

УДК 553.411(571.5)

ОСОБЕННОСТИ РУДООБРАЗОВАНИЯ БАРУН-ШИВЕЙНСКОГО ВОЛЬФРАМОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Абрамов Баир Намжилович,
b_abramov@mail.ru

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
Россия, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032.

Актуальность исследования состоит в необходимости расширения минеральной сырьевой базы России. Восточное Забайкалье является одним из старейших горнорудных регионов страны. Барун-Шивейское месторождение относится к ртутно-сурьмяно-вольфрамовой рудной формации. Для региона остро стоит вопрос о поисках и обнаружении новых рудных месторождений. Для успешного выполнения такой задачи необходимы данные детального изучения уже известных рудных месторождений, которые могут быть использованы для разработки научно обоснованных критериев поиска рудных месторождений и прогноза оруденения. К числу таких данных относится определение источников рудоносных расплавов и условий формирования месторождений ртутно-сурьмяно-вольфрамовой рудной формации.

Целью исследования является доказательство участия в рудообразовании нескольких рудоносных источников с разными характеристиками на основании данных изотопного состава кислорода рудоносного кварца и серы сульфидов, а также сравнительного анализа элементного состава кварц-вольфрамитовых руд Барун-Шивейнского месторождения с элементным составом руд кварц-вольфрамитовых руд вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья.

Объектом исследования является Барун-Шивейское вольфрамовое месторождение, расположенное в Восточном Забайкалье.

Методы. Для определения элементного состава пород использовался рентгенфлуоресцентный метод и стандартный химический анализ в Геологическом институте Сибирского отделения Российской Академии Наук (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ). Определение изотопного состава кислорода проводилось в аналитическом центре (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) с использованием установки MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области, в присутствии реагента BrF₅ по методу Z.D. Sharp (1990). Изучение состава минералов производилось в ГИН СО РАН на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (Oxford Instruments) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда меньше 0,5 нА, размере зонда 0,1 мкм. В режиме анализа время набора спектров составило 50 с. Изучение изотопного состава серы сульфидов проведено в центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты. Изотопный состав кислорода во флюиде в равновесии с кварцем продуктивного этапа при 210–150 °С составляет 4,25–14,22 ‰, что соответствует водному флюиду магматической природы. Установлен изотопный состав серы киновари, заключительной рудной стадии формирования месторождения, соответствующий мантийным значениям. Узкий интервал значений серы киновари $\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT от –3,5 до –4,5 указывает на их единый источник. Впервые на месторождении определено наличие редких минералов киновари (метаценобарит, кордероит), образующихся в зонах окисления ртутных месторождений при низкотемпературных условиях. Определен их элементный состав. В кварц-вольфрамитовых рудах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья, в том числе Барун-Шивейнского, выявлена тесная корреляционная связь ($r = 0,53–0,96$) с рядом элементов (As, Ta, Nb, Hf), свидетельствующая об единых источниках их формирования. Формирование руд Барун-Шивейнского месторождения проходило из разноуровневых рудоносных источников. Образование вольфрамитов происходило за счет корового источника, ртути – мантийного.

Ключевые слова:

Барун-Шивейское месторождение, вольфрамит, киноварь, изотопы кислорода и серы, мантийный источник, Восточное Забайкалье.

Введение

Барун-Шивейское ртутно-сурьмяно-вольфрамовое месторождение, расположенное в центральной части Забайкальского края, является составной частью Монголо-Охотского ртутного пояса [1]. Ртутные зоны приурочены к разломами северо-восточного простирания, которые являются составляющими Монголо-Охотского глубинного разлома. Породы, вмещающие рудные тела Барун-Шивейнского месторождения, представлены кварцитами онойской свиты (PR₂) с прослоями слюдисто-хлоритовых сланцев. Рудные тела, локализованные в зонах дробления, представлены прожилково-вкрапленными зонами с редкими кварцевыми жилами и минерализованными зонами брекчий. Характерной особенностью месторождения является отсутствие в районе месторождения магматических образований. Основной задачей исследова-

ния является установление источников оруденения с использованием изотопных данных, сравнительного анализа элементного состава руд месторождения с элементным составом руд вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья. Особенности геологического строения месторождения описаны в единичных работах [2]. Приуроченность вольфрамового оруденения к кварцитовым горизонтам онойской серии (PR₂) позволила отнести данное месторождение к стратиформному типу. Наличие в рудообразовании корового магматического и мантийного источников позволяет отнести Барун-Шивейское месторождения к числу полигенных месторождений.

Методика исследования

Аналитические исследования проведены в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ). Опреде-

ление элементного состава пород проводилось РФА методом на спектрометре ЭДПС-1, аналитик Б.Ж. Жалсараев. Состав петрогенных компонентов определялся стандартным методом «мокрой» химии. Изучение состава минералов производилось в ГИН СО РАН на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCAEnergy350 (OxfordInstruments) при ускоряющем напряжении 20 кв, токе зонда меньше 0,5 нА, размере зонда 0,1 мкм. В режиме анализа время набора спектров составило 50 с. Определение изотопного состава кислорода и вольфрама проводилось с использованием установки MIR 10-30 системы лазерного нагрева с лазером CO₂ мощностью 100 ватт и длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области, в присутствии реагента BrF₅ по методу Z.D. Sharp [3] (ГИН СО РАН г. Улан-Удэ), аналитик В.Ф. Посохов. Изотопный состав серы кинвари определен в ЦКП многоэлементных и изотопных ис-

следований СО РАН (г. Новосибирск), аналитики М.Н. Колбасова.

Краткая геологическая характеристика Барун-Шивейнского вольфрамового месторождения

Барун-Шивейское месторождение расположено в Агинско-Борщовочной структурно-формационной зоне. Месторождение приурочено к верхней части ононской свиты (PR₂). Месторождение размещено в южном крыле Барун-Шивейнской брахиантиклинали и субширотной тектонической зоне разломов, опережающей с востока Хара-Шибирский разлом северо-восточного простирания. Он проявлен зонами дробления, брекчирования и окварцевания пород. В структурах оперения Хара-Шибирского разлома локализуется Барун-Шивейское месторождение, так и находящееся к северу от него Жипкошинское сурьмяное месторождение (рис. 1). Возраст сурьмяного оруденения соответствует раннему мелу (142,5±1,5 млн лет) [4].

