалиями Nb, Sr, Zr, Hf и Y. На идентификационной диаграмме $La/10-Y/15-Nb/8$ точки составов рассматриваемых амфиболитов располагаются в области континентальных базальтов и известково-щелочных вулканитов островных дуг (рис. 4, а). Согласно дискриминантной диаграмме Nb_n-Th_n (рис. 4, б) метабазаальты обнаруживают признаки обогащенных базальтов континентальной окраины островодужной системы, а также попадают в область пересечения с базальтами задуговых бассейнов (BABV).

Для метабазаальтов, обнажающихся в бассейне руч. Амфиболитового, характерно более низкое содержание LILE (Ba – 14–173 ppm, Rb – 0,6–3,8 ppm, K_2O – 0,12–0,33 %) и LREE (La – 2,8–4,4 ppm, $\Sigma LREE$ – 24–33 ppm), чем в предыдущем типе амфиболитов. Породы относятся к низкотитанистым (TiO_2 – 0,84–0,96 %) образованиям известково-щелочной серии. Они имеют пологий недифференцированный спектр (рис. 3, а) распределения REE в 10–20 раз выше хондритовых ($(La/Yb)_n$ – 0,61–1,32, Eu/Eu^* – 0,97–1,06). Мультиэлементные спек-

Содержание петрогенных (мас. %), редких и редкоземельных элементов в амфиболитах харьбейского метаморфического комплекса, г/т

The content of major (wt %), rare and rare earth elements in the amphibolites of the Kharbey metamorphic complex, ppm

Элемент Element	1*	2	3	4	5	6	7	8*	9	10	11	12	13*	14*	15	16*
SiO ₂	48,66	50,15	44,37	47,28	50,57	51,10	54,22	53,19	52,22	58,69	49,93	53,01	45,66	45,04	52,76	45,32
TiO ₂	1,58	1,37	1,50	1,63	1,15	1,07	2,01	1,50	0,96	0,84	0,87	0,87	1,51	1,49	1,44	1,33
Al ₂ O ₃	14,74	14,19	14,71	13,11	13,86	13,26	14,49	12,96	13,71	19,49	18,38	14,89	13,14	14,12	12,77	14,08
Fe ₂ O ₃	4,36	3,24	6,61	6,79	2,93	3,66	3,46	5,11	1,44	1,13	3,04	2,66	8,19	3,55	3,63	7,33
FeO	7,64	7,48	11,08	10,47	6,48	5,86	7,68	7,52	6,11	3,67	4,42	5,94	7,97	8,65	9,49	7,9
MnO	0,21	0,21	0,53	0,27	0,21	0,18	0,23	0,23	0,23	0,06	0,16	0,20	0,19	0,27	0,29	0,33
MgO	6,35	8,22	6,91	5,58	9,02	7,88	4,18	3,53	10,36	1,39	6,54	7,11	6,16	7,45	6,35	6,78
CaO	9,91	9,62	8,66	10,12	9,49	10,78	7,26	8,40	10,05	4,77	10,07	8,64	11,33	9,21	7,2	7,58
Na ₂ O	3,15	2,82	2,38	1,72	3,64	3,27	3,53	4,04	2,48	8,87	4,03	4,64	2,7	2,51	3,36	3,43
K ₂ O	0,43	0,61	0,22	0,32	0,99	0,80	0,77	1,52	0,33	0,12	0,28	0,20	0,13	0,12	0,11	0,11
P ₂ O ₅	0,37	0,29	0,39	0,47	0,01	0,47	0,32	0,27	0,01	0,03	0,02	0,04	0,14	0,08	0,01	0,09
п. п. п	0,97	1,81	2,66	2,23	1,65	1,66	1,85	1,74	2,09	0,93	2,28	1,81	1,33	1,71	2,6	4,29
Сумма	99,21	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,25	98,53	100	99,36
Rb	1,3	2,7	1,7	1,3	15,7	5,5	14,2	37	2,3	0,6	3,8	1,8	0,7	0,6	0,6	1,2
Ba	71	155	35	29	687	265	514	354	26	14	173	21	5	10	13	8
Th	1,9	2,09	0,59	0,78	0,74	0,71	2,32	2,3	0,14	0,83	0,26	0,17	0,28	0,21	0,26	0,26
K	3569	5064	1826	2656	8218	6641	6392	12618	2739	996	2324	1660	1079	996	913	913
Ta	0,32	0,45	0,36	0,43	0,31	0,35	1,56	0,42	0,08	0,78	0,09	0,13	0,16	0,14	0,19	0,16
Nb	4,6	4,89	3,06	3,99	3,02	3,6	6,21	6,7	0,41	1,58	0,61	1,31	1,6	2	1,44	2,3
Sr	240	213	114	142	187	183	142	260	152	289	227	143	120	96	52	170
Zr	13	11,5	9,2	12	8,4	8,5	35,9	13	5,7	13,5	5,8	6	4,4	2,3	3,5	2,5
Hf	0,64	0,79	0,61	0,68	0,63	0,63	1,59	0,65	0,5	0,68	0,44	0,48	0,37	0,25	0,3	0,34
Ti	9470	8212	8991	9770	6893	6413	12048	8991	5754	5035	5214	5215	9051	8931	8631	7972
La	13	16,7	13,5	13,9	9,7	9,6	12,9	10	2,8	4,4	3,6	3,2	2,8	2	2,4	2,2
Ce	34	39,4	33,5	34,2	23,9	24,9	30,8	30	8,6	12,4	10,6	9,4	9	6,8	6,8	6,8
Pr	4,6	5,1	4,7	4,8	3,4	3,4	4,2	3,8	1,4	1,9	1,7	1,5	1,5	1,2	1,1	1,1
Nd	20	23,3	21,4	21,1	14,4	15,3	20,5	17	7,2	9,9	8,6	8,4	8,2	6,7	6,3	6
Sm	4,6	5,4	5,8	5,8	3,5	3,5	5,6	4,3	2,5	3,3	2,8	2,9	3	2,6	2,4	2,3
Eu	1,5	1,8	2	1,9	1,1	1,2	1,9	1,7	0,9	1,3	1,1	1,1	1	0,9	0,8	0,81
Gd	5,7	5,3	6,4	6,6	3,5	3,8	6,7	5,4	3,2	4,7	3,4	3,8	4,5	3,8	3,7	3,4
Tb	0,73	0,87	1,09	1,14	0,57	0,59	1,03	0,75	0,57	0,86	0,55	0,63	0,76	0,68	0,74	0,59
Dy	4,7	5,4	7,1	7,5	3,5	3,8	6,5	5	3,7	5,8	3,5	4,2	5,9	5,3	5,3	4,6
Ho	0,97	1,1	1,5	1,6	0,72	0,79	1,4	1	0,79	1,3	0,74	0,84	1,3	1,2	1,2	1
Er	2,9	3,2	4,4	4,8	1,9	2,3	4	3,1	2,3	4,1	2	2,3	3,9	3,8	3,4	3,1
Tm	0,4	0,45	0,65	0,69	0,3	0,34	0,56	0,45	0,33	0,69	0,3	0,34	0,56	0,57	0,52	0,45
Yb	2,6	2,9	4	4,6	1,9	2,2	3,7	2,9	2,1	4,9	1,9	2,1	3,6	3,7	3,3	2,8
Lu	0,4	0,45	0,62	0,70	0,29	0,33	0,56	0,45	0,32	0,73	0,28	0,31	0,52	0,58	0,49	0,41

