

Оригинальная статья / Original article
УДК: 553.061.2(571.54)

ПРОБЛЕМА ИСТОЧНИКОВ ФЛЮИДОВ ОРОТСКОГО БЕРИЛЛИЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© М.О. Рампилов¹, Г.С. Рипп², И.А. Избродин³, Е.И. Ласточкин⁴, В.Ф. Посохов⁵

¹⁻⁵Геологический институт СО РАН,

Российская Федерация, Республика Бурятия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

РЕЗЮМЕ. Цель данной статьи – на основании анализа стабильных изотопов в минералах из различных стадий минералообразования определить источники флюидов, участвовавших в формировании Оротского бериллиевого месторождения. **Методы.** Определение состава пород проведено методами классического силикатного анализа, рентгено-флуоресцентным и масс-спектрометрическим с индуктивно-связанной плазмой. Состав минералов изучен на модернизированном рентгеновском микроанализаторе MAP-3 и сканирующем электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300. Изотопные составы кислорода, углерода и водорода определялись на прецизионных масс-спектрометрах Finigan MAT-252 и 253 в режиме двойной системы напуска. **Результаты.** Определен изотопный состав кислорода, углерода и водорода в минералах различных стадий минералообразования. Среди ассоциаций, связанных с рудообразованием, выделяется два кластера. Один из них представляет минералы из участков метасоматического изменения гранитов. Из этой ассоциации только кварц и циркон имеют невысокие положительные значения $\delta^{18}\text{O}$, в то время как у калиевого полевого шпата и гематита они обычно ниже -10%. Кислород в минералах рудного парагенезиса, включающего берtrandит (-10,2 $\delta^{18}\text{O}\%$), диккит (-9,5 $\delta^{18}\text{O}\%$) и анкерит (-7,55 $\delta^{18}\text{O}\%$), характеризуется резкой обогащенностью легким изотопом, а кристаллизационная вода диккита резко деплетирована дейтерием (-162 $\delta\text{D}\%$). Значение $\delta^{18}\text{O}$ во флюиде, подобное составу метеорного источника, предполагает возможность нескольких вариантов. Согласно одному из них, облегчение кислорода могло быть обусловлено плавлением пород с изначально низким $\delta^{18}\text{O}$ либо путем позднего обмена с обедненными $\delta^{18}\text{O}$ гидротермальными флюидами или метеорными водами. Согласно другому варианту, источниками флюидов являлись не граниты: это мог быть и рециклинг метеорных вод, проникающих в еще горячее раскристаллизованное интрузивное тело. **Выводы.** Установлено, что в формировании Оротского месторождения принимали участие воды метеорного источника.

Ключевые слова: бериллиевые месторождения, изотопия, источники вещества.

Формат цитирования: Рампилов М.О. Рипп Г.С., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Посохов В.Ф. Проблема источников флюидов Оротского бериллиевого месторождения (Западное Забайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 1. С. 42–51.

¹Рампилов Михаил Олегович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, e-mail: mrampilov@mail.ru

Mikhail O. Rampilov, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher, e-mail: mrampilov@mail.ru

²Рипп Герман Самуилович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: ripp@gin.bsnet.ru

German S. Ripp, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: ripp@gin.bsnet.ru

³Избродин Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: isbrodin@rambler.ru

Ivan A. Izbrodin, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: isbrodin@rambler.ru

⁴Ласточкин Евгений Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

Evgeniy I. Lastochkin, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

⁵Посохов Виктор Федорович, старший научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433275, e-mail: vitaf1@yandex.ru
Viktor F. Posokhov, Senior Researcher, tel.: 8 (3012) 433275, e-mail: vitaf1@yandex.ru

THE PROBLEM OF OROT BERYLLIUM DEPOSIT FLUID SOURCES (WESTERN TRANSBAIKALIA)

M.O. Rampilov, G.S. Ripp, I.A. Izbrodin, E.I. Lastochkin, V.F. Posokhov

Geological Institute SB RAS,

6a, Sakhyanova St., Ulan-Ude, Buryat Republic, 670047, Russian Federation.

