

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научная статья
УДК 550.4.02, 553.2
doi: 10.17223/25421379/36/7

ВОЛЬФРАМОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮЖНОГО СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: ГЕНЕЗИС, ИСТОЧНИКИ РУДООБРАЗУЮЩИХ ФЛЮИДОВ



Михаил Олегович Рампилов¹, Мария Владимировна Рампилова²,
Евгений Иванович Ласточкин³, Виктор Федорович Посохов⁴

^{1, 2, 3, 4} Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹ mrampilov@mail.ru

² mburtseva@mail.ru

³ last@ginst.ru

⁴ vitafl@yandex.ru

Аннотация. В Западном и Восточном Забайкалье широко распространены вольфрамовые месторождения и проявления гидротермального и грейзенового типов. Предлагаемое исследование имело целью решение проблемы источников вещества и флюидов вольфрамовых месторождений путем привлечения изотопных методов исследований. Проведено изучение 15 вольфрамовых месторождений и рудопоявлений.

Ключевые слова: месторождения вольфрама, W-Мо месторождения, вольфрамит, изотопия, Восточная Сибирь

Благодарности: Авторы выражают признательность канд. геол.-минерал. наук [Г.С. Риппу](#) и канд. геол.-минерал. наук [О.К. Смирновой](#) за предоставленные образцы, обсуждение научных вопросов, рассматриваемых в настоящей статье, и конструктивные замечания.

Источник финансирования: Проведенные исследования выполнены в соответствии с государственным заданием Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (проект АААА-А21-121011390003-9).

Для цитирования: Рампилов М.О., Рампилова М.В., Ласточкин Е.И., Посохов В.Ф. Вольфрамовые месторождения южного складчатого обрамления Сибирской платформы: генезис, источники рудообразующих флюидов // Геосферные исследования. 2025. № 3. С. 120–138. doi: 10.17223/25421379/36/7

Original article
doi: 10.17223/25421379/36/7

TUNGSTEN DEPOSITS OF THE SOUTHERN FOLDED FRAME OF THE SIBERIAN CRATON: GENESIS, SOURCES OF ORE-FORMING FLUIDS

Mikhail O. Rampilov¹, Maria V. Rampilova², Evgeny I. Lastochkin³, Viktor F. Posokhov⁴

^{1, 2, 3, 4} Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹ mrampilov@mail.ru

² mburtseva@mail.ru

³ last@ginst.ru

⁴ vitafl@yandex.ru

Abstract. There are hydrothermal and greisen types of tungsten deposits in West and East Transbaikalia. Tungsten deposits in Eastern Siberia have been studied by many researchers. To date, the sources of ore forming fluids have remained insufficiently studied. The proposed study was aimed at the sources of ore forming fluids in tungsten deposits using isotopic research methods. Tasks contributing to achieving the aim included analyzing the isotopic compositions of stable and radiogenic isotopes and interpreting their genetic nature. The hydrogen and oxygen isotopic composition in the hydroxyl-bearing minerals, and sulfur in sulfides were determined at the Center for Isotope Research of the Far East Science Center of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok) using Finnigan MAT 253 mass spectrometer. The oxygen and carbon isotopic compositions were analyzed using facilities of Center for “Geospectr” at the Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) using Finnigan MAT 253 mass spectrometer. The isotopic composition of Nd and Sr was measured using a Triton multichannel

mass spectrometer in a static regime at the Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg. 15 tungsten deposits and occurrences were studied. They are molybdenum-wolframite, wolframite, scheelite and scheelite-bearing gold deposits. Most attention was paid to the oxygen isotopic composition in quartz, wolframite, scheelite and mica, which were formed during early, high-temperature stage of deposit formation. There are also presented results of oxygen isotopic analyzes in minor and accessory minerals (apatite, triplite, helvite, scheelite, chlorite), as well as quartz, which were formed mainly at later stages. A large group of major and minor minerals was analyzed to obtain data concerning the evolution of the oxygen isotopic composition and ore formation temperatures. The oxygen isotopic composition values were also used to assess the equilibrium of the formation of mineral associations. Igneous rocks associated with tungsten ores have been studied at the Dzhida deposit. Isotopic data obtained for post-magmatic formations of tungsten deposits indicate the participation of both mantle and crustal components in different proportions. It is shown a mantle-derived source of fluids with the participation of the crust-derived for Mesozoic molybdenite-wolframite and wolframite deposits and the crust-derived source for the Late Paleozoic scheelite deposits. The meteoric water was involved in the ore forming fluid at the later stages of deposit formation.

Keywords: *W deposits, W-Mo deposits, wolframite, isotopy, East Siberia.*

Acknowledgements: The authors express their deep gratitude to Ph.D. [G.S. Ripp] and Ph.D. [O.K. Smirnova] for providing samples, for discussing the scientific issues considered in this article and their constructive comments.

Source of financing: The research was carried within state assignment of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (project AAAA-A21-121011390003-9).

For citation: Rampilov M.O., Rampilova M.V., Lastochkin E.I., Posokhov V.F. (2025) Tungsten deposits of the southern folded frame of the Siberian craton: genesis, sources of ore-forming fluids. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 120–138. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/36/7

Введение

Наиболее крупные рудные районы с вольфрамовой специализацией тяготеют к областям распространения гранитного магматизма. К их числу относится Восточная Сибирь, включающая южное обрамление Сибирской платформы и Забайкальскую часть Монголо-Охотского складчатого пояса, одной из особенностей которого является приуроченность к области мезозойского рифтогенеза, сопровождавшегося формированием внутриплитных рифтогенных впадин, обширным проявлением базальтового вулканизма, кислого и щелочного магматизма. В этот период сформировался Центрально-Азиатский флюоритоносный пояс [Булнаев, 1981], Западно-Забайкальские карбонатитовая [Рипп и др., 2000] и бериллиеносная [Куприянова и др., 1996] провинции, молибденовые и вольфрамовые месторождения. Временные рамки рифтогенных этапов охватывают интервал 250–120 млн лет [Ярмолюк и др., 1998; Ярмолюк, Иванов, 2000]. На домезозойском этапе сформировались существенно шеелитовые кварцевожильные и скарновые проявления.

В статье приведена информация о результатах изотопного изучения вольфрамовых проявлений Западного и Восточного Забайкалья гидротермального и грейзенового типов. Они представлены вольфрамитовыми (Антонова Гора, Бом Горхон и др.) и молибденит-вольфрамитовыми (Джидинское рудное поле, Булуктаевское) месторождениями. Изучены также кварц-шеелитовые (Скалистое, Казачья поляна), флюорит-кварц-шеелитовое (Ангокит) и шеелитосодержащее золоторудное месторождение (Ирокинда).

Шеелитоносные скарны при относительной распространенности относятся к мелким проявлениям, на них, как правило, не проводилось оценочных работ и они в основном остались не изученными.

Ассоциация вольфрамового оруденения с кислым магматизмом определила среди исследователей тезис о существенно коровом происхождении рудоформирующих флюидов. Роль мантийного компонента до настоящего времени оценивается весьма неопределенно как в отношении конкретных элементов, так и масштабов привноса их в верхний структурный ярус. В качестве индикаторов в решении этой проблемы в последние годы используют результаты изотопных исследований. Такими исследованиями установлено, что характер связи рудных элементов и магматитов не всегда согласуется с распространенной моделью появления флюидной фазы в результате дистилляции или фракционной кристаллизации расплава. Они показали, что в образовании месторождений, связанных с кислыми магматитами, участвовали флюиды и вещество метаморфического, мантийного и метеорного происхождения, а их количественные соотношения и время смешения на каждом конкретном месторождении сильно варьировали [Ripp et al., 2018; Wang et al., 2018a]. При этом далеко не все гранитные массивы, близкие по петрохимическим особенностям, сопровождаются редкометальным оруденением. Исследователями рассматривается несколько механизмов образования рудоносных комплексов, ассоциирующих с кислым магматизмом. В одних случаях они связываются с глубокой дифференциацией стандартного гранитного расплава [Raimbault et al., 1995; Gomes, Neiva, 2002; Breiter, 2012], в других – с миграцией

элементов в апикальные участки магматической камеры [Коваленко и др., 1984] или особыми условиями плавления и источниками вещества [Siegel et al., 2017; Khoshnoodi et al., 2017]. В качестве альтернативы предлагаются постмагматические процессы, сопровождающиеся перераспределением редких металлов [Беус и др., 1962; Neiva, 2002], а также контаминация кислых магм осадочными породами [Zhang et al., 2017]. Все эти модели предполагают в основном коровые источники вещества и флюидов.

В связи с низкими содержаниями вольфрама в кислых породах было высказано предположение, что рудогенерирующий потенциал гранитных массивов связан в значительной мере с количеством и составом в них летучих компонентов, условиями формирования массивов [Таусон, 1979; Аксюк, 2002; Bonin, 2007; Jiang et al., 2012]. Кроме того, изотопными исследованиями было показано, что магматический очаг может вызывать рециклинг вод из резервуаров различного происхождения, а флюиды на начальной стадии представляли преимущественно магматический источник, в который происходил приток деплетированных дейтерием метеорных вод [Taylor, O'Neil, 1977]. При этом роль последних увеличивалась к завершающей фазе рудообразования. Примеры рециклинга метеорных вод, обусловленного гранитными плутонами, показаны при образовании апокарбонатных нефритов [Бурцева и др., 2015], редкоземельного оруденения в карбонатитовом комплексе [Broom-Fendley et al., 2016], бериллиевого месторождения Спор Маунтин [Johnson, Ripley, 1998], эпitherмальных флюоритовых месторождений [Seal, Rye, 1993; Ласточкин и др., 2018].

Изотопно-геохимическое изучение молибденовых, молибден-вольфрамовых и вольфрамовых месторождений Китая [Zheng et al., 2015, 2017, 2018], Казахстана [Li G. et al., 2016], Канады [Zhang et al., 2016], показало непростой механизм рудообразования и важность более детального изучения этой проблемы.

Необходимо сказать, что публикации результатов комплексных изотопных исследований месторождений в отечественной литературе немногочисленны [Дубинина, 1993; Матвеева и др., 2002]. В числе причин трансформации изотопного состава кислорода в минералах, связываемых с гранитами, указывались падение температур, удаленность от магматического очага, взаимодействие флюидов с вмещающими породами.

Первые данные по изотопному составу кислорода вольфрамовых месторождений Забайкалья приведены в работах [Борщевский и др., 1980]. Детально было изучено Спокойнинское грейзеновое месторождение [Матвеева и др., 2002]. В более поздней работе [Абрамов, Посохов и др., 2021] на примере группы вольфрамовых месторождений Агинской и Аргун-

ской структурно-формационных зон Восточного Забайкалья установлена связь оруденения с гранитами кукульбейского комплекса. На месторождениях Джидинского рудного поля (Западное Забайкалье) был определен изотопный состав некоторых радиогенных элементов (свинец, стронций, неодим) [Чернышев и др., 1986, 1998, 1999], а данные по изотопному составу серы, кислорода и водорода в минералах различных стадий рудообразования приведены в работах [Рипп, 1984; Ripp et al., 2018].

Вольфрамовые месторождения Восточной Сибири изучались многими исследователями. К настоящему времени недостаточно изученными остались источники их вещества и флюидов, и предлагаемое исследование имело целью решение этих проблем путем привлечения изотопных методов исследований. В задачи, способствующие достижению цели, входил анализ изотопных составов стабильных и радиогенных изотопов и интерпретация их генетической природы.

Методы исследований

Изотопный состав кислорода определен в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН (аналитик Т.А. Веливецкая) и в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Изотопные составы кислорода и углерода в карбонатах и кислорода в силикатах определены в Геологическом институте им. Н.Л. Добрецова СО РАН В.Ф. Посоховым. 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 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB) и $\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) определены с погрешностью $\pm 0,05$ и $\pm 0,1$ ‰ (1σ) соответственно.

