ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья УДК 552.3+551.2+552.11 (571.52) doi: 10.17223/25421379/27/1

РАЗНЫЕ ТИПЫ БАЗАЛЬТОВ ТЕС-ХЕМСКОГО УЧАСТКА АГАРДАГСКОЙ ЗАДУГОВОЙ ПОДЗОНЫ (ТУВА): ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ВОЗМОЖНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ



Андрей Александрович Монгуш¹, Ренат Васильевич Кужугет², Евгения Константиновна Дружкова³

^{1, 2, 3} Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

¹ amongush@inbox.ru

² rkuzhuget@mail.ru

³ druzhkova07@mail.ru

Аннотация. OIB-подобные ультратитанистые базальты и E-MORB-подобные кускуннугские базальты были образованы, возможно, на стадии инициации субдукции около 570 млн лет назад при 2-й и 5–15-й % степенях частичного плавления гранатового перидотита соответственно. Умереннотитанистые, относительно высокоглинозёмистые, ультракалиевые базальты, имеющие надсубдукционные геохимические характеристики, были образованы, возможно, в тылу Таннуольско-Хамсаринской островодужной системы в условиях задугового растяжения.

Ключевые слова: базальты, геохимия, Sm-Nd изотопный состав, субдукция, геодинамика

Благодарности. Авторы благодарят за помощь в проведении исследований А.С. Гибшера и В.П. Мокрушникова.

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания ТувИКОПР СО РАН, научная тема – 222020400035-4.

Для цитирования: Монгуш А.А., Кужугет Р.В., Дружкова Е.К. Разные типы базальтов Тес-Хемского участка Агардагской задуговой подзоны (Тува): вещественный состав и возможная геодинамическая позиция // Геосферные исследования. 2023. № 2. С. 6–17. doi: 10.17223/25421379/27/1

Original article doi: 10.17223/25421379/27/1

DIFFERENT TYPES OF BASALTS OF THE TES-KHEM SITE OF THE AGARDAG BACK-ARC SUBZONE (TUVA): MATERIAL COMPOSITION AND POSSIBLE GEODYNAMIC POSITION

Andrey A. Mongush¹, Renat V. Kuzhuget², Evgeniya K. Druzhkova³

^{1.2,3} Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS, Kyzyl, Russia

¹amongush@inbox.ru

² rkuzhuget@mail.ru

³ druzhkova07@mail.ru

Abstract. The Tes-Khem site is one of the main research sites of the pre-collision tectonomagmatic history of the early Caledonids of the Agardag subzone. The Agardag subzone is located in the southern part of one of the regions of Russia – the Republic of Tyva, near the border with Mongolia. This subzone is a back-arc structure that is part of the East Tuvan back-arc zone of the Early Caledonids. Spatially closely associated basalts of similar age, but of different petro- and geochemical composition, are represented within the Tes-Khem site. Basalts are found in the Kuskunnug formation and in serpentinite melange. The Kuskunnug basalts have an E-MORB-like composition. Basalts from inclusions in melange are divided into two types. The first type is similar to the *Kuskunnug basalts*, but is characterized by an ultra-titan and OIB-like composition (*Ultra-Ti basalts*). The second type is ultra-potassium basalts (*Ultra–K basalts*). The Kuskunnug basalts and Ultra-Ti basalts could have been formed from a deep mantle source at the level of garnet peridotite at different degrees of its partial melting (5-15% and 2%, respectively). According to the lithological composition of the host strata, geochemical and Sm-Nd isotopic compositions, the Kuskunnug and Ultra-Ti basalts are similar to the Aldynbulak basalts of the Sayan-Tuva fore–arc zone. Probably, both those and other basalts were formed in the same geodynamic conditions at the stage of the subduction initiation. The actualistic method

allows us to assume that the genesis of Ultra-K basalts corresponds to the potassium rear-arc basaltoids of Kamchatka and Japan, which develop under conditions of back-arc stretching. In addition, basalts with N-MORB-like characteristics, composing the Chonsair strata and inclusions in the melange in the area of the Agardag massif, represent, in our opinion, the lava complex of the Agardag back-arc ophiolites. Summarizing our assumptions, all the diversity of genetic types of basalts of the Agardag subzone can be explained as follows: 1) about 570 Ma ago, during the initiation of subduction from a deep, enriched source at 2 and 5-15% degrees, respectively, of partial melting of garnet peridotite OIB-like Ultra-Ti and E-MORB-like Kuskunnug basalts were formed; 2) in the initial stage of subduction, Agardag ophiolites, including Chonsair basalts, were formed in the process of back-arc spreading; 3) under the stationar subduction regime, moderate titanium, relatively high-alumina, ultra-potassium basalts were formed in the rear of the Tannuola-Khamsara island arc, under conditions of back-arc stretching. The results of this study, due to the limited number of analyzed samples, are considered preliminary.

Keywords: basalts, geochemistry, Sm-Nd isotopic composition, subduction, geodynamics

Acknowledgements. The authors thank Gibsher A.S. and Mokrushnikov V.P. for their help in conducting research.

Source of financing: The work was carried out according to the state task of TuvIKOPR SB RAS (theme no. 222020400035-4).

For citation: Mongush A.A., Kuzhuget R.V., Druzhkova E.K. (2023) Different types of basalts of the Tes-Khem site of the Agardag back-arc subzone (Tuva): material composition and possible geodynamic position. *Geosfernye issledovaniya* – *Geosphere Research.* 2. pp. 6–17. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/27/1

Введение

Химический состав базальтов широко используется в палеогеодинамических реконструкциях. Особый интерес вызывают участки с пространственно тесно ассоциирующимися базальтами близкого возраста, но разного петро- и геохимического состава. Один из них – Тес-Хемский участок, являющийся одним из опорных участков исследований доколлизионной тектономагматической истории ранних каледонид Агардагской подзоны в южной части Тувы.