ABSTRACT. The **purpose** of the article is to identify the sources of fluids involved in the formation of the Orot beryllium deposits (Be deposits) based on the analysis of stable isotopes in the minerals of different mineral phases. **Methods.** The methods of classical silicate analysis, X-ray fluorescence and mass spectrometric with inductively coupled plasma have been used to determine the composition of rocks. The composition of minerals has been studied by means of a modified X-ray microanalyzer MAP-3 and a scanning electron microscope LEO-1430 equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) Inca Energy-300. The isotope compositions of oxygen, carbon and hydrogen were examined on the precision mass spectrometers Finnigan MAT-252 and 253 in the double inlet system mode. **Results.** The isotopic composition of oxygen, carbon and hydrogen in the minerals of different mineral phases are determined. Two clusters are distinguished among the associations related to ore mineralization. One cluster represents the minerals from the areas of metasomatic granite alteration. In this association only quartz and zircon have low positive values of $\delta^{18}\text{O}$, while K-feldspar and hematite typically have values below -10%. The oxygen in the minerals of ore paragenesis including bertrandite (-10,2%, $\delta^{18}\text{O}$), dickite (-9,5 $\delta^{18}\text{O}$ %) and ankerite (-7,55 $\delta^{18}\text{O}$ %) is characterized by low $\delta^{18}\text{O}$ values while dickite crystallization water is sharply depleted by deuterium (-162 δD ‰). The $\delta^{18}\text{O}$ value in a fluid similar in composition to the meteoric source suggests the possibility of a few variants. According to one of them low $\delta^{18}\text{O}$ values of oxygen are the result of melting rocks with initial low $\delta^{18}\text{O}$ values or by late exchange with $\delta^{18}\text{O}$ depleted hydrothermal fluids or meteoric waters. According to another variant, granites are not the source of fluids. It could be a recycling of meteoric water penetrating hot dycrystalline intrusive body. **Conclusions.** The waters of the meteoric source are determined to take part in the formation of the Orot Be deposits.

Keywords: beryllium deposits (Be deposits), isotopy, sources of fluids

For citation: Rampilov M.O., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Posokhov V.F. The problem of Orot beryllium deposit fluid sources (Western Transbaikalia). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2017, vol. 40, no. 1, pp. 42–51. (In Russian).

Введение

Многokrатно встречающаяся пространственная сопряженность магматических пород и месторождений определила появление достаточно реальной и в то же время упрощенной модели формирования рудно-магматических систем. После привлечения современных методов исследований, в том числе изотопных, была установлена более сложная схема такой связи, позволившая выявить участие немагматических источников вещества и флюидов, реконструировать картину их трансформации при формировании месторождений. Примером этого служит часто отмечаемое обогащение легкими изотопами кислорода флюидов скарнообразующих процессов, обусловленное обменом магматических и метеорных вод [1–5]. Подобные процессы

описаны для молибден-вольфрамовых [6], апатит-магнетитовых (тип Кируны) [7] и других рудно-магматических систем. К числу примеров непростого соотношения между гранитами и оруденением может быть отнесено Оротское берtrandитовое месторождение, которое принадлежит к берtrandит-аргиллизитовой формации. Аналогом этого типа является одно из крупнейших в мире бериллиевое месторождение Спор Маунтин (Юта, США).

Методы исследований

Определение состава пород проведено методом классического силикатного анализа, микроэлементного – рентгенофлуоресцентным (Rb, Sr, Ba, Zr, Nb, Y, элементы группы железа), нейтронно-активационным (редкоземельные элементы, Ta, Hf, Th, U) и масс-спектрометрическим с индуктивно-связанной плаз-

мой методами (ИГХ СО РАН, ГИН СО РАН).

Состав минералов изучен на модернизированном рентгеновском микроанализаторе MAP-3 (С.В. Канакин). В зависимости от состава минералов съемки проводились при 15–20 kV, ускоряющем напряжении тока зонда от 20 до 40 нА, времени измерения 20 с и диаметре зонда 2–3 мкм. Для получения более достоверных результатов анализ, как правило, проводился в нескольких точках. Микроструктурные особенности и взаимоотношения минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300.