Кислород из силикатных минералов был выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа силикатных минералов описана в работе [Sharp, 1990]. Погрешность анализа составляла $\pm 0,1$ – $0,3$ ‰ при 95 %-м доверительном уровне.

Изотопный анализ серы сульфидов и водорода в гидроксилсодержащих минералах выполнен в Центре изотопных исследований ДВГИ ДВО РАН. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы проведена по методике, описанной в статье [Гриненко, 1962]. Сера сульфидов окислялась до SO_2 с использованием оксида меди. Реакция окисления проводилась в вакууме при температуре 900 °С. Полученный SO_2 очищался от остальных продуктов реакции на терморегулируемой криогенной ловушке.

Очищенный SO_2 вымораживался в отдельную ампулу. Измерение изотопных соотношений серы проведено на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Германия) с использованием двойной системы напуска. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1σ) составляет 0,1 %. Анализ изотопного состава водорода выполнен по методу [Venemann, O'Neil, 1993]. Для удаления сорбированной воды пробы были предварительно нагреты до 200 °С. Конституционная вода выделялась при температуре 1250 °С. Отделение водорода из воды произведено на хrome при температуре 950 °С. Состав его измерен на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 относительно лабораторного стандарта, калиброванного по международным стандартам VSMOW, SLAP, GISP. Воспроизводимость определения δD (1σ) составляет 1,5 ‰.

Измерения изотопного состава неодима, стронция и их концентраций проводились в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург) на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре Triton [Саватенков, Мочалов, 2018]. Воспроизводимость определения концентраций Sr, Sm и Nd, вычисленная на основании многократных анализов стандарта BCR-1, соответствует $\pm 0,5$ %. Погрешность определения изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляла 0,01 %.

Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 (Е.А. Хромова)

(ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Для оценки температуры образования сосуществующих минералов использовались изотопные составы кислорода в них.

Краткая геологическая и минералогическая характеристика месторождений

Проведено изучение 15 вольфрамовых месторождений и рудопоявлений (рис. 1). Они включают молибден-вольфрамовые (Джидинское, Булуктаевское), вольфрамитовые (Бом-Горхон, Букука, Шерловая гора, Антонова гора, Байба), шеелитовые (Скалистое, Казачья поляна, Ангокит) и шеелитосодержащее золоторудное (Ирокинда) месторождения. По большинству из них имеются десятки публикаций, в которых приведена характеристика геологического строения, вещественный состав, результаты термобарогеохимических исследований, рассматриваются проблемы генезиса и источников вещества [Повилайтис, 1960; Игнатович, 1975; Батурина, Рипп, 1984; Ходанович и др., 2003]. Изотопные исследования были посвящены анализу состава сульфидной серы [Рипп, 1984], кислорода в вольфрамитах [Борщевский и др., 1980], радиогенных изотопов (Sr, Pb, Sm-Nd) на Джидинском месторождении [Чернышев и др., 1986, 1998]. Состав кислорода и водорода относительно детально изучен на Спокойнинском месторождении [Матвеева и др., 2002].

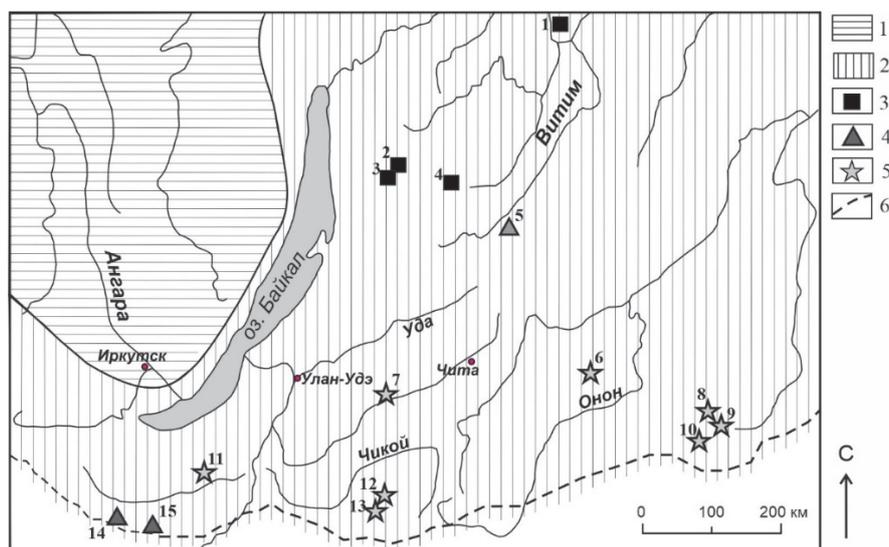


Рис. 1. Расположение изученных вольфрамовых месторождений в Забайкалье

1 – Сибирская платформа, 2 – складчатая область. Месторождения: 3 – шеелитовые; 4 – молибден-вольфрамовые; 5 – вольфрамитовые. 6 – государственная граница России. 1 – Ирокинда, 2 – Казачья Поляна, 3 – Скалистое, 4 – Ангокит, 5 – Нырокское, 6 – Спокойнинское, 7 – Бом-Горхон, 8 – Букука, 9 – Антонова Гора, 10 – Шерловая Гора, 11 – Байба, 12 – Студенческое, 13 – Шумиловское, 14 – Малый-Ойногор, 14 – Джидинское, 15 – Булуктай

Fig. 1. Location of studied W deposits in Transbaikalia

1 – Siberian craton, 2 – folded region. Deposits: 3 – scheelite; 4 – molybdenum-tungsten; 5 – wolframite. 6 – state border. 1 – Irokinda, 2 – Kazachia Polyana, 3 – Skalistoe, 4 – Angokit, 5 – Nyrokskoye, 6 – Spokoininskoye, 7 – Bom-Gorkhon, 8 – Bukuka, 9 – Antonova Gora, 10 – Sherlova Gora, 11 – Baiba, 12 – Studencheskoe, 13 – Shumilovskoe, 14 – Maly-Oinogor, 14 – Dzhida, 15 – Buluktai

На Булуктаевском и Джидинском месторождениях вольфрамовая минерализация проявилась после молибденовой вслед за внедрением межминерализационных даек гранитов и сиенитов. На начальном этапе образовалась молибден-вольфрам-бериллиевая ассоциация (молибденит, вольфрамит, берилл), позднее сформировалась более низкотемпературная минеральная ассоциация, типоморфными минералами которой являются триплит, апатит. Для завершающих стадий характерны кальцит, хлорит, эпидот, шеелит, гелльвин.

Для молибден-вольфрамовых и вольфрамовых месторождений характерно повышенное содержание сульфидных минералов. В основном это пирит, в меньших количествах представлены сфалерит, галенит, халькопирит, сульфосоли висмута. В числе редких минералов отмечаются апатит, триплит и карбонаты (родохрозит, анкерит, кальцит, сидерит, доломит), которые часто завершают гидротермальный процесс. Вольфрамит (гюбнерит), берилл, мусковит и калиевый полевой шпат тяготеют к залбандам жил, а сульфиды и карбонаты – к осевым частям. Вольфрамит участками замещен шеелитом, а триплит – апатитом и родохрозитом. Формирование комплексных молибден-вольфрамовых месторождений проходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных по времени периодами интрузивного магматизма. Минерализация каждого последующего гидротермального этапа имеет специфическую рудную нагрузку, наследуя в то же время некоторые черты предыдущего. Например, на Джидинском месторождении сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибден-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гюбнеритсодержащих прожилков (Инкурское месторождение) и кварц-гюбнеритовые жилы (Холтосонское месторождение).

Шеелитовые месторождения имеют упрощенный минеральный состав, для них не характерны флюорит (за исключением Ангокитского месторождения), слюды и калиевый полевой шпат. Минеральные ассоциации руд представлены кварцевожилковыми телами, содержащими шеелит, распространенные среди известняков. Они сформировались в одну или две стадии. В их составе, кроме кварца и шеелита, присутствуют убогая сульфидная минерализация, кальцит, тремолит-актинолит. На Ирокиндинском золоторудном месторождении шеелит слагает в основном вкрапленность, количество шеелита увеличивается с глубиной залегания рудных тел. Сульфиды представлены в основном пиритом.

Образование вольфрамовых месторождений юго-восточного Забайкалья произошло в интервале 148–

131 млн лет [Андреева и др., 1996] и связываются с кукльбейским интрузивным комплексом (J_3). Близкие значения возраста (121–144 млн лет) имеют месторождения Джидинского рудного поля [Платов и др., 2009] и Булуктаевское месторождение [Савченко и др., 2018; Ripp et al., 2018]. Рудоформирующими магматическими породами являются гранит-порфиры и лейкограниты гуджирского интрузивного комплекса (J_3-K_1). Шеелитовые гидротермальные и скарновые проявления установлены на площади распространения позднепалеозойских гранитов баргузинского комплекса (PZ₃).

Гомогенизация флюидных включений в кварце, сфалерите, флюорите, происходит в интервале 150–400 °C [Повилайтис, 1960; Онтоев, 1974; Иванова и др., 1991].

Результаты исследований и обсуждение

Проведены изотопные исследования минеральных парагенезисов начальных, продуктивных и завершающих стадий образования месторождений. Изучены молибден-вольфрамовые (Джидинский рудный узел, Булуктаевское), вольфрамитовые (Бом Горхон, Антонова Гора, Спокойнинское и др.), флюорит-кварц-шеелитовые (Ангокит), кварц-шеелитовые (Скалистое, Казачья Поляна), шеелитоносные золотокварцевые жилы (Ирокинда). На перечисленных месторождениях выполнено около 140 определений изотопного состава кислорода. Часть из них, выполненная на месторождениях Джидинского рудного поля, приведена в статье [Ripp et al., 2018]. Обобщенные результаты исследований представлены в табл. 1.

Наибольшее внимание было уделено изотопному составу кислорода в кварце, вольфрамитах, шеелитах и слюдах, представляющих в основном ранний наиболее высокотемпературный этап формирования месторождений (кварц-вольфрамит(гюбнерит)-сульфидная, молибденит-шеелитовая стадии). В табл. 2 приведены результаты анализов кислорода второстепенных и акцессорных минералов (apatит, триплит, гелльвин, шеелит, хлорит), а также кварца, образовавшихся в основном на поздних стадиях (кварц-карбонатная, кварц-шеелитовая с флюоритом и др.).

Следует отметить, что изотопная изученность магматических пород еще недостаточна. Такие исследования проведены только по гранитам Первомайского штока и дайкам сиенитов Джидинского рудного поля. В них определен состав стабильных и радиогенных изотопов (свинец, стронций, неодим). В кварце и полевом шпате из гранита и валовых пробах даек сиенита проанализирован состав кислорода [Борщевский и др., 1980; Чернышев и др., 1998, 1999; Матвеева и др., 2002; Ripp et al., 2018].