Геологическое положение

Агардагская подзона представляет собой задуговую структуру, являющуюся частью Восточно-Тувинской задуговой зоны ранних каледонид [Берзин, Кунгурцев, 1996; Preliminary..., 1999; Изох и др., 2001; Монгуш и др., 2011; Монгуш, 2018]. Восточно-Тувинская зона находится между Тувино-Монгольским массивом на юго-востоке и Таннуольско-Хамсаринской островодужной зоной к северозападу; последняя, в свою очередь, далее к северозападу сменяется Саяно-Тувинской преддуговой зоной каледонид (рис. 1 b). Наиболее ранние доколлизионные комплексы Агардагской подзоны представлены V₂-Є₁ кускуннугской осадочно-вулканогенной и V₂ чонсаирской базальтовой толщами, V₂ офиолитами (Агардагский, Карашатский и другие массивы). Кускуннугская толща со структурным несогласием перекрыта ${\mathbb C_1}^2$ карахольской осадочно-вулкано-генной и ${\mathbb C_1}^{3-4}$ теректыгской осадочной свитами [Гибшер, Терлеев, 1989], образованными в надсубдукционных условиях активной субконтинентальной окраины. С офиолитами и кускуннугской толщей пространственно и парагенетически тесно связан серпентинитовый меланж. Вышеперечисленные

комплексы прорваны син- и постколлизионными ордовикскими интрузивными и субвулканическими образованиями основного и кислого состава. Все эти комплексы пород, за исключением чонсаирской базальтовой толщи, представлены на Тес-Хемском участке (рис. 1, *c*).

По данным А.С. Гибшера и А.А. Терлеева, для кускуннугской толщи характерна невыдержанность по простиранию лавовых потоков, пачек известняков и доломитов, особенно в нижней половине разреза толщи (свиты). Поэтому приведённый ниже разрез по одному из пересечений представляет собой частный случай стратификации этой толщи и отражает лишь ее принципиальный состав.

1. Основание толщи не вскрыто.

2. Чёрные глинисто-кремнистые сланцы с линзами кремней (90 м).

3. Пакет из лавовых потоков базальтовых и андезитобазальтовых порфиритов и тефры, перемытых туфов с линзовидными телами известняков (330 м).

4. Конгломератовая пачка со взломанными пластами известняков, цементирующая масса – перемытый туф (120 м).

5. Пакет лавовых потоков, тефры с линзами кремней и перемытыми туфами (350 м).

6. Песчаная пачка с линзовидными слоями известняков. Песчаники вулканомиктового состава (130 м).

7. Конгломератовая пачка, аналогичная пачке 4, с линзовидными, взломанными слоями известняков (170 м).

8. Пачка черных ороговикованных туфов, кремнистых сланцев и вулканомиктовых песчаников (240 м).

9. Пачка серых слоистых известняков и доломитов (около 150 м).

10. Мощная, преимущественно песчано-сланцевая, подтолща с линзовидными горизонтами силицилитов,

отдельными телами лавовых потоков андезитобазальтов и линзами чёрных известняков (750 м).

Неполная мощность толщи порядка 2 300 м [Гибшер, Терлеев, 1989].





 $a - V - \varepsilon$ островодужные системы Центральной Азии (составлена с использованием данных [Добрецов, Буслов, 2007]): 1 – Тувинская (T); 2 – другие: S – Салаирская, K-A – Кузнецко-Алтайская, N-S – Северо-Саянская, L – Озерная, D – Джидинская; 3 – главные разломы и границы террейнов; b – схема геодинамического районирования Тувинской островодужной системы (составлена А.А. Монгушем с использованием данных [Берзин, Кунгурцев, 1996; Preliminary..., 1999]). ST – Саяно-Тувинская преддуговая зона, подзоны: Dz – Джебашская, Kr – Куртушибинская, K-t – Хемчикско-Тапсинская, Skh – Сыстыгхемская; T-Kh – Таннуольско-Хамсаринская островодужная зона, подзоны: Ta – Таннуольско-Хамсаринская островодужная зона, подзоны: Ag – Агардагская, Kkh – Каахемская, Uo – Улугойская, Khr – Харальская. Другие островодужные системы: N-S – Северо-Саянская, L – Озерная. WS – Западно-Саянская окраинно-континентальная турбидитовая зона. TMM – Тувино-Монгольский массив; c – геологическая карта Тес-Хемского участка (составлена А.С. Гибшером, А.А. Терлеевым и С.Ю. Беляевым, 1987, неопубликованные данные). 1 – четвертичные отложения; 2–3 – габбромонцодиорит-гранодиорит-гранитная серия, O: 2 – дайки и малые интрузии кислого состава, 3 – габбро; 4 – теректигская свита (с фауной санаштыкгольского возраста): известняки, песчаники, конгломераты, ε_1^{3-4} ; 5 – карахольская свита: андезиты, туфы, вулканомиктовые песчаники, конгломераты, ε_1^2 ; 6 – офиолитовые габбро тесхемской серии, V; 7 – серпентинитовый меланж; 8 – кускуннугская свита: базальты, туфы, сланцы, кварциты, известняки, V- ε_1^1 ; 9 – разломы, достоверные и предполагаемые; 10 – точки отбора образцов и их номера

Fig. 1. Geological position and structure of the Tes-Khem site

 $a - V - \varepsilon$ island-arc systems of Central Asia (compiled using data from [Dobretsov, Buslov, 2007]): 1 – Tuva (T); 2 – others: S – Salair, K-A – Kuznetsk-Altai, N-S – Nord-Sayan, L – Lake, D – Dzhida; 3 – main faults and terrane boundaries; b – The scheme of geodynamic zoning of the Tuva island-arc system (compiled by A.A. Mongush using data from [Берзин, Кунгурцев, 1996; Preliminary..., 1999]). ST – Sayan-Tuva fore-arc zone, subzones: Dz – Dzhebash, Kr – Kurtushiba, K-t – Khemchik-Tapsa, Sk – Systyghem; T-Kh – Tannuola–Khamsara island arc zone, subzones: Ta – Tannuola, On – Ondum, Kh – Khamsara; ET – East Tuva back-arc zone, subzones: Ag – Agardag, Kkh – Kaakhem, Uo – Ulugoy, Khr – Kharal. Other island-arc systems: N–S – Nord-Sayan, L – Lake. WS – Western Sayan continental marginal turbidite zone. TMM – Tuva-Mongolian massif; c – Geological map of the Teskhem site (by A.S. Gibsher, A.A. Terleev and S.Y. Belyaev, 1987, unpublished data). 1 – Quaternary deposits; 2–3 – gabbromonzodiorite-granite series, O: 2 – dikes and small intrusions of acid composition, 3 – gabbro; 4 – Terektig formation (with fauna of the Sanashtykgol age): limestones, sandstones, conglomerates, ε_1^{3-4} ; 5 – Karakhol formation: andesites, tuffs, volcanomictic sandstones, conglomerates, ε_1^2 ; 6 – ophiolite gabbro of the Teschem series, V; 7 – serpentinite melange; 8 – Kuskunnug formation: basalts, tuffs, shales, quartzites, limestones, V– ε_1^1 ; 9 – faults, reliable and assumed; 10 – sampling points and their numbers