Изотопные составы кислорода, углерода в анкерите и кислорода в силикатах, оксидах определены в Геологическом институте СО РАН (аналитик В.Ф. Посохов). Анализ водорода из гидроксильной воды диккита и серы из сульфидов выполнены в Аналитическом центре ДВО РАН. Все измерения проводились на прецизионных масс-спектрометрах Finigan MAT-252 и 253 в режиме двойной системы напуска. Калибровка осуществлялась по международным NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит) и лабораторным стандартам. Погрешность полученных значений составила не более 0,2–0,3, а водорода – 1,5% при 95%-м доверительном уровне.

Геологическое строение месторождения

По результатам разведочных работ Оротское месторождение приурочено к вулканотектонической структуре, сложенной породами жерловой фации. Среди них зафиксированы пирокластические, лавокластические и туфогенно-осадочные образования кислого, щелочного и среднего составов (рис. 1). В северо-западной части вулканыты контактируют с гранитоидами раннекуналейского комплекса. Представлены они мелкозер-

нистыми лейкогранитами, граносиенитами, сиенит-порфирами. На контакте с вулканогенными образованиями гранитоиды интенсивно катаклазированы. На месторождении встречаются также дайки и небольшие тела фельзит-порфиров, гранит-порфиров, диоритов.

Бериллиевое оруденение локализовано в экзоконтакте вулcano-тектонической структуры, в поле распространения гранитных брекчий и собственно лейкократовых гранитов. Рудная зона фиксируется по гидротермально-метасоматической диккитизации, микроклинизации, гематитизации, окварцеванию. Руды представлены неправильной формы диккит-полевошпатовыми метасоматическими телами, имеющими постепенные переходы к вмещающим породам. Для них характерны пережимы, раздувы и резкие выклинивания.

В метасоматических зонах кроме диккита и кварца отмечаются также флюорит, карбонаты, гематит, берtrandит, циркон. Степень изменения вмещающих пород и соотношения главных минералов сильно варьируют. Берtrandит образует кристаллы размером в десятые доли миллиметра и находится в тесной ассоциации с диккитом на контактах с реликтами полевого шпата. Он ассоциирует также с кварцем и анкеритом, выделяясь совместно с диккитом по трещинкам в полевых шпатах. В пределах рудного поля участками отмечается прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация (пирит, молибденит), связанная с кварцевыми прожилками. Она пространственно не сопряжена с участками бериллиевого оруденения.

Предполагается, что бериллиевые руды являются производными гранитов [8–10]. Их связь основывается на результатах геохронологических и геохимических исследований. При этом считается, что магматические породы и руды сформировались с участием мантийных источников [8].

