

Оригинальная статья / Original article

УДК 552.331

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ ФЛЮОРИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ (ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА И ФЛЮИДОВ)

© Е.И. Ласточкин^а, Г.С. Рипп^б, Д.С. Цыденова^с, В.Ф. Посохов^д, А.Е. Мурзинцева^е

^{а-д}Геологический институт СО РАН,

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

^еБурятский научный центр СО РАН,

670047, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8.

РЕЗЮМЕ. Цель. Оценка источников флюидов эпитеpmальных флюоритовых месторождений Западного Забайкалья с помощью анализа изотопного состава кислорода, углерода, водорода и серы. **Методы.** Изотопные составы кислорода в силикатах, а также углерода в карбонатах определены в Геологическом институте СО РАН В.Ф. Посоховым. **Результаты.** Изотопный состав кислорода в кварце характеризуется существенной облегченностью (-3,4...+2,6 ‰ δ¹⁸O). Сера пиритов этих месторождений также обогащена легким изотопом (-1,8...-7,7 ‰ δ³⁴S). Величина δ³⁴S варьирует от +0,4 до -9,7 ‰ и составляет в среднем -3,75 по семи месторождениям. **Выводы.** Изотопные исследования свидетельствуют о глубинном источнике серы, претерпевшей изменения в процессе подъема ее от магматического очага к верхним горизонтам. Состав флюида фиксирует участие воды метеорного источника, вызванного процессами рециклинга под действием неглубоко залегающего плутона базитов.

Ключевые слова: флюорит, пирит, барит, кварц, изотопия, флюид, Забайкалье.

Информация о статье. Дата поступления 9 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 5 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 29 июня 2018 г.

Формат цитирования. Ласточкин Е.И., Рипп Г.С., Цыденова Д.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е. Результаты изотопного изучения эпитеpmальных флюоритовых месторождений Западного Забайкалья (источники вещества и флюидов) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 2. С. 41–53. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53

^аЛасточкин Евгений Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 43327, e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

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

^бРипп Герман Самуилович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: ripp@gin.bscnet.ru

German S. Ripp, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, e-mail: ripp@gin.bscnet.ru

^сЦыденова Дарима Сергеевна, аспирант, e-mail: ripp@gin.bscnet.ru

Darima S. Tsydenova, Postgraduate student, e-mail: ripp@gin.bscnet.ru

^дПосохов Виктор Федорович, научный сотрудник, e-mail: vitaf1@yandex.ru

Viktor F. Posokhov, Researcher, e-mail: vitaf1@yandex.ru

^еМурзинцева Александра Евгеньевна, инженер, e-mail: muzeybsc@yandex.ru

Aleksandra E. Murzintseva, Engineer, e-mail: muzeybsc@yandex.ru

RESULTS OF ISOTOPIC STUDY OF EPITHERMAL FLUORITE DEPOSITS OF WESTERN TRANSBAIKALIA (SOURCES OF MATTER AND FLUIDS)

© E.I. Lastochkin, G.S. Ripp, D.S. Tsydenova, V.F. Posokhov, A.E. Murzintseva

Geological Institute SB RAS,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation
Buryat Scientific Center SB RAS,
8 Sakhyanova St., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation

ABSTRACT. The **purpose** of the publication is to estimate the fluid sources of the epithermal fluorite deposits of the Western Transbaikalia by analyzing the isotope composition of oxygen, carbon, hydrogen and sulfur. **Methods.** The isotopic compositions of oxygen in silicates as well as carbon in carbonates are determined by V.F. Posokhov in the Geological Institute SB RAS. **Results.** The isotopic composition of oxygen in quartz is characterized by low $\delta^{18}\text{O}$ (-3.4 - + 2.6 ‰). Pyritic sulfur of these deposits is also enriched by the light isotope $\delta^{34}\text{S}$ (from -1.8 to -7.7 ‰ $\delta^{34}\text{S}$). The value of $\delta^{34}\text{S}$ varies from +0.4 to -9.7 ‰ and is -3.75 on the average for seven fields. **Conclusions.** The isotope studies indicate a deep source of sulfur, which underwent changes in the process of its rise from the magma pocket to the upper horizons. The composition of the fluid is indicative of the participation of water from the meteor source caused by recycling processes under the influence of shallow underlying basite pluton.

Keywords: fluorite, pyrite, barite, quartz, isotopy, fluid, Transbaikalia

Article info. Received 9 April 2018; accepted for publication 5 June 2018; available online 29 June 2018.

For citation. Lastochkin E.I., Ripp G.S., Tsydenova D.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. Results of isotopic study of epithermal fluorite deposits of Western Transbaikalia (sources of matter and fluids). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = 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, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 41–53. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53. (In Russian).

Введение

По запасам флюорита Россия занимает четвертое место в мире после Китая, Мексики и Южно-Африканской Республики, обладая 12,8 % балансовых запасов его промышленных категорий. В России месторождения сосредоточены в основном на Дальнем Востоке и в Забайкалье. Главным объектом промышленных месторождений является эпитермальное существование кварц-флюоритовый тип. Наиболее крупные месторождения распространены в Восточном Забайкалье. На этой территории выявлено более 300 проявлений и месторождений, где на протяжении нескольких десятков лет ведется промышленная добыча плавикового сырья. В Западном Забайкалье сосредоточено 14,36 % общероссийских балансовых запасов флюорита [1]. Здесь обнаружено более 150 проявлений и

месторождений. Крупные запасы плавикового шпата сосредоточены в Монголии, где разведано 60 месторождений и обнаружено несколько сотен проявлений флюорита [2].

Изучением флюоритовых месторождений в Восточном Забайкалье и Монголии занимались несколько десятков исследователей. Ими дана классификация месторождений, детальная характеристика вещественного состава, геологоструктурные особенности, зональность рудных тел и месторождений, оценены возможные источники вещества и характер связи с магматическими породами. Результаты этих исследований обобщены в монографических работах [2, 3], в которых отмечена близость эпитермальных флюоритовых месторождений Монголии, Восточного и Западного Забайкалья. Эта близость предопределила

выделение Центрально-Азиатской флюоритоносной провинции, протягивающейся от Алдана до Монголии [4].

Существенно слабее изучены месторождения Западного Забайкалья. В основном по ним даны описания геологического строения, минерального состава, околорудноизмененных пород. Большая часть этих результатов зафиксирована в работах К.Б. Булнаева [5, 6].

Методы исследований

Изотопные составы кислорода, углерода в карбонатах и кислорода в силикатах определены в Геологическом институте СО РАН (аналитик В.Ф. Посохов). Карбонаты были разложены ортофосфорной кислотой с использованием опции «Газбенч» при температуре 60–70 °С в течение 2–4 ч. Измерения проведены на масс-спектрометре Finigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбонатов проведена по стандартам NBS-18, NBS-19. Величины $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ и $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ определены с погрешностью $\pm 0,05$ и $\pm 0,1$ ‰ (1σ) соответственно.

Кислород из оксидов был выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа описана в работе [7]. Воспроизводимость анализов составляла $\pm 0,1 \dots +0,3$ ‰ при 95 %-м доверительном уровне.

Изотопный состав кислорода во флюидах оценен с помощью расчетов в соответствии с коэффициентами равновесного фракционирования для каждого минерала [8–10]. Температуры, использованные при оценке изотопных составов, взяты из расчета 180–200 °С, полученных при термометрическом изучении флюидных включений в кварце и флюорите.

Изотопный состав водорода в гидроксилсодержащих минералах определен в Изотопном центре ДВНЦ РАН. Анализ выполнен по методу, описанному в

работе [11]. Для удаления сорбированной воды пробы предварительно были нагреты до 200 °С. Конституционная вода выделялась при температуре 1250 °С. Отделение водорода из воды проведено на хrome при температуре 950 °С. Состав его измерен на масс-спектрометре Finigan MAT 253 относительно лабораторного стандарта, калиброванного по международным стандартам VSMOW, SLAP, GISP. Воспроизводимость определения δD (1σ) составляет 1,5 ‰.

Общая характеристика флюоритовых месторождений

Главными объектами исследований были месторождения Западного Забайкалья. Кроме того, были изучены месторождения Абагайтуй, Калангуй, Усуглинское, расположенные в Восточном Забайкалье, Галшарьинское и Бэрх – в Монголии. Все эти месторождения отнесены к эпитермальным образованиям, сформировавшимся на небольших глубинах.

В Западном Забайкалье кроме эпитермального флюоритового типа известны также и другие флюоритсодержащие формационные типы месторождений. Среди них наиболее крупными являются фтор-бериллиевые (Ермаковское, Ауник, Амандак), молибден-вольфрамовые (Булуктаевское, Джидинская группа), флюоритсодержащие редкоземельные карбонатиты (Аршанское, Южное) и бастнезитсодержащие флюорит-альбитовые проявления (Портовое, Улан-Удэнское). Они подчеркивают фторидную специализацию региона.

Эпитермальные месторождения слагают жилы выполнения, зоны тектонических брекчий, сцементированных флюоритовым и кварц-флюоритовым агрегатом, и тела метасоматического образования. Они характеризуются простым минеральным составом, включающим в основном флюорит и кварц. В отдельных случаях к этим минералам добавляются кальцит, барит, цеолиты, пирит,

глинистые минералы. Соответственно выделяют существенно флюоритовый (Куранжинское, Березовское), кварц-флюоритовый (Хурайское, Наранское), кальцит-кварц-флюоритовый (Убукунское, Эгита), барит-кальцит-кварц-флюоритовый (Абагайтуйское, Аро-Таширское, Усуглинское и др.) и пирит-флюоритовый (Калангуйское) минеральные типы. Большинство проявлений расположено в гранитах, кристаллических сланцах, гнейсах, и лишь небольшая часть залегает в карбонатных породах (Эгитинское).

Данные по определению абсолютного возраста месторождений в настоящее время практически отсутствуют (известны единичные К-Аг определения), и потому оценка проведена по соотношению их с вмещающими породами. Принят в основном позднемезозойский возраст оруденения. В Восточном Забайкалье галька и обломки кварц-флюоритового состава обнаружены в нижнемеловых отложениях Бaleyской впадины, а в Западном Забайкалье кварц-флюоритовые жилы (Иволгинское, Манжинское) пересекают отложения нижнемеловой гусино-озерской серии.

Пространственное распределение флюоритовых проявлений показано на рисунке. В числе характерных месторождений кварц-флюоритового типа можно назвать Хурайское, Титовское, Барун-Ульское, Наранское, Третьяковское, Иволгинское. Жилы подобного состава установлены на Ермаковском и Амандакском (фтор-бериллиевых), Джидинском и Булуктаевском (молибден-вольфрамовых) месторождениях.