Рис. 2. Обнажение пиллуо-лав в серпентинитовом меланже (точка 384 на рис. 1, *c*)



Fig. 2. Pillowbasalts outcrop in serpentinite mélange (point 384 in Fig. 1, c)

Рис. 3. Микрофотографии пиллоу-лав базальтов

Ab – альбит, *Av* – авгит, *Cpx* – клинопироксен, *Pl* – плагиоклаз, *Ti-av* – титанавгит. 383/2 – николи параллельны, в остальных скрещены

Fig. 3. Micrographs pillowbasalts

Ab - albite, Av - augite, Cpx - clinopyroxene, Pl - plagioclase, Ti-av - titanavgite. 383/2 - nicoli are parallel, crossed in the rest

Вещественный состав

Базальты на Тес-Хемском участке находятся в составе кускуннугской толщи, а также в серпентинитовом меланже (см. рис. 1, *c*, рис. 2).

Базальты кускуннугской толци (образцы 504– 506) – это порфировые породы с микроофитовой или трахитоидной основной массой (см. рис. 3). Главные минералы: клинопироксен (в том числе авгит в порфировых выделениях) – 50 %, плагиоклаз – 30 %, второстепенные: ильменит – 5–7 %, актинолит – 8– 10 %, хлорит < 5 %, эпидот < 1 %. Миндалины размером до 5 мм составляют около 10 % породы и сложены агрегатами: альбит + хлорит + эпидот, альбит + карбонат, кварц + карбонат, в том числе карбонат с тонкозернистым гранатом. С лавами ассоциируют комагматичные им дайки: обр. 504 – порфировый базальт с гиалопилитовой основной массой (рис. 3).

Базальты из включения в меланже отобраны в количестве четырех образцов, расстояние между точками опробования составило около 5 м. Эти породы представляют собой пиллоу-лавы с мелкоминделекаменной текстурой и гиалокластитами в межподушечном пространстве (см. рис. 2) и с неоднородным составом и структурой, ввиду чего они разделены на две группы. Первую группу составляют образцы 384 и 383/3. Образец 384 – порфировый базальт с пилатакситовой основной массой, включающей хлорит + эпидот + актинолит + лейкоксен (70%), плагиоклаз (20%) и мелкие ($\leq 0,1$ мм) игольчатые кристаллы авгита (5%). Последний слагает также порфировые выделения и гломеропорфировые срастания размерами 0,3–1,0 мм (5%). Образец 383/3 – базальт с мелкозернистой (0,5–1,0 мм), интерсертальной структурой и миндалекаменной текстурой. Состоит из удлинённо-призматических кристаллов пренитизированного плагиоклаза (50%), авгита (10%), бурой роговой обманки (15%), в интерстициях – продукты девитрификации стекла: хлорит + кальцит + актинолит (17%), встречаются включения титаномагнетита, граната, апатита.

Вторая группа пиллоу-лав – обр. 383/1 и 383/2 – это афировые базальты с игольчатыми и шестоватыми, мелкими (0,5–0,01 мм) кристаллами светлорозового титанавгита, часто образующих «звёздочки», сферолиты. Интестиции между крупными кристаллами титанавгита выполнены плагиоклазом, а между мелкими кристаллами титанавгита – агрегатом из хлорита, эпидота, карбоната. Есть единичные чешуйки бурого биотита. Около 10 % площади шлифа составляют миндалины размером 0,3–3,0 мм, заполненные цеолитом и кальцитом.

Таблица 1

Содержания главных (мас. %, скорректированные на сухой остаток) и редких (г/т) элементов в базальтах Тес-Хемского участка

Table 1

Major-element (wt %, LOI corrected) and trace-element (ppm) composition of Tes-Khem site basalts

Полоти	Куск	суннугские база	ЛЬТЫ	Ультра-Т	і базальты	Ультра- <i>К</i> базальты		
породы	506	505	504 (<i>d</i>)	384	383/3	383/1	383/2	
SiO ₂	49,69	52,53	52,05	47,27	44,36	50,45	50,54	
TiO ₂	2,81	2,60	2,52	3,73	4,27	1,02	1,07	
Al_2O_3	11,86	10,77	12,54	11,47	12,64	16,40	16,32	
Fe_2O_3	12,06	9,20	12,93	12,45	14,99	9,90	10,03	
MnO	0,13	0,14	0,14	0,15	0,17	0,15	0,15	
MgO	9,15	7,50	6,19	8,60	7,21	7,63	7,73	
CaO	9,96	12,12	7,37	11,61	12,28	8,04	7,96	
Na ₂ O	3,69	4,36	5,27	2,82	2,28	2,81	2,70	
K ₂ O	0,32	0,45	0,66	1,44	1,20	3,26	3,17	
P_2O_5	0,32	0,35	0,32	0,46	0,61	0,33	0,33	
LOI	4,58	2,70	1,61	1,53	6,85	3,24	4,63	
Всего	100,56	100,22	100,85	98,92	98,81	98,95	99,02	
Mg#	0,60	0,62	0,49	0,58	0,49	0,60	0,60	
Rb	0,5	3,55	3,5	27,7		28,8		
Sr	206	651	393	492		628		
Y	8,17	18,07	12,09	24,3		20,3		
Zr	65,92	134,17	89,83	228		99		
Nb	10,34	24,34	11,87	41,95		3,74		
Cs	-	—	-	1,67		0,20		
Ba	53	299	137	209		547		
La	6,56	18,7	8,36	35,41		18,52		
Ce	12,51	32,13	14,58	78,91		44,59		
Pr	2,35	5,26	2,45	9,97		6,02		
Nd	12,45	24,9	12,89	42,09		25,49		
Sm	3,86	6,71	4,17	8,94		5,13		
Eu	1,28	2,39	1,59	2,95		1,78		
Gd				7,89		4,77		
Tb				1,01		0,66		
Dy	2,88	4,81	2,74	5,82		4,04		
Но	0,46	0,89	0,54	0,97		0,81		
Er	1,37	2,18	1,6	2,39		2,10		
Tm	0,19	0,33	0,22	0,29		0,30		
Yb	1,37	1,96	1,47	1,75		2,00		
Lu	0,18	0,3	0,21	0,26		0,29		
Hf	2,2	4,04	2,67	5,06		2,52		
Та	0,87	1,83	0,98	2,57		0,18		
Th	0,65	2,05	0,9	3,14		1,72		