Таблица 1

Изотопный состав кислорода, углерода, серы и водорода в рудообразующих минералах вольфрамовых месторождений южного складчатого обрамления Сибирской платформы

Table 1

Isotopic composition of O, C, S and D in ore forming minerals from W and W-Mo-deposits southern folded frame of the Siberian Craton

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ VSMOW					$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ VPDB	$\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ VCDT	δD VSMOW
		Кварц	Вольфрамит	Слюда	Шеелит	Карбонаты			
Месторождения мезозойского этапа									
Молибденит-вольфрамитовые									
1	Джидинское	8,10(19)	-1,50(8)	5,20(5)	1,90(1)	8,50(6)	-5,10(6)	0,20(15)	-84,10(2)
2	Булуктаевское	8,60(8)	-2,90(2)	5,60(2)	0,90(1)	7,54(1)	-4,90(1)	0,60(14)	-137,50(2)
3	Нырокское	10,10(1)	1,10(1)	8,20(1)					-105,60(1)
4	31 пикет	8,10(1)	-3,70(1)					1,10(7)	
Вольфрамитовые (гидротермальные, грейзеновые)									
5	Бом-Горхон	9,80(3)	0,60(4)	6,50(1)	0,70(1)			2,50(10)	-143,90(1)
6	Байба	13,30(1)	4,40(1)	9,60(1)				2,30(2)	
7	Антонова гора	12,30(3)	2,80(4)	10,10(1)				-1,50(3)	
8	Шерловая гора	12,60(1)	4,60(2)	10,20(1)					-142,20(1)
9	Букука	10,30(1)	2,80(2)	11,00(1)					
10	Шумиловское		1,10(3)						
11	Спокойнинское	14,20(1)	2,70(3)	11,00(1)					-129,00(8)
12	Студенческое		1,20(1)						
Месторождения позднепалеозойского этапа									
Кварц-шеелитовые									
14	Скалистое	15,80(1)			5,90(3)			7,40(3)	
15	Казачья поляна	16,00(4)			5,70(1)			4,70(1)	
16	Ангокит	17,60(1)			5,60(1)	20,30(1)	-2,40(1)	1,50(1)	
Золото-шеелитовые									
17	Ирокинда	16,60(1)			14,80(2)			1,70(18)	

Примечание. Содержания средние арифметические, в скобках – количество анализов. Анализы 10–12 из [Борщевский и др., 1980; Матвеева и др., 2002].

Note. The contents are average; the number of analyzes is in parentheses. Analyzes 10–12 from [Borshchevsky et al., 1980; Matveeva et al., 2002].

Таблица 2

Изотопные составы кислорода в минералах поздних стадий Джидинского, Булуктаевского и Бом-Горхонского месторождений

Table 2

Isotopic composition of oxygen in latest stage minerals from the Dzhida, Buluktai and Bom Gorkhon deposits

№ п/п	Месторождение	Минерал	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ SMOW
1	Джидинское рудное поле	Кварц	8,70
2		Кварц	9,10
3		Триплит	1,52
4		Триплит	1,11
5		Апатит	2,60
6		Апатит	1,90
7		Шеелит	1,90
8	Булуктаевское	Кварц	8,10
9		Гельвин	3,90
10		Гельвин	4,30
11		Гельвин	4,20
12		Эпидот	4,00
13		Шеелит	0,90
14		Хлорит	0,10
15		Хлорит	2,60
16	Бом-Горхон	Триплит	4,30
17		Апатит	-2,43
18		Шеелит	0,70

Изотопный состав серы.

Среди изученных вольфрамовых месторождений выделяется две группы, несколько отличающихся по изотопному составу сульфидной серы (рис. 2). В группе вольфрамитовых месторождений сера ложится в границы мантийного источника, нередко

имеет отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$. В некоторых месторождениях (Бом-Горхон, Байба) сера изотопно несколько тяжелее.

В группе кварц-шеелитовых месторождений сера изотопно утяжелена и близка к значениям в породах континентальной коры.

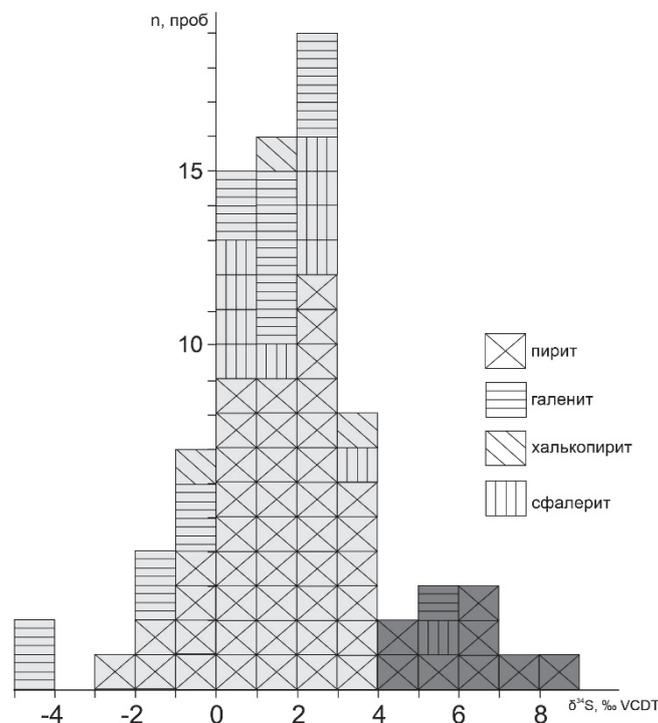


Рис. 2. Две группы изотопных составов сульфидной серы в вольфрамовых месторождениях Забайкалья
Светло-серое поле – вольфрамитовые, темно-серое – шеелитовые месторождения

Fig 2. Two groups of isotope compositions of sulfide sulfur in W deposits of Transbaikalia
Light gray field – wolframite deposits, dark gray – scheelite deposits

Изотопный состав кислорода и углерода.

В изученных месторождениях величины $\delta^{18}\text{O}$ укладываются в интервал значений от вольфрамита-шеелита до кварца ($-3,7 \dots 17,6\%$ $\delta^{18}\text{O}$). В этих границах по степени обогащения тяжелым изотопом расположены апатит, берилл, калиевый полевой шпат, слюды, триплит, гелвин, карбонаты, хлорит. Сопоставление составов кислорода в минералах молибденового и вольфрамового этапов молибден-вольфрамовых месторождений показало на отчетливое обогащение тяжелым изотопом кислорода минералов вольфрамового этапа (табл. 3, рис. 3).

На Булуктаевском месторождении величина $\delta^{18}\text{O}$ в кварце молибденоносных прожилков равна 7,4 ‰, в вольфрамитовых – 8,6 ‰. В молибденитовых рудах Джидинского месторождения эти значения имеют величины, соответственно, 5,9 и 8,1 ‰.

Кварц и вольфрамовые минералы по составу кислорода концентрируются в четыре группы (рис. 4). Наиболее легкий кислород (в основном ниже 10 ‰) харак-

терен для кварца и вольфрамитов молибден-вольфрамовых месторождений (Джидинское, Булуктаевское, Нырокское), близкие к ним значения имеют месторождения Бом Горхон и Букука. Изотопно тяжелее кислород на вольфрамитовых месторождениях Байба, Шерловая гора, Антонова Гора, а наиболее тяжелый – в кварц-шеелитовых проявлениях и золото-шеелитовом месторождении.

В минералах рудного этапа наибольшие значения $\delta^{18}\text{O}$ у кварца, меньше они в слюдах и калиевом полево-м шпате, а наименьшие – в вольфрамите, триплите, шеелите и апатите. Различия $\delta^{18}\text{O}$ сосуществующих кварца и вольфрамита варьируют в интервале 8,0–9,6 ‰ (табл. 4), в паре кварц–полевой шпат Джидинского месторождения варьирует в пределах 1,2–2,3 ‰. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в слюдах из молибден-вольфрамовых дистанцированы от таковых из вольфрамитовых месторождений (см. рис. 4). Соотношения составов кислорода в вольфрамитовых, кварце и слюдах согласуются с известной последовательностью равновесного фракционирования [Zheng, 1992, 1993a, b].

Контрастно отличается кислород шеелитов из вольфрамитовых и кварц-шеелитовых месторождений. В первых шеелит является вторичным и образовался по вольфрамиту, унаследовал изотопно легкий кислород. Существенно более тяжелый состав кислорода в шеелитовых месторождениях, а наиболее тяжелый обнаружен на Ирокиндинском золото-шеелитовом месторождении. Расчеты состава кислорода во флюидах, участвовавших в рудообразовании, представлены в табл. 5. В грейзенах он близок к составу магматического источника. Для месторождений Джидинского рудного поля это подтверждается составом водорода из гидроксильной воды мусковита ($\delta D = -84,8$ и $-83,3$ ‰).

Значения температур, полученные по изотопно-кислородному геотермометру в паре вольфрамит-кварц (см. табл. 4), в большинстве своем совпали ($277-380$ °С) с результатами термобарогеохимического изучения газожидких включений. При этом

температуры, рассчитанные по паре кварц-калишпат и из грейзенового парагенезиса (мусковит-берилл-калишпат) Джидинского месторождения, заметно выше ($297-391$ °С) и подтверждают их более раннее образование.

Изотопное изучение карбонатов проведено на трех месторождениях. Составы кислорода и углерода их на Джидинском и Булуктаевском месторождениях ложатся в поле PIC (рис. 5), типоморфное для мантийной углекислоты. При этом родохрозит, образовавшийся раньше анкерита, имеет более легкий углерод по сравнению с последним. Легкие кислород и углерод установлены в кальците (см. рис. 5, № 1), выделившимся на завершающем этапе рудообразования. Кальцит Ангокитского месторождения (рис. 5, № 2) имеет типично коровые значения кислорода ($20,3$ ‰) и углерода ($-2,4$ ‰), обусловленные контаминацией вмещающими осадочными карбонатными породами.

Таблица 3

Изотопные составы кислорода молибденовых и вольфрамовых этапов Джидинского и Булуктаевского месторождений

Table 3

Isotopic composition of oxygen in minerals of the Mo-, and W-stages from the Dzhida and Bom Gorkhon deposits

Месторождение	Этап минералообразования	Минерал	$\delta^{18}O$ ‰ VSMOW
Джидинское	Молибденовый	Кварц	5,30–6,60(5)
		Мусковит	3,90–5,30(3)
	Вольфрамовый	Кварц	7,00–9,10(14)
		Мусковит	4,90–5,50(5)
Булуктаевское	Молибденовый	Кварц	6,70–8,10(4)
	Вольфрамовый	Кварц	8,10–9,30(4)

Примечание. Содержание от – до, в скобках – количество анализов.

Note. Contents from – to, in brackets – number of analyzes.

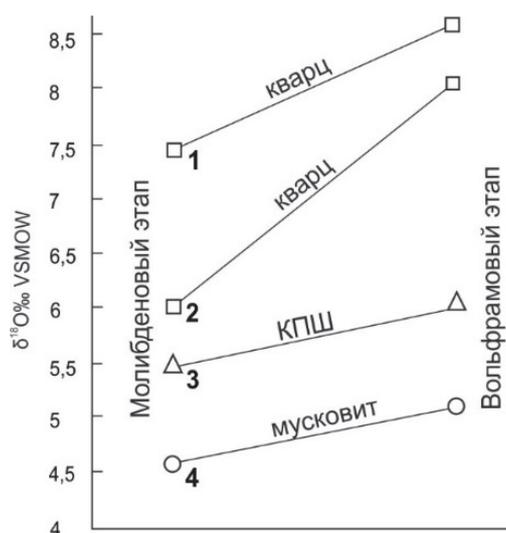


Рис. 3. Эволюция изотопного состава кислорода в минералах от раннего (молибденовый) к позднему (вольфрамовый) этапам

1 – Булуктаевское; 2, 3, 4 – Джидинское месторождения

Fig. 3. Evolution of $\delta^{18}O$ ‰ values in minerals from early (Mo) to late (W) stages