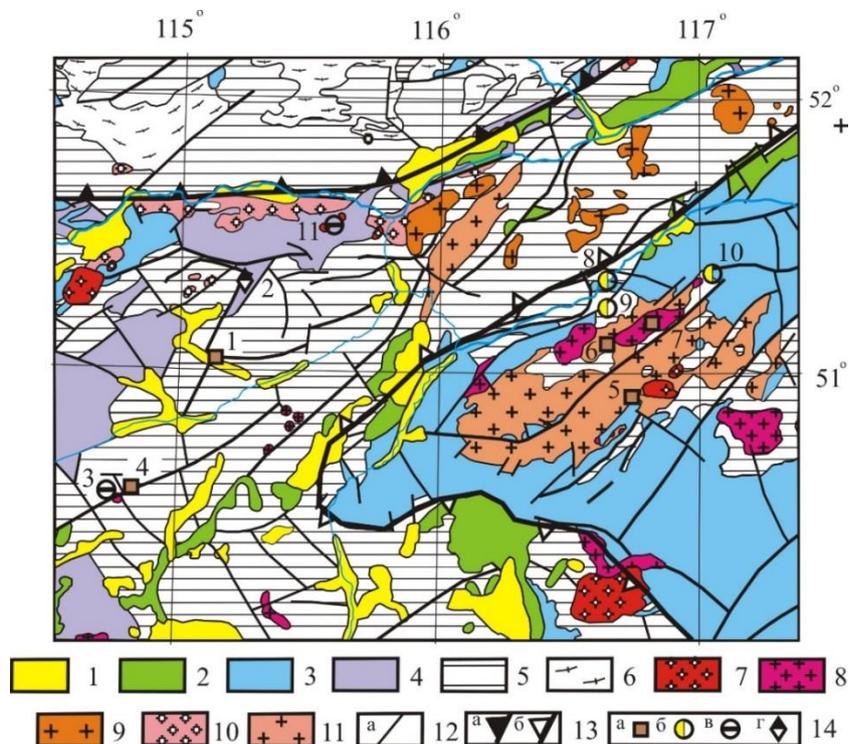


Рис. 1. Схема геологического строения центральной части Восточного Забайкалья: 1 – неоген-четвертичные отложения (N, Q); 2 – меловые отложения (K); 3 – юрские отложения (J); 4 – триассовые отложения (T); 5 – рифейские и палеозойские отложения (R, PZ); 6 – архейские стратифицированные отложения (AR); 7 – интрузии кукульбейского комплекса (J₃); 8 – интрузии амуджиканского комплекса (J_{2,3}); 9 – интрузии борщевочного комплекса (J_{2,3}); 10 – интрузии бичурского комплекса (T₃); 11 – интрузии ундинского комплекса (C); 12 – тектонические нарушения; 13 – Монголо-Охотская сутура: а) основная ветвь Монголо-Охотской сутуры, б) Ононская ветвь Монголо-Охотской сутуры; 14 – месторождения: а) вольфрама (1 – Барун-Шивейское, 4 – Спокойнинское, 5 – Антоновогорское, 6 – Букукунское, 7 – Белухинское), б) золото (8 – Балейское, 9 – Средне-Голготайское, 10 – Верхне-Алиинское), в) редких металлов (10 – Завитинское), г) сурьмы (2 – Жипкошинское)

Fig. 1. Geological structure diagram of the central part of Eastern Transbaikalia: 1 – Neogene Quaternary sediments (N, Q); 2 – Cretaceous sediments (K); 3 – Jurassic sediments (J); 4 – Triassic sediments (T); 5 – Riphean and Paleozoic sediments (R, PZ); 6 – Archean stratified sediments (AR); 7 – intrusions of kukulbey complex (J₃); 8 – intrusions of amuzhikansky complex (J_{2,3}); 9 – intrusions of borshevochniy complex (J_{2,3}); 10 – intrusions of bichursky complex (T₃); 11 – intrusions of undinsky complex (C); 12 – tectonic disturbances; 13 – Mongol-Okhotsky sutura: a) the main branch of Mongol-Okhotsky sutura, b) Ononsky branch of Mongol-Okhotsky sutura; 14 – deposits: a) tungsten (1 – Barun-Shiveinskoe, 4 – Spokoyininskoe, 5 – Antonovogorskoe, 6 – Bukukunskoe, 7 – Belukhinskoe), b) gold (8 – Baleyskoe, 9 – Sredne-Golgotayskoe, 10 – Verkhne-Aliinskoe), c) rare metals (10 – Zavitsinskoe), d) antimony (2 – Zhipkoshinskoe)

В Восточном Забайкалье, как и в Алтае-Саянской области, для ртутных месторождений глубинные разломы, вероятнее всего, являются рудоподводящими, а сопряженные с ними разломы второго и последующих порядков рудовмещающими [5]. Структурный контроль оруденения Барун-Шивейнского месторождения определяется приуроченностью к аллохтонной зоне надвига, имеющего амплитуду смещения пластов около 1 км [6]. Характерной особенностью гео-

логического строения месторождения является отсутствие магматических образований. Рудные тела, представленные прожилковыми зонами и редкими кварцевыми жилами, локализованы в кварцевых толщах с прослоями метаморфических сланцев. Метаморфические сланцы кварц-биотитовые, кварц-серицитовые, кварц-биотит-серицитовые. Кварциты несут следы катаклаза. Зоны тектонических брекчий часто вмещают рудные тела (рис. 2).