Породы	Кускуннугские базальты			Ультра-Та	і базальты	Ультра-К базальты		
	506	505	504 (<i>d</i>)	384	383/3	383/1	383/2	
U	0,19	0,24	0,13	0,78		0,56		
Th _n /Yb _n	2,6	5,7	3,3	9,7		4,7		
La_n/Yb_n	3,3	6,5	3,9	13,8		6,3		

Примечание. d – дайка. Анализы выполнены в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) методом ICP-MS на масс-спектрометре Element (аналитики С.В. Палесский и И.В. Николаева).

Note. d – dyke. The analyses were performed at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk) by ICP-MS on the mass spectrometer Element (performers S.V. Palessky and I.V. Nikolaeva).

Различия в петрографическом составе изученных базальтов подтверждаются также их петрохимическими особенностями (см. табл. 1, рис. 4). Так, базальты кускуннугской толщи – это относительно высококремнистые породы, отвечающие составу базальта и андезибазальта, низкоглиноземистые $Al_2O_3 = 10,77-12,54$ мас. %, высокотитанистые $TiO_2 = 2,52-2,81$ мас. %, умереннокалиевые $K_2O = 0,32-0,66$ мас. %, субщелочные $Na_2O+K_2O = 4,01-5,94$ мас. % породы. Далее они называются кускуннугскими базальтами.



Рис. 4. Петрохимические диаграммы для кускуннугских, ультратитанистых и ультракалиевых базальтов *a* – классификационная диаграмма SiO₂ – Na₂O + K₂O [Le Bas et al., 1986]. Поля составов: А – андезит, В – базальт, ВА – андезибазальт, BSN – базанит, BTA – трахиандезибазальт, PB – пикробазальт, TB – трахибазальт, TEP – тефрит; *b* – бинарная диаграмма MgO – Al₂O₃; *c* – классификационная диаграмма SiO₂ – K₂O [Rickwood, 1989]: I – низкокалиевые, II – умереннокалиевые, III – высококалиевые, IV – ультракалиевые; *d* – бинарная диаграмма MgO – TiO₂

Fig. 4. Petrochemical diagrams for Kuskunnug formation basalts (green diamonds) and serpentinite melange basalts, including *ultra-Ti* (red circles) and *ultra-K* (blue triangles) basalts

a – The classification diagrams of SiO₂ – Na₂O + K₂O [Le Bas et al., 1986]. Composition fields: A – andesite, B – basalt, BA – basaltic andesit, BSN – bazanit, BTA – basaltic trachyandesite, PB – picrobasalt, TB – trachybasalt, TEP – tefrit; b – The binary diagrams of MgO – Al₂O₃; c – The classification diagrams of SiO₂ – K₂O [Rickwood, 1989]: I – low potassium, II – moderately potassium, III – high potassium, IV – ultrapotassium; d – The binary diagrams of MgO – TiO₂



Рис. 5. Геохимические диаграммы для базальтов Тес-Хемского участка

a, b – нормализованные к примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989] содержания несовместимых редких элементов; c – дискриминационная диаграмма Nb/Th–Zr/Nb [Condie, 2005]; d – кривые частичного плавления шпинелевого и гранатового перидотита на диаграмме La/Sm–Lu/Hf по [Regelous et al., 2003]. Составы N-MORB и OIB по [Sun, McDonough, 1989], E-MORB – [Klein, 2003]

Fig. 5. Geochemical diagrams for Tes-Khem site basalts

a, b – Concentrations of incompatible trace elements, normalised to primitive mantle values [Sun, McDonough, 1989]; c – discrimination diagram Nb/Th – Zr/Nb [Condie, 2005]; d – curves of partial melting of spinel and garnet peridotites on the La/Sm – Lu/Hf diagram by [Regelous et al., 2003]. Compositions of N-MORB and OIB by [Sun, McDonough, 1989], E-MORB – [Klein, 2003]. For some symbols, see Fig. 4.

Базальты из включения в меланже (обр. 384 и 383/1) на диаграмме «SiO₂ – Na₂O+K₂O» попадают в поле базальта и базанита при Na₂O + K₂O = 4,26 и 3,48 мас. %; для них также характерны низкие содержания Al₂O₃ = 11,47 и 12,64 мас. %, высокие – K₂O = 1,20 и 1,44 мас. % (см. рис. 4), а по содержанию TiO₂ = 3,73 и 4,27 мас. % соответственно (табл. 1), их можно назвать *ультратитанистыми базальтами* (по [Классификация..., 1981] содержание TiO₂ в базальтах нормального ряда составляет менее 3,0 мас. %).

Базальты из включения в меланже (обр. 383/1 и 383/2): на диаграмме «SiO₂ – Na₂O+K₂O» их состав соответствует трахибазальту при Na₂O + K₂O = 6,07

и 5,87 мас. %; для них характерны повышенные содержания $Al_2O_3 = 16,40$ и 16,32 мас. % и умеренные $TiO_2 = 1,02$ и 1,07 мас. %; по содержанию $K_2O = 3,26$ и 3,17 мас.% эти породы относятся к ультракалиевым базальтам (см. табл. 1, рис. 4).

Обоснованность выделения трех групп базальтов, различающихся между собой петрографическими и петрохимическими особенностями, подтверждается и их геохимическим составом (см. табл. 1, рис. 5). *Кускуннугские базальты* по содержанию и особенностям распределения несовместимых редких элементов $Th_n/Yb_n = 2,6-5,7$, $La_n/Yb_n = 3,3-3,9$ близки к базальтам E-MORB-типа: $Th_n/Yb_n = 2,2$, $La_n/Yb_n = 2,9$, а на дис-

криминационной диаграмме Nb/Th-Zr/Nb точки их составов располагаются в пограничной зоне между полями ОІВ и ОРВ. Спектр распределения редких в *ультратитанистых* базальтах: элементов Th_n/Yb_n = 9,7, La_n/Yb_n = 13,8 (см. табл. 1, рис. 5, *b*), почти совпадает с таковым в OIB: $Th_n/Yb_n = 10,1$, La_n/Yb_n = 11,7 [Sun, McDonough, 1989]. Особенности распределения редких элементов в ультракалиевых базальтах – отрицательные аномалии Nb, Zr, Hf и Ті - свидетельствуют о формировании их мантийного источника над зоной субдукции [Pearce et al., 1984], что видно также на диаграмме Nb/Th-Zr/Nb (см. рис. 5, *b*, *c*).

На диаграмме La/Sm–Lu/Hf (см. рис. 5, d), позволяющей оценить степень плавления и фазовый состав мантийного протолита, геохимический состав кускуннугских базальтов свидетельствует о том, что их исходные расплавы могли быть выплавлены при 5–15 %-й степенях частичного плавления гранатового перидотита. Мантийный протолит *ультратитанистых базальтов* плавился при более низкой степени плавления, ~2 %, гранатового перидотита, близко с источнику ОІВ. Состав *ультракалиевых базальтов* свидетельствует о формировании его мантийного источника на уровне шпинелевого перидотита при низкой, ~2 %, степени его частичного плавления, что в целом согласуется с вышеприведенными данными о формировании их мантийного источника над зоной субдукции.

Значение параметра ε Nd(T) в ультратитанистых базальтах имеет наиболее низкие положительные значения ε Nd(T) = +4,0. Для ультракалиевых базальтов ε Nd(T) составляет +6,4. В кварцевом диорите карахольской свиты этот параметр равен +5,8 (табл. 2).

Таблица 2

Sm-Nd изотопные данные для пород Тес-Хемского участка

Table 2

Sm-Nd isotopic data for rocks of the Tes-Khem site

№ п/п	№ образца	Порода	Воз- раст, млн лет	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd±2σизм.	εNd(T)	TNd (DM), млн лет
1	384	Ультра- <i>Ті</i> базальт	570	8,463	40,197	0,127254	0,512581±9	4,0	1006
2	383/1	Ультра- <i>К</i> ба- зальт	570	5,789	27,164	0,128819	0,512712±6	6,4	789
3	AT-293	Кварцевый диорит кара- хольской сви-	525	8,320	41,771	0,120411	0,512646±25	5,8	826

Примечание. Sm-Nd изотопные анализы получены на масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) в статическом режиме П.А. Серовым в ГИ КНЦ РАН (Апатиты). Уровень холостого опыта за время исследований составлял 0,03–0,2 нг для Sm, 0,1–0,5 нг для Nd. Точность определения концентраций Sm и Nd составила $\pm 0,5$ %, изотопных отношений ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd – $\pm 0,5$ %, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd – $\pm 0,005$ % (2 σ).

Note. The Sm and Nd isotope compositions were measured on a Finnigan-MAT 262 (RPQ) mass spectrometer in the static regime at the Geological Institute, Apatity, analyst P.A. Serov. The blank sample contained 0.03–0.2 ng Sm and 0.1–0.5 ng Nd. The accuracy of determination was as follows: Sm and Nd concentrations $-\pm 0.5$ %, 147 Sm/ 144 Nd $-\pm 0.5$ %, and 143 Nd/ 144 Nd $-\pm 0.005$ % (2 σ).

Обсуждение результатов и возможная геодинамическая позиция базальтов

Результаты ранее проведенных палеогединамических исследований $V-C_1^1$ базальтов Агардагской подзоны весьма неоднозначны. Так, одни исследователи лавы базальтов Тес-Хемского участка рассматривают как результат низких степеней плавления погружающегося слэба на начальной стадии субдукции [Pfänder et al., 2002; Pfänder, Kröner, 2004]. Как видно из рис. 5, *a*, изученные Й. Пфендером с коллегами лавы базальтов Тес-Хемского участка характеризуются отрицательными аномалиями Nd. По нашим же данным, образцы пиллоу-лав кускуннугской толщи и из меланжа характеризуются, наоборот, положительными аномалиями Nd (см. рис. 5 *a*, *b*), а надсубдукционные геохимические характеристики имеют только андезитовые порфириты ${\mathbb C_1}^2$ карахольской свиты [Монгуш и др., 2021]. Поле развития ${\mathbb C_1}^{3-4}$ терешкинской свиты с археоциатами, рассеченное серией северо-восточных ордовикских даек (см. рис. 1, *c*), на карте зарубежных коллег показано как комплекс параллельных даек и массивных базальтов офиолитов, а возрастной диапазон обломочно-карбонатной толщи Тес-Хемского участка (карахольской и терешкинской свит по [Гибшер, Терлеев, 1989]) они от раннего кембрия неоправданно «растягивают» до неопротерозоя. Отметим, что датировка возраста офиолитов Pb-Pb методом по цирконам из плагиогранита в Агардагском массиве показала значение 569,6 ± 1,7 млн лет [Pfänder, Кгöner, 2004]. Другие исследователи лавы и дайки базальтов Тес-Хемского участка рассматривают как продукт начального и промежуточного этапов в тектономагматической эволюции от источника OIBтипа до источника N-MORB-типа в палеогеодинамических условиях развития рифтогенных структур типа Красноморского рифта [Куренков и др., 2002; Добрецов и др., 2005].

Е-MORB-подобные кускуннугские базальты и ОІВ-подобные ультратитанистые базальты могли быть образованы из достаточно глубинного мантийного источника на уровне гранатового перидотита при разных степенях его частичного плавления (5-15 и 2 % соответственно). Как видно из рис. 5, b-d, по геохимическому составу они похожи на базальты V₂−€¹ алдынбулакской толщи Саяно-Тувинской преддуговой зоны (см. рис. 1, b), имеющих такие же высокие и ультравысокие содержания $TiO_2 = 2,00-$ 4,28 мас. % [Монгуш, 2016]. Кроме того, и по Sm-Nd изотопному составу ультратитанистые базальты Агардагской задуговой подзоны и алдынбулакские базальты Хемчикско-Тапсинской преддуговой подзоны не различаются между собой. Так, если єNd(T) для первых составляет +4,0 (см. табл. 2), то для вторых он варьирует в интервале +3,7...+4,5 [Монгуш, 2016]. Близкий состав кускуннугских и ультратитанистых базальтов, с одной стороны, и алдынбулакских базальтов - с другой, а также одинаковый возраст кускуннугской и алдынбулакской толщ и их одинаковый литологический состав (в обеих толщах представлены базальты, кремни, сланцы, песчаники, карбонаты) могут свидетельствовать в пользу того, что как те, так и другие базальты были сформированы в одних и тех геодинамических условиях.

