

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.462

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21>

ВОЗРАСТ И ИЗОТОПНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БУЛУКТАЕВСКОГО МОЛИБДЕН-ВОЛЬФРАМОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

© А.А. Савченко^а, Г.С. Рипп^б, И.А. Избродин^с, В.Ф. Посохов^д

^{а-д}Геологический институт СО РАН,
670047, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

РЕЗЮМЕ: Цель данной статьи – датирование рудного процесса, изучение состава и характеристика минеральных парагенезисов, присутствующих в породах и рудах Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения, оценка источников вещества и флюидов. Re-Os метод (Центр изотопных исследований ВСЕ-ГЕИ) использовался для установления возраста молибденового оруденения. Изотопные составы кислорода в силикатах, а также углерода в карбонатах определены в Геологическом институте СО РАН. Изотопный состав водорода гидроксильной воды мусковита определен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН. Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН, частично в Тбилисском государственном университете. Re-Os методом установлен возраст молибденового этапа (144 ± 10 млн лет). Изотопные составы сульфидной серы как молибденового, так и вольфрамового этапа в целом ложатся в интервал значений, близкий к значениям мантийного источника. Изотопные составы кислорода в минералах молибденового и вольфрамового этапов четко разделяются на две группы. Образование месторождения происходило при участии мантийного источника. На заключительной стадии отмечено увеличение в составе флюидов роли метеорной воды.

Ключевые слова: молибден-вольфрамовое месторождение, кварц-гюбнерит-шеелитовые жилы, берилл, молибденит, изотопный состав кислорода, серы, водорода и углерода, Re-Os анализ

Благодарность: Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00129_а).

Информация о статье: Дата поступления 11 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф. Возраст и изотопная характеристика Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (Республика Бурятия). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2018;41(4):7–21. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21.

^аСавченко Алена Алексеевна, инженер лаборатории петрологии, аспирант, e-mail: savchenko@ginst.ru
Alena A. Savchenko, Engineer of the Petrology Laboratory, Postgraduate, e-mail: savchenko@ginst.ru

^бРипп Герман Самуилович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии, тел.: 8 (3012) 433955, e-mail: ripp@ginst.ru
German S. Ripp, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433955, e-mail: ripp@ginst.ru

^сИзбродин Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петрологии, тел.: 8 (3012) 433955, e-mail: izbrodin@ginst.ru
Ivan A. Izbrodin, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Petrology Laboratory, tel.: 8 (3012) 433955, e-mail: izbrodin@ginst.ru

^дПосохов Виктор Федорович, старший научный сотрудник, тел.: 8 (3012) 433955, e-mail: vitaf1@yandex.ru
Viktor F. Posokhov, Senior Researcher, tel.: 8 (3012) 433955, e-mail: vitaf1@yandex.ru

AGE AND ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF THE BULUKTAI MO-W DEPOSIT (REPUBLIC OF BURYATIA)

© Alena A. Savchenko^a, German S. Ripp^b, Ivan A. Izbrodin^c, Viktor F. Posokhov^d

^{a-d}Geological Institute SB RAS,
6a, Sakhyanova St., Ulan-Ude, 670047, Republic of Buryatia, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the article is to date the ore formation process, study the composition and provide the description of mineral parageneses in rocks and ores of the Buluktai Mo-W deposit as well as to estimate the sources of matter and fluids. The Re-Os method (The Center for isotopic studies of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)) is used for dating the molybdenum mineralization. The isotopic compositions of oxygen in silicates and carbon in carbonates is determined in the Geological Institute SB RAS. The isotopic composition of hydrogen of muscovite hydroxyl water is determined in the Center for isotopic studies of the Far Eastern Branch RAS. The isotopic analysis of sulfide sulfur is carried out in the Center for isotopic studies of the Far Eastern Branch RAS and partly at the Tbilisi State University. The age of the molybdenite phase (144 ± 10 Ma) has been determined using the Re-Os method. The isotopic compositions of sulfide sulfur in both molybdenum and tungsten stages show a range of values close to the values of a mantle source. The isotopic compositions of oxygen in the minerals of Mo and W-stages are clearly divided into two groups. The deposit was formed with the participation of a mantle source. Its final stage is characterized with the increased influence of meteoric water as a part of fluids.

Keywords: Mo-W deposit, quartz-hubnerite-scheelite veins, beryl, molybdenite, isotopic composition of oxygen, sulfur, hydrogen, and carbon, Re-Os analysis

Acknowledgement: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 17-05-00129_a).

Information about the article: Received July 11, 2018; accepted for publication November 28, 2018; available online 28 December 2018.

For citation: Savchenko A.A., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Posokhov V.F. Age and isotopic characteristics of the Buluktai Mo-W deposit (Republic of Buryatia). *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;41(4):7–21 (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-4-7-21.

Введение

Согласно источнику [1], характеристика Минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых России содержит сведения о том, что на территории республики Бурятия сосредоточено 26,89 % общероссийских балансовых запасов молибдена.

Булуқтаевское месторождение находится в пределах Джидинской структурно-металлогенической зоны, входящей в состав Саяно-Байкальского металлогенического пояса [2]. Рудный район расположен в бассейне верхнего течения реки Джиды, протягивается почти на 160 км при ширине 40–70 км, занимая

площадь около 7200 км². В пределах его известно 7 месторождений, около 20 рудопроявлений и более 60 минерализованных точек. Геологии, минералогии, последовательности образования и оценке возраста месторождения посвящено большое количество работ [2–9].

Оруденение представлено кварцевыми жилами, штокверковыми зонами и полимиктовой трубообразной брекчией. По данным геохронологических исследований [8], возраст гранитов, с которыми связывается месторождение, варьирует от 98 до 172 млн лет. Кроме того, высказано предположение [2] о позднепалео-

зойском возрасте месторождения. Ассоциация оруденения с гранитами послужила основанием для вывода о существовании коровом источнике его вещества. Участие других источников в образовании месторождения исследователями не рассматривалось.