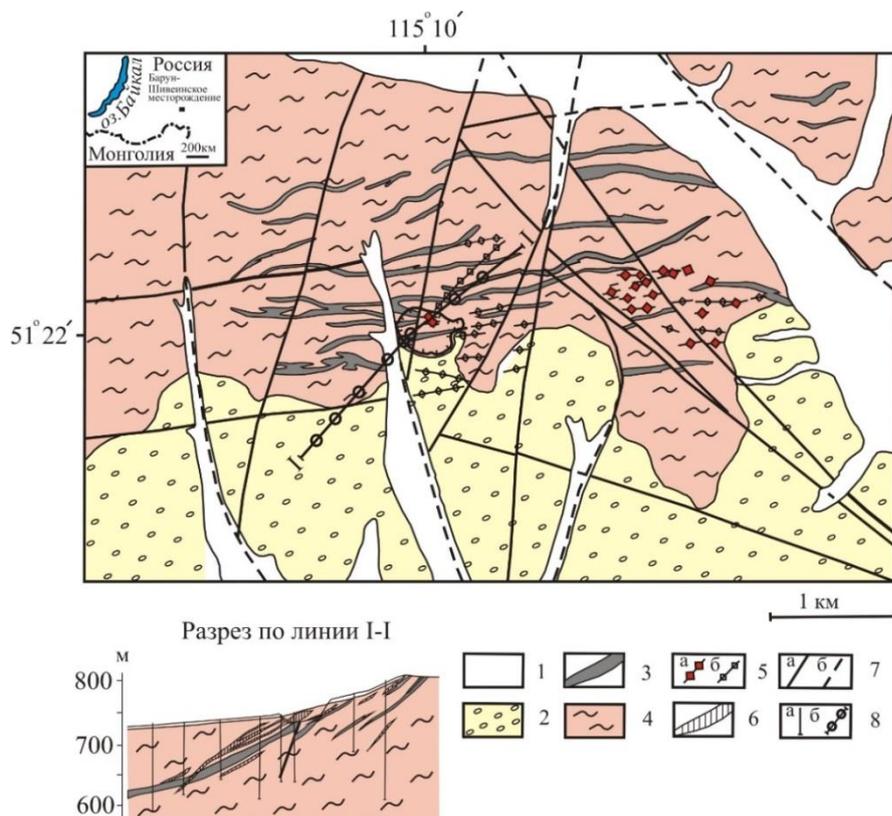


Рис. 2. Схема геологического строения Барун-Шивейнского месторождения: 1 – четвертичные отложения: пески, галечники, валуны, суглинки; 2 – плиоцен-нижнечетвертичные отложения: галечники, глины, суглинки; ононская свита (PR₃); 3 – кварциты; 4 – слюдисто-хлоритовые сланцы; 5 – рудные тела: а) установленные, б) проекции рудных тел на поверхности по скважинам; 6 – участки пород с прожилково-вкрапленной вольфрамовой минерализацией с содержанием WO₃>0,1 %; 7 – тектонические нарушения: а – установленные, б – скрытые под чехлом четвертичных отложений; 8 – разрез I-I: а) скважины, б) линии скважин

Fig. 2. Geological structure diagram of Barun-Shiveinskoe deposit: 1 – Quaternary sediments: sand, pebbles, boulders, loams; 2 – Pliocene-Lower Quaternary sediments: pebbles, clays, loams; ononsky formation (PR₃); 3 – quartzites, 4 – mica-chlorite shales; 5 – ore bodies: a) established, b) ore projections on a surface on boreholes; 6 – sites of rocks with vein and disseminated tungsten mineralization with content of WO₃>0,1 %; 7 – tectonic infringements: a – established, b – hidden under a cover of quaternary adjournment; 8 – cut I-I: a) boreholes, b) lines of boreholes

В пределах месторождения выделяются три основных кварцитовых горизонта мощностью 30–80 м, разделенные сланцами мощностью 30–60 м (рис. 2). Кварциты до 80–85 % сложены кварцем, реже отмечается калиевый полевой шпат, диопсид. Геохимические особенности отложений ононской свиты указывают на их образование в обстановке активной континентальной окраины [7]. Петрохимические особенности кварцитов и метаморфогенных сланцев на диаграмме ГМ – (Na₂O+K₂O) указывают на соответствие кварцевым песчаникам пассивной и активной континентальной окраины (рис. 3).

На месторождении при проведении геологоразведочных работ и тематических исследований выделено несколько стадий минералообразования. Перерывы между стадиями сопровождался частичным брекчированием ранее образованных руд.

Первая стадия характеризуется образованием молочно-белого кварца с редкой крупной вкрапленностью киновари, ферберита и антимонита. Кварц образует скопления маломощных (2–3 см) прожилков и небольшие жилы (до 10 см), развитые по слоистости пород. Во вторую стадию происходило образование гребенчатого кварца с включениями антимонита. Кварц с включениями антимонита цементирует об-

ломки кварцитов и кварца первой стадии. Из рудных минералов наиболее распространены антимонит, реже отмечаются ферберит, киноварь, пирит. Для данной стадии характерно наличие полосчатых руд, где мономинеральные полосы антимонита чередуются с полосами ферберита. Мощность таких полос 3–6 см.

В третью стадию происходило отложение основной массы ферберитовых руд с подчиненным количеством антимонита, киновари, сфалерита. Формирование руд данной стадии имеет наиболее широкое распространение на месторождении. Образование рудных минералов сопровождается формированием прожилков светло-серого гребенчатого кварца. Отмечается следующая последовательность выделения рудных минералов: антимонит–ферберит–киноварь.

Четвертая стадия характеризуется образованием тонких ветвящихся прожилков кварца с основным количеством киновари и незначительным количеством антимонита. В пятую стадию происходило формирование безрудного кварца, секущего руды всех предыдущих стадий.

Для Барун-Шивейнского месторождения характерны главным образом брекчиевые текстуры с подчиненным количеством полосчатых и прожилковых. Наиболее распространенными рудными минералами являются: ферберит, антимонит, киноварь, реже отмечаются пирит, халькопирит, сфалерит, арсенопирит, метацинобарит, кордероит. Окисленные рудные минералы представлены ферротунгститом, мартитом, лимонитом. В единичных пробах содержание вольфрама в рудах достигает 30 % (табл. 1). Среднее содержание WO_3 в рудах составляет 0,59 %. На основном участке месторождения выделен рудный што-

кверк размером 650×10×60 м и несколько минерализованных зон мощность от 0,5 до 10 м.