Окончание табл.
Table (continued)

Элемент Element	1*	2	3	4	5	6	7	8*	9	10	11	12	13*	14*	15	16*
Eu/Eu*	0,89	1	1	0,98	0,96	0,97	0,95	1,08	1,02	0,97	1,04	1,06	0,83	0,88	0,81	0,89
(La/Mb) _n	3,38	3,8	2,3	2,04	3,33	2,97	2,37	2,33	0,91	0,61	1,32	1	0,53	0,37	0,49	0,53
ΣLREE	77,7	91	80	81,7	56,01	57,8	75,9	66,8	23,6	33,2	28,4	26,5	25,5	20,2	19,8	19,2
La/Mb	5	5,7	3,4	3,02	4,9	4,4	3,5	3,4	1,3	0,9	1,9	1,48	0,8	0,5	0,7	0,8
Th/Ta	5,9	4,7	1,6	1,8	2,4	2,01	1,5	5,5	1,8	1,1	2,8	1,3	1,8	1,5	1,4	1,6
Gd/Mb	2,19	1,82	1,59	1,43	1,77	1,73	1,84	1,86	1,52	0,97	1,82	1,77	1,25	1,03	1,13	1,21
La/Lu	32,5	37,3	21,8	19,8	32,6	29,1	23,1	22,2	9,02	6,04	13,1	10,2	5,4	3,45	4,86	5,4
(Gd/Yb) _n	1,78	1,5	1,3	1,16	1,43	1,41	1,49	1,51	1,23	0,79	1,47	1,43	1,01	0,83	0,91	0,98
Th/Nb	0,41	0,42	0,19	0,19	0,25	0,19	0,37	0,34	0,32	0,52	0,44	0,13	0,2	0,11	0,18	0,11

Примечание. 1–8 – паргасит-гастингситовые амфиболиты, распространенные в среднем течении реки Б. Харбей и по руч. М. Харбей; 9–12 – паргасит-гастингситовые амфиболиты, распространенные по руч. Амфиболитовому; 13–16 – барруазитовые амфиболиты руч. Скалистого. Анализы с номерами со звездочкой выполнены ICP-MS методом в Институте геологии КНЦ Уро РАН (Сыктывкар), без звездочки – ICP-MS методом в Институте геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого (Екатеринбург).

