



**$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DATING OF MARUYAMAITE (K-DOMINANT TOURMALINE)
FROM DIAMOND-BEARING METAMORPHIC ROCKS OF THE KOKCHETAV MASSIF**

A.V. Korsakov ¹✉, D.S. Yudin ¹, K.A. Musiyachenko ^{1,2}, S.P. Demin ¹

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

² University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z4, Canada

ABSTRACT. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses were made on maruyamaite (potassium-dominant tourmaline) from tourmaline-quartz-feldspar rocks discovered within the Kumdy-Kol microdiamond deposit (Kokchetav massif, North Kazakhstan). Tourmaline yielded well-defined $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age spectra whose values coincide within the error – ages of 502.3 ± 8.0 , 502.2 ± 8.0 , 506.0 ± 8.0 Ma. These ages are much younger than the age of 530 ± 2 Ma determined for high-pressure metamorphism by different methods. Thus, the formation of tourmaline-rich rocks of the Kumdy-Kol deposit cannot be associated with the high-pressure metamorphic events, and, therefore, testifies in favor of the low-pressure nature of maruyamaite. Based on the coincidence of age data for tourmaline crystals with different potassium contents, it can be concluded that the K/Ar system in tourmaline can be used for dating metasomatic and metamorphic processes.

KEYWORDS: Ar-Ar dating; maruyamaite; diamond; high pressure metamorphism; Kokchetav

FUNDING: The study was supported by the Russian Science Foundation (grant 18-17-00186). Sampling began as part of the state assignment of the IGM SB RAS.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Andrey V. Korsakov, korsakov@igm.nsc.ru

Received: December 3, 2022

Revised: January 25, 2023

Accepted: February 15, 2023

FOR CITATION: Korsakov A.V., Yudin D.S., Musiyachenko K.A., Demin S.P., 2023. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Maruyamaite (K-Dominant Tourmaline) from Diamond-Bearing Metamorphic Rocks of the Kokchetav Massif. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (3), 0699. doi:10.5800/GT-2023-14-3-0699

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ДАТИРОВАНИЕ МАРУЯМАИТА (КАЛИЙСОДЕРЖАЩИЙ ТУРМАЛИН) ИЗ АЛМАЗОНОСНЫХ ПОРОД КОКЧЕТАВСКОГО МАССИВА

А.В. Корсаков¹, Д.С. Юдин¹, К.А. Мусияченко^{1,2}, С.П. Демин¹

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

² Университет Британской Колумбии, V6T 1Z4, Ванкувер, Канада

АННОТАЦИЯ. Проведено $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследование маруямаита (калийсодержащий турмалин) из турмалин-кварц-полевошпатовых пород, вскрытых в пределах главного штрека штольни Кумды-Кольского месторождения технических алмазов (Кокчетавский массив, Северный Казхстан). Получены $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектры, в которых выделяются четкие плато с совпадающими в пределах ошибки значениями возраста – датировки 502.3 ± 8.0 , 502.2 ± 8.0 , 506.0 ± 8.0 млн лет по турмалину. Эти датировки значительно моложе возраста пород, образованных на этапе высокобарического метаморфизма, фиксируемого комплексом методов – 530 ± 2 млн лет. Таким образом, формирование богатых турмалином пород Кумды-Кольского месторождения не связано с высокобарическим этапом метаморфизма, то есть образование маруямаита происходило на более позднем низкобарическом этапе. К/Аг система в турмалине может быть использована для датирования метасоматических и метаморфических процессов, так как показано, что такие датировки совпадают даже для кристаллов турмалина с различным содержанием калия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Аг-Аг датирование; маруямаит; алмаз; метаморфизм высоких давлений; Кокчетав

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены при поддержке РНФ (грант 18-17-00186). Отбор образцов начинался в рамках государственного задания ИГМ СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Датирование метасоматических и рудообразующих процессов во многих случаях осложняется дефицитом подходящих для прямого датирования минералов. Турмалин является одним из распространенных акцессорных минералов, встречающихся в породах различного генезиса [Jiang, 1998; Marschall et al., 2009; Marschall, Jiang, 2011]. Однако потенциал турмалина как надежного геохронометра все еще недостаточно раскрыт [Jiang, 1998; Korsakov et al., 2009]. Ранее проведенное Аг-Аг датирование турмалина и сопутствующего ему мусковита из алмазоносных пород Кокчетавского массива позволило выявить возрастной рубеж 491.5 ± 4.9 млн лет [Korsakov et al., 2009], который значительно отличается от возраста пика метаморфизма 528–530 млн лет, полученного различными методами и для различных минералов [Claoue-Long et al., 1991; Hermann et al., 2001, 2006; Katayama et al., 2000, 2003; Rezvukhina et al., 2021; Shatsky et al., 1995, 1999; Skuzovatov et al., 2020; Stepanov et al., 2016]. Эти различия в возрасте позволили усомниться в сингенетичной высокобарической природе маруямаита. В этом турмалине, наряду с высоким содержанием калия и необычным изотопным составом бора [Marschall et al., 2009; Musiyachenko et al., 2020, 2021; Ota et al., 2008; Korsakov et al., 2009], были диагностированы включения кристаллов алмаза [Shimizu, Ogasawara, 2005, 2013]. Нами включения кристаллов алмаза были диагностированы в кристаллах турмалина с содержанием калия ~ 1.4 – 1.6 мас. % [Korsakov et al., 2023b], а также в турмалине шерл-увитового ряда с содержанием

калия менее 0.1 мас. % [Korsakov et al., 2023a]. Известно, что успешный синтез богатого калием турмалина был реализован лишь при давлении 4 ГПа и температуре 700 °C [Berryman et al., 2014, 2015, 2016]. Это послужило новым стимулом для изучения условий образования этого минерала в природных системах. Ряд авторов [Ota et al., 2008] выступили с критикой отнесения кристаллов турмалина, использованных для датировки, к маруямаитам на основании низкого содержания K_2O (менее 1.6 мас. %). В данной работе приводятся результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования двух образцов маруямаитсодержащих пород, а также одного образца с промежуточным содержанием калия в кристаллах турмалина с целью определения влияния концентрации калия на получаемые значения возраста.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Все химико-аналитические работы были выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН в ИГМ СО РАН. Анализы минералов представительной коллекции из более 30 образцов были выполнены на рентгеноспектральном микроанализаторе JEOL JXA-8100, оснащенный пятью спектрометрами с волновой дисперсией. Подробное описание методики опубликовано в работе [Lavrent'ev et al., 2015].