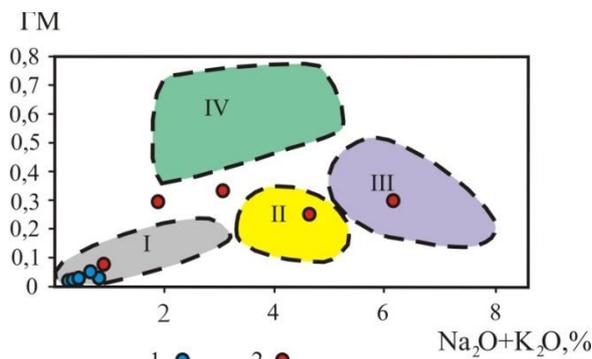


Рис. 3. Диаграмма ГМ – Na_2O+K_2O , %. Отложения ононской свиты (PR₂): 1 – кварциты, 2 – метаморфические сланцы. Кластеры песчано-сланцевых образований [8]: I – кластер мономитовых и II – мезомитовых кварцевых песчаников пассивной континентальной окраины, III – кластер аркозовых песчаников активной континентальной окраины и IV – кластер древней коры выветривания по магнетитно-железистым основным или ультраосновным породам. ГМ (гидролизатный модуль) = $(TiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3+FeO+MnO)/SiO_2$

Fig. 3. GM diagram – Na_2O+K_2O , %. Ononsky formation sediments (PR₂): 1 – quartzites, 2 – metamorphic oil shale. Clusters of sand and shale formations [8]: I – cluster of monomitic and II – cluster of mesomitic quartz sandstones of the passive continental margin, III – cluster of arkose sandstones of the active continental margin and IV – cluster of ancient weathering crust by magnetite-iron basic or ultrabasic rocks. GM (hydrolysat module) = $(TiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3+FeO+MnO)/SiO_2$

Таблица 1. Элементный состав руд Барун-Шивейнского вольфрамового месторождения, г/т

Table 1. Elemental composition of ores of the Barun-Shiveinsky tungsten deposit, g/t

№ проб Sample no.	W	Cu	Zn	Pb	As	Hg	Sb	Rb	Sr	Zr	Nb	Hf	U	Th
Кварц с вольфрамитом/Quartz with wolframite														
393	341	71	15	35	33	21	<5	11	76	23	4,2	–	–	2,8
393-1	605	110	23	9	82	7	7,4	12	21	38	5,3	3,9	–	4,7
394	434	64	22	39	97	–	29	2,6	69	34	4,5	–	–	2,6
395	99	435	191	160	2290	1159	913	3	1518	50	5,6	3,9	–	–
396	635	32	9,3	15	43	2,5	–	5,8	29	19	2,5	–	–	1,2
397	396	28	27	30	198	9,0	132	10,6	59	26	3,5	9,0	1,4	2,0
399	399	75	21	12	57	45	10	9,3	163	22	3,1	–	–	2,5
400	382	41	30	21	47	–	–	2,5	93	44	2,6	–	3,5	5,7
401	30000	34	112	36	1086	42	125	12	867	31	5,8	16,8	1,6	6,0
403	1250	80	29	16	125	–	12	13	117	34	5,7	–	–	4,9
406	330	5,2	11	14	178	5,8	55	5,5	146	22	2,2	–	–	–
406-1	346	16	9	11	249	10	64	6,3	470	24	3,5	–	–	–
414	565	122	16	7	57	77	6,7	2	53	23	3,0	–	–	2,7
Рудные брекчи/Ore breccias														
408	431	157	128	19	579	83	93	7	528	58	4,7	–	–	–
408-1	488	45	34	13	133	57	24	7,5	86	31	2,7	–	–	–
409	365	50	22	18	108	–	9	7,4	68	31	4,0	–	–	3,1
413	326	61	39	13	967	2089	51	9	240	29	3,6	4,7	–	–
391	290000	12	<3	31	3409	–	727	13	1197	40	15,3	–	–	<5
410	350000	–	–	24	3847	702	942	–	3	87	24	475	–	–
Кварц с киноварью/Quartz with cinnabar														
392	1087	25	9,2	4,7	70	3250	28	3	9	16	2,4	6,6	–	–
407	299	14	16	13	875	894	171	6,0	485	36	3,4	–	–	–
407-1	388	332	25	13	710	332	97	4,0	825	30	3,2	–	–	–
407-2	385	5	8	22	128	903	205	9,0	305	24	3,0	–	–	–
411	4281	42	72	20	51	105000	30	15	695	16	2,9	13,5	–	–

Изучение рудных минералов на электронном микроскопе выявило наличие редких минералов киновари (метациннобарит, кордероит), образующихся в зонах окисления ртутных месторождений при низкотемпературных условиях (табл. 2).

Установлено, что формирование кварц-ферберитовых прожилков происходило при температурах 150–210 °С из хлоридно-углекислых растворов, содержащих до 5 мас. % CO₂. Образование заключительной кварц-киноварной стадии рудообразования происходило при температурах ниже 130 °С [9]. Для изучения изотопного состава кислорода были отобраны образцы кварца из кварцево-сульфидных руд. Изотопный состав δ¹⁸O в кварце изменяется от 19,6 до 23,9 ‰ (табл. 3). Изотопный состав кислорода гидротермального флюида рассчитан в системе кварц-вода по уравнению δ¹⁸O_{кварц} - δ¹⁸O_{H₂O} = 3,34 (10⁶/T²) - 3,31. Где T – температура по Кельвину [10]. Рассчитанный изотопный состав кислорода во флюиде в равновесии с кварцем продуктивного этапа 210–150 °С меняется от +4,25 до +14,22 ‰. Часть полученных значений соответствуют интервалу, характерному для водных флюидов магматической природы (δ¹⁸O = +5,5...+9,5 ‰) [11–13] (табл. 3). Значения, превышающие δ¹⁸O...+9,5 ‰, обусловлены поступлением метаморфогенных вод на заключительном этапе эволюции рудообразующей системы.