Note. 1–8 – pargasite-hastingsite amphibolites distributed in the middle reaches of the B. Kharbey River and along stream M. Kharbey; 9–12 – pargasite-hastingsite amphibolites, distributed by stream Amfibolitovoi; 13–16 – barroisite amphibolites stream Skalistyi. Analyses with numbers with an asterisk were performed by the ICP-MS method at the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Syktyvkar), without an asterisk, the ICP-MS method was performed at the Institute of Geology and Geochemistry named after A. N. Zavaritsky (Ekaterinburg).

тры (рис. 3, б) характеризуются сильными минимумами по концентрациям Th, Ta, Hf и Zr. Содержание этих элементов ниже, чем в обогащенных LREE амфиболитах. На диаграмме La/10–Y/15–Nb/8 точки составов низкотитанистых амфиболитов располагаются в области низкокалиевых толеитов островных дуг (рис. 4, а), а на диаграмме Nb_n–Th_n они попадают в область пересечения островодужных образований и вулканитов BABB (рис. 4, б).

Результаты анализа содержания малых элементов в паргасит-гастингситовых амфиболитах центральной части харбейского комплекса, полученные с помощью ICP-MS метода, не расходятся с ранее выдвинутым предположением о формировании их протолита в задуговом бассейне [Кузнецова, 2008], где распространены породы с различными геохимическими метками.

Барруазитовые амфиболиты наблюдаются в западной части харбейского метаморфического комплекса в бассейне руч. Скалистого. Они образуют толщи мощностью до 10 м и более, имеют слабосланцеватую текстуру, гранонематобластовую структуру и состоят из амфибола (барруазита), граната, клиноцоизита, альбита и хлорита (рис. 2, в, г). Акцессорные минералы представлены цирконом и титанитом. Породы характеризуются низкими концентрациями LILE (Ba – 5–13 ppm, Rb – 0,6–1,2 ppm, K₂O – 0,10–0,22 %) и LREE (La – 2–2,8 ppm, ΣLREE – 19–26 ppm) относительно амфиболитов центральных частей харбейского комплекса и являются среднетитанистыми (TiO₂ – 1,33–1,51 %) толеитами. Кроме того, они образуют характерный для примитивных базальтов N-MORB тренд содержания редкоземельных элементов с обеднением LREE ((La/Yb)_n – 0,37–0,53) и в дальнейшем будут приводиться как обедненные LREE амфиболиты (рис. 3, а). На спайдер-диаграмме, где содержание редких и редкоземельных элементов нормировано на состав базальта N-MORB, наблюдается пологий недифференцированный спектр распределения элементов барруазитовых амфиболитов, лишь с четкими минимумами по Zr (2,3–4,4 ppm) и Hf (0,25–0,37 ppm), содержание которых ниже, чем в амфиболитах центральной частей харбейского метаморфического комплекса (рис. 3, б). На идентификационных диаграммах La/10–Y/15–Nb/8 и Nb_n–Th_n точки составов барруазитовых амфиболитов располагаются в области базальтов N-MORB или в поле пересечения N-MORB и BABB, и это указывает, что они сформировались по примитивным базальтам (рис. 4).