Неоднозначность в оценке возраста оруденения и отсутствие данных об источнике вещества руд вызвали необходимость геохронологического и изотопного изучения этого месторождения.

Методы исследований

Диагностика минералов и изотопные составы кислорода в силикатах и кислорода и углерода в карбонате определены в «Аналитическом центре минералого-геохимических и изотопных исследований» Геологического института СО РАН (Улан-Удэ). Однородность и взаимоотношения минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300. Карбонат был разложен 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 карбоната 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 силикатов выделен методом лазерного фторирования. Калибровка анализов осуществлялась по международным стандартам NBS-28 (кварц), NBS-30 (биотит). Методика анализа минералов описана в работе [10], воспроизводимость составляла $\pm 0,1$ – $0,3$ ‰ при 95 %-м доверительном уровне.

Изотопный состав кислорода во флюидах рассчитан в соответствии с фракционированием минерал – вода для мусковита [11], кварца и берилла [12], гюбнерита и шеелита [13], анкерита [14],

хлорита [15]. Температуры, использованные для оценки изотопных составов, взяты из результатов термобарогеохимических исследований [7].

Изотопный состав водорода гидроксильной воды мусковита определен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН. Анализ выполнен по методу, описанному в статье [16]. Для удаления сорбированной воды проба была предварительно нагрета 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) составляла 1,5 ‰.

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в Центре изотопных исследований ДВНЦ РАН, частично в Тбилисском государственном университете (М.Ш. Кавиладзе). Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа проведена по методике, описанной в работе [17]. 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, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1σ) составляет 0,1 ‰.

Изотопный Re-Os анализ молибденита проведен в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ в лаборатории, специализированной для проведения работ с высоколетучими веществами [18]. При анализе использована методика

химической сепарации и очистки рения и осмия, основанной на методе, предложенном Институтом физики Земли в Париже [19]. Отдельные зерна молибденита массой 0,5–5 мг разлагались в смеси реагентов: 1 мл 7N HNO₃ + 0,5 мл 8N HCl, в 15-миллиметровых кварцевых виалах при температуре 300 °С и давлении 125 атм. в течение 6 ч в печи высокого давления Anton Paar HPA-S [20]. Из полученного раствора после его охлаждения сухим льдом осмий выделялся бромовой экстракцией и микродистилляцией, а рений – жидкостной экстракцией с изоамиловым спиртом [19]. Для определения концентраций рения и осмия и отношения ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os использовался метод изотопного разбавления со смешанным изотопным трассером ¹⁸⁵Re-¹⁹⁰Os, который добавлялся к навескам молибденита до разложения проб. Измерения изотопного состава рения проводились на умножителе масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Element-2 (Thermo Scientific) из раствора 3 % HNO₃ в динамическом режиме регистрации.

При построении Re-Os изохрон использовалась программа Isoplot 3,75 (K. Ludwig) для Excel 2003. При расчетах Re-Os изохрон использовалось фиксированное начальное отношение изотопов осмия ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os = 0, предполагающее отсутствие захваченного при образовании молибденита радиогенного осмия.

Геологическое строение месторождения

Месторождение входит в состав Булуктай-Харацайского рудного узла [2]. Геологическое строение, состав и минералогия его неоднократно освещались в работах [3, 4, 6, 21 и др.]. На месторождении совмещены кварц-молибденитовая и гюбнерит-сульфидно-кварцевая рудные формации. В пределах его установлено трубообразное тело брекчий диаметром 170×200 м (рис. 1), прослеженное скважинами на глубину до 300 м, располагающееся в основном среди верхнепалео-

зойских кварцевых монзонит-сиенитов. В примыкающей к «трубке», кольцевой брекчированной зоне распространено штокверковое оруденение, представленное сетью разноориентированных кварцево-рудных прожилков, молибденитовых и гюбнеритовых жил, имеющих существенно северо-западное направление (см. рис. 1).

Возраст гранитов, с которыми связано оруденение, определен Rb-Sr и K-Ar методами и лежит в интервале 98–172 млн лет [8, 9]. По источнику [2] предполагается, что формирование месторождения происходило в пределах 298–292 млн лет и связано с комплексом субщелочных гранитов.

В радиусе 15 км от месторождения выявлено более 30 участков с кварцевыми жилами и штокверковыми зонами, содержащими вольфрам, молибден, медь, золото, уран, флюорит.

Северная часть месторождения сложена гранитами и гранит-порфирами. Массив этих гранитов к северу прослеживается до 10 км, а к юго-востоку уходит на территорию Монголии. На западе он прорывает карбонатно-терригенную флишвидную толщу кембро-ордовика, а на юге – гранитоиды верхнего палеозоя. С этим массивом связывают молибден-вольфрамовое оруденение. Кровля массива погружается на юго-запад под углом 30–35° и вскрывается скважинами на глубинах от 50 до 170 м. Производные магматических комплексов представлены дайками мелкозернистых гранитов, диоритовых порфиров и спессартитов. На ранней стадии в эндоконтактной зоне аляскитов образовались пегматоиды. В мелкозернистых и аплитовидных гранитах присутствуют пегматоидные-полевошпатовые и кварц-полевошпатовые шпирсы, а также их жилообразные выделения. Эти граниты в районе месторождения относятся к числу более молодых образований. С ними и связано бериллиевое оруденение. Наличие одновременно образовав-