Изотопный состав серы киновари соответствует мантийным значениям. Узкий интервал значений δ³⁴S, ‰ CDT от -3,5 до -4,5 указывает на единый источник их формирования (табл. 4).

Таблица 2. Химический состав рудных минералов Барун-Шивейнского месторождения

Table 2. Chemical composition of ore minerals of Barun-Shiveinskoe deposit

Ферберит (FeWO ₄)/Ferberite (FeWO ₄)					
№ образца Sample no.	O	Mn	Fe	W	Сумма Total
391	17,85	4,17	14,87	63,52	100,4
-/-	18,13	3,99	14,57	61,16	97,85
-/-	18,32	3,77	14,95	61,84	98,88
-/-	17,12	2,92	15,48	61,84	97,35
-/-	16,97	3,05	15,27	62,15	97,44
411	16,93	4,41	14	61,48	96,83
-/-	17,62	3,61	14,98	62,21	98,41
410	17,38	5,21	13,93	61,1	97,61
-/-	17,01	4,82	13,84	63,43	99,09
Кордероит (Hg ₃ S ₂ Cl ₂)/Corderoite (Hg ₃ S ₂ Cl ₂)					
411	O	S	Cl	Hg	Сумма Total
-/-	4,32	10,67	10,17	86,84	112
-/-	6,9	10,4	9,36	81,82	108,49
-/-	7,62	11,31	5,2	74,21	98,33
Метациннобарит (HgS)/Metacinnabarite (HgS)					
411	S	Cl	Hg	Сумма Total	
-/-	16,69	0,42	83,96	101,07	
-/-	16,87	0	87,89	104,75	
-/-	16,76	0	84,99	101,76	
-/-	16,22	0	85,54	101,77	
-/-	16,74	0	84,11	100,85	

Изотопный состав серы во флюиде магматического источника составляет 0–5 ‰ [14]. Установлено, что источники ртути в сравнении с источниками

вольфрама и сурьмы имеют более глубинное происхождение. Образование ртутной минерализации в зонах глубинных нарушений связывается с процессами дегазации Земли [15]. Севернее Барун-Шивейнского месторождения к структуре Хара-Шибирского глубинного разлома приурочено Жипкошинское сурьмяное месторождение (рис. 1).

Таблица 3. Изотопный состав кислорода и расчетный состав сосуществующего с ним флюида Барун-Шивейнского месторождения

Table 3. Oxygen isotope composition and estimated composition of Barun-Shiveinskoe deposit fluid coexisting with oxygen

Номер проб Sample no.	Состав руд Ore composition	Минерал Mineral	δ ¹⁸ O, ‰ SMOW	Изотопный состав флюида при различных температурах Fluid isotopic composition at different temperatures, δ ¹⁸ O _{H₂O}	
				210 °С	150 °С
392	Вольфрамит Wolframite	Кварц Quartz	22,8	11,82	7,45
393	-/-	Кварц	22,3	11,32	6,95
394	-/-	-/-	22,8	11,82	7,45
395	-/-	-/-	24,1	13,12	8,75
396	-/-	-/-	22,9	11,92	7,55
397	-/-	-/-	22,3	11,32	8,35
398	-/-	-/-	23,7	12,72	9,85
399	-/-	-/-	25,2	14,22	6,95
400	-/-	-/-	21,9	10,92	6,55
403	-/-	-/-	19,6	8,62	4,25
403-1	-/-	-/-	20,9	9,92	5,55
405	-/-	-/-	23,6	12,62	8,55
407	-/-	-/-	23,9	12,92	8,55
407-1	-/-	-/-	23,1	12,12	7,75

Таблица 4. Изотопный состав сульфидов Барун-Шивейнского и Жипкошинского месторождений

Table 4. Isotopic composition of sulfides of Barun-Shiveinskoe and Zhipkoshinskoe deposits

Номер проб Sample no.	Минерал Mineral	δ ³⁴ S, ‰ CDT
Барун-Шивейское месторождение Barun-Shiveinskoe deposit		
392	Киноварь Cinnabar	-4,3
407	-/-	-4,5
407-1	-/-	-4,2
411	-/-	-3,5
-	Антимонит [16] Antimonite	-5,2
-	Киноварь [16] Cinnabar	-6,9
Жипкошинское месторождение по [16] Zhipkoshinskoe deposit [16]		
-	Антимонит Antimonite	+3,2
-	-/-	+1,1
-	-/-	+1,5
-	-/-	+2,7

Изотопный состав серы антимонита данного месторождения близок к метеоритному стандарту (δ³⁴S, ‰ +1,1 – +3,5). Эти данные свидетельствуют о наличии мантийного источника в формировании Барун-

Шивейнского и Жипкошинского месторождений. В Восточном Забайкалье образование вольфрамовых месторождений связывается с процессами формирования интрузий кукульбейского комплекса [16–18].

Корреляционный анализ элементного состава руд вольфрамовых месторождений Забайкалья выявил тесную связь вольфрама с рядом одних и тех же элементов (табл. 5). Эти данные свидетельствуют о близких составах рудоносных источников Барун-Шивейнского месторождения с рудоносными источ-

никами других вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья. В целом установлена тесная корреляционная связь W с Ta, Nb и As (табл. 5). При этом в рудоносных системах фторидная водно-солевая фаза является весьма эффективным экстрагентом вольфрама, в то время как Ta, Nb полностью остаются в алюмосиликатном расплаве [18]. Тантал и ниобий в рассеянной форме фиксируются в качестве изоморфной примеси в минералах титана, циркония. Гафний концентрируется в цирконах [19].