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологические исследования методом ступенчатого прогрева выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН по методике, описанной в статье [Yudin et al., 2021]. В качестве стандартного образца использовался образец биотита МСА-11. Изотопный состав аргона измерялся

на многоколлекторном масс-спектрометре Argus фирмы GV-Instruments (Англия). Ошибки измерений, приведенные в тексте и на рисунках, соответствуют интервалу $\pm 1\sigma$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Северный Казахстан является частью позднедокембрийско-палеозойского Центрально-Азиатского складчатого пояса, расположенного между Восточно-Европейским, Сибирским, Северо-Китайским и Таримским кратонными блоками [Dobretsov et al., 1995]. Кумды-Кольское месторождение алмазов находится в пределах Кокчетавского массива (Северный Казахстан) (рис. 1). Согласно доминирующей в настоящее время точке зрения [Dobretsov et al., 1995], это зона мегамеланжа, протягивающаяся в субширотном направлении примерно на 80 км при ширине ~ 17 км. Она сформирована блоками пород, образовавшихся на различных уровнях глубинности [Buslov et al., 2015; Dobretsov et al., 1995; Theunissen et al., 2000; Zhimulev et al., 2010].

Образцы для данного исследования были отобраны из отвалов и главного штрека штольни (интервал 260–290 м) месторождения Кумды-Коль, детальная

характеристика которого приводится в работах [Shatsky et al., 1995; Lavrova et al., 1999; Letnikov, 1983]. Турмалиноносительные породы залегают согласно с вмещающими карбонатно-силикатными породами и гранат-биотитовыми гнейсами. Это относительно мелкозернистые породы (рис. 2), состоящие из турмалина (до 30 об. %), кварца (45–60 об. %) и КППШ (5–30 об. %). В подчиненном количестве в матрике присутствуют гетит, титанит, циркон, фенгит, флогопит, апатит, хлорит, цоизит, пумпеллиит и графит. Эти породы характеризуются полосчатыми и, реже, массивными текстурами. Размер порфириобластов турмалина варьируется от 0.5 до 2.0 мм. В этих кристаллах нередко фиксируется цветовая зональность – темно-коричневое ядро и более светлая кайма, которая также отражается и в составе турмалина (рис. 3). При детальном изучении состава оказалось, что из всей коллекции лишь два образца – G270 и K13-2017 – содержат повышенное содержание калия и могут быть отнесены к маруямаитам. В образце G270 подавляющее большинство зерен турмалина содержат крупные ядра, концентрация калия в которых превосходит 2.2 мас. %, а в узких каймах (мощностью около 10 мкм) содержание К снижается до 0.3 мас. %. Следует отметить,