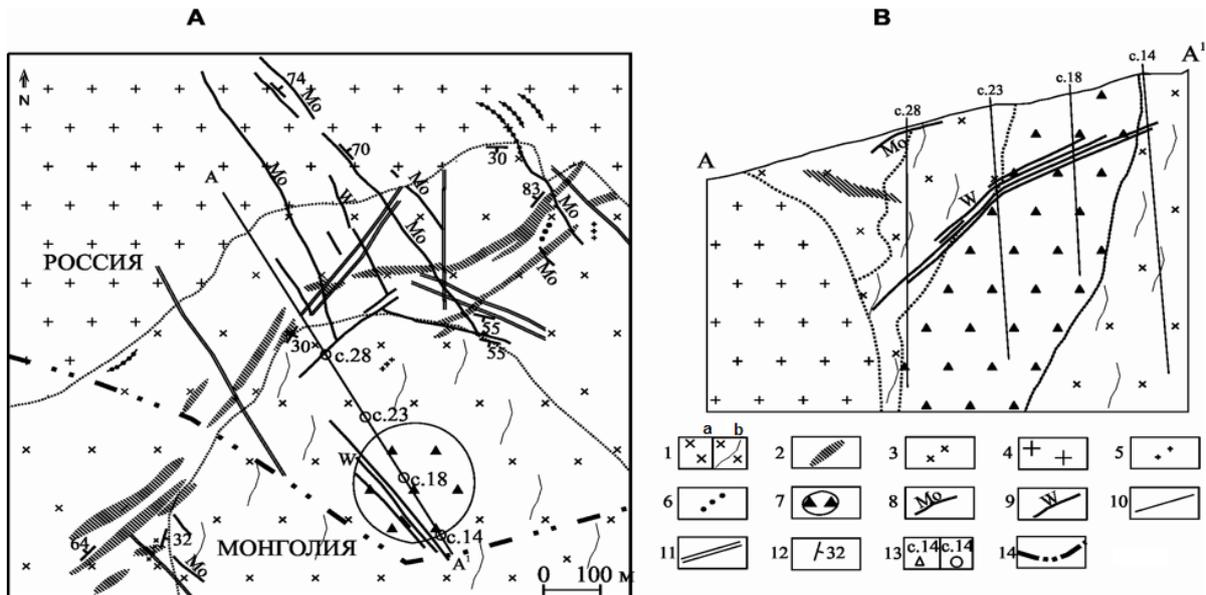


Рис. 1. Схема геологического строения Булуктаевского молибден-вольфрамового месторождения (по источнику [21]):

A – план, B – разрез по разведочному профилю–А–А¹

- 1 – верхнепалеозойские кварцевые монзонит-сиениты (а) и их брекчированные разности (b);
 2–3 – дайки верхнего палеозоя: 2 – лампрофйры (одинит-спессартиты), 3 – диорит-порфйриты;
 4 – раннемезозойские аляскистовые граниты и их дайки; 5 – аплиты; 6 – гранит-порфйры;
 7 – полимиктовая брекчия; 8–10 – жилы: 8 – кварц-молибденитовые, 9 – кварц-гюбнеритовые,
 10 – безрудные кварцевые; 11 – тектонические нарушения; 12 – элементы залегания;
 13 – скважины и их номера на разрезе (А), на схеме (В); 14 – государственная граница

Fig. 1. Diagram of the geological structure of the Buluktai molybdenum-tungsten deposit (by the source [21]):

A – plan, B – section along the survey profile A–A¹

- 1 – Upper Paleozoic quartz monzonite-syenites (a) and their brecciated variations (b);
 2–3 – Upper Paleozoic dikes: 2 – lamprophyres (odinite-spessartites); 3 – diorite-porphyrites;
 4 – Early Mesozoic Alaskan granites and their dikes; 5 – aplites; 6 – granite-porphyry;
 7 – polymictic breccia; 8–10 – veins: 8 – quartz-molybdenite, 9 – quartz-hubnerite,
 10 – barren lode quartz; 11 – tectonic dislocations; 12 – dip and strike;
 13 – holes and their numbers on the section (A), on the diagram (B); 14 – state border

шейся вкрапленности флюорита и молибденита в них послужило одним из признаков такой связи.

Трубообразное тело брекчий, согласно источнику [21], возникло на месте пересечения зон повышенной трещиноватости северо-восточного и северо-западного простирания, наложенных на массив верхнепалеозойских гранитов. Эти брекчии представляли благоприятные участки для проникновения гидротермальных растворов, интенсивно переработавших обломочный материал и сформировавших вольфрамово-молибденовое оруденение.

Оруденение образовалось в два этапа – берилл-молибденовый и вольфрамовый с бериллом и сульфидами, разделенные внедрением даек аплитов. В молибденовом этапе выделяются молибденитовая, кварц-молибденитовая и кварц-пиритовая стадии [6].

Внедрение мелкозернистых и аплитовидных гранитов сопровождается высокотемпературными пневмолито-гидротермальными процессами, представленными слюдяными грейзенами и скарноподобными жилами в породах основного состава. Скарновые образования сложены преимущественно амфиболом

и хлоритом с небольшим количеством граната, магнетита, пирита. Грейзены и скарноподобные породы секутся берилл-молибденовыми жилами, а также жилами межрудных аплитов.

На ранней стадии в гранитах образовалась вкрапленность флюорита и молибденита. Позднее сформировалась основная масса молибденового оруденения. Молибденитовые прожилки более всего распространены во внешней зоне оруденелой брекчии, опоясывающей трубчатое сооружение. Богатые вкрапленные молибденитовые руды располагаются в жильных зонах. В позднюю стадию молибденового этапа образовались кварц-пиритовые прожилки, а также жилы кварца с флюоритом и кальцитом.

Вольфрамовое оруденение отделено от молибденового внедрением даек аплитов. Последние сложены кварцем, олигоклазом, микроклином и содержат вкрапленность мусковита, флюорита и пирита. После внедрения аплитов сформировались вольфрамовое и полиметаллическое оруденения. На начальном этапе образовались микроклиновые и кварц-микроклиновые прожилки, пересекающие молибденитовые жилы. Более поздняя кварц-гюбнерит-шеелитовая стадия получила наибольшее распро-

странение. В составе ее выделяется кварц-гюбнерит-сульфидная стадия [6]. Сульфидно-гюбнеритовые жилы секут брекчии трубчатого тела монзонитоиды верхнего палеозоя, а сами они секутся жилами флюорита и халцедоновидного кварца.