Кварц-флюоритовые рудные тела представлены в основном жилами выполнения открытых трещин и минерализованными брекчиями дробления. Типичная минеральная ассоциация включает кварц и флюорит, в подчиненном количестве представлены кальцит, калиевый полевой шпат, барит, пирит, глинистые минералы, редко геарксутит, гематит,

галенит, цеолиты. Вмещающими породами служат граниты, основные и средние эффузивы, кристаллические сланцы и гнейсы, конгломераты и песчаники. Рудные тела сопровождаются окварцеванием, флюоритизацией и аргиллизацией вмещающих пород с образованием каолинита, монтмориллонита, диккита, галлуазита, гидромусковита.

Месторождения относятся к низкотемпературным приповерхностным геологическим образованиям. Термобарометрическими исследованиями установлено, что минералообразование на месторождениях Западного Забайкалья происходило при температурах 75–200 °С. Близкий температурный интервал зафиксирован и в месторождениях Восточного Забайкалья [3] и Монголии.

Около десятка небольших месторождений и рудопроявлений представлено кальцит-кварц-флюоритовым типом. Они локализованы среди карбонатных (Эгита, Дархинское, Барун-Алцакское, Верхне-Сангинское и др.) и силикатных пород (Бурун-Ульское, Верхне-Убукунское). Некоторые кварц-флюоритовые жилы, залегающие среди алюмосиликатных пород, переходят по простиранию в известняки и становятся кальцит-кварц-флюоритовыми.

Результаты

изотопных исследований

На месторождениях были изучены изотопные составы сульфидной и сульфатной серы, кислорода в кварцах, кислорода и углерода в кальцитах. В каолините и геарксутите определен изотопный состав водорода.

Изотопный состав серы. Среди проявлений представлены пиритсодержащие кварц-флюоритовые, карбонатно-кварц-флюоритовые и баритсодержащие типы. Большая часть анализов серы привлечена из источника [12]. Количество пирита в них обычно не превышает 1 мас. %. Резко отличается от них Калангуйское месторождение, где содержание

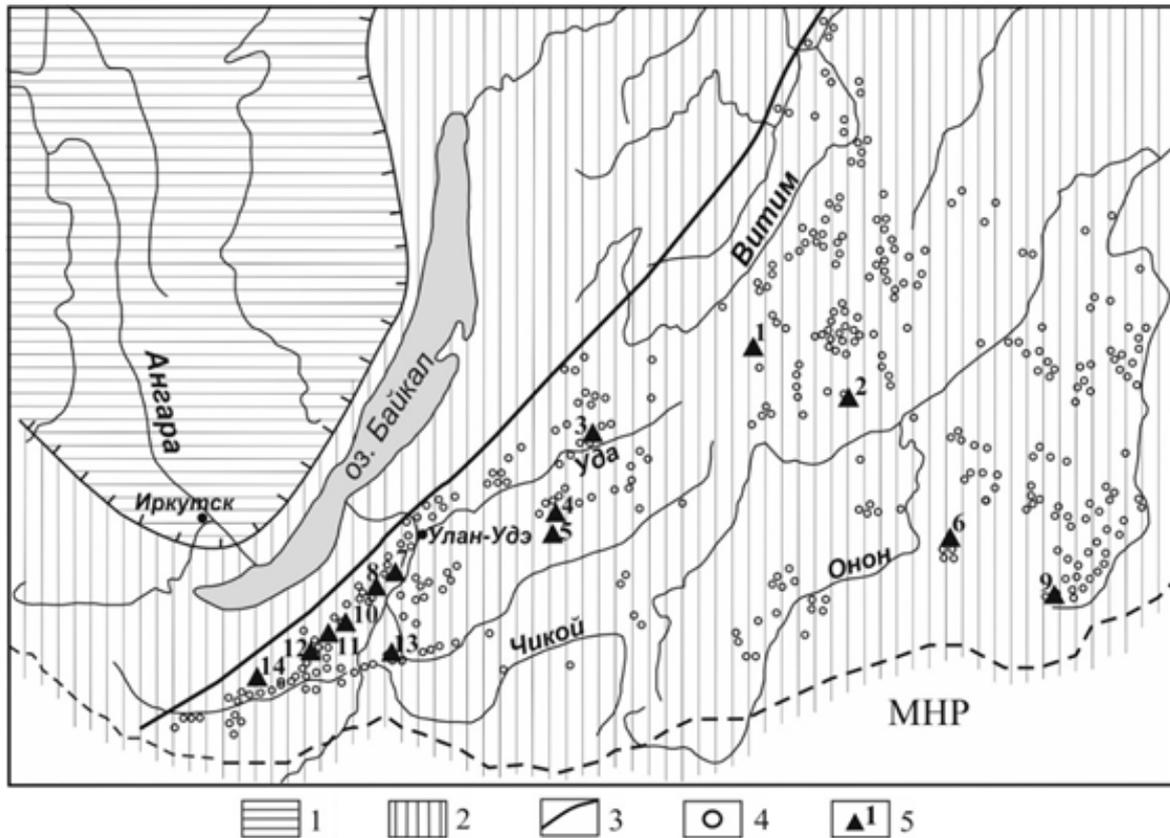


Схема распространения эпитермальной флюоритовой минерализации в Забайкалье:

1 – Сибирская платформа; 2 – складчатая область; 3 – граница распространения флюоритовой минерализации; 4 – флюоритовые проявления; 5 – изотопно-изученные флюоритовые рудопоявления и месторождения: 1 – Амандак, 2 – Усуглинское, 3 – Эгита, 4 – Кижингинское, 5 – Ермаковское, 6 – Калангуй, 7 – Третьяковское, 8 – Манжинское, 9 – Абагайтуй, 10 – Наран, 11 – Аро-Ташир, 12 – Убукун, 13 – Новопавловка-II, 14 – Хурай

Distribution diagram of epithermal fluorite mineralization in Transbaikalia:

1 – Siberian platform; 2 – folded area; 3 – boundary of fluorite mineralization distribution; 4 – fluorite occurrences; 5 – isotopically-studied fluorite ore occurrences and deposits: 1 – Amandak, 2 – Usuglinskoe, 3 – Egita, 4 – Kizhinga, 5 – Ermakovskoe, 6 – Kalangui, 7 – Tretyakovskoe, 8 – Manzhinskoe, 9 – Abagaytui, 10 – Naran, 11 – Aro-Tashir, 12 – Ubukun, 13 – Novopavlovka-II, 14 – Khurai

пирита и марказита в рудах и вмещающих породах достигает 5–7 %. Пирит встречается непосредственно в рудах, но чаще фиксируется во вмещающих породах, образуя рассеянную вкрапленность и слагая маломощные прожилки. В подавляющем большинстве величины $\delta^{34}\text{S}$ пиритов варьируют в пределах отрицательных значений и лишь в единичных случаях имеют положительные значения (табл. 1). Сера пиритов пострудной стадии (Калангуйское, Наранское, Новопавловское) в сравнении с сульфидами начальных стадий имеет более легкий изотопный состав.

Барит присутствует в основном в рудных телах, слагая вкрапленность и гнезда кристаллов (до нескольких сантиметров). В отличие от пирита изотопный состав серы менее однороден и имеет значения $\delta^{34}\text{S}$, варьирующие в пределах 8–15 %.

Изотопный состав кислорода. Изотопный состав кислорода определен в кварце рудных стадий. На Манжинском месторождении проанализированы также геаркутит, встречающийся в центральных зонах рудных тел, и калиевый полевой шпат. Главной особенностью кислорода является деплетированность

Таблица 1
Изотопный состав сульфидной (пирит) и сульфатной (барит) серы
эпитермальных флюоритовых месторождений

Table 1

Isotopic composition of sulfide (pyrite) and sulfate (barite) sulfur
from epithermal fluorite deposits

Минерал / Mineral	Месторождения / Deposits	Анализируемый материал / Material under analysis	$\delta^{34}\text{S}$ ‰ CDT	
Кварц-флюоритовые / Quartz-fluorite				
Пирит / Pyrite	Наранское / Naran	Руда (6) / Ore (6)	-3,1	
	Новопавловское II / Novoravlovka II	Руда (15) / Ore (15)	-3,38	
	Хурайское / Khurai	Руда / Ore	-4,4	
			-5,65	
	Хамнейское / Khamneiskoe		-1,7	
	-3,45			
	Третьяковское / Tret'yakovskoe		-1,8	
	Тосо-I / Toso-I		-2,4	
	Бэрх / Berkh		-3,1	
	Кальцит-кварц-флюоритовые / Calcite-quartz-fluorite			
Эгита / Egita			Мраморизованный известняк (8) / Marmorized limestone (8)	-3,60
			Кварц-серицитовый метасоматит / Quartz-sericite metasomatite	-3,90
		Кварц-флюоритовая руда / Quartz-fluorite ore	2,26	
Пирит-флюоритовые руды / Pyrite-fluorite ores				
	Калангуйское / Kalangui	Пирит (36) / Pyrite (36)	-2,0	
Барит-кальцит-кварц-флюоритовые / Barite-calcite-quartz-fluorite				
Барит / Barite	Аро-Таширское / Aro-Tashir	Руда / Ore	10,7	
			13,7	
	Новопавловское II / Novoravlovka II		9,1	
	Перевальное / Perevalnoe		15,8	
	Баян-Ундурское / Bayan-Undur		16,5	
			9,5	
	Абагайтуйское / Abagaytui		14,7	
			10,3	
			19,0	
			11,5	
	Усуглинское / Usuglinskoe		10,3	
	Галшар / Galshar		13,35	
			12,7	
			12,1	
Нижне-Кижингинское / Nizhne-Kizhinga				

Примечание. В скобках указано количество проб. По этим месторождениям даны средние значения.
Note. The number of samples is indicated in parentheses. Mean values are given for these deposits.

его тяжелым изотопом, имеющим в большинстве случаев отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ (-0,1...-3,0 ‰) и в единичных случаях достигающим 2–3 ‰ (табл. 2). Обогащенность легким кислородом зафиксирована в геарксутите и калиевом полевом шпате Манжинского месторождения. Существенно тяжелее изотопный

состав кислорода в кварце Эгитинского месторождения. Величины $\delta^{18}\text{O}$ здесь варьируют в интервале от +4,4 до +12 ‰. Расчеты состава кислорода, равновесного с кварцем, кальцитом и полевым шпатом, показывают на резкую обогащенность его легким изотопом (табл. 2, 3).

Таблица 2

Изотопный состав кислорода в минералах и равновесных с ними флюидах
Table 2
Isotopic composition of oxygen in minerals and fluids equilibrium with them

Номер пробы / Sample no.	Месторождение / Deposit	Минерал / Mineral	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ Fluid	T , °C	
Кварц-флюоритовые / Quartz-fluorite						
Гм 2864-1 / Gm 2864-1	Наран / Naran	Кварц / Quartz	2,0	-9,7	200	
Гм 2864 / Gm 2864			2,1	-9,6		
Гм 765-1 / Gm 765-1	Хурай / Khurai		-1,4	-14,5	180	
Гм 2870-1 / Gm 2870-1			-2,6	-15,7		
Гм 540-1 / Gm 540-1			1,8	-11,3		
Тр-34 / Tr-34	Третьяковка / Tret'yakovka		-2,2	-15,3	180	
Амнд-17 / Amnd-17	Амандак / Amandak		-2,2	-15,3	180	
521- Н-К / 521-N-K	Нарын-Кундуй / Naryn-Kundui		-2,3	-15,4	180	
547-Н-К / 547-N-K			1,3	-11,8		
Мн-14-1 / Mn-14-1	Манжинское / Manzhinskoe		-0,2	-13,0	-	
Мн-14-2 / Mn-14-2		-0,4	-13,5	-		
Ман. 17-1 / Man. 17-1		Калиевый полево шпат / K-feldspar	-1,8	-11,0	180	
1-грк / 1-grk		Геарксутит / Gearksutite	0,88	-	-	
Кальцит-кварц-флюоритовые / Calcite-quartz-fluorite						
Гм 637-1 / Gm 637-1	Убукун / Ubukun	Кварц / Quartz	-3,0	-15,1	200	
Гм 636 / Gm 636			-3,4	-15,5		
Э-14-2 / E-14-2	Эгита / Egita		6,2	-5,5	200	
Э-14-1 / E-14-1			4,4	-7,3		
Гм 595-1 / Gm 595-1			12,6	0,9		
Гм 596-1 / Gm 596-1			4,7	-7,0		
Э-14-2 / E-14-2			6,2	-5,5		
Гм 597-1 / Gm 597-1			10,1	-1,6		
Барит-кальцит-кварц-флюоритовые / Barite-calcite-quartz-fluorite						
2880-Аб / 2880-Ab	Абагайтуй / Abagaytui		Кварц / Quartz	3,7	-9,4	180

Примечание. Расчеты состава кислорода во флюидах проведены по источнику [9], также использованы температуры термобарогеохимических исследований.

Note. Calculations of the composition of oxygen in fluids were carried out according to [9], temperatures of thermobarogeochemical studies were also used.

Таблица 3

Изотопный состав кальцита из кварц-флюоритовых
и барит-кварц-флюоритовых месторождений

Table 3

Isotopic composition of calcite from quartz-fluorite
and barite-quartz-fluorite deposits

Номер пробы / Sample no.	Месторождение / Deposit	$\delta^{13}\text{C}$ ‰ PDB	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ Fluid	T, °C
Э-6-1 / E-6-1	Эгита / Egita	-4,83	18,2	7,6	200
Э-6-2 / E-6-2		-3,39	14,55	3,95	
Э-6-3 / E-6-3		-1,76	-6,06	-16,7	
Э-6-4 / E-6-4		-10,52	19,77	9,2	
Э-6-5 / E-6-5		-9,38	17,11	6,5	
Э-20-1 / E-20-1		-8,70	16,72	6,12	
2887-13Уб / 2887-13Ub	Убукун / Ubukun	1,76	-4,06	-14,7	180
2880-Аб / 2880-Ab	Абагайтуй / Abagaytui	-2,06	-4,25	-14,8	180
Е-15-27 / E-15-27	Ермаковское / Ermakovskoe	-1,48	1,79	-8,81	180
Е-15-27а / E-15-27a		-1,69	2,47	-8,13	

Примечание. Изотопный состав воды определен по источнику [10] исходя из температур термобарогеохимических исследований.

Note. The isotopic composition of water was determined by the source [10] on the basis of the temperatures of thermobarogeochimical studies.

Гетерогенностью составов кислорода и углерода характеризуются карбонаты кальцитсодержащих месторождений (см. табл. 3), варьирующих даже в пределах одного месторождения. Их наиболее важной особенностью является обогащенность легким углеродом, достигающим в отдельных случаях $-10,5$ ‰ $\delta^{13}\text{C}$. При этом выделяется две группы. В одну из них входит Эгитинское месторождение с интенсивно проявившимися метасоматическими процессами. На этом месторождении состав кислорода приближен к составам метаморфизованных морских карбонатных пород. Подобные изотопные характеристики кислорода и углерода установлены в кальцитах месторождении Южного Уэльса из флюоритовых прожилков, образованных метасоматическим путем по известнякам [13].

В кальцитах других карбонатсодержащих проявлений также отмечается деплетированность тяжелым углеродом и

заметно более легкий (вплоть до отрицательных значений $\delta^{18}\text{O}$) изотопный состав кислорода. Они близки составам этих элементов на эпитермальном флюоритовом карбонатсодержащем месторождении Внутренней Монголии ($-4,96$... $-4,25$ ‰ $\delta^{18}\text{O}$) и углерода ($-2,06$... $+1,76$ ‰ $\delta^{13}\text{C}$) [14].

Обсуждение

Западное Забайкалье относится к числу регионов с ярко выраженной флюоритовой специализацией. Здесь кроме эпитермальных месторождений распространены фтор-бериллиевые (20–70 % флюорита), молибден-вольфрамовые месторождения (Булуктаевское, Джидинское рудное поле) (до 10–15 % флюорита). Флюорит характерен для редкоземельных (7–10 %) карбонатитов (Аршанское, Южное), флюорит-флогопит-бастнезитовых метасоматитов (5–10 %) (Портовое, Улан-Удэнское). Образование перечисленных типов минерализации охватывает период от 240 млн лет до

позднего мела. Наиболее ранний из них совпадает со временем формирования щелочно-сиенит-гранитного куналейского комплекса и связанных с ними фтор-бериллиевых месторождений (Ермаковское – 225–220 млн лет, Ауник, Амандак – 240–250 млн лет) [15]. Возраст флюоритсодержащих карбонатитов и флюорит-флогопитовых метасоматитов (Аршан, Южное, Портовое) – 132–135 млн лет, а вольфрамовых месторождений (Джидинское, Булуктаевское) – 120–144 млн лет. Наибольшая интенсивность эпитермального флюоритового оруденения сближена с этапом проявления позднемезозойского базальтового вулканизма, формировавшегося вплоть до позднего мела. Сотни их проявлений приурочены к полосе Центрально-Азиатского флюоритоносного пояса. Начало проявления флюоритового оруденения синхронизировано с этапами мезозойских внутримантийных рифтогенных процессов.

При оценке источников вещества и флюидов геологических объектов в настоящее время наиболее продуктивным является использование изотопных методов исследований. Несмотря на распространенность эпитермальных флюоритовых месторождений такие исследования пока еще немногочисленны [16–18]. В них представлены результаты изучения изотопных составов кислорода, углерода, сульфидной и сульфатной серы, водорода, стронция, неодима. На некоторых месторождениях определены составы кислорода и водорода в газожидких включениях [18], изотопный состав кислорода в баритах [17]. К числу важных результатов этих исследований относится вывод об участии в образовании руд вод метеорного источника. Проявившиеся метасоматические процессы на некоторых месторождениях обусловили контаминацию веществом вмещающих известняков и широкие вариации изотопных составов кислорода, углерода

и стронциевых отношений.

Связь флюоритовых месторождений с магматическими породами интерпретируется неоднозначно. С одной стороны, они сопровождают лейкограниты, щелочные граниты и сиениты, с другой – синхронизированы с породами мантийного происхождения: карбонатитами, базальтоидами. Юрские и меловые основные эффузивы, судя по источнику [19], отличаются самыми высокими содержаниями фтора (425,4 г/т). В их миндалинах отмечены проявления флюорита [2]. В случаях ассоциаций с кислым магматизмом в продуктах постмагматических процессов последних фиксируется присутствие мантийных компонентов. Сульфидная сера молибден-вольфрамовых месторождений идентична мантийным меткам ($-2...+2\text{‰ } \delta^{34}\text{S CDT}$), первичные стронциевые отношения лежат в интервале 0,703–0,705, а изотопный состав кислорода и углерода ложится в поле PC мантийного квадрата [20].

Составы стабильных изотопов флюоритовых эпитермальных месторождений резко отличаются от других типов эндогенных месторождений Забайкалья. В большинстве случаев они отчетливо деплетированы тяжелыми изотопами серы, кислорода и углерода. Возрастная и пространственная близость базитов и флюоритовых эпитермальных руд логично предполагает мантийный источник последних. Сера пирита при близости к метеоритному стандарту заметно обогащена S^{32} , а величины $\delta^{34}\text{S}$ ее в большинстве случаев имеют отрицательные значения. Она идентична сульфидной сере позднемезозойских молибден-вольфрамовых месторождений, в которых фиксируются мантийные метки и других элементов (O, C, Sr, εNd) [20].

Обогащение легкой серой, вероятно, было связано с изотопным разделением во флюидной фазе в процессе ее перемещения. Верхняя часть колонны обогащалась легкой серой, а в

отстающей сульфатной концентрировался тяжелый изотоп. Такой механизм описан при дистилляции базальтового расплава [21], при котором улетучивающийся SO₂ обогащался легкой серой, а остающаяся сера утяжелялась.

Иной механизм предполагается для появления легкого кислорода в минералах изученных месторождений. Состав кислорода в воде, равновесной с кварцем и кальцитом, при температурах 180–200 °С (см. табл. 3) свидетельствует о преобладающей роли метеорного источника. Субвулканическое происхождение месторождений при небольшой глубине их формирования предполагает рециклинг метеорных вод. Это подтверждается составом водорода из каолинита Эгитинского месторождения, деплетированного дейтерием (-175,8 ‰ δD). Существенно метеорный источник флюидов, участвовавших в образовании эпитермальных флюоритовых месторождений, согласуется с результатами исследований проявлений Австралии, Испании, Ирана, Турции, Китая [16–18]. В то же время состав водорода (-48 ‰ δD) в воде из геракситита Манжинского месторождения указывает также и на участие глубинного

флюида. На многих из этих месторождений подобно Эгитинскому в результате метасоматических процессов фиксируется контаминация веществом вмещающих карбонатных пород.

Выводы

1. В Западном Забайкалье отчетливо фиксируется область флюоритовой минерализации, охватывающая период от раннего триаса до позднего мела. Этот этап синхронизирован с проявлениями внутриплитных рифтогенных процессов.

2. Главной особенностью эпитермальных флюоритовых месторождений является деплетированность легкими изотопами серы, кислорода и углерода. На заключительном этапе их формирования большую роль играли флюиды метеорного источника, вызванного процессами рециклинга.

3. При проявлении метасоматических процессов в результате контаминации вмещающими породами фиксируются сдвиги в изотопных составах кислорода и углерода.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ 17-05-00129 и 18-45-030004 p_a.

Библиографический список

1. Дондоков З.Б.-Д., Потапов Л.В., Кислов Е.В. Минерально-сырьевой комплекс Республики Бурятия: состояние и перспективы // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 6. С. 43–51.

2. Жамсран М., Лхамсурен Ж., Оболенский А.А., Бадамгарав Ж., Батжаргал Ш., Оболенская Р.В., Туменбаяр Б., Цоодол Б., Шийтэр Н. Металлогения Монгольской Народной Республики. Новосибирск: Наука, 1986. 48 с.

3. Иванова А.А. Флюоритовые месторождения Восточного Забайкалья. М.: Недра, 1974. 208 с.

4. Соловьев А.Т. К вопросу о поясах

и этапах флюоритовой минерализации Восточного Забайкалья // Труды ВСЕГЕИ. 1961. Т. 57. С. 141–145.

5. Булнаев К.Б. Флюоритовые месторождения Западного Забайкалья // Новосибирск: Наука, 1976. 128 с.

6. Булнаев К.Б. Особенности образования и размещения флюоритовых формаций Забайкалья // Эволюция эндогенных процессов и оруденения в Забайкалье. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского филиала СО АН СССР, 1981. С. 101–109.

7. Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // Geochimica

et *Cosmochimica Acta*. 1990. Vol. 54. P. 1353–1357.

8. Beaudoin G., Therrien P. The updated web stable isotope fractionation calculator // *Handbook of stable isotope analytical techniques* / ed. P.A. De Groot. Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 1120–1122.

9. Sharp Z.D., Gibbons J.A., Maltsev O., Atudorei V., Pack A., Sengupta S., Shock E.L., Knauth L.P. A calibration of the triple oxygen isotope fractionation in the SiO₂-H₂O system and applications to natural samples // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2016. Vol. 186. P. 105–119.

10. O'Neil, Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates // *Journal of Chemical Physics*. 1969. Vol. 51. P. 5547–5558.

11. Venneman T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent // *Chemical Geology (Isotope Geoscience section)*. 1993. Vol. 103. P. 227–234.

12. Рипп Г.С. Геохимия эндогенного оруденения и критерии прогноза в складчатых областях. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.

13. Barker S.L.L., Bennet V.C., Cox S.F., Norman M.D., Gagan M.K. Sm-Nd, Sr, C and O isotope systematic in hydrothermal calcite-fluorite veins: Implications for fluid-rock reaction and geochronology // *Chemical Geology*. 2009. Vol. 268. P. 58–66.

14. Pei Q., Zhang S., Santosh M., Cao H., Zhang W., Hu X., Wang L. Geochronology, geochemistry, fluid inclusion and C, O and Hf isotope compositions of the Shuitou fluorite deposit, Inner Mongolia, China // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 83. P. 174–190.

15. Лыхин Д.А., Ярмолюк В.В. Западно-Забайкальская бериллиевая провинция: месторождения, рудоносный магматизм, источники вещества. М.: ГЕОС, 2015. 256 с.

16. Khorshidi E., Abadi B.E.A. REE and stable isotope (C, O, S) geochemistry of fluorite from the Kamar-Mehdi deposit, southwest of Tabas, Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 9. P. 123.

17. Sanchez V., Cardellach E., Corbella M., Vindel E., Martin-Crespo T., Boyce A.J. Variability in fluid sources in the fluorite deposits from Asturias (N Spain): Further evidences from REE, radiogenic (Sr, Sm, Nd) and stable (S, C, O) isotope data // *Ore Geology Reviews*. 2010. Vol. 37. P. 87–100.

18. Cosanay P., Kirat E., Nihal C., Kizilkanat C., Mutlu H., Koc S. Geochemical, microthermometric, and isotopic constraints on the origin of fluorite deposits in central Anatolia, Turkey // *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2017. Vol. 26. P. 206–226.

19. Канищев А.Д., Менакер Г.И. Средние содержания 15 рудообразующих химических элементов в земной коре Центрального и Восточного Забайкалья // *Геохимия*. 1974. № 2. С. 405–411.

20. Рипп Г.С., Смирнова О.К., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Посохов В.Ф. К проблеме источников вещества месторождений Джидинского рудного поля (по данным изотопных исследований) (Западное Забайкалье) // *Петрология магматических и метаморфических комплексов: материалы IX Всерос. петрографич. конф. Томск, 2017. С. 371–376.*

21. Фор Г. Основы изотопной геологии / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 560 с.

References

1. Dondokov Z.B.-D., Potapov L.V., Kislov Ye.V. The mineral resource sector in the Republic of Buryatia: current state and further development. *Mineral'nyye resursy*

Rossii. Ekonomika i upravleniye [Mineral resources of Russia. Economics and management], 2015, no. 6, pp. 43–51. (In Russian).