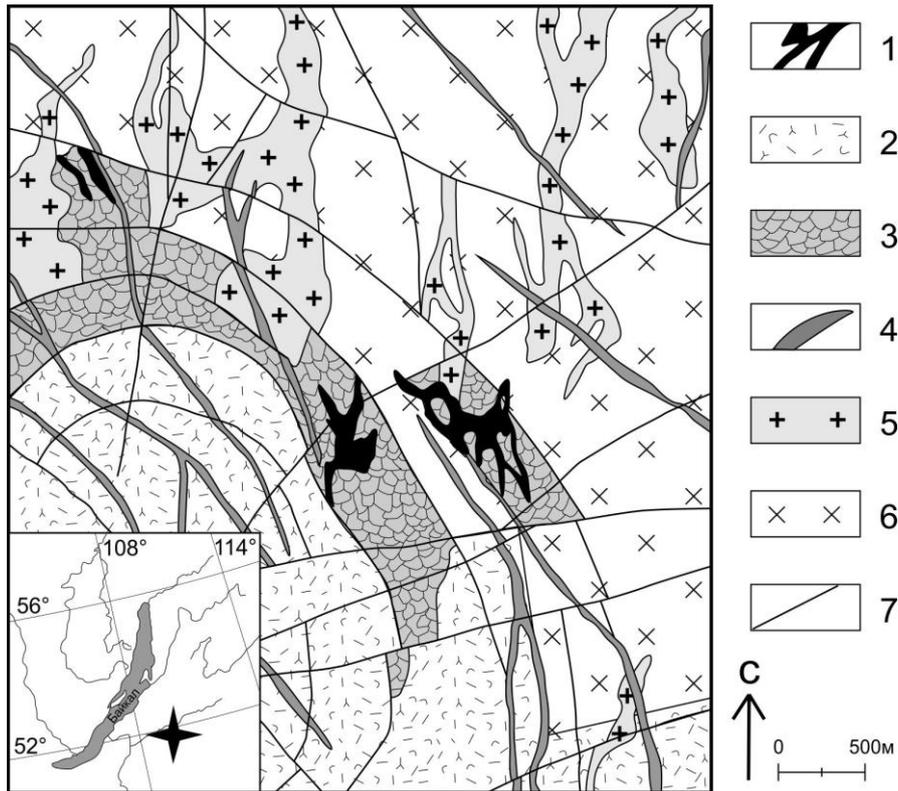


Рис. 1. Схема геологического строения Оротского месторождения (по результатам поисково-оценочных работ):

- 1 – рудные тела; 2 – туфобрекчии и лавы трахитов, трахиандезитов, трахилипаритов;
 3 – зоны брекчирования гранитов; 4 – дайки фельзит-порфиров, гранит-порфиров, диоритов;
 5 – мелкозернистые лейкократовые граниты; 6 – сиенитпорфиры, граносиениты;
 7 – тектонические нарушения

Fig. 1. Scheme of the Orot deposit geological structure (on the basis of prospect evaluation survey results):

- 1 – ore bodies; 2 – tuff breccias and lavas of trachytes, trachyandesites, trachyliparites;
 3 – zones of granite brecciation; 4 – dikes of felsite-porphyry, granite-porphyry, diorites;
 5 – fine-grained leucocratic granites; 6 – syenite porphyry, granosyenites; 7 – faulting

По данным термобарогеохимических исследований предполагается [9, 10], что рудоносные растворы отделялись от гранитного расплава в виде конденсированной паровой фазы вскипавшего раствора. Газовая фаза, возникшая при вскипании, обладала кислотными свойствами и вызывала аргиллизацию пород. В расплавных включениях гранитов были установлены сульфатные минералы, свидетельствующие о высокой фугитивности кислорода в процессе формирования пород. Она обусловила преобладание в породах окисного железа и присутствие гематита. Соответственно,

это накладывает ограничение на возможную связь с ними сульфидной минерализации.

Результаты изотопных исследований

Наиболее важной особенностью кислорода и водорода является весьма высокая обогащенность минералов Оротского месторождения легкими изотопами, имеющими значения, подобные значениям метеорных вод (таблица). Среди ассоциаций, связанных с рудообразованием, выделяется два кластера. Один из них представляет минералы из участков метасоматического изменения

гранитов. Это вкрапленники и гнезда калиевого полевого шпата (КПШ) и ассоциирующие с ним гематит и циркон. Из этой ассоциации только кварц и циркон имеют невысокие положительные значения $\delta^{18}\text{O}$, в то время как у КПШ и гематита они обычно ниже -10%. Изотопный состав

кислорода во флюиде, равновесном с минералами, имеет устойчиво низкие значения величины $\delta^{18}\text{O}$.

Кислород в минералах рудного парагенезиса, включающего берtrandит, диккит и анкерит, также характеризуется резкой обогащенностью легким

**Изотопные составы кислорода, углерода, водорода и серы
 в минералах Оротского месторождения**
**Isotopic compositions of oxygen, carbon, hydrogen and sulfur
 in Orot deposit minerals**

Анализируемые ассоциации / Analyzed Association	Минерал / Mineral	$\delta^{18}\text{O}\%$ SMOW	$\delta^{13}\text{C}\%$ PDB	$\delta\text{D}\%$ SMOW	$\delta^{34}\text{S}\%$ CDT	$\delta^{18}\text{O}\%$ fluid SMOW
Участки аргиллизированных гранитов / Sites of argillized granites	Калиевый полевой шпат / K-feldspar	-13,60				-17,80
		-11,60				-15,80
		-10,80				-15,00
		-10,70				-14,90
		-9,20				-13,40
	Гематит / Hematite	-7,10				-11,30
		-15,00				-14,30
			-12,15			
	Кварц / Quartz	3,00				-4,00
	Циркон / Zircon	0,20				2,00
Минералы рудного парагенезиса / Minerals of ore paragenesis	Диккит / Dickite	-9,50		-166,40		-15,70
		-9,40		-158,60		-15,60
		-8,80				-15,00
	Берtrandит / Bertrandite	-10,20				
	Анкерит / Ankerite	-7,65	-1,95			-16,45
-7,52		-1,29			-16,32	
Сульфидный парагенезис / Sulphide paragenesis	Молибденит / Molybdenite				7	
	Пирит / Pyrite				6,13	
						7,60
					7,62	

Примечание. Расчет состава кислорода в воде, равновесной с минералами, проведен по [11]. Температуры, использованные при оценке изотопных составов, взяты из расчета 250–300°C.

Note. Calculation of oxygen composition in water equilibrium with minerals was carried out according to [11]. The temperatures used in the estimation of isotopic compositions follow the calculation of 250–300°C.

изотопом. Состав кислорода во флюиде, равновесном с перечисленными минералами, еще больше обогащен легким кислородом и свидетельствует об участии в процессе минералообразования воды метеорного источника. Это подтверждается резкой деплетированностью дейтерием кристаллизационной воды диккита (рис. 2).

Обсуждение результатов

По петрохимическим и геохимическим особенностям граниты Оротского месторождения мало отличаются от стандартных лейкогранитов повышенной щелочности. Присутствие в них акцессорных количеств эгирина, принимаемого исследователями в качестве индикатора принадлежности пород к щелочному ряду, могло быть обусловлено высокой фугитивностью кислорода в расплаве, определившей широкое распространение в них окисного железа. Высокая фугитивность кислорода определила также отсутствие сульфидных минералов в бериллиеносных метасоматитах.

Значение $\delta^{18}\text{O}$ во флюиде, подобное составу метеорного источника, свидетельствует об иной модели рудообразования, чем предлагалось предшественниками. Появление такого флюида предполагает возможность нескольких вариантов. Согласно одному из них, облегчение кислорода могло быть обусловлено плавлением пород с изначально низким $\delta^{18}\text{O}$ либо поздним обменом с обедненными $\delta^{18}\text{O}$ гидротермальными флюидами или метеорными водами [13]. Согласно другому варианту, источниками флюидов являлись не граниты. Это могло быть и рециклинг метеорных вод, проникающих в еще горячее раскристаллизованное интрузивное тело. Такой механизм предложен для флюидов месторождения Спор Маунтин [14], которое, как и Оротское месторождение, относится к берtrandит-аргиллизитовой формации.

В случае с Оротским месторождением облегчение изотопного состава кислорода могло быть обусловлено присутствием сульфатной серы в расплаве.

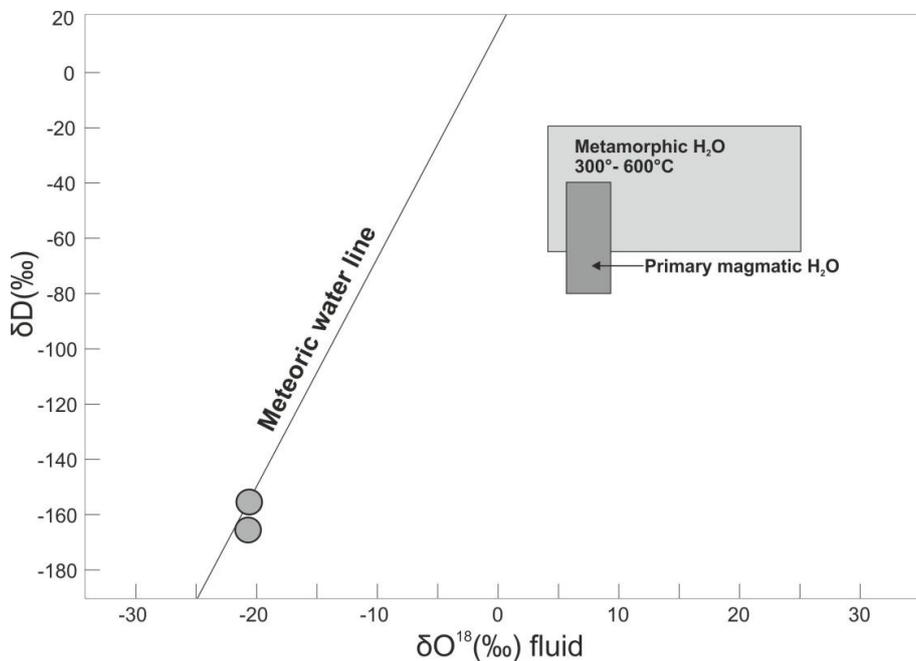


Рис. 2. Диаграмма составов δD и $\delta^{18}\text{O}$ в дикките, ассоциирующем с берtrandитом
Источники флюидов из различных резервуаров Земли по [12]

Fig. 2. A diagram of δD and $\delta^{18}\text{O}$ compositions in dickite associated with bertrandite
The sources of fluids from various Earth reservoirs by [12]

Механизм трансформации изотопных составов здесь связывается с окислением серы и, соответственно, обогащением флюида легким кислородом или изотопным обменом кислородом между флюидом и сульфатными фазами [15]. В обоих вариантах должна фиксироваться эволюция изотопных составов кислорода. Если исходить из крайне низкой концентрации сульфатной серы (менее 0,1 мас. %), присутствующей в гранитах, масштабы трансформации изотопного состава кислорода в этом случае не могли быть сколько-нибудь значимыми.

Относительно рассмотренных выше вариантов несколько большее предпочтение имеет механизм вскипания флюида и конденсации газовой фазы с образованием флюидных потоков [9]. По аналогии с фракционированием изотопного состава кислорода и водорода в результате испарительного механизма [16] такой процесс мог проявиться и в гранитах Оротского месторождения. В то же время отсутствие данных по изотопному составу кислорода остаточного флюида оставляет этот вариант на стадии гипотезы. Если предположить, что мы имеем дело со стандартными гранитами, то значения $\delta^{18}\text{O}$ последнего должны были увеличиться до величин более 9–10% $\delta^{18}\text{O}$. Кроме того, количество конденсированных флюидов не могло достигать масштабов, сопоставимых с масштабами метасоматических процессов. Поэтому рассмотренная модель также не выглядит реалистичной.

Библиографический список

1. Baumgartner L.P., Valley J.W. Stable isotope transport and contact metamorphic fluid flow // Rev. in Miner. and Geoch. 2001. Vol. 43. Pp. 415–467. Doi: 10.2138/gsrmg.43.1.415.
2. Brown P.E., Bowman J.R., Kelly W.K. // Econ. Geol. 1985. Vol. 80. Pp. 72–95.

Заключение

На данном этапе мы можем остановиться на варианте изначальной обогащенности магматического очага легким кислородом. В настоящее время известно немного гранитных массивов с изотопно легким кислородом [5, 17].

Вторым реальным механизмом, обусловившим такой состав кислорода и деплетированность флюидов дейтерием, представляется вовлечение в процесс рудообразования вод метеорного источника. Такой вариант в свое время был предложен для берtrandитового месторождения Спор Маунтин [14]. Также участие флюидов метеорного источника в образовании бериллиевых руд предложено для Ермаковского месторождения [18].

Касаясь проблемы мантийного вещества, участвовавшего в формировании месторождения, можно сказать, что результаты изотопных исследований, включая данные анализа сульфидной серы, свидетельствуют пока лишь о коровом источнике. Таким образом, рассмотренные механизмы возможного появления аномально легкого изотопного состава кислорода в минералах и во флюидной фазе не согласуются с моделями фракционной кристаллизации и вскипанием магматического очага.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта 15-45-04089 p_сибирь_a.

References

1. Baumgartner L.P., Valley J.W. Stable isotope transport and contact metamorphic fluid flow. Rev. in Miner. and Geoch. 2001, vol. 43, pp. 415–467. Doi: 10.2138/gsrmg.43.1.415.
2. Brown P.E., Bowman J.R., Kelly W.K. Econ. Geol, 1985, vol. 80, pp. 72–95.

3. Hall D.L., Cohen L.H., Schiffman P. Hydrothermal Alteration Associated with the Iron Hat Iron Skarn Deposit, Eastern Mojave Desert, San Bernardino County, California // *Econ. Geol.* 1988. Vol. 83. Pp. 568–587. Doi: 10.2113/gsecongeo.83.3.568.

4. Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See District. West Germany and the Alno District, Sweden // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967. Vol. 31. Pp. 407-430. Doi: 10.1016/0016-7037(67)90051-8.

5. Boroughs S., Wolff J.A., Ellis B.S., Bonnicksen B., Larson P.B. Evaluation of models for the origin of Miocene low- $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites of the Yellowstone // *Columbia River Large Igneous Province. Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. Vol. 313–314. Pp. 45–55. Doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.039.

6. Li X., Huang C., Wang C., Wang L. Genesis of the Huangshaping W – Mo – Cu – Pb – Zn polymetallic deposit in Southeastern Hunan Province, China: Constraints from fluid inclusions, trace elements, and isotopes // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 79. Pp. 1–25. Doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.04.023.

7. Yu, J., Che, L. & Wang, T. Alteration, oxygen isotope, and fluid inclusion study of the Meishan iron oxide-apatite deposit, SE China // *Miner Deposita*. 2015. Vol. 50. No. 7. Pp. 847–869. Doi: 10.1007/s00126-015-0577-0.

8. Лыхин Д.А., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. Возраст, состав и источники рудоносного магматизма Оротского бериллиевого месторождения в Западном Забайкалье // *Геология рудных месторождений*. 2004. Т. 46. № 2. С. 128–146.

9. Рейф Ф.Г., Карманов Н.С., Ишков Ю.М. Кислые Be-носные растворы Оротского месторождения и их связь с интрузи-

3. Hall D.L., Cohen L.H., Schiffman P. Hydrothermal Alteration Associated with the Iron Hat Iron Skarn Deposit, Eastern Mojave Desert, San Bernardino County, California. *Econ. Geol.* 1988, vol. 83, pp. 568–587. Doi: 10.2113/gsecongeo.83.3.568.

4. Taylor H.P., Frechen J., Degens E.T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See District. West Germany and the Alno District, Sweden. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, vol. 31, pp. 407-430. Doi: 10.1016/0016-7037(67)90051-8.

5. Boroughs S., Wolff J.A., Ellis B.S., Bonnicksen B., Larson P.B. Evaluation of models for the origin of Miocene low- $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites of the Yellowstone. *Columbia River Large Igneous Province. Earth Planet. Sci. Lett.* 2012, vol. 313–314, pp. 45–55. Doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.039.

6. Li X., Huang C., Wang C., Wang L. Genesis of the Huangshaping W – Mo – Cu – Pb – Zn polymetallic deposit in Southeastern Hunan Province, China: Constraints from fluid inclusions, trace elements, and isotopes. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 79, pp. 1–25. Doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.04.023.

7. Yu, J., Che, L. & Wang, T. Alteration, oxygen isotope, and fluid inclusion study of the Meishan iron oxide-apatite deposit, SE China. *Miner Deposita*, 2015, vol. 50, no. 7, pp. 847–869. Doi: 10.1007/s00126-015-0577-0.

8. Lykhin D.A., Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Kovach V.P., Sal'nikova E.B. *Vozrast, sostav i istochniki rudonosnogo magmatizma Orotskogo berilievogo mestorozhdeniya v Zapadnom Zabaikal'e* [Age, composition and sources of ore-bearing magmatism of the Orot beryllium deposit in Western Transbaikalia, Russia]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2004, vol. 46, no. 2, pp. 128–146. (In Russian).

9. Reif F.G., Karmanov N.S., Ishkov Yu.M. *Kislye Be-nosnye rastvory Orotskogo mestorozhdeniya i ikh svyaz' s intruziei*

зией щелочных гранитов // Доклады академии наук. 2005. Т. 405. № 2. С. 247–250.

10. Рейф Ф.Г. Щелочные граниты и бериллиевое (фенакит-бертрандитовое) оруденение на примере Оротского и Ермаковского месторождений // Геохимия. 2008. № 3. С. 243–263.

11. Zheng, Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // Earth Planet. Sci. Lett. 1993. Vol. 120. Pp. 247–263.

12. Sheppard, S.M.F. Characterization and isotopic variations in natural waters. Review of mineralogy. 1986. Vol. 16. Pp. 165–181.

13. Riishuus, M.S., Harris, C., Peate, D.W., Tegner C., Wilson J.R., Brooks C.K. Formation of low- $\delta^{18}\text{O}$ magmas of the Kangerlussuaq Intrusion by addition of water derived from dehydration of foundered basaltic roof rocks // Contrib. Mineral Petrol. 2015. Vol. 169:41. Doi: 10.1007/s00410-015-1134-7.

14. Johnson T.W., Ripley E.M. // Geol. Soc Am. Abstr. Progr. 1998. Vol. 30. 127 p.

15. Rye R.O. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems // Chem. Geol. 2005. Vol. 215. No. 1–4. Pp. 5–36. Doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.034.

16. Фор Г. Основы изотопной геологии: пер. с англ. М.: Мир. 1989. 590 с.

17. Wickham S.M., Alberts A.D., Zanzilevich A.N., Litvinovsky B.A., Bindeman I.N., Schauble E.A. A Stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia // Journal of Petrology. Vol. 37. No. 5. Pp. 1063–1095.

shchelochnykh granitov [Acid Be solutions at the Orot deposit and their relation to the intrusion of alkaline granites] *Doklady akademii nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences], 2005, vol. 405, no. 2, pp. 247–250. (In Russian).

10. Reif F.G. *Shchelochnye granity i berillievoye (fenakit-bertranditovoye) orudnenie na primere Orotskogo i Ermakovskogo mestorozhdenii* [Alkaline granites and Be (phenacite–bertrandite) mineralization for the case of the Orot and Ermakovka deposits]. *Geokhimiya* [Geochemistry], 2008, no. 3, pp. 243–263. (In Russian).

11. Zheng, Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, vol. 120, pp. 247–263.

12. Sheppard, S.M.F. Characterization and isotopic variations in natural waters. *Review of mineralogy*, 1986, vol. 16, pp. 165–181.

13. Riishuus, M.S., Harris, C., Peate, D.W., Tegner C., Wilson J.R., Brooks C.K. Formation of low- $\delta^{18}\text{O}$ magmas of the Kangerlussuaq Intrusion by addition of water derived from dehydration of foundered basaltic roof rocks. *Contrib. Mineral Petrol*, 2015, vol. 169:41. Doi: 10.1007/s00410-015-1134-7.

14. Johnson T.W., Ripley E.M. *Geol. Soc Am. Abstr. Progr.* 1998. Vol. 30. 127 p.

15. Rye R.O. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. *Chem. Geol.*, 2005, vol. 215, no. 1–4, pp. 5–36. Doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.034.

16. For G. *Osnovy izotopnoi geologii* [Foundations of isotope geology]. Moscow, Mir Publ., 1989. 590 p.

17. Wickham S.M., Alberts A.D., Zanzilevich A.N., Litvinovsky B.A., Bindeman I.N., Schauble E.A. A Stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia. *Journal of Petrology*, vol. 37, no. 5, pp. 1063–1095.

18. Рипп Г.С., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Дорошкевич А.Г., Рампилов М.О., Посохов В.Ф. Изотопная характеристика Ермаковского флюорит-берtrandит-фенакитового месторождения (Западное Забайкалье) // Геохимия. 2016. № 9. С. 780–796. Doi 10.7868/S0016752516090053.

18. Ripp G.S., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Posokhov V.F. *Izotopnaya kharakteristika Ermakovskogo flyuorit-bertrandit-fenakitovogo mestorozhdeniya (Zapadnoe Zabaikal'e)* [Isotopic characteristics of the Ermakovskoe fluorite–bertrandite–phenacite deposit (Western Transbaikalia)]. *Geokhimiya* [Geochemistry], 2016, no. 9, pp. 780–796. Doi 10.7868/S0016752516090053. (In Russian).

*Статья поступила 16.01.2017 г.
The article was received 16.01.2017.*