По данным термобарогеохимических исследований [7], молибденитовый этап сформировался при температурах от 200 до более 480 °С, минерализация в дайках аплитов – 280–380 °С, вольфрамитовое оруденение – 230–390 °С, ассоциация низкотемпературного флюорита и кварца – 200–300 °С. Схема последовательного образования месторождения представлена в табл. 1. Она показывает, что минеральные ассоциации Булуктаевского месторождения сформировались в три этапа. В два первые были образованы высоко- и среднетемпературные берилл-молибденовые и кварц-гюбнерит-шеелитовые руды, в третий в близповерхностных условиях образовались низкотемпературные флюоритовые жилы с халцедоновидным и гребенчатым кварцем. Последние по составу и условиям образования идентичны флюоритовым месторождениям Монголии, Восточного и Западного Забайкалья [22–24].

Таблица 1

Последовательность формирования руд Булуктаевского месторождения

Table 1

Formation sequence of Buluktai deposit ores

Этап	Стадия	T, °С
Молибденитовый	Пегматоидная	
	Грейзеновая	480–390
	Молибденитовая	340–290
	Кварц-молибденитовая	340–280
	Кварц-пиритовая	280–200
Внедрения даек аплитов	–	380–280
Вольфрамитовый	Полевошпатовая и кварц-полевошпатовая	390–260
	Кварц-гюбнерит-шеелитовая	380–260
	Кварц-флюорит-шеелитовая	320–230
Низкотемпературного флюорита и халцедоновидного кварца	Крупнозернистого флюорита, гребенчатого и халцедоновидного кварца	300–200

Примечание. Температура T дана по источнику [7].

Note. The temperature T is given by source [7].

Результаты изотопных исследований

На месторождении проведена оценка возраста (Re-Os) рудного этапа и изучены изотопные составы кислорода, серы, водорода и углерода различных стадий минералообразования. На основе данных термобарогеохимических исследований [7] рассчитан изотопный состав кислорода во флюиде, равновесном с минералами рудного и пострудного этапов.

Изохронный Re-Os возраст молибденита. Re-Os датирование проведено по молибдениту (проба Бул-617) из

кварц-молибденитового прожилка (табл. 2). С молибденитом ассоциируют пирит, галенит и сфалерит. В пробе содержится 14,5–17,7 ppm рения. Рассчитанная по фракциям молибденита изохрона дала возраст 144 ± 10 млн лет (рис. 2).

Изотопный состав серы. Изотопные составы сульфидной серы пирита, молибденита, сфалерита и галенита как молибденового, так и вольфрамового этапа в целом гомогенны (табл. 3, рис. 3), ложатся в интервал значений, близкий к значениям мантийного источника. При этом отмечается несколько большая обогащенность молибденита тяжелой серой.

Таблица 2

Результаты Re-Os изотопных анализов молибденита Булуктаевского месторождения

Table 2

Results of Re-Os isotope analyzes of molybdenite sample from the Buluktai deposit

Номер точки	M, mg	Re, ppm	¹⁸⁷ Re, ppb	¹⁸⁷ Os, ppb	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os (±2d %)	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os (±2d %)	T model, Ma
4853	1,25	17,7	11108	26,57	36 5617 ± 0,5	88 ± 1,19	143
4854	1,89	16,1	10096	24,26	43 647 ± 0,6	105 ± 2,55	144
4855	2,36	16,0	10055	22,79	15 639 ± 0,6	36 ± 0,93	136

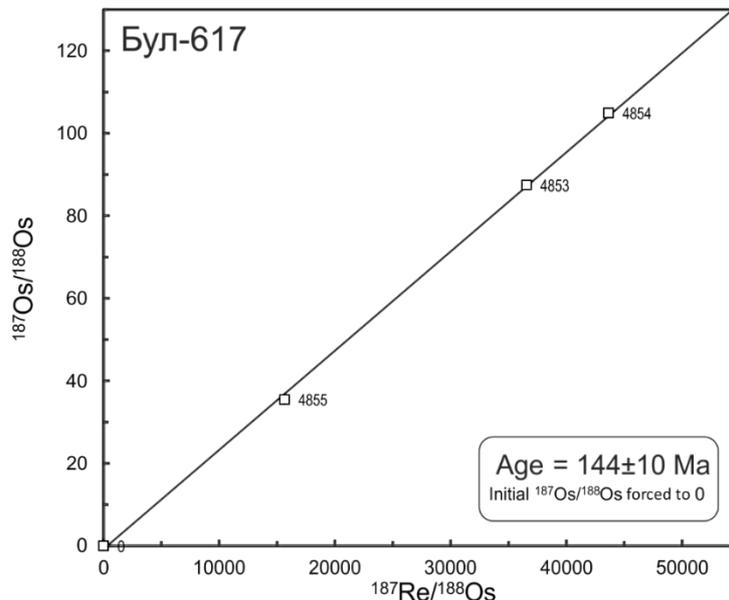


Рис. 2. Изохронная Re-Os диаграмма для пробы молибденита Булуктаевского месторождения
Fig. 2. Isochronic Re-Os diagram for molybdenite sampling material of the Buluktai deposit

