

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.493.45

**РЕЗУЛЬТАТЫ  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ДАТИРОВАНИЯ РУД  
ЕРМАКОВСКОГО F–Be-МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
(ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ)**

© 2022 г. Б. Б. Дамдинов<sup>1,\*</sup>, Л. Б. Дамдинова<sup>1</sup>, Д. С. Юдин<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН В.В. Ярмолюком 12.03.2022 г.

Поступило 14.03.2022 г.

После доработки 16.03.2022 г.

Принято к публикации 17.03.2022 г.

Ермаковское F–Be-месторождение, крупнейшее в России и одно из крупнейших в мире месторождений бериллия, расположено в Западном Забайкалье. Руды месторождения весьма многообразны по своему облику и составу, основная их масса представлена апоизвестняковыми фенакит-бертрандит-флюоритовыми метасоматитами. Происхождение бериллиевого оруденения связывается со штоком лейкократовых эгиринсодержащих субщелочных гранитов, возраст которых соответствует 224–226 млн лет. Известные датировки самих руд имеют значения в интервале 225.5–219 млн лет и близки к возрасту рудогенерирующих гранитов. Для уточнения возраста руд было проведено  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование по калиевому полевому шпату и, впервые, непосредственно по бериллиевому минералу – милариту, калийсодержащему водному силикату бериллия ( $\text{KCa}_2(\text{Be}_2\text{AlSi}_{12}\text{O}_{30}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) из разных рудных тел Ермаковского месторождения. В возрастном спектре миларита (образец Ер-17) выделяется устойчивое плато в высокотемпературной части спектра, состоящее из четырех последовательных ступеней, составляющих ~50% выделенного  $^{39}\text{Ar}$  с возрастом  $182.5 \pm 3.0$  млн лет. Датировки калиевых полевых шпатов показали согласующиеся значения в интервале 169.8–170.6 млн лет. Результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования минералов из руд Ермаковского F–Be-месторождения позволяют сделать вывод, что процессы минералообразования происходили в течение достаточно длительного периода в промежутке 225–170 млн лет назад.

*Ключевые слова:* Ермаковское F–Be-месторождение,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование, руды, миларит

DOI: 10.31857/S2686739722070064

ВВЕДЕНИЕ

Ермаковское F–Be-месторождение, крупнейшее в России и одно из крупнейших в мире месторождений бериллия, расположено в Западном Забайкалье в 140 км восточнее г. Улан-Удэ. Геологическое строение месторождения, состав руд и их генезис изучались многими исследователями, среди которых можно отметить А.И. Гинзбурга,