1 – Buluktai; 2, 3, 4 – Dzhida deposits

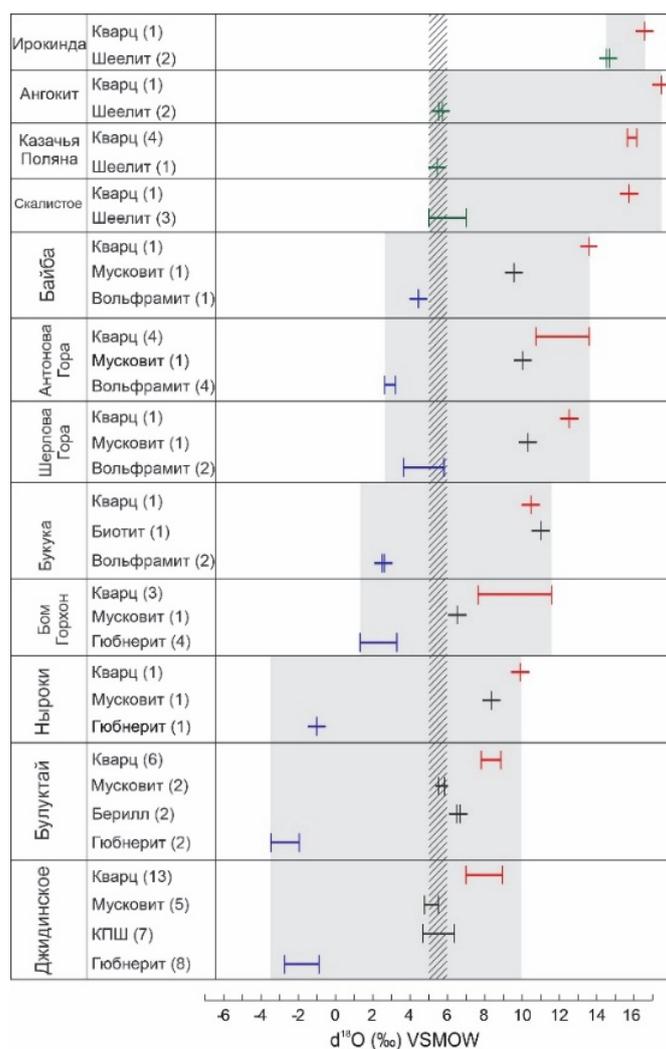


Рис. 4. Изотопные составы кислорода в главных минералах рудных стадий вольфрамовых месторождений
Заштриховано поле мантийного кислорода. Серым цветом выделена область полученных значений $\delta^{18}\text{O}$ (-3,7...17,6) на изученных месторождениях

Fig. 4. Isotopic compositions of oxygen in the main minerals of ore stages of W deposits

The mantle oxygen field is shaded. The range of values (-3,7...17,6) $\delta^{18}\text{O}$ in the studied deposits is highlighted in gray

Таблица 4

Расчеты изотопных температур в парах кварц–вольфрамит и кварц–КПШ вольфрамовых месторождений Забайкалья

Table 4

Calculations of isotope temperatures in quartz–wolframite and quartz–KFS from the W deposits of Transbaikalia

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰ VSMOW}$		Δ	T, °C
		Кварц	Вольфрамит		
1	Байба	13,30	4,42	8,88	319
2	Антонова Гора	10,28	2,70	8,10	359
3		12,80	3,10	9,70	281
4	Шерловая Гора	12,60	3,30	9,30	299
5	Букука	10,30	2,60	7,70	381
6	Бом-Горхон	7,80	-1,20	9,00	314
7		11,30	2,27	9,03	312
8		10,48	2,60	7,88	371
9	Ныроки	10,17	1,08	9,09	309
10	Булуктай	8,90	-2,10	11,00	228
11	Джидинское	8,90	-0,90	9,80	277
12		7,00	-2,50	9,50	290
13		8,50	-1,10	9,60	286
14		8,60	-1,10	9,70	281

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ VSMOW		Δ	T, °C
		Кварц	Вольфрамит		
15		7,40	-3,40	10,80	236
16*		7,20	-1,40	8,60	333
17		8,80	6,40	2,40	313
18		7,70	5,70	2,00	391
19		7,30	5,20	2,10	370

Примечание. * – проба 16 из грейзена, 17–19 – из кварц-калишпатового парагенезиса.

Note. * – sample 16 from greisen, 17–19 – from quartz-k-feldspar paragenesis.

Таблица 5

Изотопные составы кислорода в главных рудообразующих минералах и равновесных с ними флюидах вольфрамовых месторождений

Table 5

Isotopic composition of oxygen in main ore-forming minerals and fluids of W deposits

№ п/п	Месторождение	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ VSMOW					T °C	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ флюид		
		Мусковит	Кварц	Вольфрамит	Шеелит			Мусковит	Кварц	Вольфрамит
1	Джидинское	5,30	7,80	-1,70		300	5,30	-1,30	-0,20	
2	Булуктай	5,60	8,90	-2,10		230	5,60	-1,10	-1,90	
3	Ныроки	8,20	10,20	1,10		300	6,70	3,50	2,90	
4	Бом-Горхон	6,50	10,48	2,60		310	5,20	5,38	5,10	
5	Байба	9,60	13,30	4,42		320	8,50	6,90	6,42	
6	Антонова Гора	10,10	12,80	3,10		360	9,60	5,10	4,50	
7	Шерловая Гора	10,20	11,70	3,00		300	8,70	5,40	5,10	
8	Букука	11,00	10,30	2,70		380	10,80	5,40	5,20	
9	Спокойнинское	11,00	14,20	5,50		220	7,30	3,80	5,50	
10	Скалистое		15,80		5,70	200		3,70		
11	Ангокит		17,60		5,60	200		5,50		
12	Казачья поляна		16,00		5,70	200		3,90		
13	Ирокинда		15,60		13,20	200		3,50		

Примечание. Значения изотопного состава в минералах и флюидах средние.

Note. The $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ values in minerals and fluids are average.

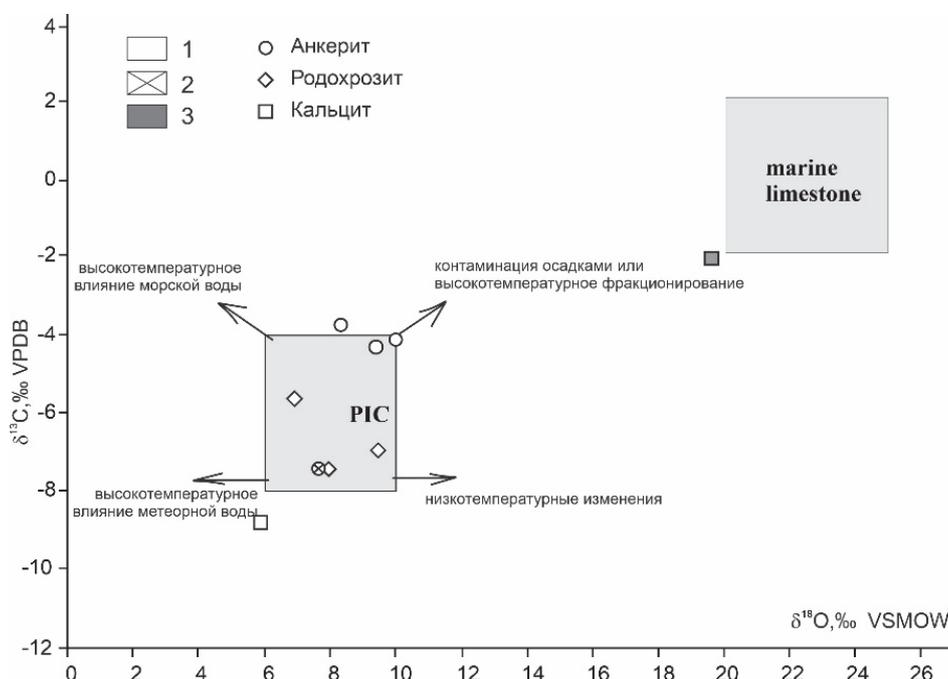


Рис. 5. Изотопные составы кислорода и углерода в карбонатных минералах Джидинского (1), Булуктаевского (2) и Ангокитского (3) месторождений

Поле PIC по [Taylor et al., 1967]

Fig. 5. The $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ and $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ values in carbonate minerals of the Dzhida (1), Buluktai (2) and Angokit (3) deposits
The PIC field according to [Taylor et al., 1967]

Изотопный состав водорода.

Большая часть полученных значений изотопного состава водорода в изученных месторождениях характеризуется деплетированностью дейтерием (табл. 6, рис. 6), свидетельствующей об участии в процессах минералообразования воды метеорного источника. Определения состава водорода, выполненные на Спокойнинском месторождении [Матвеева и др., 2002], также характеризуются деплетированностью дейтерием. И только кристаллизационная вода в слюдах из грейзенов Джидинского рудного поля, фиксирующих начальную стадию рудообразования, лежит в границах мантийного источника (-78,8...-84,8 ‰ δD).

Анализы изотопных составов стронция, самария и неодима выполнены для гранита Первомайского массива и двух даек меланократовых сиенитов Джидинского ме-

сторождения. Главной особенностью их являются низкие значения Sr_i в этих породах (0,704–0,705) и величины εNd, лежащие на тренде эволюции мантийного источника [Ripp et al., 2018]. В минералах рудных парагенезисов величины Sr_i в шеелитах, флюоритах и карбонатах варьируют в пределах 0,7047–0,7055. В гидротермальных минералах так же, как и в магматических породах, зафиксированы плюсовые значения εNd(T) (флюорит от +0,1 до +3,3, вольфрамит, микролин и кальцит, соответственно, +1,6, +0,4, и +3,9), лежащие на тренде эволюции мантийного источника [Чернышев и др., 1998].

С целью получения данных по эволюции изотопного состава кислорода и температур рудообразования проанализирована большая группа главных и второстепенных минералов. Значения изотопного состава кислорода были использованы и для оценки равновесности формирования минеральных ассоциаций.

Таблица 6

Изотопные составы кислорода и водорода в кристаллизационной воде гидроксилсодержащих минералов вольфрамитовых месторождений

Table 6

The δ¹⁸O‰ and δD‰ values in OH-bearing minerals of W deposits

№ п/п	Месторождение	Минерал	δ ¹⁸ O‰ VSMOW	δ ¹⁸ O‰ Флюид	δD‰ VSMOW	δD‰ Флюид	T, °C*
1	Джидинское	Мусковит	7,30	7,30	-78,80	-49,10	400
2	Джидинское	Мусковит	5,30	5,00	-84,80	-55,10	400
3	Джидинское	Мусковит	5,50	5,50	-83,30	-53,60	400
4	Нырокское	Мусковит	8,20	8,20	-105,60	-75,90	400
5	Шерловая гора	Биотит	11,70	13,80	-141,00	-92,40	400
6*	Спокойнинское	Мусковит	11,00	11,00	-129,00	-99,30	400
7	Булуктаевское	Мусковит	5,60	5,60	-144,00	-114,00	400
8	Булуктаевское	Эпидот	4,00	3,00	-130,10	-96,50	300
9	Бом-Горхон	Эпидот	6,50	6,50	-144,00	-114,20	400

Примечание. * данные по [Матвеева и др., 2002]. Расчеты состава кислорода во флюиде [Zheng, 1993], водорода – [Suzuoki, Epstein, 1976; Chako et al., 1999].

Note. * according to [Matveeva et al., 2002]. Calculations of δ¹⁸O‰ fluid [Zheng, 1993], δD‰ fluid – [Suzuoki, Epstein, 1976; Chako et al., 1999].