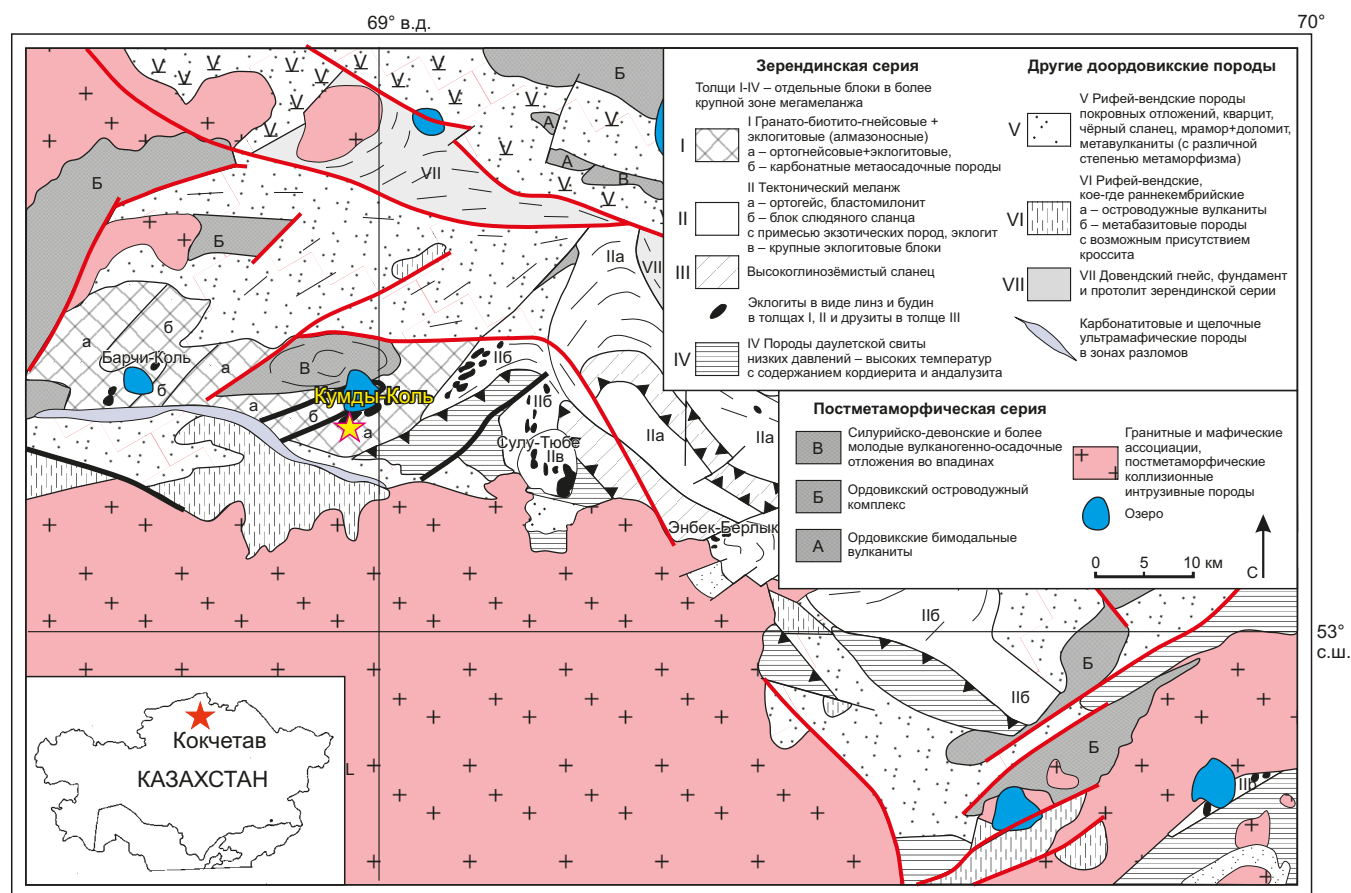


Рис. 1. Геолокация Кокчетавского массива и геологическая карта Кокчетавского массива по [Dobretsov et al., 1995]. Звездочкой отмечено место отбора образцов.

Fig. 1. Geolocation of the Kokchetav massif and geological map of the Kokchetav massif modified from [Dobretsov et al., 1995]. The asterisk marks the sampling site.

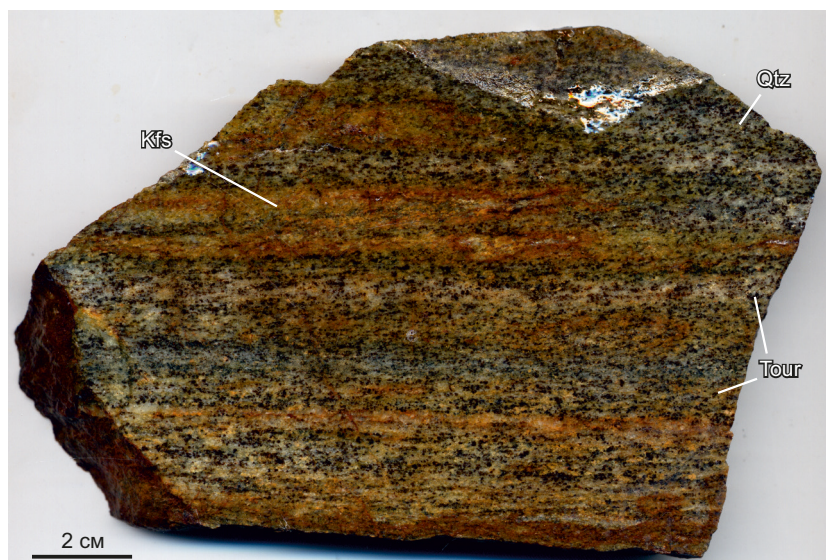


Рис. 2. Фотография образца турмалинсодержащих пород месторождения Кумды-Коль (обр. G278).

Fig. 2. Photograph of tourmaline-bearing rocks from the Kumdy-Kol deposit (sample G278).

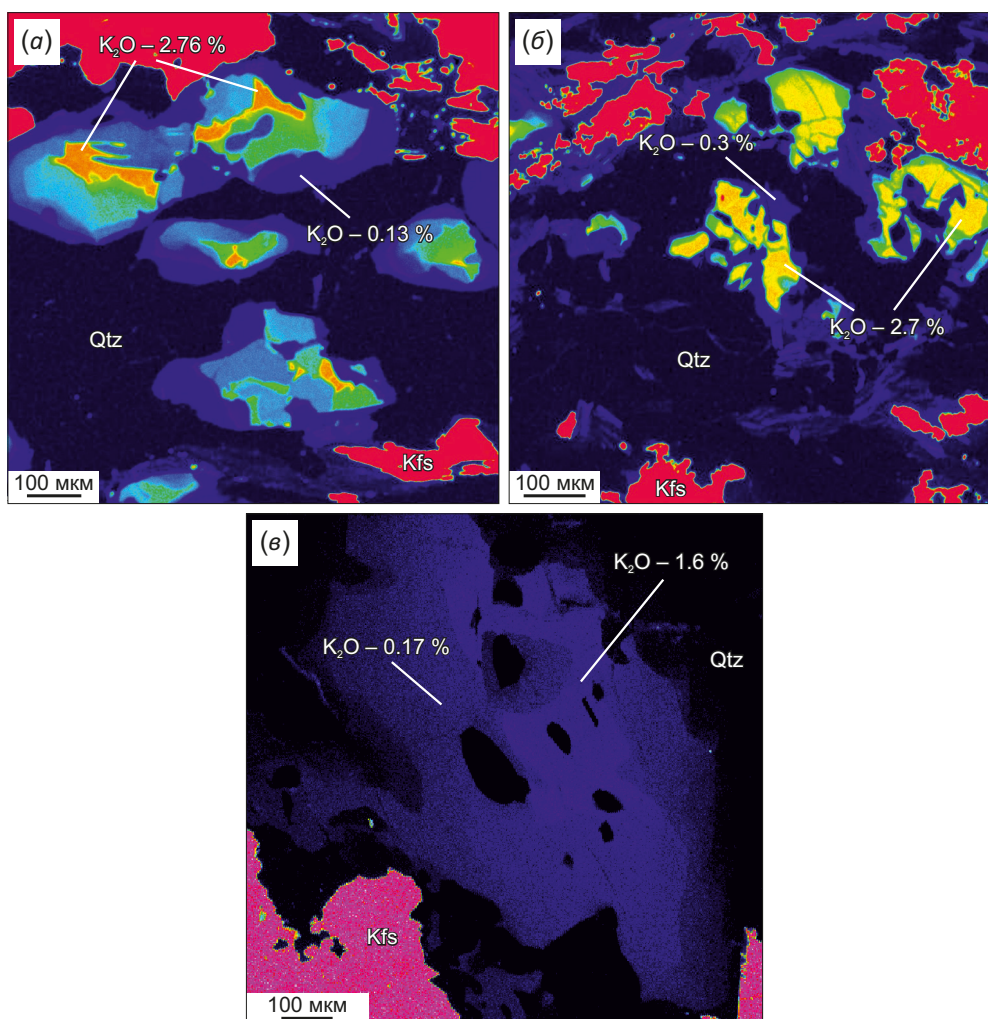


Рис. 3. Распределение калия в кристаллах маруямаита обр. K13-2017 и G270 ((a) и (б) соответственно) и алмазосодержащем турмалине обр. G278 (e).