Таким образом, барруазитовые амфиболиты отличаются по геохимическим особенно-

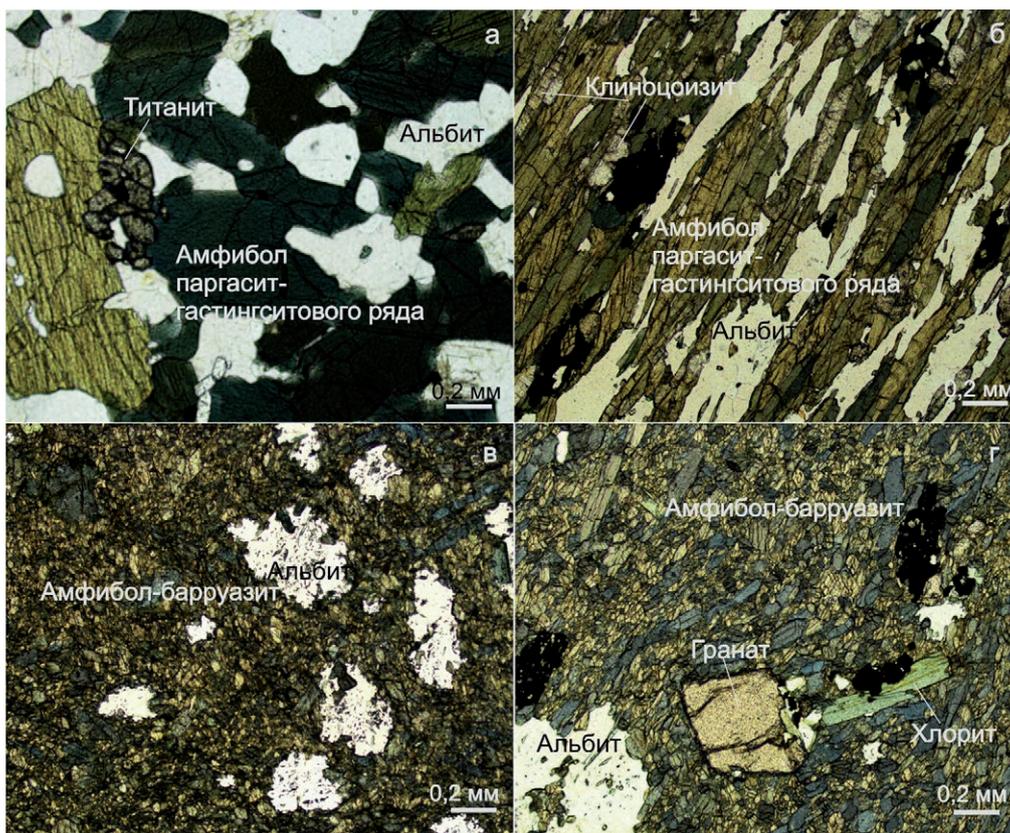


Рис. 2. Фотографии шлифов (без анализатора) паргасит-гастингситовых массивных (а) и сланцеватых (б) амфиболитов центральной части харбейского метаморфического комплекса и барруазитовых амфиболитов (в, г) руч. Скалистого

Fig. 2. Photographs of thin sections (without the analyzer) of pargasite-hastingsite massive (a) and schisty (b) amphibolites of the central part of the Kharbey metamorphic complex and barroisite amphibolites (c, d) of stream Skalistsy

стям и условиям формирования от паргасит-гастингситовых метавулканитов.

Состав и глубина магматического источника

Характерные для всех пород отрицательные аномалии Zr и Hf, одних из наиболее стабильных элементов, отражающих состав мантийного источника [Hellman, Green, 1979], могут свидетельствовать о генетическом родстве между metabasalts. Различия амфиболитов по содержанию редких и редкоземельных элементов, скорее всего, связаны с составом и глубиной источников материнского расплава.

Протолиты паргасит-гастингситовых амфиболитов с повышенными концентрациями LREE сформировались, скорее всего, из обогащенного мантийного источника с малой долей частичного плавления субстрата, так как имеют повышенные значения отношений Gd/Yb (1,43–2,19), La/Lu (19,8–37,3), Th/Ta (1,5–5,9), La/Yb (3,02–5,7) (рис. 5). Невысокие значения

отношений $(Gd/Yb)_n$, равные 1,3–1,8, свидетельствуют об отсутствии в источнике реститового граната, а плавящая порода, видимо, находилась на уровне фации шпинелевого лерцолита. Материнская порода, из которой выплавлялись расплавы низкотитанистых паргасит-гастингситовых амфиболитов, согласно индикаторным отношениям $(Gd/Yb - 0,97-1,81; La/Lu - 6,04-13,1; Th/Ta - 1,1-2,8; La/Yb - 0,9-1,95; (Gd/Yb)_n - 0,79-1,47)$, близка по составу к примитивной мантии и характеризуется большей долей частичного плавления мантийного вещества. Учитывая отрицательные аномалии по Nb и Ta, а также повышенные значения Th/Nb отношения, равные 0,2–0,53, для этих двух типов metabasalts можно предположить присутствие некоторой доли субдукционного компонента или водного флюида в их источниках [Hellman, 1979; Pearce, 1982; Saunders et al., 1988]. Выплавки для протолитов барруазитовых обедненных LREE амфиболитов образовались на меньшей глубине из деплетированного источника с наибольшей долей частичного