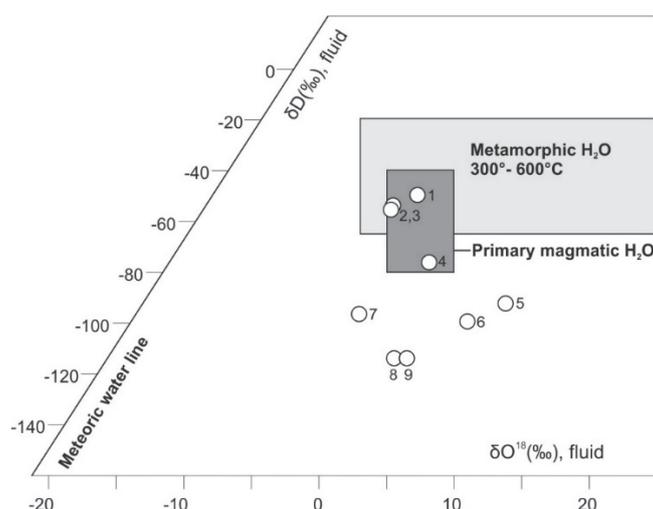


Рис. 6. Изотопные составы кислорода и водорода в водосодержащих минералах вольфрамитовых месторождений Забайкалья (см. табл. 6)

Источники флюидов из различных резервуаров Земли по [Sheppard, 1986]

Fig. 6. The δ¹⁸O‰ and δD‰ in OH-bearing minerals of W deposits in Transbaikalia (see table 6)

Sources of fluids from various reservoirs of the Earth according to [Sheppard, 1986]

Изотопные составы стронция и неодима.

Оценка источников компонентов проведена в соответствии с данными работ [Taylor et al., 1967; Sheppard, 1986; Фор, 1989; Hoefs, 2009]. Поле $\delta^{18}\text{O}$ в границах 5,5–6 ‰ соответствует значениям мантийного кислорода, а в случаях ниже 4–5 ‰ и высокой деплетированности дейтерием (менее 100 ‰ δD) предполагается участие метеорной воды. Обеднение $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерием магматических вод связывается [Фор, 1989] с процессами обмена с метеорными водами. Источник воды определялся расчетом состава кислорода во флюиде с равновесными минералами. Температуры образования минеральных фаз определены термометрическими методами и приведены в работах [Матвеева и др., 2002]. Расчеты проведены в соответствии с фракционированием в системе минерал–вода, исходя из справочных данных, приведенных в работах [Zheng, 1992, 1993a, 1993b; Chacko et al., 1999]. Вместе с данными по изотопному составу водорода в гидроксилсодержащих минералах они использованы для установления источников рудообразующих флюидов.

Ассоциация вольфрамового оруденения с гранитами определила распространенность тезиса о существовании корового источника его вещества. Это касается магматических пород и рудоносных флюидов. Появление изотопных методов исследований скорректировало эту проблему, что отчетливо зафиксировано в многочисленных зарубежных публикациях, включая вольфрамовые и молибденовые месторождения. На вольфрамовых месторождениях результаты таких исследований ранее были приведены в работах [Борщевский и др., 1980; Матвеева и др., 2002]. Анализ изотопных составов свинца, стронция и неодима в породах и рудах Джидинского рудного поля приведен в работе [Чернышев и др., 1998], а результаты изучения изотопного состава серы – в монографии [Рипп, 1984].

Магматические породы, с которыми ассоциируют вольфрамовые руды, изучены на Джидинском месторождении. Граниты Первомайского массива, предваряющие молибденовое оруденение и дайки меланократовых сиенитов, предшествовавшие формированию вольфрамовых руд, характеризуются обогащенностью легким изотопом кислорода (около 5 и 4 ‰ соответственно), пониженными первичными изотопными отношениями стронция ($\text{Sr}_0 = 0,704\text{--}0,705$) и значениями ϵNd . (0,9...–1,1), лежащими на тренде эволюции мантийного источника. Такие граниты по изотопному составу кислорода отнесены [Hoefs, 2009] к малочисленной группе – со значениями $\delta^{18}\text{O}$ ниже 6 ‰. В многочисленных массивах кислых магматитов Западного Забайкалья [Wickham et al., 1996; Litvinovsky et al., 2011] и других регионов [Yang et al.,

2017] значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в основном в интервале 10–14 ‰. Изотопная облегченность кислорода установлена в гранитах, сопровождающихся молибденовым и вольфрамовым оруденением – Первомайском (3,8–6,7 ‰), Жарчихинском (6,2–6,5 ‰), Тамирском (3,8–5,8 ‰) участках. Облегчение могло быть обусловлено изменением гранитов на постмагматическом этапе в результате воздействия флюидов с участием воды метеорного происхождения. К числу примеров гранитов с легким кислородом, в результате взаимодействия их с метеорными водами, отличающихся одновременно высокой деплетированностью дейтерием, относятся бертрандитовое месторождение Спор Маунтин (–120...–130 ‰) [Johnson, Ripley et al., 1998] и Харитоновский массив (–200...–300 ‰) [Wickham et al., 1996].

В числе возможных причин низких значений $\delta^{18}\text{O}$ в гранитах указывается [Hoefs, 2009] образование их по протолиту, изначально обогащенному легким кислородом (например, базиты, породы, переработанные метеорной водой или участие мантийных источников). Низкие концентрации хрома, никеля, кобальта в гранитах Первомайского массива (Джидинское рудное поле) не поддерживают вариант образования их за счет базитов, а изотопные составы стронция, неодима, свинца [Чернышев и др., 1999] – по породам корового происхождения. Изотопные отношения свинца обосновываются [Чернышев и др., 1998] образованием гранитной магмы в условиях нижней коры из пород деплетированных U и Th и сохранивших примитивные изотопные отношения свинца аналогичные мантийным.

Модель возникновения гранитов при плавлении пород под действием высокотемпературного мантийного флюидного потока рассмотрена в работах [Летников, 2006]. Вариант такой модели для Джидинского месторождения был предложен в работе [Чернышев и др., 1999]. Аналогичный механизм обосновывается для гранитов Казахстана, с которыми связаны молибден-вольфрамовые месторождения Акчатау, Коунрад [Li G. et al., 2016].

Изотопные данные, полученные для постмагматических образований вольфрамовых месторождений, свидетельствуют об участии в разных соотношениях как мантийного, так и корового компонентов. Низкие первичные изотопные стронциевые отношения и положительные значения ϵNd в породах и минералах Джидинского рудного поля предполагают поступление из мантийного резервуара калия, фтора, углекислоты. По данным изотопного состава серы [Рипп, 1984] среди молибденовых и вольфрамовых месторождений установлено две группы (см. рис. 2). У одной из них она имеет значения с вариацией от +5 до 8 ‰ $\delta^{34}\text{S}$, у другой – близка к метеоритному стандарту [Рипп, 1984]. К последним относятся наиболее

крупные месторождения (Булуктаевское, Мало-Ойногорское, Бом-Горхонское, Джидинское), сопровождающиеся повышенными концентрациями сульфидных минералов и флюорита. Такая же сера установлена на молибден-вольфрамовых месторождениях Центрального Казахстана (Коунрад, Караоба, Коктенкуль) [Чухров и др., 1967], Китая [Wang et al., 2018b] и Калгутинском на Алтае [Боровиков и др., 2016].

Величины $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатных минералах (см. рис. 5) также предполагают мантийное происхождение углекислоты. Кислород, близкий к магматическим породам, имеют слюды из грейзенов, а наибольшей обогащенностью легким кислородом характеризуются вольфрамиты. Деpletированность их тяжелым кислородом согласуется с коэффициентами фракционирования. Легкий кислород в триплите (1,1–4,3 ‰), апатите (–2,4–2,6) относительно кварца и калиевого полевого шпата в значительной мере обусловлен коэффициентами их фракционирования.

Об участии мантийного вещества в формировании вольфрамитовых месторождений указывает изотопный состав кислорода в грейзенах и слюдяных метасоматитах (4,2–6,5 ‰ $\delta^{18}\text{O}$), а также значение δD гидроксильной воды в мусковите (–78,8...–84 ‰) Джидинского месторождения. В то же время изотопные составы кислорода флюидов равновесных с другими минералами рудных стадий вместе с данными по изотопному составу водорода свидетельствуют об участии в рудообразовании также воды метеорного источника. На это указывает облегченность изотопного состава кислорода (нередко с отрицательными значениями $\delta^{18}\text{O}$) в воде равновесной с минералами гидротермальных парагенезисов. Наименьшее её количество участвовало на начальном этапе при формировании грейзенов и зон околоконтатных слюдяных метасоматитов. Оно существенно возрастало (от 7–9 до 35–40 %) к завершающим стадиям минералообразования. На метеорное происхождение части флюида (до 30–40 %) в формировании вольфрамовых месторождений Забайкалья ранее указывал [Борщевский и др., 1980], неоднократно обосновывалось и для месторождений Китая [Zhang et al., 2017; Song et al., 2018; Wang et al., 2018a, 2018b], а на завершающем этапе формирования месторождения Дайшан метеорная вода преобладала [Shieh et al., 1991].

Кислород вольфрамового этапа относительно молибденового на молибден-вольфрамовых месторождениях более гетероген и обогащен метеорной водой. В вольфрамитовых месторождениях отчетливо фиксируется синхронность изменения состава кислорода в кварцах и вольфрамитах. По [Борщевский и др., 1980] низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ в вольфрамитах связываются с вовлечением в гидротермы метеорных

вод. Расчет состава кислорода во флюидах равновесных с вольфрамитом не противоречит этому.

Сравнение изотопных характеристик изученных месторождений с вольфрамовыми и молибден-вольфрамовыми месторождениями Китая [Zeng et al., 2015; Zhang, 2018; Shieh et al., 1991, Song et al., 2018, Li X. et al., 2016], Казахстана [Li G. et al., 2016], Канады [Zhang et al., 2016] показало, что в ряде случаев они заметно отличаются. Магматические породы, с которыми связывается оруденение, часто менее деpletированы тяжелым кислородом, имеют более высокие первичные стронциевые отношения и отрицательные величины ϵNd [Zhang et al., 2017; Zheng et al., 2017]. Минералы рудных парагенезисов месторождений Китая существенно больше обогащены тяжелым кислородом. Значения $\delta^{18}\text{O}$ их в вольфрамитах варьируют от 4,1 до 6,8 ‰, в шеелитах – 4,2–6,3, кварце 11,1–14 ‰, мусковите 8,4–10 ‰ [Shieh et al., 1991]. Ближе всего к Забайкальским подходят месторождения Акчатау, Восточный Коунрад имеющих низкие первичные стронциевые отношения (0,703–0,705) и положительные величины ϵNd (от –0,5 до +2,8).

Гидротермальные шеелитовые месторождения и проявления Западного Забайкалья так же, как и скарновые, установлены главным образом на площадях распространения позднепалеозойских гранитоидов. Особенностью месторождений является обогащенность кварца и шеелита рудных тел изотопно тяжелым кислородом. Значения $\delta^{18}\text{O}$ пары минералов шеелит–кварц (см. рис. 4) более всего дистанцированы от вольфрамитовых месторождений. Изотопный состав сульфидной серы в пиритах флюорит-шеелитового и золото-шеелитового типа близок к значениям мантийного источника, а кварц-шеелитовых – утяжелен и имеет коровое происхождение.

Проведенные изотопные исследования свидетельствуют о существенном различии источников вещества позднепалеозойских и мезозойских вольфрамосодержащих месторождений. В образовании объектов мезозойского этапа, формировавшихся в рифтогенных обстановках, отчетливо фиксируется участие мантийного источника флюидов. Для позднепалеозойского этапа, сопровождавшегося образованием существенно шеелитовых проявлений, распространенного на площадях развития Ангаро-Витимского батолита, характерно преобладание существенно корового источника вещества и флюидов.

Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие наиболее важные выводы:

В формировании вольфрамовых месторождений Забайкалья участвовали компоненты глубинного

(мантийного) источника. Это были фтор, сера и углекислота. На поздних стадиях образования месторождений в состав флюидов была вовлечена вода метеорного источника.

Установлено различие источников вещества позднепалеозойских и мезозойских вольфрамсодержащих

месторождений. Группа месторождений, связанных с мезозойским этапом, формировались с участием мантийного источника флюидов, тогда как в позднепалеозойских установлено преобладание существенно корового источника вещества и рудоформирующих флюидов.