2. Zhamsran M., Lkhamsuren Zh., Obolenskii A.A., Badamgarav Zh., Batzhargal SH., Obolenskaya R.V., Tumenbayar B., Tsoodol B., Shiiter N. *Metallogeniya mongol'skoi narodnoi respubliki* [Metallogeny of the Mongolian People's Republic]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 48 p. (In Russian).
3. Ivanova A.A. *Flyuoritovyye mestorozhdeniya Vostochnogo Zabaykal'ya* [Fluorite deposits of the Eastern Transbaikalia]. Moscow: Nedra Publ., 1974, 208 p. (In Russian).
4. Solov'yeva A.T. On the question of belts and stages of fluorite mineralization in the Eastern Transbaikalia. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo geologicheskogo instituta* [Proceedings of All-Russian scientific research geological institute], 1961, vol. 57, pp. 141–145. (In Russian).
5. Bulnayev K.B. *Flyuoritovyye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaykal'ya* [Fluorite deposits of the Western Transbaikalia]. Novosibirsk: Nauka, 1976, 128 p. (In Russian).
6. Bulnayev K.B. *Osobennosti obrazovaniya i razmeshcheniya flyuoritovykh formatsiy Zabaykal'ya* [Formation and location features of fluorite strata in Transbaikalia] *Evolyutsiya endogennykh protsessov i orudneniya v Zabaykal'ye* [Evolution of endogenous processes and mineralization in Transbaikalia]. Ulan-Ude: Buryat department of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1981, pp. 101–109. (In Russian).
7. Sharp Z.D. A laser-based micro-analytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
8. Beaudoin G., Therrien P. The updated web stable isotope fractionation calculator. *Handbook of stable isotope analytical techniques*. Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 1120–1122.
9. Sharp Z.D., Gibbons J.A., Maltsev O., Atudorei V., Pack A., Sengupta S., Shock E.L., Knauth L.P. A calibration of the triple oxygen isotope fractionation in the SiO₂-H₂O system and applications to natural samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, vol. 186, pp. 105–119.
10. O'Neil, Clayton R.N., Mayeda T.K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journal of Chemical Physics*, 1969, vol. 51, pp. 5547–5558.
11. Venneman T.W., O'Neil J.R. A simple and inexpensive method of hydrogen isotope and water analyses of minerals and rocks based on zinc reagent. *Chemical Geology (Isotope Geoscience section)*, 1993, vol. 103, pp. 227–234.
12. Ripp G.S. *Geokhimiya endogenogo orudneniya i kriterii prognoza v skladchatykh oblastyakh* [Geochemistry of endogenous mineralization and forecasting criteria in folded areas]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 191 p. (In Russian).
13. Barker S.L.L., Bennet V.C., Cox S.F., Norman M.D., Gagan M.K. Sm-Nd, Sr, C and O isotope systematic in hydrothermal calcite-fluorite veins: Implications for fluid-rock reaction and geochronology. *Chemical Geology*, 2009, vol. 268, pp. 58–66.
14. Pei Q., Zhang S., Santosh M., Cao H., Zhang W., Hu X., Wang L. Geochronology, geochemistry, fluid inclusion and C, O and Hf isotope compositions of the Shuitou fluorite deposit, Inner Mongolia, China. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 83, pp. 174–190.
15. Lykhin D.A., Yarmolyuk V.V. *Zapadno-Zabaykal'skaya berilliyevaya provintsiya: mestorozhdeniya, rudonosnyy magmatizm, istochniki veshchestva* [West Trans-Baikal beryllium province: deposits, ore-bearing magmatism, sources of matter]. Moscow: GEOS Publ., 2015, 256 p. (In Russian).
16. Khorshidi E., Abadi B.E.A. REE and stable isotope (C, O, S) geochemistry of fluorite from the Kamar-Mehdi deposit, southwest of Tabas, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, vol. 9, p. 123.
17. Sanchez V., Cardellach E., Corbella M., Vindel E., Martin-Crespo T., Boyce

A.J. Variability in fluid sources in the fluorite deposits from Asturias (N Spain): Further evidences from REE, radiogenic (Sr, Sm, Nd) and stable (S, C, O) isotope data. *Ore Geology Reviews*, 2010, vol. 37, pp. 87–100.

18. Cosanay P., Kirat E., Nihal C., Kizilkanat C., Mutlu H., Koc S. Geochemical, microthermometric, and isotopic constraints on the origin of fluorite deposits in central Anatolia, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2017, vol. 26, pp. 206–226.

19. Kanishchev A.D., Menaker G.I. Average contents of 15 ore-forming chemical elements in the earth's crust of Central and Eastern Transbaikalia. *Geokhimiya* [Geochemistry], 1974, no. 2, pp. 405–411. (In Russian).

20. Ripp G.S., Smirnova O.K.,

Izbrodin I.A., Lastochkin Ye.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. *K probleme istochnikov veshchestva mestorozhdeniy Dzhidinskogo rudnogo polya (po dannym izotopnykh issledovaniy) (Zapadnoye Zabaykal'ye)* [To the problem of the sources of matter of Dzhida ore field deposits (according to isotopic research data) (Western Transbaikalia)]. *Materialy IX Vserossiiskoi petrograficheskoi konferentsii "Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov"* [Proceedings of IX All-Russia petrographic Conference "Petrology of igneous and metamorphic complexes"]. Tomsk, 2017, pp. 371–376. (In Russian)

21. Faure G. Principles of Isotope Geology, 1969, 608 p. (Russ. ed.: *Osnovy izotopnoi geologii*. Moscow: Mir Publ., 1989, 560 p.).

Критерии авторства

Ласточкин Е.И., Рипп Г.С., Цыденова Д.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Lastochkin E.I., Ripp G.S., Tsydenova D.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.