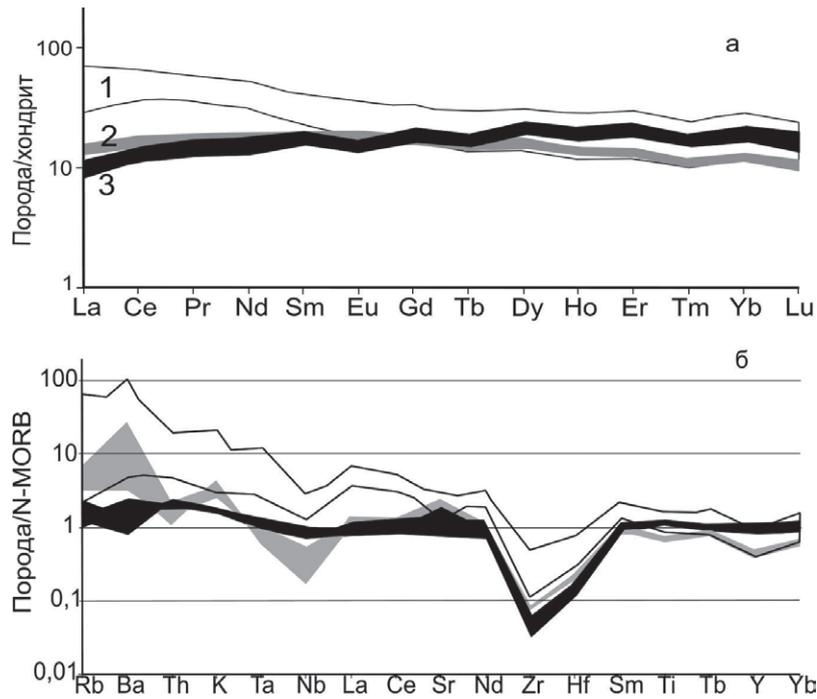


Рис. 3. Содержание REE и редких элементов в амфиболитах харьбейского метаморфического комплекса, нормированное относительно их содержания в хондрите (а) и базальте N-MORB (б) [Sun, McDonough, 1989].

Поля: 1 – обогащенных LREE амфиболитов, 2 – низкотитанистых амфиболитов, 3 – обедненных LREE амфиболитов

Fig. 3. The contents of REE and rare elements in the amphibolites of the Kharbey metamorphic complex, normalized with respect to their contents in chondrite (a) and basalt N-MORB (b) [Sun, McDonough, 1989].

Fields: 1 – LREE-enriched amphibolites, 2 – low-titanium amphibolites, 3 – LREE-depleted amphibolites

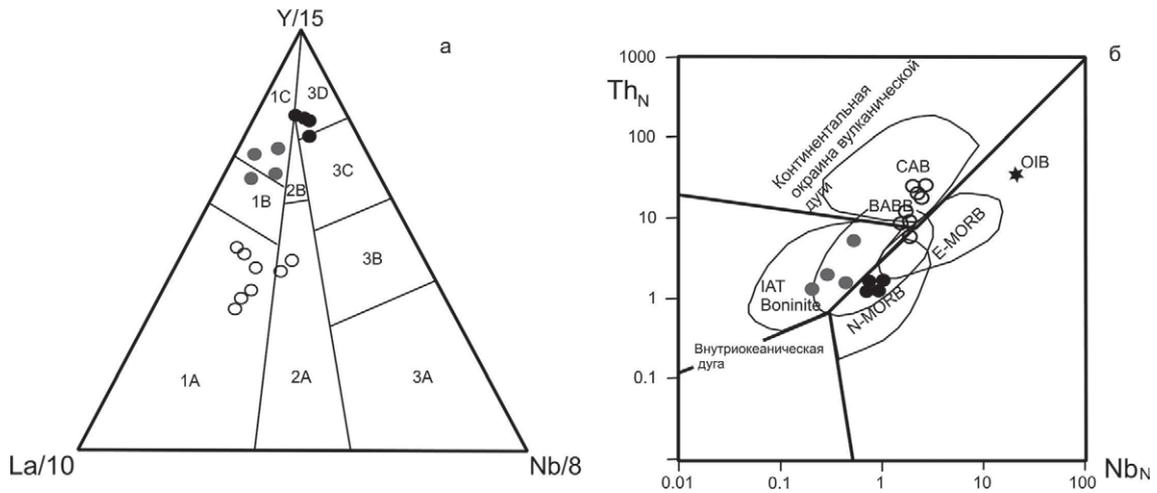


Рис. 4. Положение точек состава амфиболитов харьбейского метаморфического комплекса на диаграммах $La/10-Y/15-Nb/8$ (а) [Cabani, Lecolle, 1989] и Nb_n-Th_n (б) [Saccani, 2014]. Nb и Th нормализованы к составу N-MORB [Sun, McDonough, 1989].

Названия полей на диаграммах соответствуют: 1А – CAB (известково-щелочные базальты), 1В – CAB+IAT (островодужные толеиты), 1С – IAT, 2А – континентальные базальты, 2В – BABB (базальты задугового бассейна), 3А – щелочные базальты континентальных рифтов, 3В, 3С – E-MORB (обогащенные базальты срединно-океанических хребтов), 3D – N-MORB (примитивные базальты срединно-океанических хребтов). Здесь и на рис. 5: условные обозначения для точек составов – см. рис. 1

Fig. 4. The location of the composition points of amphibolites of the Kharbey metamorphic complex in the $La/10-Y/15-Nb/8$ diagrams (a) [Cabani, Lecolle, 1989] and Nb_n-Th_n (b) [Saccani, 2014]. Nb and Th are normalized to the N-MORB composition [Sun, McDonough, 1989].