Fig. 3. Potassium distribution in maruyamaite crystal samples K13-2017 and G270 ((a) and (b) respectively), and diamond-containing tourmaline sample G278 (e).

что в этом образце в большом количестве присутствуют включения кварца в ядрах порфириобластов турмалина. В образце K13-2017 также установлены ядра с содержанием K_2O до 2.7 мас. %, однако в этом образце отмечается до пяти ростовых зон, в которых происходит ступенчатое снижение содержания K_2O [Musiachenko et al., 2020]. В образце G278 содержание K_2O в ядерных зонах турмалина 1.6–1.9 мас. %, что несколько выше, чем в исследованном ранее образце G31 (1.4–1.6 мас. % K_2O) [Korsakov et al., 2009]. Более того, именно в этом образце были диагностированы многочисленные включения алмаза в турмалине (рис. 4), что, согласно предположению японских коллег [Shimizu, Ogasawara, 2005, 2013], указывает на глубинное образование этого турмалина.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследования маруямаита из турмалин-кварц-полевошпатовых пород показали согласующиеся в пределах ошибки значения возраста (табл. 1). Так, в $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастном спектре турмалина (образец G270), состоящем из шести ступеней, выделяется ступень с возрастом 502.2 ± 8.0 млн лет (рис. 4), составляющая ~60 % выделенного ^{39}Ar . В возрастном спектре турмалина (образец G278), состоящем из трех ступеней, выделяется ступень с возрастом 502.3 ± 8.0 млн лет (рис. 4), составляющая более 90 % выделенного ^{39}Ar . В $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастном спектре турмалина (образец K13-2017), состоящем из восьми ступеней, выделяется

устойчивое плато из трех ступеней (~90 % выделенного ^{39}Ar) с возрастом 506.0 ± 8.0 млн лет (рис. 5). В пределах погрешности все вновь полученные оценки $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста К-турмалина совпадают с полученной ранее оценкой возраста 491 ± 5 млн лет для образца G31 [Korsakov et al., 2009].

Возраст единственного плато составляет 506 ± 8 млн лет (табл. 1; рис. 5), он зафиксирован лишь в образце K13-2017, отобранном из отвалов разведочной штольни месторождения Кумды-Коль, и его точное местоположение в разрезе неизвестно. Вместе с тем по своему облику он не отличается от образцов турмалинсодержащих пород, встречающихся в интервале 260–290 м штольни Кумды-Кольского месторождения. Вероятно, этот образец был извлечен при проходке горных выработок этого же интервала. Следует отметить, что в кристаллах турмалина этого образца отмечается до пяти ростовых зон с различным содержанием калия. Если бы образование этих зон происходило со значительными временными перерывами, то маловероятно, что при этом наблюдалось бы установленное плато 506 ± 8 млн лет.

А.В. Травиным выделяются несколько этапов активных термических событий, повлиявших на породы высокobarического парагенезиса, с возрастом 505–517, 481–497, 456–460 млн лет [Travin, 2016]. Им отмечается этап с возрастом 505–517 млн лет, который

Таблица 1. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования образцов турмалинсодержащих пород Кумды-Кольского месторождения

Table 1. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of tourmaline samples from the Kumdy-Kol deposit

T °C	$t_{\min}$	^{40}Ar , 10^{-9} cm^3 STP	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	Ca/K	$\Sigma^{39}\text{Ar}$, %	Возраст, млн лет	$\pm 1\sigma$
G278 турмалин (16.97 мг)														
J=0.007017±0.000128														
700	10	20.9	31.9	0.069	0.064	0.00208	58.43	5.3393	0.0452	0.00247	210.4	2.0	221.1	9.0
900	10	36.1	40.2	0.086	0.054	0.00141	89.87	3.4128	0.0534	0.00299	323.5	4.8	284.8	10.7
1130	10	1422.4	46.5	0.007	0.015	0.00006	2.27	0.1207	0.0026	0.00010	8.2	100.0	502.3	8.0
G270 турмалин (26.78 мг)														
J=0.006999±0.000127														
500	10	29.5	65.4	0.191	0.087	0.00296	111.44	8.8071	0.1053	0.00494	401.2	0.5	388.3	16.2
700	10	116.3	35.4	0.027	0.026	0.00034	24.15	1.7654	0.0239	0.00099	86.9	4.2	326.2	6.2
900	10	191.1	33.9	0.015	0.022	0.00026	12.48	0.9108	0.0114	0.00046	44.9	10.7	349.5	5.9
1000	10	2437.4	46.5	0.009	0.015	0.00003	2.18	0.0817	0.0021	0.00007	7.8	70.3	502.2	8.0
1050	10	971.2	44.5	0.012	0.018	0.00008	6.44	0.1166	0.0033	0.00009	23.2	95.1	479.7	7.6
1130	10	124.5	28.7	0.045	0.046	0.00037	44.87	0.9384	0.0258	0.00076	161.5	100.0	248.5	4.9
K13-2017 турмалин (34.5 мг)														
J=0.006981±0.000127														
700	10	35.2	26.4	0.083	0.067	0.00097	99.81	2.5212	0.0393	0.00219	359.3	1.8	177.1	8.0
900	10	57.1	32.9	0.077	0.049	0.00101	61.23	1.7418	0.0275	0.00136	220.4	4.1	287.4	6.5
950	10	162.7	46.0	0.023	0.022	0.00036	17.47	1.5238	0.0081	0.00058	62.9	8.8	479.5	7.8
1000	10	331.9	47.4	0.017	0.019	0.00021	9.36	0.7892	0.0036	0.00041	33.7	18.2	505.8	8.1
1050	10	1965.0	47.3	0.008	0.015	0.00004	2.30	0.1415	0.0009	0.00007	8.3	73.6	512.1	8.1
1075	10	830.7	46.4	0.008	0.017	0.00009	4.90	0.1724	0.0022	0.00016	17.6	97.4	500.4	8.0
1100	10	44.9	35.8	0.060	0.058	0.00140	77.02	3.6845	0.0410	0.00183	277.3	99.1	276.3	7.5
1130	10	16.4	24.9	0.087	0.117	0.00226	184.58	9.2099	0.0662	0.00441	664.5	100.0	66.2	15.9