Таблица 5. Корреляционные связи вольфрама с элементами-примесями в кварц-вольфрамитовых жилах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья

Table 5. Correlations of tungsten with impurity elements in quartz-wolframite veins of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia

Месторождения Deposits	r							
	As	Hf	Nb	Ta	Hg	Sb	U	Th
Спокойнинское n=20 Spokoyninskoe	-0,01	0,74 (3,31>2,23)	0,86 (8,32 >2,23)	0,79 (4,25 >2,16)	–	-0,71	0,08	-0,89
Букукинское n=12 Bukukinskoe	0,91 (6,98>2,18)	0,80 (1,36<3,18)	0,65 (4,36 >2,20)	0,63 (2,88 >2,31)	–	-0,01	0,62	-0,45
Антоновогорское n=11 Antonovogorskoe	0,54 (1,9<2,26)	–	0,82 (4,28 >2,26)	0,58 (3,69 >2,26)	–	0,04	0,58	0,23
Барун-Шивейское n=30 Barun-Shiveinskoe	0,66 (4,62>2,0)	0,82 (2,46<2,52)	0,79 (6,88 >2,0)	0,75 (1,68 <2,77)	-0,02	0,36	-0,21	0,48

r – значение коэффициента корреляции; n – число анализов; «–» – нет данных; $T_{набл.} > T_{кр.}$ – данные соответствуют значимым.

r – correlation coefficient value; n – number of analyses; «–» – no data. $T_{набл.} > T_{кр.}$ – the data corresponds to the significant ones.

$T_{набл.} = r \times \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$, $T_{кр.}$ – T критерий Стьюдента (по уровню значимости $\alpha=0,05$ и числу степеней свободы).

$T_{набл.} = r \times \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$, $T_{кр.}$ – T Student's t-test (according the significance level $\alpha=0,05$ and the number of degrees of freedom).

Вопрос генезиса Барун-Шивейнского месторождения, а также источника вольфрама является дискуссионным. Существующие взгляды на происхождение месторождения включают по меньшей мере две концепции. Одни исследователи относят его к стратиформному типу [2], полагая, что источником металлов могут быть породы вулканогенно-осадочной толщи, другие считают, что решающий фактор рудообразования – магматическая дистилляция, которая происходила в процессе остывания интрузивного массива, создавая условия для выноса рудного компонента, содержащегося во флюидной фазе магматического расплава. Источником рудоносных растворов могли быть магматические образования, расположенные юго-восточнее месторождения. В пользу магматического источника оруденения свидетельствуют данные изотопного состава кислорода рудных жил, соответствующие флюиду магматической природы ($\delta^{18}O=+5,5...+9,5$ ‰), а также тесные корреляционные связи вольфрама с Ta, Nb и As в рудах, типичных для руд вольфрамовых месторождений Забайкалья, источниками которых являются магматические образования кукульбейского комплекса (J₃).

Наличие юго-восточнее района месторождения магматических образований доказывается гравиметрическими данными. Судя по аномалии силы тяжести, эти магматические образования погружаются на северо-запад в направлении Барун-Шивейнского месторождения [15]. Коровый источник установлен для

многих вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья [16–18].

Характерной особенностью ртутных месторождений является отсутствие четких генетических связей с магматическими очагами. Большинство ртутных месторождений являются низкотемпературными гидротермальными образованиями, удаленными от магматических очагов. Это объясняется свойствами ртути, являющейся очень подвижным элементом. Проявления ртути не находятся вблизи магматических очагов, а напротив отмечается их отгонка и рассеивание в окружающих породах [5]. В Восточном Забайкалье, по данным сейсмографических исследований, образование рудно-магматических систем связывается с воздействием в среднеюрский-раннемеловой период в переходной зоне мантии стагнированного океанического слэба на литосферу [20–22]. При этом в результате длительного воздействия мантийных потоков на нижние части литосферы были сформированы разновысотные рудоносные магматические очаги [23–25]. Вероятно, в этот период произошло образование Барун-Шивейнского месторождения. Установлена пространственная приуроченность рудных месторождений к зонам глубинных нарушений. Этим можно объяснить совмещение в рудах Барун-Шивейнского месторождения вольфрамо (коровый источник) и ртутного (мантийный источник) оруденений. Это объясняется близодновременным функционированием различных по составу и металлогенической специализации источников рудного вещества.

Заключение

Барун-Шивейское месторождение расположено к верхней части ононской свиты (PR₂). В структурном отношении оно приурочено к субширотной тектонической зоне разломов, оперяющей с востока Хара-Шибирский глубинный разлом северо-восточного простираения. По геофизическим данным наиболее вероятным источником вольфрамового оруденения были не выходящие на дневную поверхность магматические образования, расположенные юго-восточнее района месторождения. Судя по аномалии силы тяжести, эти магматические образования погружены на северо-запад в направлении Барун-Шивейского месторождения. В пользу этого магматического источника вольфрамовых руд Барун-Шивейского месторождения свидетельствует изотопный состав кислорода кварц-вольфрамовых жил, соответствующий водному флюиду магматической породы, а также сходный элемент-