Field names: 1A – CAB (calc-alkaline basalts), 1B – CAB+IAT (island-arc tholeiites), 1C – IAT, 2A – continental basalts, 2B – BABB (basalts of the back-arc basin), 3A – alkaline basalts of continental rifts, 3B, 3C – E-MORB (enriched basalts of the mid-ocean ridges), 3D – N-MORB (primitive basalts of the mid-ocean ridges). Here and in Fig. 5: see Fig. 1 for the composition points legend

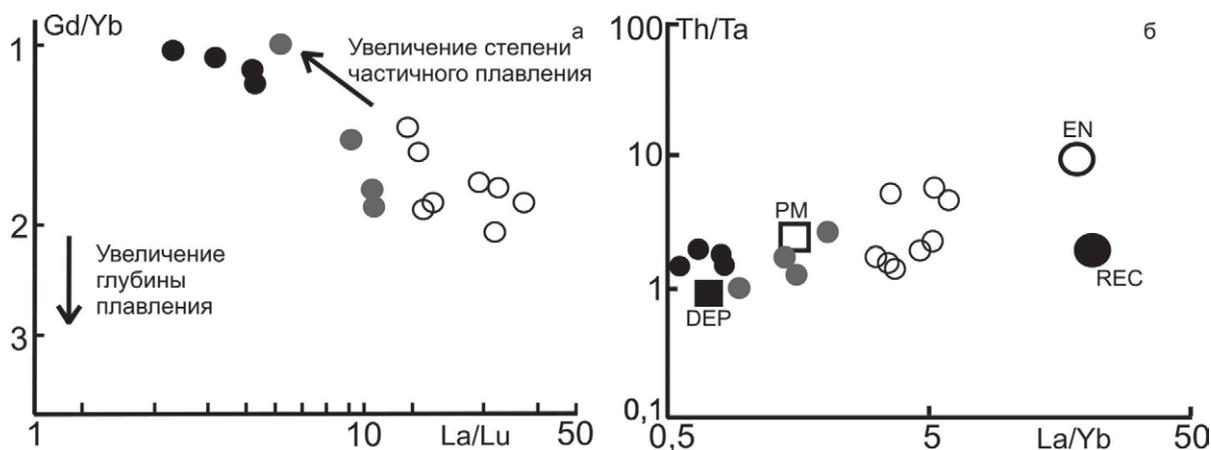


Рис. 5. Точки составов амфиболитов харьбейского метаморфического комплекса на диаграммах La/Lu–Gd/Yb [Boyce et al., 2015] и La/Yb–Th/Ta [Condie et al., 2002]:

PM – примитивная мантия, DEP – деплетированная мантия, EN – обогащенный компонент, REG – рециклированный компонент

Fig. 5. Composition points of amphibolites of the Kharbey metamorphic complex in the La/Lu–Gd/Yb diagrams [Boyce et al., 2015] and La/Yb–Th/Ta diagrams [Condie et al., 2002].

PM – primitive mantle, DEP – depleted mantle, EN – enriched component, REG – recycled component

плавления субстрата по сравнению с предыдущими типами metabазальтов, о чем свидетельствуют низкие значения отношений Gd/Yb (1,03–1,25), La/Lu (3,45–5,4), Th/Ta (1,4–1,8), La/Yb (0,5–0,8), $(Gd/Yb)_n$ (0,83–1,01). Эти породы сформировались, по-видимому, без участия субдукционного компонента, так как для них характерны пониженные значения Th/Nb (0,11–0,18) и отсутствует аномалия по Nb.

Если рассматривать протолиты барруазитовых амфиболитов в рамках образования в островодужной системе, то они могли являться производными завершающего этапа формирования океанической коры задугового пространства уже после прекращения процессов субдукции. Аномально низкие количества циркония и гафния, характерные для всех типов амфиболитов, скорее всего, связаны с составом плавящегося субстрата, который, возможно, претерпел метасоматические изменения. На увеличение этой аномалии от обогащенных амфиболитов до примитивных образований также могло повлиять повышение степени плавления мантийного вещества.

Заключение

Изучение содержания редких и редкоземельных элементов в амфиболитах харьбейского метаморфического комплекса показало, что в пределах ханмейхойской свиты встречаются породы с разными геохимическими метками.

Среди паргасит-гастингситовых амфиболитов центральной части комплекса встре-

чаются умеренно- и высокотитанистые породы с повышенным содержанием LILE и LREE ($(La/Yb)_n$ – 2,3–3,8), схожие по составу с базальтами континентальных рифтов и островных дуг, а также низкотитанистые метавулканы с низкими концентрациями LILE и LREE ($(La/Yb)_n$ – 0,61–1,32), близкие по геохимическим особенностям к толеитам островных дуг и задуговых бассейнов. Для этих пород характерны отрицательные аномалии по содержанию Nb и Ta.