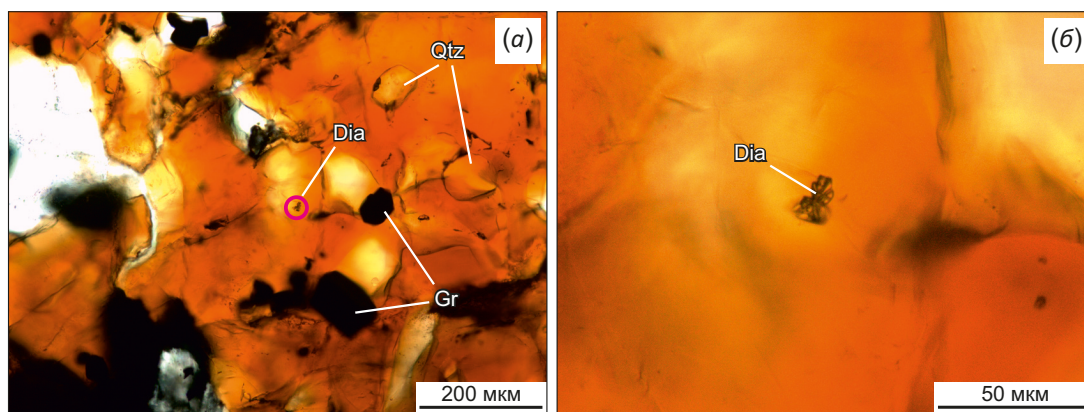


Рис. 4. Фотография кристалла турмалина из обр. G278. Включения в этом кристалле представлены кварцем (Qtz), графитом (Gr) и алмазом (Dia). Содержание калия в этом кристалле не превышает 1.6 мас. %.

Fig. 4. Photograph of a tourmaline crystal from sample G278. Inclusions in this crystal are represented by quartz (Qtz), graphite (Gr), and diamond (Dia). Potassium content in this crystal does not exceed 1.6 wt. % K_2O .