ный состав кварц-вольфрамитовых жил Барун-Шивейского месторождения с другими вольфрамовыми месторождениями Восточного Забайкалья, источниками которых являются интрузии кукульбейского комплекса. Близость элементного состава кварц-вольфрамитовых жил вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья с элементным составом кварц-вольфрамитовых жил Барун-Шивейского месторождения подтверждается тесными корреляционными связями ($r > 0,5$) W с Ta, Nb. Изотопный состав серы кинвари Барун-Шивейского месторождения соответствует мантийным. В пользу мантийного источника оруденения также свидетельствуют мантийные метки изотопов антимонита Жипкошинского месторождения. Эти месторождения приурочены к зоне Хара-Шибирского глубинного тектонического разлома. Таким образом, Барун-Шивейское месторождение по условиям формирования является полиформационным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлогения Монгольской Народной Республики (ртуть) / В.А. Кузнецов, А.А. Оболенский, А.С. Борисенко, В.И. Лебедев, Р.В. Оболенская. – Новосибирск: Изд-во СО РАН (Препринт 2), 1986. – 46 с.
2. Трубачев А.И. Стратиформные руды – важнейший вид полезных ископаемых Восточного Забайкалья // Вестник Читинского государственного университета. – 2011. – № 3 (70). – С. 104–109.
3. Z Sharp. D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1990. – V. 54. – P. 1353–1357.
4. Редин Ю.О. Золоторудная минерализация Лугоканского рудного узла (Восточное Забайкалье): минеральные ассоциации, возраст, эндогенная зональность: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2015. – 21 с.
5. Оболенский А.А. Генезис месторождений ртутной рудной формации. – Новосибирск: Наука, 1985. – 193 с.
6. Барабанов В.Ф. Минералогия вольфрамитовых месторождений Забайкалье. Т. 2. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. – 360 с.
7. Литохимические характеристики и геодинамическая природа метаосадочных пород ононской и чинданской свит (Восточное Забайкалье) / Ю.В. Носкова, С.И. Дриль, С.А. Сасим, О.В. Зарубина // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2016. – Т. 18. – С. 105–127.
8. Юдович Я.Э., Кетрис. М.П. Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000. – 479 с.
9. Бергер В.И. Сурьмяные месторождения. – Л.: Недра, 1978. – 295 с.
10. Zheng Y.-F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // *Geochemical J.* – 1999. – V. 33. – P. 109–126.
11. Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 141–162.
12. Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н., Артемьев Д.А. Условия образования, состав и источники рудообразующих флюидов золото-порфирирового месторождения Большой Каран (Южный Урал) // *Литосфера*. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 397–410.
13. Александровское золоторудное месторождение (Восточное Забайкалье): источники вещества пород и руд / Б.Н. Абрамов, Ю.А. Калинин, А.А. Боровиков, Р.А. Бадмацыренова, В.Ф. Посохов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 83–95.
14. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. – N.-Y.: John Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.

15. Об источниках вещества ртутных и сурьмяных месторождений / Н.А. Озерова, П.Н. Горчаков, Б.О., Манучарянц А.С. Борисенко // Источники рудного вещества и физико-химические условия эпitherмального рудообразования. – Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 1990. – С. 53–74.
16. Абрамов Б.Н. Источники рудоносных флюидов Au, Mo, W и Pb-Zn месторождений Восточного Забайкалья (по данным распределения редких и редкоземельных элементов) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 71–83.
17. Редина А.А., Мокрушников В.П., Редин Ю.О. Условия формирования и возраст редкометалльного кукульбейского рудного района (Восточное Забайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 90–102.
18. Физико-химические условия образования редкометалльных месторождений во фторсодержащих гранитоидных системах по экспериментальным данным / Ю.Б. Шаповалов, В.Ю. Чевычелов, В.С. Коржинская, Н.П. Котова, А.Ф. Редькин, А.А. Конышев // *Петрология*. – 2019. – № 6. – Т. 27. – С. 617–637.
19. Таусон Л.В. Геохимия редких элементов. – М.: Наука, 1964. – 154 с.
20. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamic framework of large unique uranium ore belts in Southeast Russia and East Mongolia // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2016. – V. 119. – P. 145–166.
21. Zhao D., Yamamoto Y., Yanada T. Global mantle heterogeneity and influence on teleseismic regional tomography // *Gondwana Research*. – 2013. – V. 23. – P. 595–616.
22. Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: mantle dynamics and antiplate tectonics on the Core-Mantle Boundary // *Gondwana Research*. – 2007. – V. 11. – P. 7–37.
23. Li Sh.-R., Santosh M. Metallogeny and craton destruction: records from the North China Craton // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 56. – P. 376–414.
24. Li C., Van der Hilst R.D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from travel time tomography // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – V. 115. – B07308.
25. Goldfarb R.J., Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposit: are they unique? // *Geoscience Frontiers*. – 2014. – V. 5. – P. 139–153.

Поступила 18.08.2021 г.

Информация об авторах

Абрамов Б.Н., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН.

UDC 553.411 (571.5)

SPECIFIC FEATURES OF ORE FORMATION OF BARUN-SHIVEINSKOE TUNGSTEN DEPOSIT (EASTERN TRANSBAIKALIA)

Bair N. Abramov,
b_abramov@mail.ru

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS,
16a, PO box 1032, Nedorezov street, Chita, 672014, Russia.

The relevance of the study is in the need to expand the mineral resource base of Russia. Eastern Transbaikalia is one of the oldest mining regions of the country. Barun-Shiveinskoe field is mercury-antimony-tungsten ore formations. For the region, there is an urgent need to search for and discover new ore deposits. For successful completion of such a task, the data are needed from a detailed study of already known ore deposits, which can be used to develop scientifically reasonable criteria for searching for ore deposits and forecasting mineralisation. Such data includes determination of sources of ore-bearing melts and conditions of formation of mercury-antimony-tungsten ore formation deposits.

The aim of the study is to prove participation in ore formation of several ore-bearing sources with different characteristics based on the data of isotopic composition of oxygen of ore-bearing quartz and sulphur sulfides, as well as comparative analysis of elemental composition of quartz-wolframite ores of Barun-Shiveinskoe deposit with quartz-wolframite ores of tungsten deposits in Eastern Transbaikalia.

Object of the study is Barun-Shiveinskoe tungsten deposit located in Eastern Transbaikalia.

Methods. To determine the elemental composition of rocks, the X-ray fluorescence method and standard chemical analysis were used at the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (GIN SB RAS, Ulan-Ude). Oxygen isotopic composition was determined at the analytical centre (GIN SO RAS, Ulan-Ude) using a MIR 10-30 laser heating system with a 100 Watt CO₂ laser and a 10,6 μm wavelength in the infrared region, in the presence of the BrF₅ reagent using the Z.D. Sharp method (1990). Mineral composition study was carried out in GIN SO RAS on the LEO-1430VP scanning electron microscope with the INCA Energy 350 energy dispersion spectrometer (Oxford Instruments) at an accelerating voltage of 20 kV, probe current is less than 0,5 nA, probe size is 0,1 μm. In the analysis mode, the spectral set time was 50 s. Isotope composition of sulphur sulfides study was carried out at the collective use centre for multi-element and isotope studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk).