В западной части комплекса распространены барруазитовые амфиболиты, отличающиеся от паргасит-гастингситовых амфиболитов центральных частей комплекса более низким содержанием LILE и LREE ($(La/Yb)_n$ – 0,37–0,53). Они схожи по составу с примитивными базальтами N-MORB, сформировавшимися из деплетированного источника.

Все изученные амфиболиты, несмотря на различия в содержании редких и редкоземельных элементов, скорее всего, генетически связаны, на что указывают характерные для всех типов пород отрицательные аномалии по Hf и Zr. Различия в геохимическом составе metabазальтов связаны, скорее всего, с эволюцией магматического расплава в результате изменения глубины магмогенерации, степени частичного плавления материнского источника и влияния водного флюида. Если рассматривать изученные амфиболиты в концепции их развития в островодужной системе, то протолиты паргасит-гастингситовых амфиболитов могли формироваться на более ранних и средних этапах развития задугового пространства,

а барруазитовые метабазалты – на завершающей стадии развития задугового бассейна уже после прекращения процессов субдукции.

Автор благодарит д. г.-м. н., профессора А. М. Пыстина, а также Ю. Л. Ронкина и Г. В. Игнатьева за помощь и консультацию.

Литература

Голубева И. И., Афонькин М. М. Амфиболиты париквасьшорской свиты как индикатор наличия докембрийской островной дуги на Полярном Урале // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана: Сб. ст. (Тр. Института геологии. Вып. 119). № 4. Сыктывкар, 2006. С. 22–38.

Душин В. А., Макаров А. Б., Сычева Э. А., Исхаков Р. А. О формационной принадлежности метаморфитов харьбейского гнейсо-амфиболитового комплекса // Геология метаморфических комплексов. Межвуз. темат. сб. Свердловск: СГИ, 1983. С. 83–90.

Душин В. А. Магматизм и геодинамика палеоконтинентального сектора севера Урала. М.: Недра, 1997. 213 с.

Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 152 с.

Кузнецова Н. С. Состав и условия формирования мафитов харьбейского комплекса (Полярный Урал) // Литосфера. 2008. № 1. С. 51–65.

Макрыгина В. А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. Новосибирск: Наука, 1981. 200 с.

Охотников В. Н. Геология рудных образований Полярного Урала. Л.: Наука, 1975. 175 с.

Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 168 с.

Ронкин Ю. Л., Лепихина О. П., Голик С. В., Журавлев Д. З., Попова О. Ю. Мультиэлементный анализ геологических образцов кислотным разложением и окончанием на HR ICP-MS Element2 // Ежегодник-2004: Информ. сб. науч. тр. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 423–433.

Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург, 1994.

Уляшева Н. С. Термодинамическая эволюция метаморфизма метабазитов харьбейского комплекса // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 9. С. 2–6.

Boyce J. A., Nicholls I. A., Keays R. R., Hayman P. C. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia // Contrib. Mineral. Petrol. 2015. Vol. 169, 11. doi: 10.1007/s00410-015-1106-y

Cabanis B., Lecomte M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale // Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. 1989. Vol. 309. P. 2023–2029.

Condie K. C., Frey B. A., Kerrich R. The 1.75 – Ga Iron King Volcanics in west-central Arizona: a remnant of an accreted oceanic plateau derived from a mantle plume with a deep depleted component // Lithos. 2002. Vol. 64. P. 49–62. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00158-5

Hellman P. L., Green T. H. The high pressure experimental crystallization of staurolite in hydrous mafic compositions // Contribut. Mineral. Petrol. 1979. Vol. 68. P. 369–377.

Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries // Andesite / Ed. R. S. Thorpe. London, 1982. P. 526–547.

Saccani E. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic // Geosci. Front. 2014. Vol. 6, iss. 4. doi: 10.1016/j.gsf.2014.03.006

Saunders A. D., Norry M. J., Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints // J. Petrol (Special Lithosphere Iss.). 1988. P. 415–445.

Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the oceanic basins / Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. No. 42. P. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Поступила в редакцию 04.06.2020

References

Dushin V. A., Makarov A. B., Sycheva E. A., Iskhakov R. A. O formatsionnoi prinadlezhnosti metamorfитov kharbeiskogo gneiso-amfibolitovogo kompleksa [On the formation of metamorphites of the Kharbey gneiss-amphibolite complex]. *Geol. metamorficheskikh kompleksov. Mezhevuz. temat. sb.* [Geol. of metamorphic complexes. Interuniv. subj. coll.]. Sverdlovsk: SGI, 1983. P. 83–90.

Dushin V. A. Magmatizm i geodinamika paleokontinental'nogo sektora severa Urala [Magmatism and geodynamics of the paleocontinental sector of the north of the Urals]. Moscow: Nedra, 1997. 213 p.

Golubeva I. I., Afon'kin M. M. Amfibolity parikvas'shorskoi svity kak indikator nalichiya dokembriiskoi ostrovnnoi

dugi na Polyarnom Urale [Amphibolites of the Parvikashor formation as an indicator of the Precambrian island arc in the Polar Urals]. *Petrol. i mineralogiya severa Urala i Timana (Trudy Instituta geol. Vyp. 119)* [Petrology and Mineralogy of the North of the Urals and Timan (Proceed. Inst. Geol. Iss. 119)]. Syktyvkar, 2006. No. 4. P. 22–38.

KrasnobaeV A. A. Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov [Zircon as an indicator of geological processes]. Moscow: Nauka, 1986. 152 p.

Kuznetsova N. S. Sostav i usloviya formirovaniya mafitov kharbeiskogo kompleksa (Polyarnyi Ural) [Composition and conditions for the formation of mafites of the Kharbey complex (Polar Urals)]. *Litosfera* [Lithosphere]. 2008. No. 1. P. 51–65.

Makrygina V. A. Geokhimiya regional'nogo metamorfizma i ul'trametamorfizma umerennykh i nizkikh davlenii [Geochemistry of regional metamorphism and ultrametamorphism of moderate and low pressures]. Novosibirsk: Nauka, 1981. 200 p.

Okhotnikov V. N. Geologiya rudnykh obrazovaniy Polyarnogo Urala [Geology of ore formations of the Polar Urals]. Leningrad: Nauka, 1975. 175 p.

Pystina Yu. I., Pystin A. M. Tsirkonovaya letopis' ural'skogo dokembriya [Zircon chronicle of the Ural Precambrian]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2002. 168 p.

Ronkin Yu. L., Lepihina O. P., Golik S. V., Zhuravlev D. Z., Popova O. Yu. Mul'tielementnyi analiz geologicheskikh obraztsov kislotnym razlozheniem i okonchaniem na HR ICP-MS Element2 [Multi-element analysis of geological samples by acid decomposition and completion on HR ICP-MS Element2]. *Ezhegodnik-2004: Inform. sb. nauch. tr. IGG UrO RAN* [Proceed. IGG UB RAS. Yearbook-2004]. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 2005. P. 423–433.

Stratigraficheskie skhemy Urala (dokembrii, paleozoii) [Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Paleozoic)]. Ekaterinburg, 1994.

Ulyasheva N. S. Termodinamicheskaya evolyutsiya metamorfizma metabazitov kharbeiskogo kompleksa [Thermodynamic evolution of metamorphism of metabasites of the Kharbey complex]. *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN* [Bull. IG Komi Sci. Center, Ural Br. RAS]. 2011. No. 9. P. 2–6.

Boyce J. A., Nicholls I. A., Keays R. R., Hayman P. C. Variation in parental magmas of Mt Rouse, a complex polymagmatic monogenetic volcano in the basaltic intraplate Newer Volcanics Province, southeast Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2015. Vol. 169, 11. doi: 10.1007/s00410-015-1106-y

Cabanis B., Lecomte M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences* [Proceed. Acad. Sci.]. 1989. Vol. 309. P. 2023–2029.

Condie K. C., Frey B. A., Kerrich R. The 1.75 – Ga Iron King Volcanics in west-central Arizona: a remnant of an accreted oceanic plateau derived from a mantle plume with a deep depleted component. *Lithos.* 2002. Vol. 64. P. 49–62. doi: 10.1016/S0024-4937(02)00158-5

Hellman P. L., Green T. H. The high pressure experimental crystallization of staurolite in hydrous mafic compositions. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979. Vol. 68. P. 369–377.

Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *Andesite.* Ed. R. S. Thorpe. London, 1982. P. 526–547.

Saccani E. A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematic. *Geosci. Front.* 2014. Vol. 6, iss. 4. doi: 10.1016/j.gsf.2014.03.006

Saunders A. D., Norry M. J., Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints. *J. Petrol (Special Lithosphere Iss.)*. 1988. P. 415–445.

Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the oceanic basins.* Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. No. 42. P. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Received June 04, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Уляшева Наталия Сергеевна

научный сотрудник лаб. региональной геологии
Институт геологии им. Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Коми научный центр РАН»
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми,
Россия, 167982
эл. почта: nataliaulyashewa@yandex.ru

CONTRIBUTOR:

Ulyasheva, Natalia

Institute of Geology, Komi Science Centre,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
54 Pervomaiskaya St., 167982 Syktyvkar, Komi, Russia
e-mail: nataliaulyashewa@yandex.ru