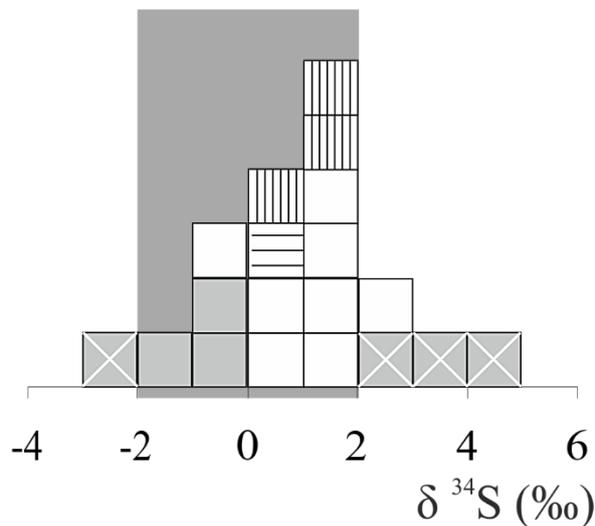
Таблица 3

Изотопный состав серы Булуктаевского месторождения

Table 3

Isotopic composition of sulfur from the Buluktai deposit

Этап	Номер пробы	Минерал	$\delta^{34}\text{S} \text{‰}_{\text{CDT}}$
Молибденовый	Бл-26	Молибденит	-2,7
	Бул-55		3,26
	66а		2,84
	64а		4,2
	230/1-53	Пирит	-1,1
	Бл-1а		-0,45
	230/394		-0,61
Вольфрамовый	Бул-1	Пирит	1,2
	230		1,75
	230/с-х-1а		0,7
	230-18-20		0,5
	252/16		-0,1
	1089-76		2,19
	1087		1,81
	1087а		1,8
	230/501		Галенит
	230/с-х-1	Сфалерит	0,4
	Бл-2		1,5
	230/501а		2



Молибденовый этап: Молибденит Пирит
 Вольфрамовый этап: Галенит Сфалерит Пирит

Рис. 3. Диаграмма изотопных составов сульфидной серы ($\delta^{34}\text{S}\text{‰}_{\text{CDT}}$) Булуктаевского месторождения

Заштриховано поле мантийного источника серы

Fig. 3. Diagram of the isotopic compositions of sulfide sulfur ($\delta^{34}\text{S}\text{‰}_{\text{CDT}}$) of the Buluktai deposit

The field of mantle sulfur is shaded

Изотопный состав кислорода. Результаты анализов изотопных составов кислорода молибденового, вольфрамового и пострудного этапов представлены в табл. 4 и на рис. 4. Кислород их четко разделяется на две группы. В одну из них входят начальные более высокотемпературные ассоциации, включающие берилл и мусковит. Это грейзен и слюдяные оторочки на контактах рудных жил. Составы их, так же, как рассчитанные значения $\delta^{18}\text{O}$ равновесной с ними флюидной фазы, близки к значениям мантийного источника (рис. 4, 5). Вторую группу представляют минералы рудных стадий. Кварц как молибденового, так и вольфрамового этапа заметно обогащен тяжелым кислородом (см. табл. 4). Состав кислорода флюидов, равновесных с этим минералом (см. рис. 5), фиксирует обогащенность легким изотопом. Легким кислородом обогащены и флюиды, рав-

новесные с гюбнеритом, шеелитом, хлоритом. Изотопный состав кислорода и углерода в анкерите попадает в квадрат PIC.

Обсуждение

Результат Re-Os датирования по молибдениту подтвердил предположение о позднемезозойском возрасте оруденения. Он заметно отличается от возраста гранитов, с которым связывается месторождение. Полученное значение близко с Re-Os возрастом Ореkitканского молибденового месторождения ($142,2 \pm 0,8$ млн лет [25]) и Гуджирских гранитов Джидинского молибден-вольфрамового месторождения (120–125 млн лет [26, 27]). Из известных данных по геохронологии [9] (143 ± 4 млн лет) только граниты близки к возрасту руд. Полученные данные не согласуются с предположением [2] о позднепалеозойском возрасте оруденения.

Таблица 4

Изотопный состав кислорода, водорода и углерода в минералах Булуктаевского месторождения

Table 4

Isotopic composition of oxygen, hydrogen and carbon in the minerals of the Buluktai deposit

Этап	Минерал	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}_{\text{VSMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}_{\text{PDB}}$	$\delta\text{D}\text{‰}_{\text{VSMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}_{\text{fluid}}$	T, °C
Молибденовый	Мусковит	5,6	–	–	5,9	430
		5,9	–	-144,3	6,2	430
	Берилл	6,7	–	–	7,1	340
	Кварц	9,1	–	–	3,3	340
		7,2	–	–	1,4	340
		8,3	–	–	2,5	340
		9,3	–	–	3,5	340
Вольфрамовый	Берилл	6,4	–	–	6,3	310
	Кварц	8,9	–	–	2,2	310
		8,1	–	–	1,4	310
		7,9	–	–	1,2	310
	Гюбнерит	-2,1	–	–	-0,2	310
		-3,72	–	–	-1,82	310
	Шеелит	0,9	–	–	-1,8	200
Анкерит	7,54	-4,99	–	–	–	
Пострудный	Хлорит	2,6	–	–	-1,4	150

Примечание. При расчете состава кислорода флюидов использованы температуры термобарогеохимического изучения [7].

Note. The temperatures of the thermobarogeochemical study were used to calculate the fluid oxygen composition [7].

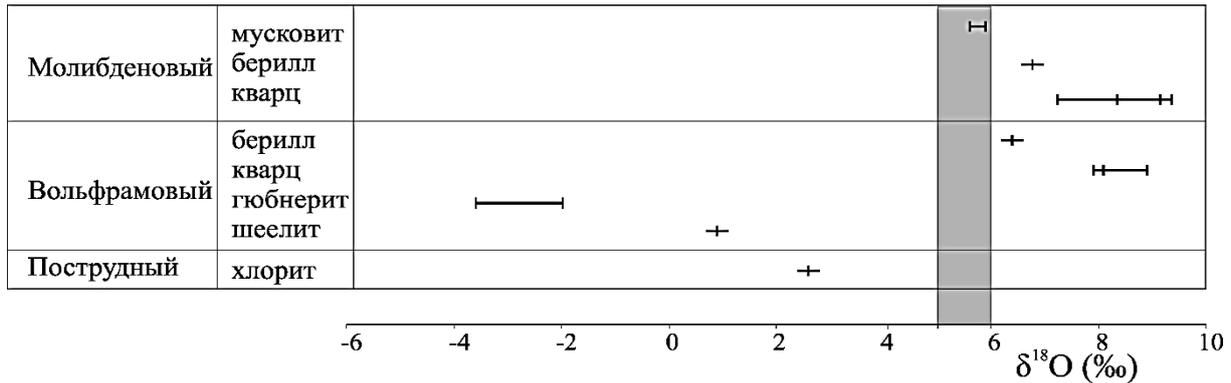


Рис. 4. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}\text{‰VSMOW}$) в минералах Булуктайского месторождения
 Fig. 4. Isotopic composition of oxygen ($\delta^{18}\text{O}\text{‰VSMOW}$) in the minerals of the Buluktai deposit