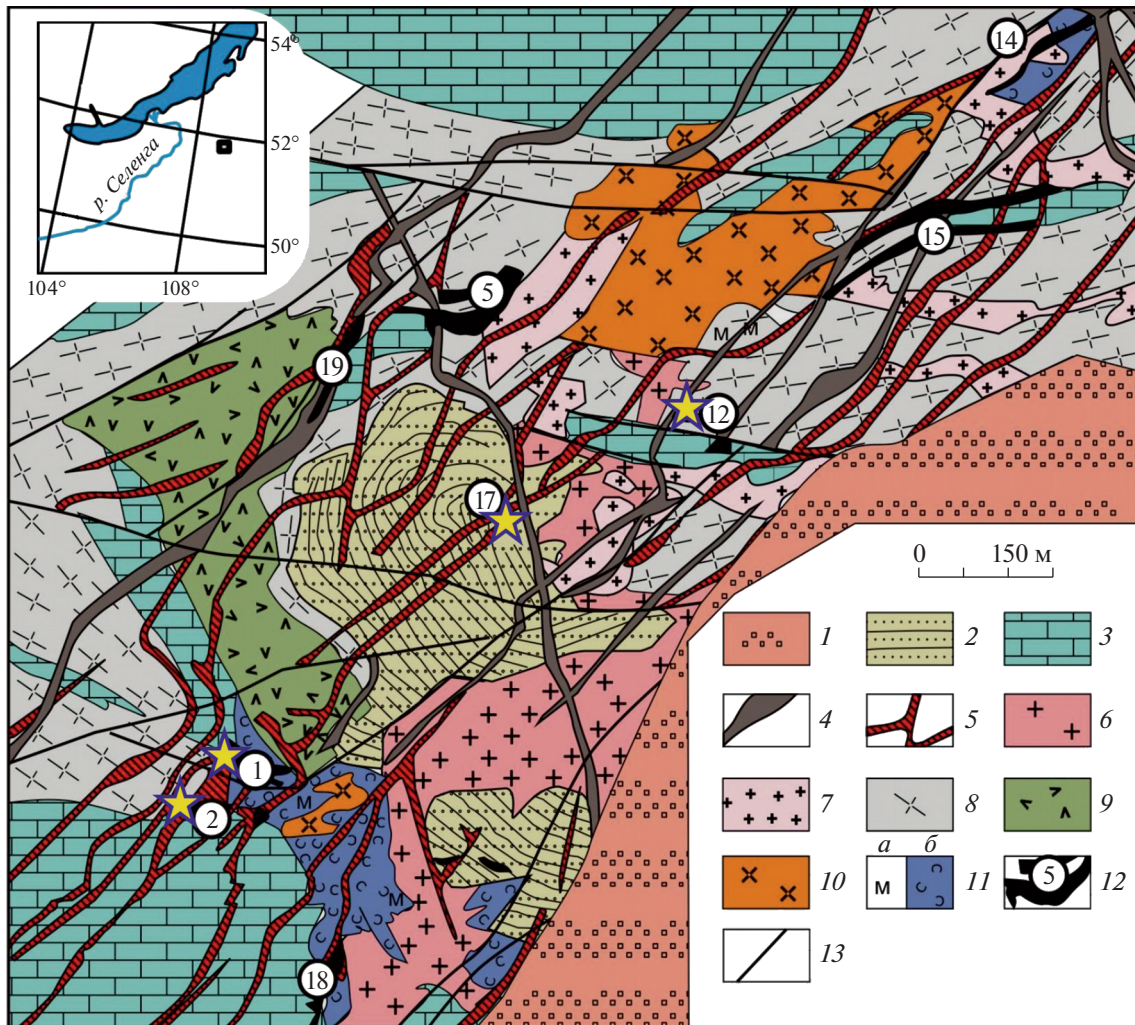
В.И. Гальченко, Я.А. Косалса, Н.П. Заболотную, М.И. Новикову, И.И. Куприянову, Ф.Г. Рейфа и др. В более поздних работах были детально охарактеризованы: последовательность образования интрузивных пород рудного поля [5–7]; условия кристаллизации и дегазации штока рудоносных эгириновых гранитов и состав магматических флюидов [8]; особенности строения прожилковых Be-руд и металлоносность рудообразующих растворов [2, 3, 9].

Ермаковское месторождение располагается в прибортовой части Кижингинской мезозойской рифтогенной впадины и локализовано в карбонатно-терригенной толще, сохранившейся в виде сравнительно крупного провеса кровли в поле распространения палеозойских гранитоидов (рис. 1). Вмещающая толща представляет собой

<sup>1</sup>Геологический институт им. Н.Л. Добрецова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