Ранее, опираясь на данные [Dilek, Furnes, 2011], было высказано предположение, что геохимический состав алдынбулакских (инициальных) базальтов Саяно-Тувинской преддуговой зоны может быть обусловлен магматическими процессами на стадии инициации сублукции при плавлении глубокого, обогашенного мантийного источника [Монгуш, 2016]. В своей обзорной статье Дилек и Фарнес приводят данные о том, что на стадии инициации субдукции, в результате понижения давления, происходит выплавление из фертильной мантии обогащенных несовместимыми элементами базальтов. В дальнейшем в источниках базальтов повышается роль деплетированного источника, который начинает плавиться под воздействием слэбовых флюидов и в результате проявления процессов «rollback», сопровождаемого надсубдукционным спредингом. По геохимическому составу все эти базальты соответствуют различным вариациям MORB-подобных базальтов. Мантийная магмогенерация в начальный период субдукции охватывает широкую зону с образованием офиолитов эмбриональных задуговопреддуговых (backarc to forearc) обстановок [Dilek, Furnes, 2011]. Похожие результаты опубликованы и в других статьях [Whattam, Stern, 2011; Reagan et al., 2017; Shervais et al., 2019]. С учетом сказанного, мы предполагаем, что ультратитанистые и кускуннугские базальты были образованы на стадии инициации субдукции около 570 млн лет назад при 2 и 5–15 %-й степенях частичного плавления гранатового перидотита соответственно.

Базальты с N-MORB-подобными характеристиками, слагающие чонсаирскую толщу и включения в меланже в районе Агардагского массива [Добрецов и др., 2005; Pfänder et al., 2002; Мокрушников В.П., неопубликованные данные], представляют собой, по нашему мнению, лавовый комплекс агардагских задуговых офиолитов.

Актуалистический метод позволяет нам предположить, что генезис *ультракалиевых базальтов* соответствует калиевым тыловодужным базальтоидам Камчатки и Японии, которые «развиваются в условиях задугового растяжения» [Мартынов, 1999, с. 64].

Обобщая все наши предположения, всё многообразие генетических типов базальтов Агардагской подзоны возможно объяснить следующим образом: около 570 млн лет назад, во время инициации субдукции из глубинного, обогащенного источника были выплавлены ультратитанистые и кускуннугские базальты; в начальной стадии субдукции, в процессе задугового спрединга были образованы агардагские офиолиты, в том числе чонсаирские базальты; при станционарном режиме субдукции в тылу островной дуги были образованы ультракалиевые базальты.

Результаты настоящего исследования, из-за ограниченного количества проанализированных образцов, рассматриваются как предварительные.

Выводы

1. OIB-подобные ультратитанистые базальты и Е-MORB-подобные кускуннугские базальты Агардагской задуговой подзоны были образованы, возможно, на стадии инициации субдукции около 570 млн лет назад при 2-й и 5–15 %-й степенях частичного плавления гранатового перидотита соответственно.

2. Умереннотитанистые, относительно высокоглинозёмистые, ультракалиевые базальты Агардагской задуговой подзоны, имеющие надсубдукционные геохимические характеристики, были образованы, возможно, в тылу Таннуольско-Хамсаринской островодужной системы в условиях задугового растяжения.

Список источников

Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 1. С. 63–81.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 93–108.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Буслов М.М., Котляров А.В. Магматизм и геодинамика Палеоазиатского океана на вендкембрийском этапе его развития // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 9. С. 952–967.

Гибшер А.С., Терлеев А.А. Региональная стратиграфия позднего докембрия – раннего палеозоя Сангилена // Структурновещественные комплексы юго-восточной Тувы. Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1989. С. 3–26.

Изох А.Э., Шелепаев Р.А., Егорова В.В. Эволюция базитового магматизма кембро-ордовикского коллизионного этапа Алтае-Саянской складчатой области (на примере Западного Сангилена) // Фундаментальные проблемы геологии и тектоники Северной Евразии : тез. докл. конф. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. С. 24–26.

Классификация и номенклатура магматических горных пород. М. : Недра, 1981. 160 с.

Куренков С.А., Диденко А.Н., Симонов В.А. Геодинамика палеоспрединга. М. : Геос, 2002. 294 с.

Мартынов Ю.А. Геохимия базальтов активных континентальных окраин и зрелых островных дуг (на примере Северо-Западной Пацифики). Владивосток : Дальнаука, 1999. 218 с.

Монгуш А.А. Базальтовые комплексы Саяно-Тувинской преддуговой зоны: геологическое положение, геохимия, геодинамика // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. Эколого-экономические проблемы природопользования. Вып. 14. Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2016. С. 74–94.

Монгуш А.А. Тектоническая эволюция ранних каледонид Тувы и метаморфизм северо-западной окраины Тувино-Монгольского массива // Геология, магматизм и металлогения Центра Азии. 2018: Рудно-магматические системы Сангилена (щелочные интрузивы. карбонатиты) : материалы I Всерос. полевой конф. с междунар. участием (14–30.07.2018, Сангилен, Россия). Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2018. С. 75–83.

Монгуш А.А., Лебедев В.И., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Дружкова Е.К., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В., Загорная Н.Ю., Травин А.В., Серов П.А. Тектономагматическая эволюция структурно-вещественных комплексов Таннуольской зоны Тувы в позднем венде-раннем кембрии (на основе геохимических, Nd изотопных и геохронологических данных) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 5. С. 649–665.

Монгуш А.А., Мокрушников В.П., Дружкова Е.К. Геолого-петрографические и петрогеохимические особенности базальтов и андезитовых порфиритов Тесхемского участка Агардагской задуговой подзоны (Южная Тува) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Взаимодействие науки, экономики и общества как фактор развития региона». Кызыл : ТувИКОПР СО РАН, 2021. С. 112–115.

Condie K.C. High field strength element rations in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79, No. 3–4. P. 491–504.

Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // Geological Society of America Bulletin. 2011. V. 123(3/4). P. 387–411.

Klein E.M. Geochemistry of the igneous oceanic crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust / ed. by R.L. Rudnick. 2003. P. 433–463.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B.A. Chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram // Journal of Petrology. 1986. V. 27, No. 3. P. 745–750.

Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites // Marginal Basin Geology, Geol. Soc / eds by B.P. Kokelaar, M.F. Howells. London, 1984. Spec. Publ. 16. P. 77–94.

Pfänder J.A., Jochum K.P., Kozakov I.K. Kröner A., Todt Wol. Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardag Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data // Contrib. Mineral. Petrol. 2002. V. 143. P. 154–174.

Pfänder J.A., Kröner A. Tectono-magmatic evolution, age and emplacement of the Agardagh Tes-Chem ophiolite in Tuva, Central Asia: crustal growth by island arc accretion // Precambrian Ophiolites and Related Rocks. Edited by Timothy M. Kusky. Developments in Precambrian Geology. 2004. V. 13. P. 207–221.

Preliminary publications book 1 from project on mineral resources, metallogenesis, and tectonics of Northeast Asia / eds by W.J. Nokleberg, V.V. Naumova, M.I. Kuzmin, T.V. Bounaeva. Open-File Report 99-165. U.S. Department of the Interrior, U.S. Geological Survey. 1999. (CD).

Reagan M.K., Pearce J.A., Petronotis K., Almeev R.R., Avery A.J., Carvallo C., Chapman T., Christeson G.L., Ferré E.C., Godard M., Heaton D.E., Kirchenbaur M., Kurz W., Kutterolf S., Li H., Li Y., Michibayashi K., Morgan S., Nelson W.R., Prytulak J., Python M., Robertson A.H. F., Ryan J.G., Sager W.W., Sakuyama T., Shervais J.W., Shimizu K., Whattam S.A. Subduction initiation and ophiolite crust: New insights from IODP drilling // International Geology Review. 2017. V. 59, No. 11. P. 1439–1450.

Rickwood P.C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements // Lithos. 1989. V. 22. P. 247–263.

Regelous M., Hofmann A.W., Abouchami W., Galer J.G. Geochemistry of lavas from the Emperor seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma // J. Petrol. 2003. V. 44, No. 1. P. 113–140.

Shervais J.W., Reagan M., Haugen E., Almeev R.R., Pearce J.A., Prytulak J., Ryan J.G., Whattam S.A., Godard M., Chapman T., Li H., Kurz W., Nelson W.R., Heaton D., Kirchenbaur M., Shimizu K., Sakuyama T., Li Y, Vetter S.K. Magmatic response to subduction initiation: Part 1. Fore-arc basalts of the Izu-Bonin arc from IODP Expedition 352 // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. P. 314–338.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Magmatism in the ocean basins / eds by A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. London. Spac. Publ. 1989. V. 42. P. 313–346.

Whattam S.A., Stern R.J. The 'subduction initiation rule': a key for linking ophiolites, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation // Contrib. Mineral Petrol. 2011. V. 162. P. 1031–1045.

References

Berzin N.A., Kungurtsev L.V. *Geodinamicheskaia interpretatsiia geologicheskikh kompleksov Altae-Saianskoi oblasti* [Geodynamic interpretation of geological complexes of the Altai-Sayan region] // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 1996. V. 37. No. 1. pp. 63–81. In Russian

Dobretsov N.L., Buslov M.M. Late Cambrian-Ordovician tectonics and geodynamics of Central Asia // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 2007. V. 48. No. 1. pp. 93–108. In Russian

Dobretsov N.L., Simonov V.A., Buslov M.M, Kotliarov A.V. *Magmatizm i geodinamika Paleoaziatskogo okeana na vendkembriiskom etape ego razvitiia* [Magmatism and geodynamics of the Paleoasian ocean at the Vendian-Cambrian stage of its evolution] // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 2005. V. 46. No. 9. pp. 952–967. In Russian

Gibsher A.S., Terleev A.A. *Regional'naia stratigrafiia pozdnego dokembriia – rannego paleozoia Sangilena* [Regional stratigraphy of the Late Precambrian – Early Paleozoic Sangilene] // Strukturno-veshchestvennye kompleksy iugo-vostochnoi Tuvy (Structural-material complexes of Southeastern Tuva). Novosibirsk: IGiG SO AN SSSR. 1989. pp. 3–26. In Russian

Izokh A.E., Shelepaev R.A., Egorova V.V. *Evoliutsiia bazitovogo magmatizma kembro-ordovikskogo kollizionnogo etapa Altae-Saianskoi skladchatoi oblasti (na primere Zapadnogo Sangilena)* [Evolution of basitic magmatism of the Cambro-Ordovician collisional stage of the Altai-Sayan folded region (on the example of the Western Sangilen)] // Fundamental'nye problemy geologii i tektoniki Severnoi Evrazii: Tezisy dokladov konferentsii (Fundamental problems of geology and tectonics of Northern Eurasia: Abstracts of the conference reports). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2001. pp. 24–26. In Russian

Klassifikatsiya i nomenklatura magmaticheskikh gornykh porod [Classification and nomenclature of igneous rocks]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 160 p. In Russian

Kurenkov S.A., Didenko A.N., Simonov V.A. *Geodinamika paleospredinga* [Geodynamics of paleospreading]. Moscow : Geos. 2002. 294 p. In Russian

Martynov Iu.A. *Geokhimiia bazal'tov aktivnykh kontinental'nykh okrain i zrelykh ostrovnykh dug (na primere Severo-Zapadnoi Patsifiki)* [Geochemistry of bazalts of active continental margins and mature island arcs (North-West Pacific)]. Vladivostok: Dal'nauka. 1999. 218 p. In Russian

Mongush A.A. *Bazal'tovye kompleksy Saiano-Tuvinskoi preddugovoi zony: geologicheskoe polozhenie. geokhimiia. geodinamika* [Basaltic complexes of the Sayan-Tuva forearc: geological setting, geochemistry, geodynamics] // Sostoianie i osvoenie prirodnykh resursov Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noi Azii. Ekologo-ekonomicheskie problemy prirodopol'zovaniia: Vypusk 14 (State and exploration of natural resources of Tuva and adjacent regions of Central Asia. Ecological and economic problems of natural resources use: fascicle 14). Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN. 2016. pp. 74–94. In Russian

Mongush A.A. *Tektonicheskaia evoliutsiia rannikh kaledonid Tuvy i metamorfizm severo-zapadnoi okrainy Tuvino-Mongol'skogo massiva* [Tectonic evolution of the Early Caledonides of Tuva and metamorphism of the North-Western margin of the Tuva-Mongolia massif] // Geologiia. magmatizm i metallogeniia Tsentra Azii. 2018: Rudno-magmaticheskie sistemy Sangilena (shchelochnye intruzivy. karbonatity): Materialy I Vserossiiskoi polevoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (Geology, magmatism and metallogeny of Central Asia. 2018: Ore-magmatic systems of the Sangilen (alkaline intrusives, carbonatites), 14–30.07.2018. Sangilen. Russia). Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN. 2018. pp. 75–83. In Russian

Mongush A.A., Lebedev V.I., Kovach V.P., Sal'nikova E.B., Druzhkova E.K., Yakovleva S.Z., Plotkina Yu.V., Zagornaya N.Yu., Travin A.V., Serov P.A. The tectonomagmatic evolution of structure-lithologic complexes in the Tannu-Ola zone, Tuva, in the Late Vendian–Early Cambrian (from geochemical, Nd isotope, and geochronological data) // Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]. 2011. V. 52. No. 5. pp. 649–665. In Russian

Mongush A.A., Mokrushnikov V.P., Druzhkova E.K. Geologo-petrograficheskie i petrogeokhimicheskie osobennosti bazal'tov i andezitovykh porfiritov Teskhemskogo uchastka Agardagskoi zadugovoi podzony (Iuzhnaia Tuva) [Geological-petrographic and petrogeochemical features of basalts and andesitic porphyrites of the Teskhemsky area of the Agardagskaya arc subzone (South Tuva)] // Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vzaimodeistvie nauki, ekonomiki i obshchestva kak faktor razvitiia regiona» (Interaction of science, economy and society as a factor of regional development: Proceedings of the international research-to-practice conference). Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN. 2021. pp. 112–115. In Russian

Condie K.C. High field strength element rations in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. No. 3–4. pp. 491–504.

Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // Geological Society of America Bulletin. 2011. 123(3/4). pp. 387–411.

Klein E.M. Geochemistry of the igneous oceanic crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust (ed. R.L. Rudnick). 2003. pp. 433–463.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B.A. chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // Journal of Petrology. 1986. V. 27. 3. pp. 745–750.

Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar, B.P. and Howells, M.F. (eds) Marginal Basin Geology, Geol. Soc. London. 1984. Spec. Publ. 16. pp. 77–94.

Pfänder J.A., Jochum K.P., Kozakov I.K. Kröner A., Todt Wol. Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardag Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data // Contrib. Mineral. Petrol. 2002. V. 143. pp. 154–174.

Pfänder J.A., Kröner A. Tectono-magmatic evolution, age and emplacement of the Agardagh Tes-Chem ophiolite in Tuva, Central Asia: crustal growth by island arc accretion // Precambrian Ophiolites and Related Rocks. Ed. by Timothy M. Kusky. Developments in Precambrian Geology. 2004. V. 13. pp. 207–221.

Preliminary publications book 1 from project on mineral resources, metallogenesis, and tectonics of Northeast Asia / Editors Warren J. Nokleberg, Vera V. Naumova, Mikhail I. Kuzmin, and Tatiana V. Bounaeva. Open-File Report 99-165. U.S. Department of the Interrior, U.S. Geological Survey. 1999. (CD).

Reagan M.K., Pearce J.A., Petronotis K., Almeev R.R., Avery A.J., Carvallo C., Chapman T., Christeson G.L., Ferré E.C., Godard M., Heaton D.E., Kirchenbaur M., Kurz W., Kutterolf S., Li H., Li Y., Michibayashi K., Morgan S., Nelson W.R., Prytulak J., Python M., Robertson A.H. F., Ryan J.G., Sager W.W., Sakuyama T., Shervais J.W., Shimizu K., Whattam S.A. Subduction initiation and ophiolite crust: New insights from IODP drilling. International Geology Review, 2017. V. 59. No. 11, pp. 1439–1450.

Rickwood P.C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements // Lithos. 1989. V. 22. pp. 247–263.

Regelous M., Hofmann A.W., Abouchami W., Galer J.G. Geochemistry of lavas from the Emperor seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma // J. Petrol. 2003. V. 44. No. 1. pp. 113–140.

Shervais J.W., Reagan M., Haugen E., Almeev R. R., Pearce J.A., Prytulak J., Ryan J.G., Whattam S.A., Godard M., Chapman T., Li H., Kurz W., Nelson W.R., Heaton D., Kirchenbaur M., Shimizu K., Sakuyama T., Li Y, Vetter S.K. Magmatic response to subduction initiation: Part 1. Fore-arc basalts of the Izu-Bonin arc from IODP Expedition 352 // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. 20. pp. 314–338.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Magmatism in the ocean basins. Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. London. Spac. Publ. 1989. V. 42. pp. 313–346.

Whattam S.A., Stern R.J. The 'subduction initiation rule': a key for linking ophiolites, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation // Contrib. Mineral Petrol, 2011. 162. pp. 1031–1045.

Информация об авторах:

Монгуш А.А., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геодинамики, магматизма и рудообразования, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: amongush@inbox.ru

Кужугет Р.В., кандидат геолого-минералогических наук, директор, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: rkuzhuget@mail.ru

Дружкова Е.К., инженер, лаборатория геодинамики, магматизма и рудообразования, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия.

E-mail: druzhkova07@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Mongush Andrey A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Laboratory of Geodynamics, Magmatism and Ore Formation, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia. E-mail: amongush@inbox.ru

Kuzhuget Renat V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: rkuzhuget@mail.ru

Druzhkova Evgeniya K., Engineer, Laboratory of Geodynamics, Magmatism and Ore Formation, Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, SB RAS, Kyzyl, Russia.

E-mail: druzhkova07@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.02.2022; одобрена после рецензирования 04.02.2023; принята к публикации 20.06.2023

The article was submitted 10.02.2022; approved after reviewing 04.02.2023; accepted for publication 20.06.2023