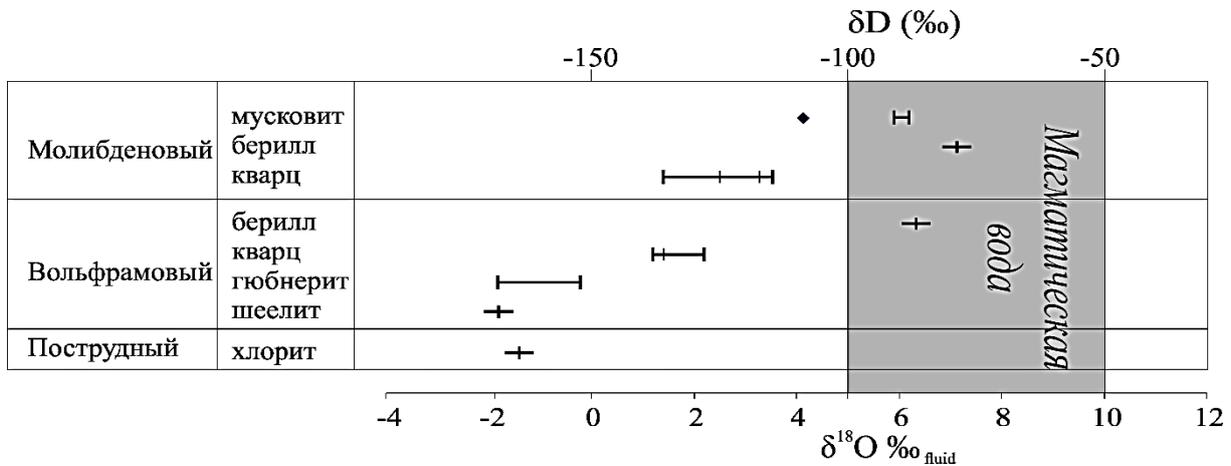


Рис. 5. Изотопные составы кислорода ($\delta^{18}\text{O}\text{‰fluid}$) и водорода ($\delta\text{D}\text{‰VSMOW}$) во флюидах Булуктаевского месторождения
 Fig. 5. Isotopic compositions of oxygen ($\delta^{18}\text{O}\text{‰fluid}$) and hydrogen ($\delta\text{D}\text{‰VSMOW}$) in the fluids of the Buluktai deposit

По данным анализа изотопных составов сульфидной серы отчетливо фиксируется ее мантийное происхождение. При этом отмечается заметное обогащение тяжелым изотопом в молибдените относительно других сульфидов. Подобные мантийные метки наблюдаются и на других молибденовых и вольфрамовых месторождениях Джидинского рудного узла (Первомайское, Инкурское, Холтосонское и Орекитканское) [28, 29].

Изотопный состав кислорода указывает на участие мантийного и корового вещества в продуктах рудообразования. При этом мантийный источник фиксируется на ранних этапах рудообразования, а коровый преобладал при формировании гидротермалитов. Последнее

подтверждается расчетом состава кислорода во флюиде, равновесном с рудообразующими минералами, показывающими (см. рис. 5) обогащенность его легким кислородом. Метеорный источник воды зафиксирован и в хлорите, завершающем процесс гидротермального минералообразования. Существенная деплетированность дейтерием гидроксильной воды в мусковите также подтверждает вовлечение в рудообразующий процесс воды метеорного источника.

О глубинном происхождении углекислоты свидетельствуют составы кислорода и углерода в анкерите из трубчатого тела, лежащие в квадрате PIC. Они подобны составам кислорода и углерода в карбонатах вольфрамоносных жил

Джидинского рудного поля [28].

Выводы

1. Методом изотопного Re-Os анализа молибденита установлен позднемезозойский возраст молибденового оруденения Булуктаевского месторождения.

2. Комплексное изотопное изучение минералов свидетельствует о том, что в формировании оруденения участвовало вещество мантийного источника, а в процесс рудообразования были вовлечены флюиды метеорного происхождения.

Библиографический список

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

2. Гордиенко И.В., Гороховский Д.В., Смирнова О.К., Ланцева В.С., Бадмацыренова Р.А., Орсов Д.А. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 1. С. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>.

3. Коржинский А.Ф., Фрацкая Е.В. О позднем выделении молибденита на Булуктаевском месторождении Юго-Западного Забайкалья // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. 1958. № 6. С. 46–53.

4. Вахромеев С.А., Иньшин Е.Д., Корятова Д.М. О геолого-структурных и генетических особенностях Булуктаевского молибдено-вольфрамового месторождения // Записки Восточно-Сибирского отделения Всесоюзного минералогического общества. Иркутск. 1962. Вып. 3. С. 19–34.

5. Туговик Г.И. Стадии гидротермальной минерализации и генезис молибдено-вольфрамовых месторождений Джидинского рудного узла // Геология и геофизика СО АН СССР. 1964. № 2. С. 93–104.

6. Рипп Г.С. Новые данные о стадийности в формировании Булуктаев-

ского молибдено-вольфрамового месторождения // Материалы по геологии и полезным ископаемым Бурятской АССР. 1966. Вып. X. С. 155–168.

7. Kosals Ya.A., Dmitriyeva A.N. Sequences and temperatures in formation of the Bulukhtay molybdenum-tungsten deposit (Southwestern Transbaykal) // International Geology Review. 1973. Vol. 15. № 1. P. 25–30.

8. Батурина Е.Е., Рипп Г.С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья. М.: Наука, 1984. 152 с.

9. Бузкова Н.Г. Новые данные о соотношении гранитоидного магматизма с эндогенным оруденением (на примере Булуктаевского массива в Западном Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338. № 6. С. 793–797.

10. 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. № 54. P. 1353–1357.

11. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates // Earth and Planetary Science Letters. 1993. № 120. P. 247–263.

12. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. № 57. P. 1079–1091.

13. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in wolframite // European Journal of Mineralogy. 1992. № 4. P. 1331–1335.

14. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // Geochemical Journal. 1999. № 33.

P. 109–126.

15. Wenner D.B., Taylor H.P. Jr. Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation between coexisting serpentine and magnetite // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1971. № 32. P. 165–185.

16. 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 // *Chemical Geology*. 1993. № 103. P. 227–234.

17. Гриненко В.А. Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // *Журнал неорганической химии*. 1962. Т. 7. С. 578–582.

18. Крымский Р.Ш., Сергеев Д.С., Брюгманн Г.Э., Шевченко С.С., Антонов А.В., Беляцкий Б.В., Капитонов И.Н., Сергеев С.А. Опыт изучения изотопного состава осмия и распределения элементов платиновой группы в перидотитах литосферной мантии Восточной Антарктиды // *Региональная геология и металлогения*. 2011. № 46. С. 51–60.

19. Birck J.L., Barman M.R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples // *Geostandards Letters*. 1997. Vol. 20. № 1. P. 19–27.

20. Paliulionyte V., Meisel Th., Ramming P., Kettisch P. High pressure asher digestion and an isotope dilution-ICP-MS method for the determination of platinum-group element concentrations in chromitite reference materials CHR-Bkg, GAN Pt-1 and HNH // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2006. Vol. 30. P. 87–96.

21. Туговик Г.И. Эксплозии и рудный процесс. М.: Недра, 1974. 208 с.

22. Жамсран М., Лхамсурен Ж., Оболенский А.А., Бадамгарав Ж., Батжаргал Ш., Оболенская Р.В., Тумэнбаяр Б., Цоодол Б., Шийтэр Н. Металлогения Монгольской Национальной Республики (флюорит). Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1986. 48 с.

23. Булнаев К.Б. Флюоритовые месторождения Западного Забайкалья (металлогенический анализ). Новосибирск: Наука, 1976. 128 с.

24. Иванова А.А. Флюоритовые месторождения Восточного Забайкалья: условия формирования и закономерности размещения. М.: Недра, 1974. 208 с.

25. Mironov A., Stein H., Zimmerman A., Yang G. Re-Os dating of the Orekitkan molybdenum deposit (Russia) // *Understanding the genesis of ore deposits to meet the 21st century, 12th Quadrennial IAGOD Symposium*. Vol. 1. File 065. Moscow, 21–24 August 2006.

26. Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Мухин В.Н., Сулова С.В., Платова Е.В., Большакова Т.В., Шеломенцева Т.И. Объяснительная записка листа М-48 – Улан-Удэ, серия Алдано-Забайкальская. СПб.: Министерство природных ресурсов России, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. 276 с.

27. Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.В., Иванова Г.Ф. Rb-Sr геохронология процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Mo месторождение, Западное Забайкалье // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 360. № 4. С. 537–740.

28. 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. конф. с междунар. уч. Вып. 9. Томск, 28 ноября – 2 декабря 2017 г. Томск, 2017. С. 371–375.*

29. Рипп Г.С. Геохимия эндогенного оруденения и критерии прогноза в складчатых областях. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.

References

1. Dondokov Z.B.-D., Potapov L.V., Kislov E.V. The mineral resource sector in the Republic of Buryatia: current state and further development. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2015, no. 6, pp. 43–51. (In Russian).
2. Gordienko I.V., Gorokhovskii D.V., Smirnova O.K., Lantseva V.S., Badmatyrenova R.A., Orsoev D.A. Dzhida ore district: geology, structural and metallogenic regionalization, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecast, and outlook for development. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2018, vol. 60, no. 1, pp. 3–37. <https://doi.org/10.7868/S001677701801001X>. (In Russian).
3. Korzhinskii A.F., Fratskaya E.V. On the late release of molybdenite at the Bulukhtai deposit of the South-Western Transbaikalia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences], 1958, no. 6, pp. 46–53. (In Russian).
4. Vakhromeev S.A., In'shin E.D., Korytova D.M. On the geological-structural and genetic features of the Bulukhtai Mo-W deposit. *Zapiski Vostochno-Sibirskogo otdeleniya Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the East-Siberian Department of the All-Russian Mineralogical Society]. Irkutsk, 1962, issue 3, pp. 19–34.
5. Tugovik G.I. Hydrothermal mineralization stages and genesis of molybdenum-tungsten deposits of the Dzhida ore cluster. *Geologiya i geofizika SO AN SSSR* [Geology and Geophysics SB AS USSR], 1964, no 2, pp. 93–104. (In Russian).
6. Ripp G.S. *Novye dannye o stadiinosti v formirovanii Bulukhtayevskogo molibdeno-vol'framovogo mestorozhdeniya* [New data on staging in the formation of the Bulukhtai Mo-W deposit]. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Buryatskoi ASSR* [Materials on Geology and Minerals of the Buryat ASSR], 1966, issue X, pp. 155–168. (In Russian).
7. Kosals Ya.A., Dmitriyeva A.N. Sequences and temperatures in formation of the Bulukhtay molybdenum-tungsten deposit (Southwestern Transbaikalia). *International Geology Review*, 1973, vol. 15, no. 1, pp. 25–30.
8. Baturina E.E., Ripp G.S. *Molibdenovye i vol'framovye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaikal'ya* [Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia]. Moscow: Nauka Publ., 1984, 152 p. (In Russian).
9. Buzkova N.G. New data on granitoid magmatism and endogenic mineralization relationship (on example of the Bulukhtai massif in the Western Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1994, vol. 338, no. 6, pp. 793–797. (In Russian).
10. Sharp Z.D. A laser-based micro-analytical method for the in-situ determination of ox-ygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, no. 54, pp. 1353–1357.
11. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, no. 120, pp. 247–263.
12. Zheng Y.F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, no. 57, pp. 1079–1091.
13. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in wolframite. *European Journal of Mineralogy*, 1992, no. 4, pp. 1331–1335.
14. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochemical Journal*, 1999, no. 33, pp. 109–126.
15. Wenner D.B., Taylor H.P. Jr. Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fractionation