\*E-mail: damdinov@mail.ru

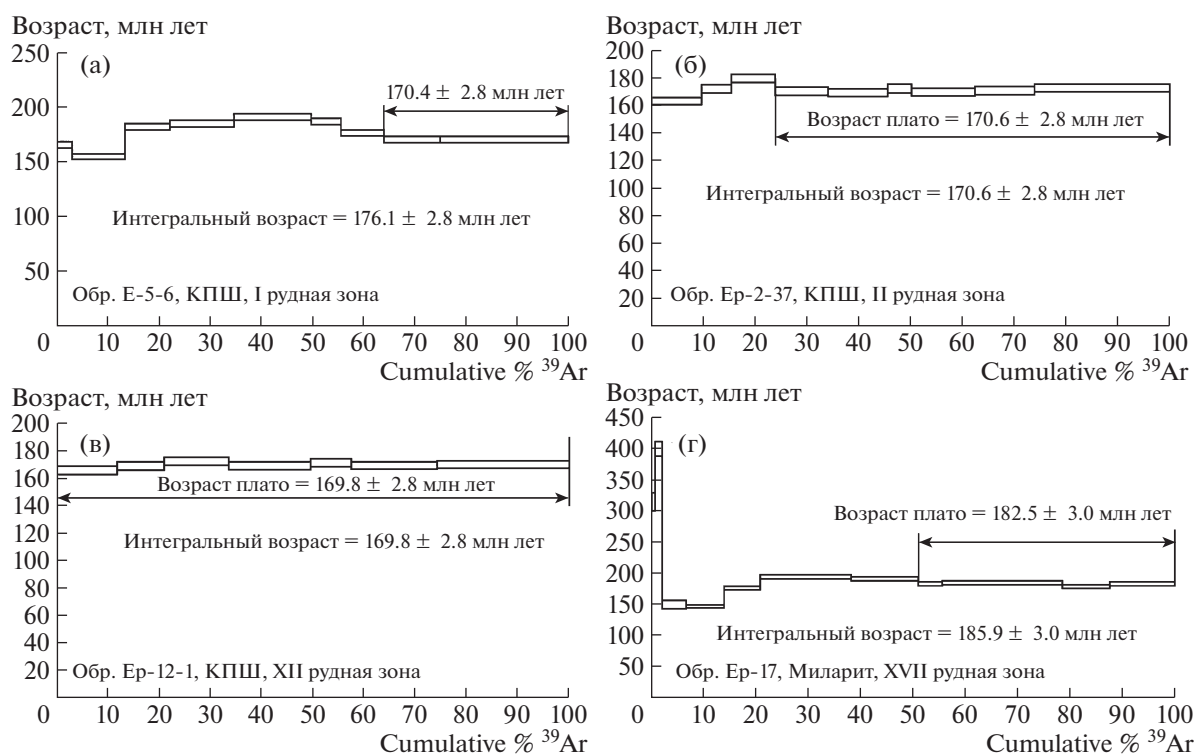


**Рис. 1.** Схема геологического строения Ермаковского месторождения (составлено по материалам В.И. Гальченко, В.П. Шабанова). 1 – конгломераты, гравелиты, песчаники; 2 – метаморфизованные песчаники с прослоями известняков и сланцев; 3 – доломиты; 4 – дайки сиенит-порфиров; 5 – дайки диоритовых порфиров; 6 – лейкократовые субщелочные граниты (массив “Шток”); 7 – граниты, гранодиориты; 8 – кристаллические сланцы; 9 – габбро, габбро-диориты; 10 – сиениты; 11 – скарны; 12 – рудные зоны и их номера; 13 – тектонические нарушения. Звездочками помечены места отбора проб на изотопное датирование.

субширотную асимметричную синклинали. Метаморфизованные песчаники слагают ядро синклинали, тогда как толща переслаивающихся доломитов, известняков и амфибол-пироксен-биотитовых сланцев образует крылья синклинали. Исключительно широко в рудном поле месторождения распространены дайки основного, среднего и кислого состава (см. рис. 1). Гидротермально измененные породы представлены следующими разновидностями: 1) альбитовые и кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты по домезозойским гранитам и пегматитам; 2) гранат-пироксеновые и пироксен-везувиановые скарны, развивающиеся по карбонатным и силикатным породам, включая некоторые магматические об-

разования; 3) микроклиниты, замещающие как метаосадочные, так и изверженные породы; 4) жиллообразные зоны флюоритизации, характерные для всех типов пород внутри рудного поля, контролирующиеся тектоническими нарушениями.

Происхождение бериллиевого оруденения связывается со штоком лейкократовых эгиринсодержащих субщелочных гранитов [8]. Руды весьма многообразны по своему облику и составу, основная их масса представлена апоизвестняковыми фенакит-берtrandит-флюоритовыми метасоматитами. Существенная доля руд представлена жильным выполнением зон крупнообломочных брекчий (II, XII зона) и прожилков (I, II зоны). По данным рудничных геологов, берtrandит преоб-



**Рис. 2.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -спектры минералов руд Ермаковского F–Be-месторождения: а – КПШ из руд первой рудной зоны (обр. Е-5-6); б – КПШ из руд второй рудной зоны (обр. Е-2-37); в – КПШ из руд двенадцатой рудной зоны (обр. Е-12-1); г – миларит из руд семнадцатой рудной зоны (обр. Е-17).

ладал на верхних горизонтах месторождения, которые к настоящему времени отработаны, а на нижних горизонтах главного карьера преобладают фенакитовые руды.

Промышленное значение имеют фенакит-микроклин-флюоритовые залежи с высоким содержанием  $\text{BeO}$  (до 4%, в среднем 1.19%), образовавшиеся путем метасоматического замещения известняков. Более бедное прожилково-вкрапленное оруденение распространено незначительно и развито преимущественно в алюмосиликатных породах: скарнах, кристаллических сланцах и изверженных породах.

Имеющиеся данные по возрасту магматических пород, присутствующих в рудном поле месторождения, опубликованные в работе [6], позволили выделить дорудные магматические породы: габброиды и гнейсовидные граниты (333–316 млн лет); дайки основного и кислого состава – трахидолериты, трахиандезиты, трахириолиты ( $325 \pm 3$  млн лет). Рудоносные лейкократовые эгиринсодержащие граниты ( $226 \pm 1$  млн лет, по данным U–Pb-датирования методом TIMS,  $224 \pm 1.3$  млн лет по данным Rb–Sr-изохронного датирования) образуют слабо эродированный ( $0.01 \text{ км}^2$  на поверхности), расширяющийся с глубиной выступ Ермаковской интрузии. Рудные тела группируются вокруг

этого выступа на удалении от 100 до 400 м, но в самих гранитах F–Be-оруденение не обнаружено, хотя их локальная флюоритизация сопровождается 2–4-кратным повышением содержания Be. Возраста руд, определенные Rb–Sr-изохронным методом по калиевому полевому шпату (КПШ) и флюориту, флогопиту и флюориту, имеют значения  $225.5 \pm 1.3$  и  $225.9 \pm 1.2$  млн лет соответственно. Позднее было проведено U–Pb-датирование апатита из руд Ермаковского месторождения и получены две близкие по возрасту датировки –  $225.1 \pm 6.2$  и  $219 \pm 1.2$  млн лет [13].

Пострудный магматизм представлен единичной дайкой фельзитов, имеющей секущие взаимоотношения с другими породными комплексами, и лишенной признаков гидротермальной проработки в местах пересечения ею рудных залежей. Возраст фельзитов определен Rb–Sr-методом по 6 валовым пробам и составляет  $161 \pm 5$  млн лет [6]. Хотя ранее была опубликована Rb–Sr-датировка в 184 млн лет [5].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ДАТИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для уточнения возраста руд было проведено  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование по КПШ и милариту – ка-

лийсодержащему водному силикату бериллия ( $\text{KCa}_2(\text{Be}_2\text{AlSi}_{12}\text{O}_{30}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) из разных рудных тел Ермаковского месторождения. Минералы были отобраны из I (КПШ), II (КПШ), XII (КПШ) и XVII (миларит) рудных зон месторождения (см. рис. 1).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -изотопное датирование проводилось по ранее опубликованной методике [10] в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

В результате датирования получено две группы значений возрастов – 169.8–170.6 и 182.5 млн лет (рис. 2).

Впервые  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировка получена непосредственно по бериллиевому минералу – милариту. Проба для датирования была отобрана из крупного кристалла, радиально-лучистого, без видимых включений, примесей других минералов и вторичных преобразований. В возрастном спектре миларита (образец Ер-17) выделяется устойчивое плато в высокотемпературной части спектра, состоящее из четырех последовательных ступеней, составляющих ~50% выделенного  $^{39}\text{Ar}$  с возрастом  $182.5 \pm 3.0$  млн лет.

Датирование КПШ из разных рудных зон Ермаковского месторождения показало согласующиеся значения изотопного возраста в интервале 169.8–170.6 млн лет (рис. 2). Однако в возрастном спектре КПШ (образец Е-5-6) в соответствии с критериями [11, 12] возрастное плато выделить не удалось. Вместе с тем среднее значение возраста по двум ступеням в высокотемпературной части возрастного спектра образца Е-5-6 совпадает со значениями возраста, полученными по возрастным плато образцов КПШ Ер-2-37 и Ер-12-1 и составляет  $170.4 \pm 2.8$  млн лет.

Наличие в низкотемпературной части возрастного спектра КПШ из рудной зоны I (обр. Е-5-6) ступеней с более древними значениями возраста позволяет предполагать более ранний возраст их формирования с последующим переуравновешиванием К–Аг-изотопной системы на рубеже 170.4 млн лет. Калиевый полевой шпат, как один из минералов наиболее подверженных вторичным изменениям, может отражать возраст наложенных геологических процессов. По-видимому, полученное значение (около 170 млн лет) отвечает возрасту воздействия эпигенетических процессов, возможно, дайкового магматизма, на К–Аг изотопную систему в КПШ.