Список источников

- Абрамов Б.Н., Посохов В.Ф.** Петрогеохимическая и изотопная характеристика, связь с магматизмом вольфрамовых месторождений Агинской и Аргунской структурно-формационных зон Восточного Забайкалья // Литосфера. 2021. Т. 21, № 2. С. 262–272.
- Аксюк А.М.** Экспериментально-обоснованные геофториметры и режим фтора в гранитных флюидах // Петрология. 2002. Т. 10, № 6. С. 628–642.
- Андреева О.В., Головин В.А., Гольцман Ю.В., Козлова П.С., Сельцов Б.М.** Эволюция мезозойского магматизма и руднометасоматических процессов в Юго-Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. 1996. № 2. С. 115–130.
- Батурина Е.Е., Рипп Г.С.** Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья. М. : Наука, 1984. 152 с.
- Беус А.А., Северов А.С., Ситин А.А., Субботин К.Д.** Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). М. : Издательство АН СССР, 1962. 193 с.
- Боровиков А.А., Говердовский В.А., Борменко А.С., Брянский Н.В., Шабалин С.И.** Состав и металлоносность рудообразующих флюидов Мо-W месторождения Калгутинское (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 4. С. 647–662. doi: 10.15372/GiG20160401
- Борщевский Ю.А., Апельцин Ф.Р., Борисова С.Л.** Изотопный состав кислорода вольфрамитов из вольфрамовых месторождений различных формационных и генетических типов // Записки ВМО. 1980. Т. 4, № 109. С. 633–643.
- Булнаев К.Б.** Особенности образования и размещения флюоритовых формаций Забайкалья. Эволюция эндогенных процессов и оруденения в Забайкалье. Улан-Удэ : Издательство БФ СО РАН, 1981. С. 101–109.
- Бурцева М.В., Рипп Г.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е.** Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 3. С. 516–527. doi: 10.15372/GiG20150303
- Гриненко В.А.** Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Неорганическая химия. 1962. № 7. С. 2578–2582.
- Дубинина Е.О.** Поведение стабильных изотопов при редкоземельном рудообразовании на месторождении Акчатау : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1993. 123 с.
- Иванова Г.Ф., Смирнова О.К., Игнатенко К.И.** Особенности химического состава вольфрамитовой минерализации Джидинского рудного поля // Записки РМО. 1991. № 4. С. 77–88.
- Игнатович В.И.** Основные закономерности кварц-гюбнеритовых жил в Джидинском рудном поле. Минералогия и геохимия вольфрамовых месторождений. Л. : Изд-во ЛГУ, 1975. 111 с.
- Коваленко В.И., Антипин В.С., Коваленко Н.И.** Коэффициенты распределения фтора в магматических породах // Геохимия. 1984. № 3. С. 331–351.
- Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Новикова М.И., Журкова З.А.** Бериллий России: состояние, проблемы развития и освоения минерально-сырьевой базы. М. : Геоинформарк, 1996. 40 с.
- Ласточкин Е.И., Рипп Г.С., Цыденова Д.С., Посохов В.Ф., Мурзинцева А.Е.** Результаты изотопного изучения эпитермальных флюоритовых месторождений Западного Забайкалья (Источники вещества и флюидов) // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Известия Сиб. отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2018. Т. 41, № 2. С. 9–22. doi: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53
- Летников Ф.А.** Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 12. С. 1296–1308.
- Матвеева С.С., Спасенных М.Ю., Сушевская Т.М., Бочков А.Ю., Игнатьев А.В.** Геохимическая модель формирования Спокойнинского вольфрамового месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 2. С. 125–147.
- Онтоев Д.О.** Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М. : Наука, 1974. 244 с.
- Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Мухин В.Н., Суслова С.В., Платова Е.В., Большакова Т.В., Шеломенцева Т.И.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение) Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48. Улан-Удэ. Объяснительная записка. СПб. : Издательство СПб картофабрики ВСЕГЕИ, 2009. 271 с.
- Повилайтис М.М.** Основные черты минералогии Джидинского Мо-W месторождения // Тр. ИМГРЭ. М. : Издательство АН СССР, 1960. Вып. 24. 167 с.
- Рипп Г.С.** Геохимия эндогенного оруденения и критерии прогноза в складчатых областях. Новосибирск : Наука, 1984. 192 с.
- Рипп Г.С., Кобылкина О.В., Дорошкевич А.Г., Шаракшинов А.О.** Позднемезозойские карбонатиты Западного Забайкалья. Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2000. 232 с.
- Саватенков В.М., Мочалов А.Г.** Возраст и источники дунитов массива Кондер Алданского щита // Доклады Академии наук. 2018. Т. 482, № 5. С. 577–582. doi: 10.31857/S086956520003033-9
- Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф.** Возраст и изотопная характеристика Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (Республика Бурятия) // Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Известия Сиб. отделения секции наук о Земле РАЕН. 2018. Т. 41, № 2. С. 9–22. doi: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21
- Таусон Л.В.** Магматизм и рудообразование. М. : Наука, 1979. 36 с.

Фор Г. Основы изотопной геохимии. М. : Мир, 1989. 590 с.

Ходанович П.Ю., Гончаров Д.А., Смирнова О.К. Соотношение даек и Мо-W оруденения Джидинского рудного поля (Западное Забайкалье) по геологическим, изотопным и геохимическим данным. Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза // Материалы II Всероссийской конференции по изотопной геохронологии. СПб. : Изд-во ИГГД РАН, 2003. С. 525–529.

Чернышев И.В., Агапова А.А., Троицкий В.А. Pb-Pb изотопные характеристики и проблема источника крупномасштабного W-Мо оруденения в Джидинском рудном поле (Западное Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1999. Т. 366, № 6. С. 819–822.

Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Банрова Э.В., Иванова Г.Ф. Rb-Sr геохронология процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Мо месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360, № 4. С. 537–540.

Чернышев М.В., Журавлев Д.З., Троицкий В.А. Источники вещества редкометалльных (W-Мо) месторождений в свете данных изотопного состава Sr, Nd и Pb // XI Всесоюзный симпозиум по геохимии изотопов : тезисы Докладов. М., 1986. С. 365–367.

Чухров Ф.В., Ермилова Л.П., Виноградов В.И. Изотопный состав и происхождение серы некоторых вольфрамовых месторождений центрального Казахстана. Изотопы серы и вопросы рудообразования. М. : Наука, 1967. С. 46–58.

Ярмолук В.В., Иванов В.Г. Магматизм и геодинамика Западного Забайкалья в позднем мезозое и кайнозое // Геотектоника. 2000. № 2. С. 43–64.

Ярмолук В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И. Источники внутриплитного магматизма Западного Забайкалья в позднем мезозое – кайнозое (на основе геохимических и изотопных данных) // Петрология. 1998. Т. 6, № 2. С. 115–138.

Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects // *Lithos*. 2007. V. 97. P. 1–27.

Breiter K. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe // *Lithos*. 2012. V. 151. P. 105–121. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.022

Broom-Fendley S., Heaton T., Wall F., Gunn G. Tracing the fluid source of heavy REE mineralisation in carbonatites using a novel method of oxygen-isotope analysis in apatite: the example of Songwe Hill, Malawi // *Chem. Geol.* 2016. V. 440. P. 275–287. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.07.023

Chacko T., Riciputi L.R., Cole D.R., Horita J. A new technique for determining equilibrium hydrogen isotope fractionation factors using the ion microprobe: Application to the epidote-water system // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. V. 63. P. 1–10.

Gomes M., Neiva A. Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, northern Portugal: The importance of magmatic processes // *Chemie der Erde-Geochemistry*. 2002. V. 62 (1). P. 47–72.

Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. 286 p.

Jiang Y.-H., Liu Z., Jia R.-Y., Liao S.-Y., Zhou Q., Zhao P. Miocene potassic granite-syenite granite-syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba-Sr granite genesis // *Lithos*. 2012. V. 134–135. P. 146–162. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.012

Johnson T.M., Ripley E.M. Hydrogen and oxygen isotopic systematic of berillium mineralisation Spor Mountain. Utah Geol. Soc. Am. Abstr. Progr. 1998. V. 30. 127 p.

Khoshnoodi K., Behzadi M., Gannadi-Maragheh M., Yazdi M. Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran. *Geol. Croat.* 2017. V. 70. P. 53–69. doi: 10.4154/gc.2017.03

Li G.-M., Cao M., Qin K.-Z., Evans N.J., Hollings P., Seitmuratova E.Y. Geochronology, petrogenesis and tectonic settings of pre- and syn-ore granites from the W-Mo deposits (East Kounrad, Zhanet and Akshatau), Central Kazakhstan // *Lithos*. 2016. V. 252–253. P. 16–31. doi: 10.1016/j.lithos.2016.01.023

Li X., Huang C., Wang L., 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. V. 79. P. 1–25. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.04.023

Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Paleozoic post-collisional igneous province Transbaikalia // *Lithos*. 2011. V. 125. P. 845–874. doi: 10.1016/j.lithos.2011.04.007

Neiva A. Portuguese granites associated with Sn-W and Au mineralizations // *Bulletin-Geological Society of Finland*. 2002. V. 74. P. 79–101.

Raimbault L., Cuney M., Azencott C., Duthou J., Joron J.L. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central // *Economic Geology*. 1995. V. 90. P. 548–576.

Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. An isotope study of the Dzhida Mo-W ore field (Western Transbaikalia, Russia) // *Minerals*. 2018. V. 8 (12). 546. doi: 10.3390/min8120546

Seal R.R., Rye R.O. Stable isotope study of fluid inclusions in fluorite from Idaho: Implications for continental climates during the Eocene // *Geology*. 1993. V. 21. P. 219–222.

Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. P. 1353–1357.

Sheppard S.M.F. Characterization and isotope variation in natural waters // *Review of mineralogy*. 1986. V. 16. P. 165–181.

Shieh Y.-N., Zhang G.-X. Stable isotope studies of quartz-vein type tungsten deposits in Dajishan Mine, Jiangxi Province, Southeast China. *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. The Geochemical Society, Special Publication. 1991. V. 3. P. 425–435.

Siegel K., Williams-Jones A.E., Van Hinsberg V.J. The amphiboles of the REE-rich A-type peralkaline Strange Lake pluton: Fingerprints of magma evolution // *Lithos*. 2017. V. 288. P. 156–174. doi: 10.1016/j.lithos.2017.07.012

Song W.-L., Yao J.-M., Chen H.-Y., Sun W.-D., Ding J.-Y., Xiang X.-K., Zuo Q.-S., Lai C.-K. Mineral paragenesis, fluid inclusions, H-O isotopes and ore-forming processes of the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 99. P. 116–150. doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.06.002

Suzuoki T., Epstein S. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1976. V. 40. P. 1229–1240.

- Taylor B.E., O'Neil J.R.** Stable isotope studies of metasomatic Ca-Fe-Al-Si-skarns and associated metamorphic and igneous rocks Osgood mountains, Nevada // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. V. 63(1). P. 1–50.
- 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. V. 31. P. 407–430.
- Vennemann, 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. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*. 1993. V. 103. P. 227–234.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.J., Xue C.-J., Li B.C., Xian X.C.** Ore genesis and hydrothermal evolution of the Donggebi porphyry Mo deposit, Xinjiang, Northwest China: evidence from isotopes (C, H, O, S, Pb), fluid inclusions, and molybdenite Re-Os dating // *Economic Geology*. 2018a. V. 113 (2). P. 463–488.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.J., Xue C.-J., Zhang Z.-C.** Genesis of the Wurinitu W-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, fluid inclusions and isotope systematics // *Ore Geology Reviews*. 2018b. V. 94. P. 367–382.
- Wickham S.M., Alberts A.D., Zandvilevich A.N., Litvinovsky B.A., Bindeman J.N., Schanble E.A.** A stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia // *Petrology*. 1996. V. 37 (5). P. 1063–1095.
- Yang J., Barreing J., Siebert C., Futzke J., Stephens E., Halliday A.N.** The molibdenium isotopic compositions of J-S and A-Type granitic suites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2017. V. 205. P. 168–186. doi: 10.1016/j.gca.2017.01.027
- Zeng Q.-D., Sun Y., Chu S.-X., Duan X.-X., Liu J.** Geochemistry and geochronology of the Dongshanwan porphyry Mo–W deposit, Northeast China: Implications for the Late Jurassic tectonic setting // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 97. P. 472–485. doi: 10.1016/j.jseas.2014.07.027
- Zhang F.-F., Wang Y.-H., Liu J.-J., Wang J.-C.** Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 93. P. 181–199. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.12.021
- Zhang W., Lentz D.R., Thorne K.G., McFarlane C.** Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W–Mo–Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 77. P. 82–96. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.02.004
- Zhang Y., Yang J.-H., Chen J.-Y., Wang H., Xiang Y.-X.** Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Hf-O isotopes // *Lithos*. 2017. V. 278–281. P. 166–180. doi: 10.1016/j.lithos.2017.01.018
- Zheng W., Mao J.-W., Zhao H.-J., Ouyang H.-G., Zhao C.-S., Yu X.-F.** Geochemistry, Sr-Nd-Pb-Hf isotopes systematics and geochronological constrains on petrogenesis of the Xishan A-type granite and associated W-Sn mineralization in Guangdong province, South China // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 88. P. 739–752.
- Zheng Y., Cai X., Ding, Z., Cawood P.A., Yue S.** Geology, geochronology and isotopic geochemistry of the Xiaoliugou W-Mo ore field in the Qilian Orogen, NW China: Case study of a skarn system formed during continental collision // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 81 (2). P. 575–586.
- Zheng Y.-F.** Oxygen isotope fractionation in wolframite // *European Journal of Mineralogy*. 1992. V. 4. P. 1331–1335.
- Zheng Y.-F.** Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1993a. V. 57. P. 1079–1091.
- Zheng Y.-F.** Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1993b. V. 120. P. 247–263.

References

- Abramov B.N., Posokhov V.F. Petrogeochemical and isotopic characteristics, connection with magmatism of tungsten deposits of the Aginsk and Argunsk structural-formational zones of Eastern Transbaikalia // *Lithosphere (Russia)*. 2021. V. 21. 2. pp. 262–272.
- Aksyuk A.M. *Ekspperimental'no-obosnovannyye geoflorimetriya i rezhim ftora v granitnykh flyuidakh* [Experimentally based geofluorimeters and the fluorine regime in granitic fluids] // *Petrologiya [Petrology]*. 2002. V. 10. No. 6. pp. 628–642. In Russian
- Andreeva O.V., Golovin V.A., Goltsman Y.V., Kozlova P.S., Seltsov B.M. *Evolutsiya mezozoysskogo magmatizma i rudnometasomaticheskikh protsessov v Yugo-Vostochnom Zabaykal'e (Rossiya)* [Evolution of mesozoic magmatism and ore metasomatic processes in the South-Eastern Transbaikalia (Russia)] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of ore deposits]*. 1996. No. 2. pp. 115–130. In Russian
- Baturina E.E., Ripp G.S. *Molibdenovyye i vol'framovyye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaykal'ya* [Mo-W deposits of Western Transbaikalia]. Moscow: Nauka, 1984. 152 p. In Russian
- Beus A.A., Severov A.S., Sitin A.A., Subbotin K.D. *Al'bitizirovannyye i greyzenizirovannyye granity (apogranity)* [Albitized and greisenized granites (apogranites)]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1962. 193 p. In Russian
- Borovikov A.A., Goverdovskiy V.A., Borisenko A.S., Bryanskiy N.V., Shabalin S.I. *Sostav i metallonosnost' rudoobrazuyushchikh flyuidov Mo-W mestorozhdeniya Kalgutinskoe (Gornyy Altay)* [Composition and metal contents of ore-forming fluids of the Kalguty Mo–W(Be) deposit (Gorny Altai)] // *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*. 2016. V. 57. No. 4. pp. 647–662. doi: 10.1016/j.rgg.2016.04.001
- Borshchevsky Y.A., Apeltsin F.R., Borisova S.L. *Izotopnyy sostav kisloroda vol'framitov iz vol'framovykh mestorozhdeniy razlichnykh formatsionnykh i geneticheskikh tipov* [Isotope composition of oxygen of wolframite from tungsten deposits of various formation and genetic types] // *Zapiski VMO*. 1980. V. 4. No. 109. pp. 633–643. In Russian
- Bulnaev K.B. *Osobennosti obrazovaniya i razmeshcheniya flyuoritovykh formatsiy Zabaykal'ya. Evolyutsiya endogennykh protsessov i orudneniya v Zabaykal'e* [Features of the formation and placement of fluorite formations in Transbaikalia. Evolution of endogenous processes and mineralization in Transbaikalia]. Ulan-Ude: BF SO RAN. 1981. pp. 101–109. In Russian
- Burtseva M.V., Ripp G.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. *Nefrity Vostochnoy Sibiri: geokhimicheskie osobennosti i problemy genezisa* [Nephrites of East Siberia: Geochemical features and problems of genesis] // *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*. 2015. V. 56. No. 3. pp. 516–527. doi: 10.1016/j.rgg.2015.02.003

- Grinenko V.A. *Prigotovlenie dnuokisi sery dlya izotopnogo analiza* [Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis] // *Neorganicheskaya khimiya* [Inorganic chemistry]. 1962. No. 7. pp. 2578–2582. In Russian
- Dubinina E.O. *Povedenie stabil'nykh izotopov pri redkozemel'nom rudoobrazovanii na mestorozhdenii Akchatau* [Behavior of stable isotopes during rare earth ore formation at the Akchatau deposit]. Thesis for the degree of cand. geol.-min. sciences. Moscow. 123 p. In Russian
- Ivanova G.F., Smirnova O.K., Ignatenko K.I. *Osobennosti khimicheskogo sostava vol'framitovoy mineralizatsii Dzhidinskogo rudnogo polya* [Chemical composition of the wolframite-mineralization of the Dzhida ore field] // *Zapiski RMO*. 1991. No. 4. pp. 77–88. In Russian
- Ignatovich V.I. *Osnovnye zakonomernosti kvarts-gyubneritovykh zhil v Dzhidinskom rudnom pole. Mineralogiya i geokhimiya vol'framovykh mestorozhdeniy* [The main patterns of quartz-hubnerite veins in the Dzhida ore field. Mineralogy and geochemistry of tungsten deposits]. Leningrad: Izdatel'stvo LGU, 1975. 111 p. In Russian
- Kovalenko V.I., Antipin V.S., Kovalenko N.I. *Koeffitsienty raspredeleniya flora v magmaticheskikh porodakh* [Fluorine partition coefficients in igneous rocks] // *Geokhimiya* [Geochemistry International]. 1984. No. 3. pp. 331–351. In Russian
- Kupriyanova I.I., Shpanov E.P., Novikova M.I., Zhurkova Z.A. *Berillyi Rossii: sostoyanie, problemy razvitiya i osvoeniya mineral'no-syr'evoy bazy* [Beryllium in Russia: state, problems of development and development of the mineral resource base]. Moscow: Izdatel'stvo Geoinformark, 1996. 40 p. In Russian
- Lastochkin E.I., Ripp G.S., Tsydenova D.S., Posokhov V.F., Murzintseva A.E. *Rezultaty izotopnogo izucheniya epitermal'nykh flyuoritovykh mestorozhdeniy Zapadnogo Zabaykal'ya (Istochniki veshchestva i flyuidov)* [Results of isotopic study of epithermal fluorite deposits of Western Transbaikalia (sources of matter and fluids)] // *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Izvestiya Sib. otdeleniya Sektzii nauk o Zemle RAEN*. 2018. V. 41. No. 2. pp. 9–22. In Russian. doi: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-41-53
- Letnikov F.A. *Flyuidnyy rezhim endogennykh protsessov i problemy rudogeneza* [Fluids in endogenic processes and problems of metallogeny] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2006. V. 47. No. 12. pp. 1296–1308. In Russian
- Matveeva S.S., Spasennikh M.Y., Sushevskaya T.M., Bochkov A.Y., Ignatiev A.V. *Geokhimicheskaya model' formirovaniya Spokoininskogo vol'framovogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaykal'e, Rossiya)* [Geochemical model of formation of the Spokininsky deposit (East Transbaikalia)] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits]. 2002. V. 44. No. 2. pp. 125–147. In Russian
- Ontoev D.O. *Stadiynost' mineralizatsii i zonal'nost' mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Stages of Mineralization and Zoning of the Deposits of Transbaikalia]. Moscow: Nauka, 244 p. In Russian
- Platov V.S., Savchenko A.A., Ignatov A.M., Gorokhovskiy D.V., Shor G.M., Alekseenko V.D., Mukhin V.N., Suslova S.V., Platova E.V., Bolshakova T.V., Shelomentseva T.I. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'e pokolenie) Aldan-Zabaykal'skaya seriya. List M-48. Ulan-Ude. Ob'yasnitel'naya zapiska*. [State Geological Map of the Russian Federation; Scale 1: 1000000 (Third Generation) Aldan-Transbaikalian Series; M-48. Ulan-Ude]. St. Petersburg: Izdatel'stvo SPB kartfabriki VSEGEL. 2009. 271 p. In Russian
- Povilaitis M.M. *Osnovnye cherty mineralogii Dzhidinskogo Mo-W mestorozhdeniya* [Main features of the mineralogy of the Dzhida Mo-W deposit]. Tr. IMGRE. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1960. Vyp. 24. 167 p. In Russian
- Ripp G.S. *Geokhimiya endogennoy orudneniya i kriterii prognoza v skladchatykh oblastyakh* [Geochemistry of endogenous mineralization and forecasting criteria in folded regions]. Novosibirsk: Nauka, 192 p. In Russian
- Ripp G.S., Kobylkina O.V., Doroshkevich A.G., Sharakhshinov A.O. *Pozdne mezozoiyskie karbonatity Zapadnogo Zabaykal'ya* [Late mesozoic carbonatites of Western Transbaikalia]. Ulan-Ude: Izdatel'stvo BNTs SO RAN, 232 p. In Russian
- Savatenkov V.M., Mochalov A.G. *Vozrast i istochniki dunitov massiva Konder Aldanskogo shchita* [Age and sources of dunitites of Konder massive (Aldan shield)] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 2018. V. 482. No. 5. pp. 577–582. In Russian. doi: 10.1134/S1028334X18100161
- Savchenko A., Ripp G., Izbrodin I., Posokhov V. *Vozrast i izotopnaya kharakteristika Buluktaevskogo molibden-vol'framovogo mestorozhdeniya (Respublika Buryatiya)* [Age and isotopic characteristics of the Buluktaev Mo-W deposit (Republic of Buryatia)] // *Geologiya, poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Izvestiya Sib. otdeleniya sektzii nauk o Zemle RAEN*. 2018. V. 41. No. 2. pp. 9–22. In Russian
- Towson L.V. *Magmatizm i rudoobrazovanie* [Magmatism and mineralization]. Moscow: Nauka, 36 p. In Russian
- Faure G. *Osnovy izotopnoy geokhimii* [Fundamentals of isotope geochemistry]. Moscow: Mir, 590 p. In Russian
- Khodanovich P.Y., Goncharov D.A., Smirnova O.K. *Sootnoshenie daek i Mo-W orudneniya Dzhidinskogo rudnogo polya (Zapadnoe Zabaykal'e) po geologicheskim, izotopnym i geokhimicheskim dannym. Izotopnaya geokhronologiya v reshenii problem geodinamiki i rudogeneza* [Correlation of dikes and Mo-W mineralization of the Dzhida ore field (Western Transbaikalia) according to geological, isotope and geochemical data. Isotope geochronology in solving problems of geodynamics and ore genesis] // *Materialy II Vserossiyskoy konferentsii po izotopnoy geokhronologii*. St.Petersburg: Izdatel'stvo IGGD RAN. 2003. pp. 525–529. In Russian
- Chernyshev I.V., Agapova A.A., Troitskiy V.A. *Pb-Pb izotopnye kharakteristiki i problema istochnika krupnomasshtabnogo W-Mo orudneniya v Dzhidinskom rudnom pole (Zapadnoe Zabaykal'e)* [Pb-Pb isotope characteristics and problem of the source of large-scale W-Mo mineralization in the Dzhida ore field (Western Transbaikalia)] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 1999. V. 366. No. 6. pp. 819–822. In Russian
- Chernyshev I.V., Gol'tsman Y.V., Bairova E.D., Ivanova G.F. *Rb-Sr geokhronologiya protsessov posledovatel'nogo formirovaniya granitov, greyzenizatsii i gidrotermal'noy mineralizatsii: Dzhidinskoe W-Mo mestorozhdenie, Zapadnoe Zabaykal'e* [Rb-Sr geochronometry of sequential granite formation, greisenization, and hydrothermal mineralization: Evidence from the Dzhida W-Mo deposit, Western Transbaikalian region] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences]. 1998. V. 360. No. 4. pp. 537–540. In Russian
- Chernyshev M.V., Zhuravlev D.Z., Troitskiy V.A. *Istochniki veshchestva redkometal'nykh (W-Mo) mestorozhdeniy v svete dannykh izotopnogo sostava Sr, Nd i Pb. XI Vsesoyuznyy simpozium po geokhimii izotopov* [Sources of matter from rare metal (W-Mo) deposits in light of Sr, Nd and Pb isotopic data. XI All-Union Symposium on Geochemistry of Isotopes]. Tezisy Dokladov. Moscow. 1986. pp. 365–367. In Russian
- Chukhrov F.V., Ermilova L.P., Vinogradov V.I. *Izotopnyy sostav i proiskhozhdenie sery nekotorykh vol'framovykh mestorozhdeniy tsentral'nogo Kazakhstana. Izotopy sery i voprosy rudoobrazovaniya* [Isotopic composition and origin of sulfur in some tungsten deposits of central Kazakhstan. Sulfur isotopes and issues of ore formation]. Moscow: Izdatel'stvo «Nauka». 1967. pp. 46–58. In Russian

- Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G. *Magmatizm i geodinamika Zapadnogo Zabaykal'ya v pozdnem mezozoe i kaynozoe* [Magmatism and geodynamics of Western Transbaikalia in the late mesozoic and Cenozoic] // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2000. No. 2. pp. 43–64. In Russian
- Yarmolyuk V.V., Ivanov V.G., Kovalenko V.I. *Istochniki vnutriplitnogo magmatizma Zapadnogo Zabaykal'ya v pozdnem mezozoe – kaynozoe (na osnove geokhimicheskikh i izotopnykh dannykh)* [The sources of intraplate magmatism of Western Transbaikalia in late mesozoic and cenozoic: evidence from geochemical and isotope-geochemical data] // *Petrologiya* [Petrology]. 1998. V. 6, No. 2. pp. 115–138. In Russian
- Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects // *Lithos*. 2007. V. 97. pp. 1–27.
- Breiter K. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe // *Lithos*. 2012. V. 151. pp. 105–121. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.022
- Broom-Fendley S., Heaton T., Wall F., Gunn G. Tracing the fluid source of heavy REE mineralisation in carbonatites using a novel method of oxygen-isotope analysis in apatite: the example of Songwe Hill, Malawi // *Chem. Geol.* 2016. V. 440. pp. 275–287. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.07.023
- Chacko T., Riciputi L.R., Cole D.R., Horita J. A new technique for determining equilibrium hydrogen isotope fractionation factors using the ion microprobe: Application to the epidote-water system // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. V. 63. pp. 1–10.
- Gomes M., Neiva A. Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, northern Portugal: The importance of magmatic processes // *Chemie der Erde-Geochemistry*. 2002. V. 62 (1). pp. 47–72.
- Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. 286 p.
- Jiang Y.-H., Liu Z., Jia R.-Y., Liao S.-Y., Zhou Q., Zhao P. Miocene potassic granite–syenite granite–syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba–Sr granite genesis // *Lithos*. 2012. V. 134–135. pp. 146–162. doi: 10.1016/j.lithos.2011.12.012
- Johnson T.M., Ripley E.M. Hydrogen and oxygen isotopic systematic of berillium mineralisation Spor Mountain. Utah Geol. Soc. Am. Abstr. Progr. 1998. V. 30. 127 p.
- Khoshnoodi K., Behzadi M., Gannadi-Maragheh M., Yazdi M. Alkali metasomatism and Th-REE mineralization in the Choghart deposit, Bafq district, Central Iran. *Geol. Croat.* 2017. V. 70. pp. 53–69. doi: 10.4154/gc.2017.03
- Li G.-M., Cao M., Qin K.-Z., Evans N.J., Hollings P., Seitmuratova E.Y. Geochronology, petrogenesis and tectonic settings of pre- and syn-ore granites from the W-Mo deposits (East Kounrad, Zhanet and Akshatau), Central Kazakhstan // *Lithos*. 2016. V. 252–253. pp. 16–31. doi: 10.1016/j.lithos.2016.01.023
- 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. V. 79. pp. 1–25. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.04.023
- Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Paleozoic post-collisional igneous province Transbaikalia // *Lithos*. 2011. V. 125. pp. 845–874. doi: 10.1016/j.lithos.2011.04.007
- Neiva A. Portuguese granites associated with Sn-W and Au mineralizations // *Bulletin-Geological Society of Finland*. 2002. V. 74. pp. 79–101.
- Raimbault L., Cuney M., Azencott C., Duthou J., Joron J.L. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central // *Economic Geology*. 1995. V. 90. pp. 548–576.
- Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. An isotope study of the Dzhida Mo–W ore field (Western Transbaikalia, Russia) // *Minerals*. 2018. V. 8(12). 546. doi: 10.3390/min8120546
- Seal R.R., Rye R.O. Stable isotope study of fluid inclusions in fluorite from Idaho: Implications for continental climates during the Eocene // *Geology*. 1993. V. 21. pp. 219–222.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. pp. 1353–1357.
- Sheppard S.M.F. Characterization and isotope variation in natural waters // *Review of mineralogy*. 1986. V. 16. pp. 165–181.
- Shieh Y.-N., Zhang G.-X. Stable isotope studies of quartz-vein type tungsten deposits in Dajishan Mine, Jiangxi Province, Southeast China. *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*. The Geochemical Society, Special Publication. 1991. V. 3. pp. 425–435.
- Siegel K., Williams-Jones A.E., Van Hinsberg V.J. The amphiboles of the REE-rich A-type peralkaline Strange Lake pluton: Fingerprints of magma evolution // *Lithos*. 2017. V. 288. pp. 156–174. doi: 10.1016/j.lithos.2017.07.012
- Song W.-L., Yao J.-M., Chen H.-Y., Sun W.-D., Ding J.-Y., Xiang X.-K., Zuo Q.-S., Lai C.-K. Mineral paragenesis, fluid inclusions, H-O isotopes and ore-forming processes of the giant Dahutang W-Cu-Mo deposit, South China // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 99. pp. 116–150. doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.06.002
- Suzuoki T., Epstein S. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1976. V. 40. pp. 1229–1240.
- Taylor B.E., O'Neil J.R. Stable isotope studies of metasomatic Ca-Fe-Al-Si-skarns and associated metamorphic and igneous rocks Osgood mountains, Nevada // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. V. 63 (1). pp. 1–50.
- 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. V. 31. pp. 407–430.
- Vennemann, 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. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*. 1993. V. 103. pp. 227–234.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.J., Xue C.-J., Li B.C., Xian X.C. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Donggebi porphyry Mo deposit, Xinjiang, Northwest China: evidence from isotopes (C, H, O, S, Pb), fluid inclusions, and molybdenite Re-Os dating // *Economic Geology*. 2018a. V. 113 (2). pp. 463–488.
- Wang Y.-H., Zhang F.-F., Liu J.J., Xue C.-J., Zhang Z.-C. Genesis of the Wurinitu W-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, fluid inclusions and isotope systematics // *Ore Geology Reviews*. 2018b. V. 94. pp. 367–382.
- Wickham S.M., Alberts A.D., Zanzvilevich A.N., Litvinovsky B.A., Bindeman J.N., Schanble E.A. A stable Isotope Study of Anorogenic Magmatism in East Central Asia // *Petrology*. 1996. V. 37 (5). pp. 1063–1095.

Yang J., Barreing J., Siebert C., Futzke J., Stephens E., Halliday A.N. The molibdenium isotopic compositions of J-S and A-Type granitic suites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2017. V. 205. pp. 168–186. doi: 10.1016/j.gca.2017.01.027

Zeng Q.-D., Sun Y, Chu S-X, Duan X-X, Liu J. Geochemistry and geochronology of the Dongshanwan porphyry Mo-W deposit, Northeast China: Implications for the Late Jurassic tectonic setting // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 97. pp. 472–485. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.07.027

Zhang F.-F., Wang Y.-H., Liu J.-J., Wang J.-C. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopes // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 93. pp. 181–199. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.12.021

Zhang W., Lentz D.R., Thorne K.G., McFarlane C. Geochemical characteristics of biotite from felsic intrusive rocks around the Sisson Brook W-Mo-Cu deposit, west-central New Brunswick: An indicator of halogen and oxygen fugacity of magmatic systems // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 77. pp. 82–96. doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.02.004

Zhang Y., Yang J.-H., Chen J.-Y., Wang H., Xiang Y.-X. Petrogenesis of Jurassic tungsten-bearing granites in the Nanling Range, South China: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb and Hf-O isotopes // *Lithos*. 2017. V. 278–281. pp. 166–180. doi: 10.1016/j.lithos.2017.01.018

Zheng W., Mao J.-W., Zhao H.-J., Ouyang H.-G., Zhao C.-S., Yu X.-F. Geochemistry, Sr-Nd-Pb-Hf isotopes systematics and geochronological constrains on petrogenesis of the Xishan A-type granite and associated W-Sn mineralization in Guangdong province, South China // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 88. pp. 739–752.

Zheng Y., Cai X., Ding, Z., Cawood P.A., Yue S. Geology, geochronology and isotopic geochemistry of the Xiaoliugou W-Mo ore field in the Qilian Orogen, NW China: Case study of a skarn system formed during continental collision // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 81(2). pp. 575–586.

Zheng Y.-F. Oxygen isotope fractionation in wolframite // *European Journal of Mineralogy*. 1992. V. 4. pp. 1331–1335.

Zheng Y.-F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1993a. V. 57. pp. 1079–1091.

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

Информация об авторах:

Рампилов М.О., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: mrampilov@mail.ru

Рампилова М.В., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: mburtseva@mail.ru

Ласточкин Е.И., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: last@ginst.ru

Посохов В.Ф., старший научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: vitafl@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Rampilov M.O., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: mrampilov@mail.ru

Rampilova M.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: mburtseva@mail.ru

Lastochkin E.I., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: last@ginst.ru

Posokhov V.F., Senior Researcher, Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: vitafl@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.06.2024; одобрена после рецензирования 25.04.2025; принята к публикации 29.08.2025

The article was submitted 04.06.2024; approved after reviewing 25.04.2025; accepted for publication 29.08.2025