between coexisting serpentine and magnetite. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1971, no. 32, pp. 165–185.

16. 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. Chemical Geology, 1993, no. 103, pp. 227–234.

17. Grinenko V.A. Sulfur dioxide preparation for isotopic analysis. Zhurnal neorganicheskoi khimii [Russian Journal of Inorganic Chemistry], 1962, vol. 7, pp. 578–582. (In Russian).

18. Krymskii R.Sh., Sergeev D.S., Bryugmann G.E., Shevchenko S.S., Antonov A.V., Belyatskii B.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. Experience of studying the isotopic composition of osmium and the distribution of platinum group elements in the peridotites of the lithospheric mantle of East Antarctica. Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny], 2011, no. 46, pp. 51–60. (In Russian).

19. Birck J.L., Barman M.R., Campas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples. Geostandards Letters, 1997, vol. 20, no. 1, pp. 19–27.

20. Paliulionyte V., Meisel Th., Ramming P., Kettisch P. High pressure asher digestion and an isotope dilution-ICP-MS method for the determination of platinum-group element concentrations in chromitite reference materials CHR-Bkg, GAN Pt-1 and HHH. Geostandards and Geoanalytical Research, 2006, vol. 30, pp. 87–96.

21. Tugovik G.I. *Eksplozii i rudnyi protsess* [Explosions and the ore process]. Moscow: Nedra Publ., 1974. 208 p. (In Russian).

22. Zhamsran M., Lkhamsuren Zh., Obolenskii A.A., Badamgarav Zh., Batzharгал Sh., O6olenskaya R.V., Tumenbayar B., Tsoodol B., Shiiter N. *Metallogeniya Mongol'skoi Natsi-onal'noi Respubliki (flyuorit)* [Metallogeny of the Mongolian National Republic (Fluorite)]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 48 p. (In Russian).

23. Bulnaev K.B. *Flyuoritovye mestorozhdeniya Zapadnogo Zabaikal'ya (metallogenicheskii analiz)* [Fluorite deposits of the Western Transbaikalia: metallogenic analysis]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976, 128 p. (In Russian).

24. Ivanova A.A. *Flyuoritovye mestorozhdeniya Vostochnogo Zabaikal'ya: usloviya formirovaniya i zakonomernosti razmeshcheniya* [Fluorite deposits of the Eastern Transbaikalia: formation conditions and distribution patterns]. Moscow: Nedra Publ., 1974, 208 p. (In Russian).

25. Mironov A., Stein H., Zimmerman A., Yang G. Re-Os dating of the Orekitkan molybdenum deposit (Russia). Understanding the genesis of ore deposits to meet the 21st century, 12th Quadrennial IAGOD Symposium. Vol. 1, file 065. Moscow, 21–24 August 2006.

26. Platov V.S., Savchenko A.A., Ignatov A.M., Gorokhovskii D.V., Shor G.M., Alekseenko V.D., Mukhin V.N., Suslova S.V., Platova E.V., Bol'shakova T.V., Shelomentseva T.I. Ob'yasnitel'naya zapiska lista M-48 – Ulan-Ude, seriya Aldan-Zabaikal'skaya) [Explanatory note of the M-48 - Ulan-Ude, Aldan-Transbaikalian series sheet. Ministry of Natural Resources of Russia, Cartography Factory VSEGEI (St. Petersburg)]. Saint-Petersburg: Ministry of Natural Resources of Russia, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2009, 276 p. (In Russian).

27. Chernyshev I.V., Gol'tsman Yu.V., Bairova E.V., Ivanova G.F. Rb-Sr geochronology of the processes of consecutive formation of granites, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhida W-Mo deposit, Western Transbaikalia. Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences], 1998, vol. 360, no. 4, pp. 537–740. (In Russian).

28. Ripp G.S., Smirnova O.K., Izbrodin I.A., Lastochkin E.I., Rampilov M.O., Posokhov V.F. *K probleme istochnikov veshchestva mestorozhdenii Dzhidinskogo rudnogo polya (po dannym izotopnykh*

issledovanii) (Zapadnoe Zabaikal'e) [To the problem of matter sources of Dzhida ore field deposits (according to isotopic research data) (Western Transbaikalia)]. *Materialy IX Vseros. konf. s mezhdunar. uch. "Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov"* [Materials of IX All-Russian Conference with International Participation "Petrology of igneous and

metamorphic complexes"]. Issue. 9. Tomsk, 28 November – 2 December 2017. Tomsk, 2017, pp. 371–375. (In Russian)

29. Ripp G.S. *Geokhimiya endogenogo orudneniya i kriterii prognoza v skladchatykh oblastiakh* [Geochemistry of endogenous mineralization and forecasting criteria in folded areas]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 192 p. (In Russian).

Критерии авторства

Савченко А.А., Рипп Г.С., Избродин И.А., Посохов В.Ф. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Savchenko A.A., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Posokhov V.F. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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