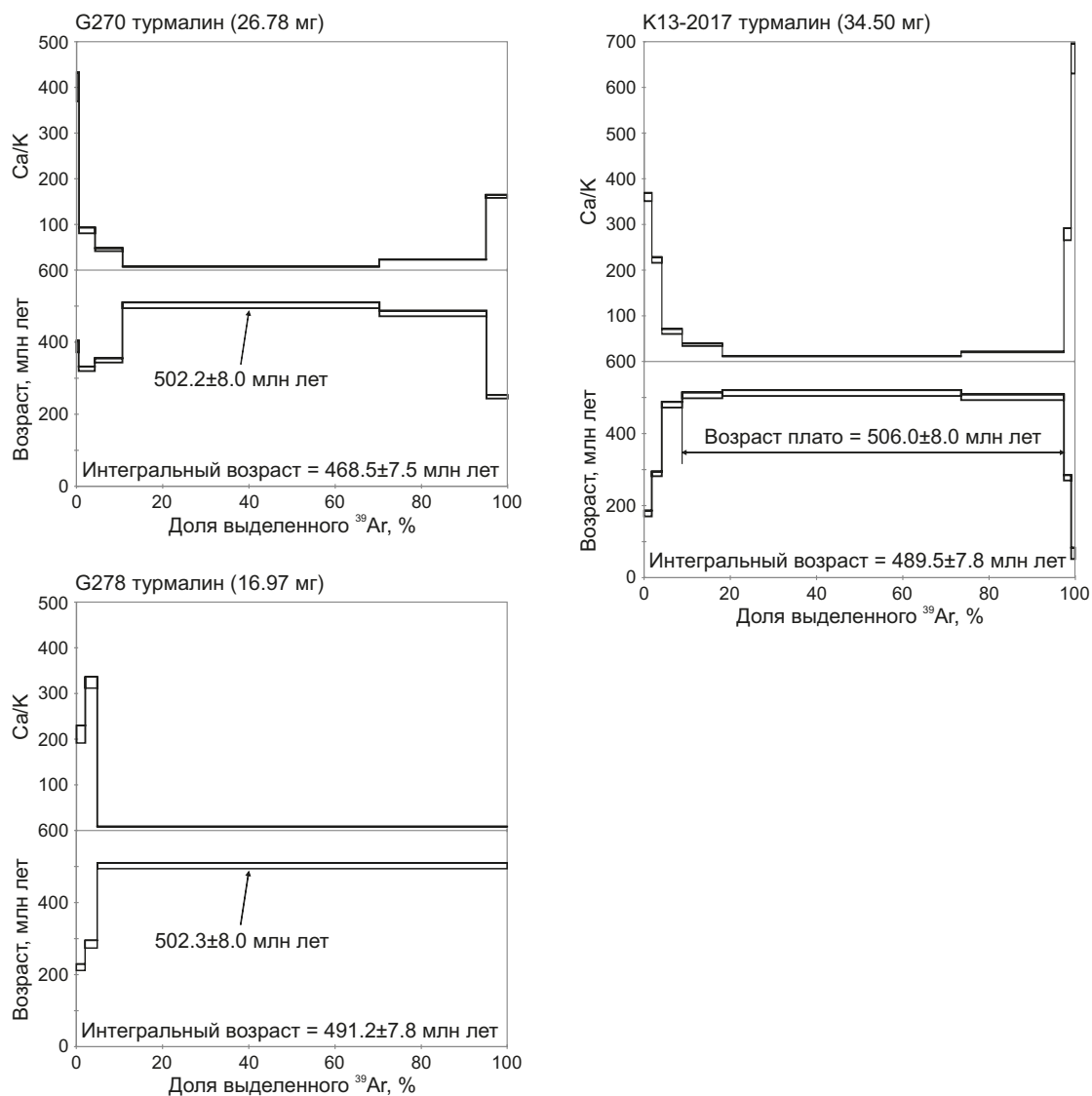


Рис. 5. Результаты Ar-Ar датирования кристаллов маруямаита обр. G270 и K13-2017 и алмазосодержащих кристаллов турмалина из обр. G278.

Fig. 5. Results of Ar-Ar dating of maruyamaite crystal samples G270 and K13-2017, as well as diamond-bearing tourmaline crystals from sample G278.

характеризовался формированием гранат-слюдистых и слюдистых сланцев, милонитизацией, частичным плавлением и/или кристаллизацией гранитных расплавов, что согласуется с полученными ранее датировками [Hacker et al., 2003; Borisova et al., 1995]. Значения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста по турмалину, полученные в настоящей работе (образцы 270, 278 и K13-2017), являются статистически неразличимыми, поскольку приведенные ошибки измерений соответствуют интервалу $\pm 1\sigma$. Полученная ранее датировка по турмалину (491 ± 5 млн лет) моложе трех новых и совпадает с возрастом синдеформационного мусковита из этого же образца. Поскольку поздний этап (490 ± 5 млн лет [De Grave et al., 2006; Travin, 2016]) характеризуется формированием покровной структуры Кокчетавского массива и локальных деформационных зон, можно было бы предполагать, что полученные ранее оценки 491 ± 5 млн лет [Korsakov et al., 2009] связаны с воздействием деформаций на структуру турмалина и его изотопную систему. Однако минералого-петрографические исследования турмалиносодержащих пород Кумды-Кольского месторождения не выявили каких-либо различий в степени деформаций между изученными образцами. Следует отметить, что исследованный ранее обр. G31 был отобран всего лишь в 2 м от образца G278. Трудно предположить, что деформация были столь локальными и привели к избирательному «омоложению» части кристаллов турмалина. Также следует подчеркнуть, что возраст кристаллов турмалина, отобранных из образцов G270 и G278, составляет 502.3 ± 8.0 млн лет (табл. 1), тогда как содержание K_2O в этих кристаллах различается почти в два раза. Согласно модели, предложенной японскими исследователями [Ota et al., 2008; Shimizu, Ogasawara, 2005, 2013], кристаллы турмалина с подобными содержаниями калия должны были кристаллизоваться в поле стабильности алмаза обр. G270 и на регрессивном этапе в поле стабильности кварца обр. G278. Однако включения кристаллов алмаза не были диагностированы в кристаллах турмалина образца G270, но в большом количестве встречаются в порфиробластах турмалина обр. G278 (см. рис. 4). Данное наблюдение подтверждает предположение [Korsakov et al., 2004], что включения кристаллов алмаза не могут быть использованы в качестве единственного доказательства высокobarической природы минерала-хозяина.

Таким образом, можно констатировать, что турмалины с различным содержанием K_2O кристаллизовались одновременно, а различное содержание калия в структуре можно объяснить локальными вариациями состава флюидной фазы, при участии которой происходило формирование турмалина в алмазоносных породах месторождения Кумды-Коль.

Следует отметить, что полученные датировки соответствуют этапу поздних деформаций высокobarических пород уже после выведения их на верхние уровни земной коры и связаны с процессами коллизии Кокчетавского микроконтинента и Степнякской островной

дуги [Dobretsov et al., 2006]. Термальное воздействие Зерендинского батолита, имевшее место 460–440 млн лет назад [Shatagin, 1994], не отразилось в хронологической летописи турмалинов Кумды-Кольского месторождения, что свидетельствует о его высокой устойчивости к поздним термальным воздействиям, а полученные значения возраста могут рассматриваться в качестве возраста формирования этих необычных турмалинов. Следовательно, формирование облика богатых турмалином пород Кумды-Кольского месторождения связано с метасоматическими процессами, активными во время одного из поздних этапов завершения формирования структуры Кокчетавского массива [De Grave et al., 2006].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование кристаллов маруямаита и калийсодержащего турмалина из турмалин-кварц-полевошпатовых пород Кумды-Кольского месторождения (Кокчетавский массив, Северный Казахстан) показало согласующиеся в пределах ошибки значения возраста. Следовательно, кристаллы турмалина с различным содержанием K_2O формировались синхронно, а различное содержание калия в структуре турмалина можно объяснить локальными вариациями состава протолита или флюидной фазы, при участии которой происходила кристаллизация турмалина в алмазоносных породах месторождения Кумды-Коль.

В заключение еще раз отметим, что результаты проведенных исследований указывают на то, что калийсодержащий турмалин (включая маруямаит) является надежным геохронометром, который может применяться для датирования метаморфических и метасоматических событий.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Berryman E.J., Wunder B., Ertl A., Koch-Müller M., Rhede D., Scheidl K., Giester G., Heinrich W., 2016. Influence of the X-Site Composition on Tourmaline's Crystal Structure: Investigation of Synthetic K-Dravite, Dravite, Oxy-Uvite, and Magnesio-Foitite Using SREF and Raman Spectroscopy. *Physics and Chemistry of Minerals* 43, 83–102. <https://doi.org/10.1007/s00269-015-0776-3>.

Berryman E., Wunder B., Rhede D., 2014. Synthesis of K-Dominant Tourmaline. *American Mineralogist* 99 (2–3), 539–542. DOI:10.2138/am.2014.4775.

Berryman E.J., Wunder B., Wirth R., Rhede D., Schettler G., Franz G., Heinrich W., 2015. An Experimental Study on K and Na Incorporation in Dravitic Tourmaline and Insight into the Origin of Diamondiferous Tourmaline from the Kokchetav Massif, Kazakhstan. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 169, 28. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1116-9>.

Borisova E.Yu., Bibikova E.V., Dobrzhinetskaya L.F., Markarov V.A., 1995. Geochronological Study of Zircons, from Granitegneisses of the Kokchetav Diamond-Bearing Area. *Doklady Earth Sciences* 343 (6), 801–805 (in Russian) [Борисова Е.Ю., Бибикина Е.В., Добержинская Л.Ф., Макаров В.А. Геохронологическое изучение цирконов гранитоидов Кокчетавского алмазоносного района // Доклады АН. 1995. Т. 343. № 6. С. 801–805].

Buslov M., Dobretsov N., Vovna G., Kiselev V., 2015. Structural Location, Composition, and Geodynamic Nature of Diamond-Bearing Metamorphic Rocks of the Kokchetav Subduction-Collision Zone of the Central Asian Fold Belt (Northern Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics* 56 (1–2), 64–80. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.004>.

Claoue-Long J.C., Sobolev N.V., Shatsky V.S., Sobolev A.V., 1991. Zircon Response to Diamond-Pressure Metamorphism in the Kokchetav Massif, USSR. *Geology* 19 (7), 710–713. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019%3C0710:ZRTDPM%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019%3C0710:ZRTDPM%3E2.3.CO;2).

De Grave J.D., Buslov M.M., Zhimulev F., Vermeesch P., McWilliams M.O., Metcalf J., 2006. The Early Ordovician Age of Deformations in the Kokchetav Subduction-Collision Zone: New Structural and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Data. *Russian Geology and Geophysics* 47 (4), 441–450.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Zhimulev F.I., Travin A.V., Zayachkovsky A.A., 2006. Vendian-Early Ordovician Geodynamic Evolution and Model for Exhumation of Ultrahigh- and High-Pressure Rocks from the Kokchetav Subduction-Collision Zone (Northern Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics* 47 (4), 428–444.

Dobretsov N.L., Sobolev N.V., Shatsky V.S., Coleman R.G., Ernst W.G., 1995. Geotectonic Evolution of Diamondiferous Paragneisses of the Kokchetav Complex, Northern Kazakhstan: The Geologic Enigma of Ultrahigh-Pressure Crustal Rocks within Phanerozoic Foldbelt. *Island Arc* 4 (4), 267–279. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.1995.tb00149.x>.

Hacker B.R., Calvert A., Zhang R.Y., Ernst W.G., Liou J.G., 2003. Ultrarapid Exhumation of Ultrahigh-Pressure Diamond-Bearing Metasedimentary Rocks of the Kokchetav Massif, Kazakhstan? *Lithos* 70 (3–4), 61–75. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(03\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(03)00092-6).

Hermann J., Rubatto D., Korsakov A., Shatsky V.S., 2001. Multiple Zircon Growth during Fast Exhumation of Diamondiferous, Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 141, 66–82. <https://doi.org/10.1007/s00410000218>.

Hermann J., Rubatto D., Korsakov A.V., Shatsky V.S., 2006. The Age of Metamorphism of Diamondiferous Rocks Determined with Shrimp Dating of Zircon. *Russian Geology and Geophysics* 47 (4), 513–520.

Jiang S.-Y., 1998. Stable and Radiogenic Isotope Studies of Tourmaline: An Overview. *Journal of the Czech Geological Society* 43, 75–90.

Katayama I., Muko A., Iizuka T., Maruyama S., Terada K., Tsutsumi Y., Sano Y., Zhang R.Y., Liou J.G., 2003. Dating of Zircon from Ti-Clinohumite-Bearing Garnet Peridotite: Implication for Timing of Mantle Metasomatism. *Geology* 31 (8), 713–716. <https://doi.org/10.1130/G19525.1>.

Katayama I., Zayachkovsky A.A., Maruyama S., 2000. Prograde Pressure-Temperature Records from Inclusions in Zircons from Ultrahigh-Pressure-High-Pressure Rocks of the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan. *Island Arc* 9, 417–427. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2000.00286.x>.

Korsakov A.V., Mikhailenko D.S., Zhang L., Shu Yu., 2023a (in press). Inclusions of Diamond Crystals in Tourmaline of the Schorl-Uvite Series: The Problems of Genesis. *Journal of Mining Institute* (in Russian) [Корсаков А.В., Михайленко Д.С., Чжан Л., Шу Ю. Включения кристаллов алмаза в турмалине шерл-увитового ряда: проблемы генезиса // Записки Горного института. 2023 (в печати)].

Korsakov A.V., Musiyachenko K.A., Mikhailenko D.S., Demin S.P., 2023b (in press). Formation Conditions of Potassium-Dominant Tourmalines from the Kumdy-Kol Deposit (Kokchetav Massif, North Kazakhstan): from Data on Solid-Phase Inclusions. *Lithosphere* (in press) (in Russian) [Корсаков А.В., Мусияченко К.А., Михайленко Д.С., Демин С.П. Условия образования калийсодержащих турмалинов Кумды-Кольского месторождения (Кокчетавский массив, Северный Казахстан): по данным изучения твердофазных включений // Литосфера. 2023 (в печати)].

Korsakov A.V., Theunissen K., Smirnova L.V., 2004. Intergranular Diamonds Derived from Partial Melting of Crustal Rocks at Ultrahigh-Pressure Metamorphic Conditions. *Terra Nova* 16 (3), 146–151. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00547.x>.

Korsakov A.V., Travin A.V., Yudin D.S., Marschall H.R., 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Tourmaline from Metamorphic Rocks of the Kokchetav Massif, Kazakhstan. *Doklady Earth Sciences* 424, 168–170. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0901036X>.

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>.

Lavrova L.D., Pechnikov V.A., Pleshakov A.M., Nadezhdina E.D., Shukolyukov Yu.A., 1999. A New Genetic Type of Diamond-Bearing Deposits. *Nauchny Mir, Moscow*, 228 p. (in Russian) [Лаврова Л.Д., Печников В.А., Плешаков А.М., Надеждина Е.Д., Шуколюков Ю.А. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Научный мир, 1999. 228 с.].

Letnikov F.A., 1983. Diamond Formation in Deep-Seated Tectonic Zones. *Doklady of the USSR Academy of Sciences*

271 (2), 433–435 (in Russian) [Летников Ф.А. Образование алмазов в глубинных тектонических зонах // Доклады АН СССР. 1983. Т. 271. № 2. С. 433–435].

Marschall H.R., Jiang S.-Y., 2011. Tourmaline Isotopes: No Element Left Behind. *Elements* 7 (5), 313–319. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.313>.

Marschall H.R., Korsakov A.V., Luvizotto G.L., Nasdala L., Ludwig T., 2009. On the Occurrence and Boron Isotopic Composition of Tourmaline in (Ultra)high-Pressure Metamorphic Rocks. *Journal of the Geological Society* 166 (4), 811–823. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-042>.

Musiyachenko K.A., Korsakov A.V., Letnikov F.A., 2021. A New Occurrence of Maruyamaite. *Doklady Earth Sciences* 498, 403–408. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21050111>.

Musiyachenko K.A., Korsakov A.V., Shimizu R., Zelenovskiy P.S., Shur V.Y., 2020. New Insights on Raman Spectrum of K-Bearing Tourmaline. *Journal of Raman Spectroscopy* 51 (9), 1415–1424. <https://doi.org/10.1002/jrs.5731>.

Ota T., Kobayashi K., Kunihiro T., Nakamura E., 2008. Boron Cycling by Subducted Lithosphere; Insights from Diamondiferous Tourmaline from the Kokchetav Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72 (14), 3531–3541. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.05.002>.

Rezvukhina O.V., Skublov S.G., Rezvukhin D.I., Korsakov A.V., 2021. Rutile in Diamondiferous Metamorphic Rocks: New Insights from Trace-Element Composition, Mineral/Fluid Inclusions, and U-Pb ID-TIMS Dating. *Lithos* 394–395, 106172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106172>.

Shatagin K.N., 1994. Age and Origin of Zerendinsk Batholith Granitoids in North Kazakhstan on Rb-Sr Isotopic Data. *Doklady Earth Sciences* 336 (5), 674–676 (in Russian) [Шатагин К.Н. Возраст и происхождение гранитоидов Зерендинского батолита в Северном Казахстане по результатам Rb-Sr-изотопного исследования // Доклады АН. 1994. Т. 336. № 5. С. 674–676].

Shatsky V.S., Jagoutz E., Sobolev N.V., Kozmenko O.A., Parkhomenko V.S., Troesch M., 1999. Geochemistry and Age of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Kokchetav Massif (Northern Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 137, 185–205. <https://doi.org/10.1007/s004100050545>.

Shatsky V.S., Sobolev N.V., Vavilov M.A., 1995. Diamond-Bearing Metamorphic Rocks of the Kokchetav Massif (Northern Kazakhstan). In: R. Coleman, X. Wang (Eds), *Ultrahigh Pressure Metamorphism*. Cambridge University

Press, p. 427–455. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511573088.013>.

Shimizu R., Ogasawara Y., 2005. Discovery of K-Tourmaline in Diamond-Bearing Quartz-Rich Rock from Kokchetav Massif, Kazakhstan. *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft* 150, 141.

Shimizu R., Ogasawara Y., 2013. Diversity of Potassium-Bearing Tourmalines in Diamondiferous Kokchetav UHP Metamorphic Rocks: A Geochemical Recorder from Peak to Retrograde Metamorphic Stages. *Journal of Asian Earth Sciences* 63, 39–55. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.024>.

Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Ragozin A.L., Wang K.-L., 2020. Ubiquitous Post-Peak Zircon in an Eclogite from the Kumdy-Kol, Kokchetav UHP-HP Massif (Kazakhstan): Significance of Exhumation-Related Zircon Growth and Modification in Continental-Subduction Settings. *Island Arc* 30 (1), e12385. <https://doi.org/10.1111/iar.12385>.

Stepanov A.S., Rubatto D., Hermann J., Korsakov A.V., 2016. Contrasting P-T Paths within the Barchi-Kol UHP Terrain (Kokchetav Complex): Implications for Subduction and Exhumation of Continental Crust. *American Mineralogist* 101 (4), 788–807. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5454>.

Theunissen K., Dobretsov N.L., Korsakov A., Travin A., Shatsky V.S., Smirnova L., Boven A., 2000. Two Contrasting Petrotectonic Domains in the Kokchetav Megamelange (North Kazakhstan): Difference in Exhumation Mechanisms of Ultrahigh-Pressure Crustal Rocks, or a Result of Subsequent Deformation? *Island Arc* 9 (3), 284–303. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2000.00279.x>.

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>.

Yudin D., Murzintsev N., Travin A., Alifirova T., Zhimulev E., Novikova S., 2021. Studying the Stability of the K/Ar Isotopic System of Phlogopites in Conditions of High T, P: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating, Laboratory Experiment, Numerical Simulation. *Minerals* 11 (2), 192. <https://doi.org/10.3390/min11020192>.

Zhimulev F.I., Poltaranina M.A., Korsakov A.V., Buslov M.M., Druzyaka N.V., Travin A.V., 2010. Eclogites of the Late Cambrian–Early Ordovician North Kokchetav Tectonic Zone (Northern Kazakhstan): Structural Position and Petrology. *Russian Geology and Geophysics* 51 (2), 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.020>.