Полученная  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировка миларита ( $182.5 \pm 3$  млн лет) моложе ранее опубликованных данных по возрасту рудогенерирующих щелочных гранитов и бериллиевых руд (226–219 млн лет). Проверка результатов  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования путем построения изохрон показала их полную сходимость с данными по возрасту плато. Это обсто-

ятельство повышает достоверность полученных нами возрастных датировок, следовательно, такая разница в возрасте скорее всего обусловлена геологическими причинами.

Магматические породы, отвечающие этому возрастному этапу (около 180 млн лет) в рудном поле Ермаковского месторождения, несмотря на достаточно хорошую изученность, неизвестны. Поэтому одной из причин большой разницы между возрастом рудоносных щелочных гранитов и оруденения может быть длительное остывание рудогенерирующего гранитоидного массива. Действительно, данные по термохронологии Ангаро-Витимского батолита показали, что становление и кристаллизация крупных гранитоидных массивов – достаточно длительный процесс, протекающий на протяжении более ста млн лет [10]. Исследования Ф.Г. Рейфа (2008) показали, что рудогенерирующий щелочно-гранитный массив “Шток”, присутствующий на Ермаковском месторождении, вместе с аналогичным массивом на Ортском бериллиевом месторождении, удаленном от Ермаковского на 30 км, представляют собой выступы единого крупного магматического резервуара. Следовательно, становление такого относительно крупного массива могло происходить в течение достаточно продолжительного времени.

Термобарогеохимические исследования руд XVIII рудной зоны показали, что рудообразование происходило в относительно высокobarических и, следовательно, в достаточно глубоких условиях [1]. Глубинные условия кристаллизации обусловили медленное остывание материнского интрузива, в течение которого могло происходить несколько импульсов выделения рудообразующих флюидов. В то же время продукты таких последовательных импульсов рудообразования, отражающих разные стадии остывания рудно-магматической системы, достоверно не установлены. Возможно, это связано с малым количеством датировок разных типов бериллиевой минерализации. Хотя формирование такого крупного месторождения, уникального по количеству видов бериллиевых минералов, характеризующегося наличием большого количества пространственно разобщенных рудных зон, отличающихся по составу бериллиевых минералов, должно было происходить в ходе достаточно длительной эволюции рудообразующей системы.

Другой причиной проявления поздних этапов рудообразования может быть более поздний магматизм, проявленный в рудном поле месторождения дайкой фельзитов, считающейся пострудной, возраст которой определяется в интервале 184–161 млн лет, по данным Rb–Sr-изотопного датирования [5, 6]. Пространственная связь оруденения с дайками сиенитов отмечается на XVIII руд-

ной зоне, где бериллиевая минерализация представлена ассоциацией Са–На–бериллосиликатов (лейкофан–мелинофан–эвидимит), замещающей ранний фенакит. Возраст этих даек не определен, однако растворы, формировавшие руды XVIII зоны, отличаются повышенной щелочностью, что позволяет предполагать генетическую связь Са–На–бериллосиликатов с щелочным дайковым магматизмом [1].

Главным бериллиевым минералом руд Ермаковского месторождения является фенакит  $\text{BeSiO}_4$ , отложение которого происходило на ранней стадии рудообразования, тогда как миларит–бавенитовая минерализация формировалась на самой поздней сульфидно–карбонатной стадии [4]. Четкого структурного перерыва между стадиями не обнаружено, но наблюдается замещение раннего фенакита агрегатами миларита, бавенита и кальцита. Промежуток времени между стадиями рудоотложения неизвестен, однако взаимоотношения бериллиевых минералов показывают, что миларит формировался позже главных флюорит–фенакитовых руд, практически на завершающем импульсе (этапе) рудообразования Ермаковского месторождения. Возможно, этот импульс связан с дайковым магматизмом, однако для уточнения этого вопроса необходимо проведение дополнительных геохронологических исследований пострудных даек.

Таким образом, результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования минералов из руд Ермаковского F–Be-месторождения позволяют сделать вывод, что процессы минералообразования происходили в течение достаточно длительного периода в промежутке 225–170 млн лет.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект ГИН СО РАН № АААА–А21–121011390003–9).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б., Брянский Н.В. Процессы формирования флюорит–лейкофан–мелинофан–эвидимитовых руд Ермаковского F–Be месторождения (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1271–1291.
2. Дамдинова Л.Б., Рейф Ф.Г. Особенности формирования разнотипной прожилковой бериллиевой минерализации на Ермаковском F–Be месторождении (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика, 2004. Т. 45. № 8. С. 979–991.
3. Дамдинова Л.Б., Рейф Ф.Г. Происхождение кварц–флюоритовой залежи с низким содержанием бериллия на Ермаковском месторождении богатых F–Be руд // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 11. С. 1084–1097.
4. Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Гальченко В.И. Ермаковское флюорит–бериллиевое месторождение (Западное Забайкалье, Россия), М.: ВИМС, 2009. 309 с.
5. Лыхин Д.А., Костицын Ю.А., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Рипп Г.С. Рудоносный магматизм Ермаковского бериллиевого месторождения в Западном Забайкалье: возраст, источники магм и соотношение с оруденением // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 1. С. 52–70.
6. Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В. Западно–Забайкальская бериллиевая провинция: месторождения, рудоносный магматизм, источники вещества // М.: ИГЕМ РАН, ГЕОС. 2015. 256 с.
7. Рейф Ф.Г., Ишков Ю.М. Ве–носные сульфатно–фторидные рассолы – продукт дистилляции остаточных пегматитов щелочно–гранитной интрузии (Ермаковское F–Be месторождение, Забайкалье) // Геохимия, 1999. № 10. С. 1096–1111.
8. Рейф Ф. Г. Щелочные граниты и бериллиевое (фенакит–бертрандитовое) оруденение на примере Оротского и Ермаковского месторождений // Геохимия. 2008. № 3. С. 243–263.
9. Стельмачонок К.З., Ишков Ю.М. Металлоносность рудообразующих растворов Ермаковского бериллиевого месторождения // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 5. С. 802–814.
10. Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 11. С. 1181–1199.
11. Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of Discordant  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Age Spectra of Mesozoic Tholeiites from Antarctica // Geochem. Cosmochim. Acta. 1977. V. 41. P. 15–32.
12. Ludwig K.R. User's Manual for Isoplot 3.00: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center. Special Publication. 2003.
13. Ripp G.S., Izbrodin I.A., Rampilov M.O., Tomilenko A.A., Lastochkin E.I., Posokhov V.F. Relationship of F–Be Mineralization to Granites and Syenites at the Eрмаkovka Deposit (Western Transbaikalia) // Geologica Acta. 18.2. 1–13, I–VI.

**RESULTS OF  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  DATING OF ORES OF THE ERMAKOVKA F-Be DEPOSIT (WESTERN TRANSBAIKALIA, RUSSIA)****B. B. Damdinov<sup>a,#</sup>, L. B. Damdinova<sup>a</sup>, and D. S. Yudin<sup>b</sup>**<sup>a</sup>*N.L. Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*<sup>b</sup>*Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*<sup>#</sup>*E-mail: damdinov@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Yarmolyuk March 12, 2022

The Ermakovka F-Be deposit is the largest in Russia and one of the largest beryllium deposits in the world. It is located in Western Transbaikalia. The ores of the deposit vary in appearance and composition. Most of them are represented by after limestone phenakite-bertrandite-fluorite metasomatites. The origin of beryllium mineralization is associated with a stock of leucocratic aegirine-bearing subalkaline granites, whose age corresponds to 224–226 Ma. The known dates of the ores are in the range of 225.5–219 Ma and are close to the age of ore-generating granites. To clarify the age of the ores,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating was carried out on potassium feldspar and, for the first time, on beryllium mineral milarite, potassium-containing hydrous beryllium silicate ( $\text{KCa}_2(\text{Be}_2\text{AlSi}_{12}\text{O}_{30}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) from different ore bodies of the Ermakovka deposit. In the age spectrum of milarite (sample Ep-17), a stable plateau is distinguished in the high-temperature part of the spectrum, consisting of four successive steps, constituting ~50% of the released  $^{39}\text{Ar}$  with an age of  $182.5 \pm 3.0$  Ma. Dating of potassium feldspars showed consistent values in the range of 169.8–170.6 Ma. The results of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of minerals from the ores of the Ermakovka F-Be deposit allow us to conclude that the processes of mineral formation took place over a quite long period in the range of 225–170 million years ago.

*Keywords:* Ermakovka F-Be deposit,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, ores, milarite