



HIGH-PRESSURE METAMORPHIC ROCKS OF THE CHARA OPHIOLITE BELT (CAOB): AGE AND EXHUMATION CONDITIONS

M.S. Zdrokova ¹✉, V.G. Vladimirov ^{1,2}, A.V. Travin ^{1,2}

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. A critical element in the construction of tectonic models of exhumation of basalts that have undergone high-pressure metamorphism is the diagnosis of synchronicity and the genetic relationship between deformations and high-pressure metamorphic changes. In this report, these issues are discussed on the example of the metabasalts of the Chara ophiolite belt. In the bottom of the basalt block with the separation of pillow lavas near the Burshabulak farm, crack-vein systems with high-pressure mineral associations were discovered and analyzed, which directly indicates their tectonic origin. It is shown that the conditions for the formation of such vein mineral associations correspond to eclogite-like rocks ($P=18.5$ kbar temperatures of no more than 520 °C). The age of the high-pressure metamorphism basalts of the synchronous type with deformations according to $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope dating of amphiboles cannot be younger than the boundary of 452 ± 14 million years.

KEYWORDS: high-pressure metamorphism; exhumation; basalts; Ar/Ar dating; Chara ophiolite belt

FUNDING: The study was conducted in the framework of state assignment for the IGM SB RAS. Analytical work was carried out at Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 13, 2021

Revised: April 22, 2022

Accepted: April 27, 2022

Correspondence: Marina S. Zdrokova, mkvadrat93@gmail.com

FOR CITATION: Zdrokova M.S., Vladimirov V.G., Travin A.V., 2022. High-Pressure Metamorphic Rocks of the Chara Ophiolite Belt (CAOB): Age and Exhumation Conditions. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0617. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0617

ВЫСОКОБАРИЧЕСКИЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ ЧАРСКОГО ОФИОЛИТОВОГО ПОЯСА (ЦАСП): ВОЗРАСТ И ОБСТАНОВКИ ЭКСГУМАЦИИ ПОРОД

М.С. Здрокова¹, В.Г. Владимиров^{1,2}, А.В. Травин^{1,2}

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Критическим элементом при построении тектонических моделей эксгумации базальтов, претерпевших высокобарический метаморфизм, является диагностика синхронности и генетической связи между деформациями и высокобарическими метаморфогенными изменениями. В настоящем сообщении данные вопросы обсуждаются на примере metabазальтов Чарского офиолитового пояса. В подошве блока базальтов с отдельностью подушечных лав, вблизи фермы Буршабулак, обнаружены и проанализированы трещинно-жильные системы с высокобарическими минеральными ассоциациями, что прямо указывает на их тектоническое происхождение. Показано, что условия образования подобных жильных минеральных ассоциаций отвечают эклогитовой фации ($P=18.5$ кбар, T – не более 520 °C). Возраст высокобарического метаморфизма базальтов, синхронного с деформациями по данным $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопного датирования амфиболов, не может быть моложе рубежа 452 ± 14 млн лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокобарический метаморфизм; эксгумация; базальты; Ar/Ar изотопное датирование; Чарский офиолитовый пояс

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено по государственному заданию ИГМ СО РАН. Аналитические работы выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Критическим элементом при построении тектонических моделей субдукции, метаморфизма и эксгумации базальтов океанической коры является проблема синхронизации геологических событий. При P-T-d-t реконструкциях обычно опираются на мультисистемные (Ar/Ar, U/Pb) и мультиминеральные (Ms, Bt, Amp, Zrn и др.)¹ изотопно-геохронологические методы. В этом случае каждая выборка минералов позволяет оценить, когда порода достигла соответствующей температуры закрытия изотопной системы. Однако подобный подход не снимает вопрос о существовании прямых свидетельств и, соответственно, оценок P-T-d-t условий инициации эксгумирования metabазальтов погруженной океанической коры.

В настоящей работе данные вопросы рассматриваются на примере высокобарических пород и metabазальтов Чарского офиолитового пояса (Чарская тектоническая зона, Чарский пояс).

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Чарский офиолитовый пояс расположен на юго-западной окраине Сибирского континента [Shcherba et al., 1998]. Принято считать, что формирование Чарской зоны тесно связано с процессами закрытия Обь-Зайсанского палеоокеанического бассейна [Polyansky et al., 1979; Polyansky, Khomyakov, 1981; Ermolov et al., 1977, 1983; Vladimirov et al., 2008; Safonova et al., 2012; и др.]. Современная структура Чарского офиолитового

пояса окончательно сформировалась в позднем карбоне – перми [Buslov et al., 2003; Safonova et al., 2004; Kurganskaya et al., 2014]. Однако заложение проникающих тектонических структур Чарского пояса происходило в ордовике [Dobretsov et al., 1979; Dobretsov, Zonenshain, 1985; Volkova et al., 2011; Vladimirov et al., 2008; и др.].

Длительная история развития Чарского пояса обеспечила его сложное тектоническое строение, в пределах которого выделяют до трех типов серпентинитового меланжа [Ermolov et al., 1981; Belyaev, 1985].

Благодаря работам [Polyansky, Khomyakov, 1981; Ermolov et al., 1981; Volkova et al., 2004; и др.], полигон Буршабулак был детально изучен и закартирован (рис. 1). Существующая детальная изученность офиолитов позволила нам выбрать для решения поставленных задач наиболее информативный объект – экзотический блок метаморфизованных базальтов со структурами пиллоу-лав (рис. 1, а, б, в, точка наблюдения КТ 869).

По данным [Volkova et al., 2016a], подушки metabазальтов представлены плотными массивными породами, на 75–80 % состоящими из глаукофана. Помимо амфибола, в породе присутствует эпидот, альбит, хлорит, кварц и сфен.

По геохимическим характеристикам глаукофаны отвечают низкомагнезиальным умеренно титанистым толеитовым базальтам, наиболее близко тяготеющим к базальтам типа N-MORB [Volkova, Sklyarov, 2007; Volkova et al., 2014, 2016a].

¹Здесь и далее сокращения минералов приведены по [Whitney, Evans, 2010].

3. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

При специализированном структурном картировании полигона Буршабулак отдельное внимание было уделено скальным выходам metabазальтов с подушечными лавами (обнажение КТ 869, рис. 1). Подушечные структуры подчеркиваются скорлуповатой отдельностью и развитием жильных петельчатых образований.

В основании скального выхода базальтов были зафиксированы признаки хрупких трещинно-сколовых деформаций (рис. 1, в). Также было обращено особое внимание на появление жил растяжения как в метачертах, так и в metabазальтах. В экзоконтакте базальтов жилы в метачертах выполнены кварц-амфиболовым материалом. В непосредственной близости от них, но в

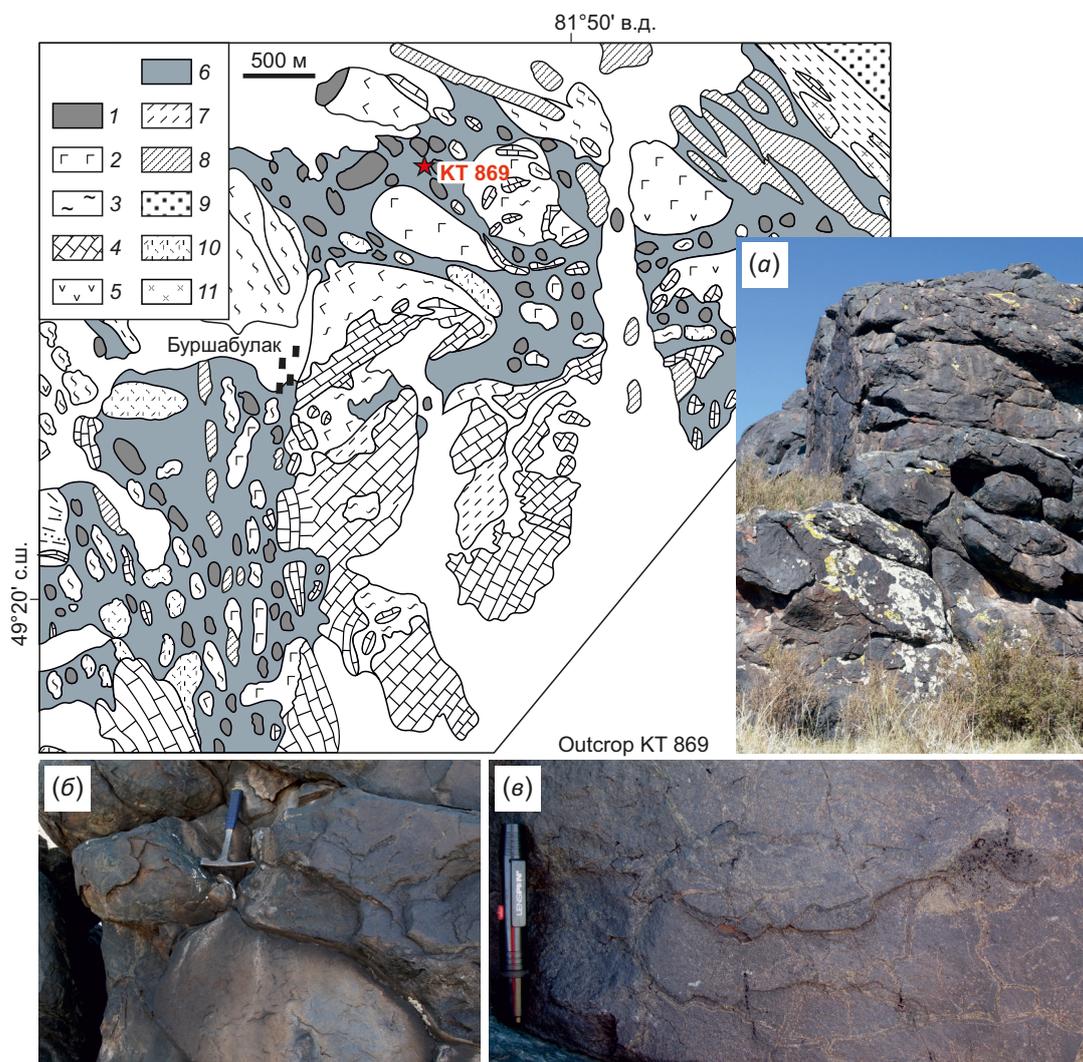


Рис. 1. Позиция высокобарических пород в меланже Чарского офиолитового пояса (район фермы Буршабулак). Схема составлена Н.В. Полянским и дополнена Н.И. Волковой [Volkova et al., 2008, 2011] по материалам [Dobretsov et al., 1979; Ermolov et al., 1981; Khomyakov, 1984]]. На схеме значком красного цвета показано положение metabазальтов со структурами пиллоу-лав (обнажение КТ 869).

(а, б) – вид скального обнажения с подушечными лавами; (в) – зоны дробления и прожилкования в основании тектонического блока metabазальтов (обнажение КТ 869). 1 – блоки высокобарических пород; 2 – базальты беркутинского комплекса (O_2-D_3); 3 – метачерты (O_2-D_3); 4 – девонские известняки; 5 – андезиты верочарского комплекса (C_1); 6 – серпентиниты; 7 – алевролиты и песчаники (C_1); 8 – листвениты; 9 – песчаники (C_1s); 10 – дациты и риодациты верочарского комплекса (C_1); 11 – диоритовые порфириты верочарского комплекса (C_1).

Fig. 1. Position of high-pressure rocks in the melange of the Chara ophiolite belt (the area of the Burshabulak farm).

The diagram was drawn up by N.V. Polyansky and supplemented by N.I. Volkova [Volkova et al., 2008, 2011] based on materials [Dobretsov et al., 1979; Ermolov et al., 1981; Khomyakov, 1984]]. In the diagram, the red icon shows the position of metabasalts with pillow-lava structures (outcrop KT 869).

(a, б) – view of a rock outcrop with pillow lavas; (в) – zones of crushing and veining at the base of the tectonic block of metabasalts (outcrop KT 869). 1 – blocks of high pressure rocks; 2 – basalt, Berkuta complex (O_2-D_3); 3 – metacherts (O_2-D_3); 4 – Devonian limestones; 5 – andesites, Verochar complex (C_1); 6 – serpentinites; 7 – siltstones, sandstones (C_1); 8 – listwanites; 9 – sandstones (C_1s); 10 – dacites and rhyodacites, Verochar complex (C_1); 11 – diorite porphyries, Verochar complex (C_1).

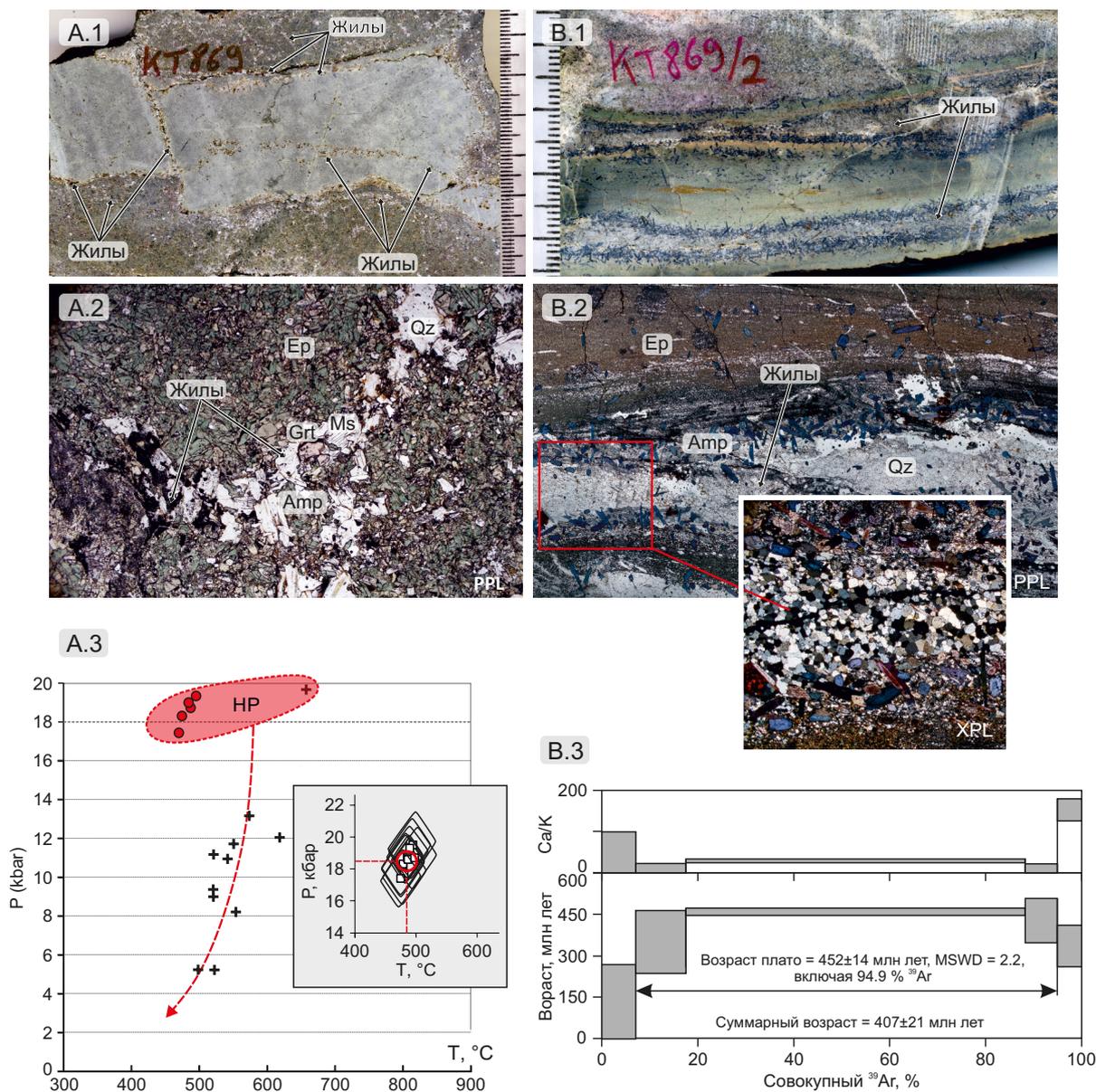


Рис. 2. Условия и возраст жилеобразования в высокобарических метаморфических породах на начальных стадиях инициации тектонического экспонирования метабазальтов.

A.1 – хрупкие деформации в метабазальтах в подошве блока пиллоу-лав. A.2 – формирование жильных систем с выполнением Qz-Ms-Pl-Amp-CPx минеральным агрегатом (микрофотография петрографического шлифа в проходящем свете). A.3 – расчет P-T условий минералообразования для ассоциации Qz-Ms-Pl-Amp-CPx. Красным цветом обозначено поле высокобарических метаморфических пород, отвечающее начальным стадиям их эксгумации. Окружности красного цвета – образец KT 869a. Крестики черного цвета – данные [Volkova et al., 2011].

B.1 – хрупкие трещины, сколы и жилы, формирующиеся в обстановках растяжения в кремнистых породах в основании блока пиллоу-лав. B.2 – кварцевые жилы растяжения с кристаллизацией в зальбандах щелочного амфибола. Микрофотография петрографического шлифа в проходящем свете (PPL) и в скрещенных николях (врезка, XPL). Следует обратить внимание на ориентировку амфибола и гранобластовые структуры кварца. B.3 – результаты изотопного-геохронологического датирования щелочного амфибола (Ar/Ar).

Fig. 2. Conditions and age of veins formation in high-pressure metamorphic rocks at the early stages of initiation of tectonic exhumations of metabasalts.

A.1 – brittle deformations in metabasalts at the base of the Pillow Lava block. A.2 – formation of veins systems with Qz-Ms-Pl-Amp-CPx (micrograph of a petrographic thin section in transmitted light). A.3 – calculation of P-T conditions of mineral formation for the Qz-Ms-Pl-Amp-CPx association. The red color indicates the HP field of metamorphic rocks corresponding to the initial stages of their exhumation. Red circles – sample KT 869a. Black crosses – data from [Volkova et al., 2011].

B.1 – brittle fractures, cracks and veins formed under tension conditions in silica rock at the base of the Pillow Lava block. B.2 – quartz tension veins with crystallization in selvages of alkaline amphibole. Photomicrograph of a petrographic thin section in transmitted light (PPL) and in crossed nicols (XPL). One should pay attention to the orientation of the amphibole and granoblastic structures of quartz. B.3 – results of isotope-geochronological dating of alkaline amphibole (Ar/Ar).

эндоконтактовой зоне внутри подушек метабазальтов подобные жилы представляют собой продукт фрагментирования пород, сопровождающихся хрупкопластичным деформированием и жильобразованием с гранатом и клинопироксеном (рис. 2).

Исходя из структурных наблюдений, был сделан вывод, что мы имеем дело с тектоническим блоком метабазальтов пиллоу-лав, который был экспонирован с дроблением эндоконтактовой зоны и формированием жильных образований.

По результатам микрорентгеноспектрального изучения химического состава минералов проведен анализ P-T условий жильобразования и, соответственно, оценка условий эксгумирования пород. Ar/Ar изучение амфибола позволило бы установить, когда произошло закрытие изотопной системы исследуемого жильного парагенезиса.

4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Состав минералов определялся в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Ltd). Типичные условия анализа изложены в работе [Lavrent'ev et al., 2015].

Для оценки P-T-параметров минералообразования использовалось ПО THERMOCALC [Holland, Powell, 1998], базирующееся на взаимосогласованных базах термодинамических данных.

⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопное датирование амфибола из трещины растяжения в образце КТ 869/2 было проведено в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) по стандартной методике, описанной в работе [Travin, 2016].

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптическое и микрорентгеноспектральное изучение минералов в жильных образованиях метабазальтов показало, что хрупкопластические трещины растяжения выполнены высокобарическим минеральным

парагенезисом Qz+Ep+Ms+Grt+Amr+CPx (обнажение КТ 869, образец КТ 869а, рис. 2). В образце КТ 869а трещины растяжения не являются проникающими; следовательно, метаморфические процессы с формированием данного минерального парагенезиса протекали «in situ» без существенного привноса флюида. Параметры метаморфизма отвечают T=485±45 °C, P=18.5±2.5 кбар (рис. 2, А.3, врезка).

Для определения возраста синкинематического минералообразования в непосредственной близости с образцом КТ 869а в подошве метабазальтов (т.н. КТ 869) отобран образец КТ 869/2 из метачертов (см. рис. 1; рис. 2). Здесь системы жил выполнены кварцевым агрегатом и глаукофаном. Следует обратить внимание на то, что вытянутые кристаллы амфибола ориентированы по направлению растяжения жилы, а кварцевые агрегаты имеют гранобластовые структуры (рис. 2, В.2, врезка XPL). Совокупность микроскопических признаков указывает на то, что в породе после стадии трещино- и жильобразования деформации отсутствовали. Проведенные изотопно-геохронологические исследования позволили получить возраст закрытия изотопной системы для амфибола 452±14 млн лет (табл. 1), что хорошо согласуется с известными датировками [Volkova et al., 2005, 2008, 2011, 2016b; и др.].

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изучение синкинематического минералообразования в системе жил растяжения, расположенных в основании экзотического блока метабазальтов с элементами подушечных лав, показало, что жильобразование происходило в высокобарических условиях, отвечающих фации эклогитов. ⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопное датирование амфибола из трещины растяжения в метачертах указывает на то, что данные события происходили не позднее верхнего ордовика. Условия синкинематического минералообразования позволяют предположить, что жильобразование было связано с динамическими процессами тектонического экспонирования метабазальтов. Однако необходимо подчеркнуть следующие противоречия.

Таблица 1. ⁴⁰Ar/³⁹Ar аналитических данных глаукофана КТ 869/2

Table 1. ⁴⁰Ar/³⁹Ar analytical data of glaucophane КТ 869/2

T °C	t, мин	⁴⁰ Ar, нсм ³	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	Ca/K	Σ ³⁹ Ar, %	Возраст, млн лет ±1σ	
Навеска=111.21 мг, J=0.004199±0.000046*														
650	10	9.4*e ⁻⁹	361.63	43.31	0.1604	0.1029	10.80	16.79	1.223	0.189	38.9	7.1	1.4	265.6
800	10	5.5*e ⁻⁹	142.71	5.13	0.0943	0.0297	1.64	4.65	0.324	0.038	5.9	17.6	325.6	67.8
925	10	23.3*e ⁻⁹	89.91	0.64	0.0066	0.0048	8.05	1.29	0.071	0.007	29.0	88.3	458.4	13.2
1000	10	3.5*e ⁻⁹	141.84	7.33	0.0634	0.0471	2.54	3.51	0.265	0.053	9.1	94.9	426.3	93.3
1130	10	3.3*e ⁻⁹	177.79	7.14	0.1692	0.0444	42.41	7.45	0.440	0.044	152.7	100.0	330.0	75.2

Примечание. * – параметр, характеризующий интегральную интенсивность нейтронного потока.

Note. * – a parameter describing the integral intensity of the neutron flux.

1. Если метаморфические изменения базальтов достигают пиковых значений по давлению, то следует ожидать проявление ретроградных метаморфических процессов, которые должны были быть наиболее интенсивными в зонах трещиноватости. Однако ретроградных изменений в жилах мы не наблюдаем.

2. Если мы имеем дело с высокоскоростными и динамичными процессами тектонического экспонирования метаморфизованных базальтов, то почему в ослабленных трещинно-жилых образованиях отсутствуют признаки наложенных деформаций?

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования метабазальтов Чарского офиолитового пояса в районе полигона Буршабулак позволили на конкретном примере установить синхронность процессов деформирования позднеордовикского возраста и высокобарического метаморфизма базальтов, достигающего 18.5 кбар при температуре не более 485 °С.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Н.И. Волкову, И.В. Кармышеву, Я.В. Куйбиду, В.А. Яковлеву и И.А. Савинского за совместные полевые исследования.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

10. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Belyaev S.Yu., 1985. Tectonics of Chara Zone (East Kazakhstan). Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of the USSR Academy of Sciences. Iss. 650. Novosibirsk, 119 p. (in Russian) [Беляев С.Ю. Тектоника Чарской зоны (Восточный Казахстан) // Труды Института геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 650. Новосибирск, 1985. 119 с.].

Buslov M.M., Watanabe T., Smirnova L.V., Fujiwara I., Iwata K., de Grave I., Semakov N.N., Travin A.V., Kir'yanova A.P., Kokh D.A., 2003. Role of Strike-Slip Faults in Late Paleozoic – Early Mesozoic Tectonics and Geodynamics of the Altai-Sayan and East Kazakhstan Folded Zone. Russian Geology and Geophysics 44 (1–2), 49–75.

Dobretsov N.L., Ermolov P.V., Khomyakov V.D., 1979. Ophiolites and Basement Composition of the Axial Part of the Zaisan Geosyncline. In: Yu.A. Kuznetsov (Ed.), Basite and

Ultrabasite Complexes of Siberia. Iss. 441. Nauka, Novosibirsk, p. 196–219 (in Russian) [Добрецов Н.Л., Ермолов П.В., Хомяков В.Д. Офиолиты и состав фундамента осевой части Зайсанской геосинклинали // Базитовые и ультрабазитовые комплексы Сибири / Ред. Ю.А. Кузнецов. Новосибирск: Наука, 1979. Вып. 441. С. 196–219].

Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., 1985. Riphean – Lower Paleozoic Ophiolites of North Eurasia. Nauka, Novosibirsk, 195 p. (in Russian) [Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П. Рифейско-нижнепалеозойские офиолиты Северной Евразии. Новосибирск: Наука, 1985. 195 с.].

Ermolov P.V., Izokh E.P., Ponomaryova A.P., Tyun V.D., 1977. Gabbro-Granitic Series of the Western Part of Zaisan Folding System. Nauka, Novosibirsk, 249 p. (in Russian) [Ермолов П.В., Изох Э.П., Пономарёва А.П., Тян В.Д. Габбро-гранитные серии западной части Зайсанской складчатой системы. Новосибирск: Наука, 1977. 249 с.].

Ermolov P.V., Polyansky N.V., Dobretsov N.L., 1981. Ophiolites of the Chara Belt. In: A.A. Abdulin, E.I. Patalakha (Eds), Ophiolites. Nauka, Alma-Ata, p. 103–178 (in Russian) [Ермолов П.В., Полянский Н.В., Добрецов Н.Л. Офиолиты Чарского пояса // Офиолиты / Ред. А.А. Абдулин, Е.И. Паталяха. Алма-Ата: Наука, 1981. С. 103–187].

Ermolov P.V., Vladimirov A.G., Izokh A.E., Polyanskiy N.V., Kuzebnny B.S., Revyakin P.S., Bortsov V.D., 1983. Orogenic Magmatism of Ophiolitic Belts (at an Example of East Kazakhstan). Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of the USSR Academy of Sciences. Iss. 651. Nauka, Novosibirsk, 210 p. (in Russian) [Ермолов П.В., Владимиров А.Г., Изох А.Э. Полянский Н.В., Кузевный В.С., Ревякин П.С., Борцов В.Д. Орогенный магматизм офиолитовых поясов (на примере Восточного Казахстана) // Труды Института геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 651. Новосибирск: Наука, 1983. 210 с.].

Holland T.J.B., Powell R., 1998. An Internally Consistent Thermodynamic Data Set for Phases of Petrological Interest. Journal of Metamorphic Geology 16 (3), 309–343. <https://doi.org/10.1111/J.1525-1314.1998.00140.X>.

Khomyakov V.D., 1984. Petrology of Ophiolites of Chara Zone (Eastern Kazakhstan). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Ust-Kamenogorsk, 16 p. (in Russian) [Хомяков В.Д. Петрология офиолитов Чарской зоны (Восточный Казахстан): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Усть-Каменогорск, 1984. 16 с.].

Kurganskaya E.V., Safonova I.Yu., Simonov V.A., 2014. Geochemistry and Petrogenesis of Suprasubduction Volcanic Complexes of the Char Shear Zone (Eastern Kazakhstan). Russian Geology and Geophysics 55 (1), 62–77. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.12.005>.

Lavrent'ev Y.G., Karmanov N.S., Usova L.V., 2015. Electron Probe Microanalysis of Minerals: Microanalyzer or Scanning Electron Microscope? Russian Geology and Geophysics 56 (8), 1154–1161. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.07.006>.

Polyansky N.V., Dobretsov N.L., Ermolov P.V., Kuzebnny V.S., 1979. Structure and Development History of the Chara Ophiolitic Belt. Russian Geology and Geophysics 5, 66–78 (in Russian) [Полянский Н.В., Добрецов Н.Л., Ермолов П.В.,

Кузубный В.С. Структура и история развития Чарского офиолитового пояса // Геология и геофизика. 1979. № 5. С. 66–78].

Polyansky N.V., Khomyakov V.D., 1981. Geosynclinal Volcanic Complexes of Chara Ophiolitic Belt. Vol. 40. Nauka, Alma-Ata, p. 4–12 (in Russian) [Полянский Н.В., Хомяков В.Д. Геосинклинальные вулканические комплексы Чарского офиолитового пояса. Алма-Ата: Наука, 1981. Т. 40. С. 4–12].

Safonova I.Yu., Buslov M.M., Iwata K., Kokh D.A., 2004. Fragments of Vendian – Early Carboniferous Oceanic Crust of the Paleo-Asian Ocean in Foldbelts of the Altai-Sayan Region of Central Asia: Geochemistry, Biostratigraphy and Structural Setting. *Gondwana Research* 7 (3), 771–790. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71063-7](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71063-7).

Safonova I.Yu., Simonov V.A., Kurganskaya E.V., Obut O.T., Romer R.L., Seltmann R., 2012. Late Paleozoic Oceanic Basalts Hosted by the Char Suture-Shear Zone, East Kazakhstan: Geological Position, Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 49, 20–39. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.11.015>.

Shcherba G.N., Bespayev Kh.A., D'yachkov B.A., Mysnik A.M., Ganzhenko G.D., Sapargaliyev E.M., 1998. Large Altai (Geology and Metallogeny). Gylm Publishing House, Almaty, 395 p. (in Russian) [Щербина Г.Н., Беспаяев Х.А., Дьячков Б.А., Мысник А.М., Ганженко Г.Д., Сапаргалиев Е.М. Большой Алтай (геология и металлогения). Алматы: Гылым, 1998. 395 с.].

Travin A.V., 2016. Thermochronology of Early Paleozoic Collisional and Subduction-Collisional Structures of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 434–450. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.006>.

Vladimirov A.G., Kruk N.N., Khromykh S.V., Polyansky O.P., Vladimirov V.G., Travin A.V., Babin G.A., Kuibida M.L., Vladimirov V.D., Chervov V.V., 2008. Permian Magmatism and Lithospheric Deformation in the Altai Caused by Crustal and Mantle Thermal Processes. *Russian Geology and Geophysics* 49 (7), 468–479. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.006>.

Volkova N.I., Khlestov V.V., Sukhorukov V.P., Khlestov M.V., 2014. Geochemistry of Metamorphosed Pillow-Basalts of Chara Zone, North-Eastern Kazakhstan. In: Correlation of Altaides and Uralides: Magmatism, Metamorphism, Stratigraphy, Geochronology, Geodynamics and Metallogeny. Proceedings of the Third International Scientific Conference (April 1–4, 2014). Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 26–27 (in Russian) [Волкова Н.И., Хлестов В.В., Сухоруков В.П., Хлестов М.В. Геохимия метаморфизованных пиллоу-базальтов Чарской зоны, Северо-Восточный Казахстан // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы Второй международной научной конференции (1–4 апреля 2014 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. С. 26–27].

Volkova N.I., Khlestov V.V., Sukhorukov V.P., Khlestov M.V., 2016a. Geochemistry of Metamorphosed Pillow Basalts of

the Chara Zone, NE Kazakhstan. *Doklady Earth Sciences* 467, 350–354. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16040085>.

Volkova N.I., Simonov V.A., Travin A.V., Stupakov S.I., Yudin D.S., 2016b. Eclogites in the Chara Zone, NE Kazakhstan: New Geochemical and Geochronological Data. *Geochemistry International* 54, 208–214. <https://doi.org/10.1134/S0016702915120101>.

Volkova N.I., Sklyarov E.V., 2007. High-Pressure Complexes of Central Asian Fold Belt: Geologic Setting, Geochemistry, and Geodynamic Implications. *Russian Geology and Geophysics* 48 (1), 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.008>.

Volkova N.I., Tarasova E.N., Polyansky N.V., Khomyakov V.D., 2005. Petrology of High-Baric Rocks of Chara Zone (East Kazakhstan). In: Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes. Proceedings of Materials of the All-Russian Petrographic Conference (November 24–26, 2005). Iss. 5. Vol. 1. Publishing House of CSTI, Tomsk, p. 317–320 (in Russian) [Волкова Н.И., Тарасова Е.Н., Полянский Н.В., Хомяков В.Д. Петрология высокобарических пород Чарской зоны (Восточный Казахстан) // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы Всероссийской петрографической конференции (24–26 ноября 2005 г.). Томск: ЦНТИ, 2005. Вып. 5. Т. 1. С. 317–320].

Volkova N.I., Tarasova E.N., Polyansky N.V., Travin A.V., Yudin D.S., 2004. Geochemistry and ^{39}Ar - ^{40}Ar Age of High-Baric Rocks Inclusions in Serpentinite Melange of the Chara Zone. In: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of Scientific Meeting (October 19–22, 2004). Iss. 2. Vol. 1. Publishing House of IEC SB RAS, Irkutsk, p. 76–80 (in Russian) [Волкова Н.И., Тарасова Е.Н., Полянский Н.В., Травин А.В., Юдин Д.С. Геохимия и ^{39}Ar - ^{40}Ar возраст включений высокобарических пород в серпентинитовом меланже Чарской зоны // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН (19–22 октября 2004 г.). Иркутск: Изд-во ИЭК СО РАН, 2004. Вып. 2. Т. 1. С. 76–80].

Volkova N.I., Tarasova E.N., Vladimirov A.G., Khomyakov V.D., Polyanskii N.V., 2008. High-Pressure Rocks in the Serpentinite Melange of the Chara Zone, Eastern Kazakhstan: Geochemistry, Petrology, and Age. *Geochemistry International* 46, 386–401. <https://doi.org/10.1134/S0016702908040071>.

Volkova N.I., Travin A.V., Yudin D.S., 2011. Ordovician Blueschist Metamorphism as a Reflection of Accretion-Collision Events in the Central Asian Orogenic Belt. *Russian Geology and Geophysics* 52 (1), 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.006>.

Whitney D.L., Evans B.W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist* 95 (1), 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>.