Results. The isotopic composition of oxygen in the fluid was determined in equilibrium with quartz of the productive stage at 210–150 °C, varying from 4,25 to 14,22 ‰, which corresponds to aqueous fluid of magmatic nature. The isotopic composition of sulfur cinnabar, the final ore stage of the deposit formation, corresponding to mantle values, has been established. A narrow interval of δ³⁴S, ‰ CDT values for cinnabar sulphur from –3,5 to to –4,5 indicates a single source. For the first time, a rare cinnabaric minerals (metacinnabarite, corderoite) formed in the oxidation zones of mercury deposits under low-temperature conditions were identified at the deposit. Their elemental composition was determined. In quartz-wolframite ores from tungsten deposits in Eastern Transbaikalia, including Barun-Shiveinskoe, a close correlation relation ($r = 0,53-0,96$) with a number of elements (As, Ta, Nb, Hf) was identified, indicating common sources of their formation. Ore formation at Barun-Shiveinskoe deposit was carried out from different levels of ore-bearing sources. Wolframites were formed from a crust source and mercury – from a mantle one.

Key words:

Barun-Shiveinskoe deposit, wolframite, cinnabar, isotopes of oxygen and sulfur, mantle source, Eastern Transbaikalia.

REFERENCES

- Kuznetsov B.A., Obolensky A.A., Borisenko A.S., Lebedev V.I., Obolenskaya R.V. *Metallogeniya Mongolskoy Narodnoy Respubliki (rtut)* [Metallogeny of Mongolian people's Republic (mercury)]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 1986. 46 p.
- Trubachev A. Stratiform ore – a key form of mineral resources of Eastern Transbaikalia. *Bulletin of Chita state University*, 2011, no. 3 (70), pp. 104–109. In Rus.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, pp. 1353–1357.
- Redin Yu.O. *Zolotorudnaya mineralizatsiya Lugokanskogo rudnogo uzla (Vostochnoe Zabaykale): mineralnye assotsiatsii, vozrast, endogennaya zonalnost*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Gold mineralisation of Lugokanskoe ore cluster (Eastern Transbaikalia): mineral associations, age, endogenous zoning. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2015. 21 p.
- Obolensky A.A. *Genezis mestorozhdeniy rtutnoy rudnoy formatsii* [Genesis of mercury ore formation deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 193 p.
- Barabanov V.F. *Mineralogiya volframitovykh mestorozhdeniy Zabaykalya. T. 2* [Mineralogy of Transbaikal wolframite deposits. Vol. 2]. Leningrad, Leningrad University Publ. house, 1975. 360 p.
- Noskova Yu.V., Dril S.I., Sasim S.A., Zarubina O.V. Lithochemistry and geodynamics of metasedimentary rocks of ononskaya and chindantskaya suits (East Transbaikalia). *Izvestiya irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2016, vol. 18, pp. 105–127. In Rus.
- Yudovich Ya.E., Ketris. M.P. *Osnovy litokhimii* [Basics of lithochemistry]. St-Petersburg, Nauka Publ., 2000. 479 p.
- Berger V.I. *Surmyanye mestorozhdeniya* [Antimony deposits], Leningrad, Nedra Publ., 1978. 295 p.
- Zheng Y.-F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochemical J*, 1999, vol. 33, pp. 109–126.
- Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 141–162.
- Znamenskiy S.E., Ankusheva N.N., Artemev D.A. Formation conditions, composition and ore-forming sources of the Bolshoy Karan gold-porphyry deposit (the Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 397–410. In Rus.
- Abramov B.N., Kalinin Yu.A., Borovikov A.A., Badmatsyrenova R.A., Posokhov V.F. Alexandrovskoe gold deposit (Eastern Transbaikalia): sources of rock and ore substance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 83–95. In Rus.
- Ohmoto H., Rye R.O. *Isotopes of sulfur and carbon. Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.-Y., John Wiley and Sons. 1979. pp. 509–567.

15. Ozerova N.A., Gorchakov P.N., Manucharyants B.O., Borisenko A.S. On the sources of matter of mercury and antimony deposits. *Sources of ore matter and physico-chemical conditions of epithermal ore formation*. Novosibirsk, Nauka, Sib. Department, 1990. pp. 53–74.
16. Abramov B.N. Sources of ore-bearing fluids Au, Mo, W and Pb-Zn of Eastern Transbaikalia deposits (according to the rare earth elements distribution). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 71–83. In Rus.
17. Redina A.A., Mokrushnikov V.P., Redin Yu.O. Formation conditions and age of the rare-metal mineralization of the Kukulbey ore region (Eastern Transbaikalia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 90–102. In Rus.
18. Shapovalov Yu.B., Chevychelov V.Yu., Korzhinskaya V.S., Kotova N.P., Redkin A.F., Konyshov A.A. Physical and chemical parameters of processes producing rare-metal deposits in granitoid systems with fluorine: experimental data. *Petrology*, 2019, vol. 27, no. 6, pp. 617–637. In Rus.
19. Tauson L.V. *Geokhimiya redkikh elementov* [Geochemistry of rare elements]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 154 p.
20. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamic framework of large unique uranium ore belts in Southeast Russia and East Mongolia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, vol. 119, pp. 145–166.
21. Zhao D., Yamamoto Y., Yanada T. Global mantle heterogeneity and influence on teleseismic regional tomography. *Gondwana Research*, 2013, vol. 23, no. 2, pp. 595–616.
22. Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: mantle dynamics and antiplate tectonics on the Core-Mantle Boundary. *Gondwana Research*, 2007, vol. 11, pp. 7–37.
23. Li Sh.-R., Santosh M. Metallogeny and craton destruction: records from the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 56, pp. 376–414.
24. Li C., Van der Hilst R.D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol. 115, B07308.
25. Goldfarb R.J., Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposit: are they unique? *Geoscience Frontiers*, 2014, vol. 5, pp. 139–153.

Received: 18 August 2021.

Information about the authors

Bair N. Abramov, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS.