

УДК 553.46(550.83:550.93)

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ВОЗРАСТ РЕДКОМЕТАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ КУКУЛЬБЕЙСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Редина Анна Андреевна¹,
redina@igm.nsc.ru

Мокрушников Виктор Павлович¹,
viktorm@igm.nsc.ru

Редин Юрий Олегович¹,
redin@igm.nsc.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность. Определение современными методами условий формирования редкометального оруденения на примере типовых месторождений Кукульбейского рудного района, в совокупности с изотопно-геохронологическими исследованиями являются ключевыми аспектами в решении одной из важнейших фундаментальных проблем рудной геологии и геохимии – выяснение условий, источников, механизмов и последовательности формирования рудных концентраций металлов в различных геологических обстановках.

Цель: получение новых данных о физико-химических условиях формирования редкометального оруденения, а также установление возраста оруденения.

Объекты: Букукинское, Белухинское и Антоновогорское месторождения.

Методы. Флюидные включения были изучены в прозрачно-полированных пластинках методами крио-термометрии и Рамановской спектроскопии. Крио-термометрические исследования выполнялись в микротермокамере THMSG-600 фирмы Linkam. Образцы последовательно охлаждались до температуры -190 °С и нагревались до полной гомогенизации вещества включений. В процессе наблюдения замерялись температуры эвтектики, плавления льда и гомогенизации. Температуры плавления льда для двухфазных и температуры плавления кристалликов соли для трехфазных флюидных включений позволили установить концентрацию солей в пересчете на NaCl-эквивалент. Состав газовой и минеральной фаз флюидных включений изучался методом Рамановской спектроскопии – спектрометр Ramanor U-1000 и детектор Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon, лазер Millennia Pro фирмы Spectra-Physics; Confocal Raman Microscope alpha 300R фирмы WITec. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод изотопно-геохронологического датирования по методике ступенчатого прогрева применялся для установления абсолютного возраста оруденения.

Результаты. Рудные минеральные ассоциации рассматриваемых месторождений сформировались при участии хлоридных высокотемпературных флюидов, насыщенных углекислотой. Повсеместно рудоносные флюиды содержат восстановленные газы, из которых превалирует метан, а сероводород, азот и водород находятся в подчиненном количестве. В рамках кристаллизации отдельных минеральных ассоциаций прослеживается эволюция рудоносного флюида: снижение температуры и концентрации растворов. Катионный состав растворов также изменился от существенно натрового до существенно калиевого. Для объектов исследования получены умеренные оценки глубин: 6–8 км для Букукинского, 4,5–6 км для Белухинского и 3–3,5 км для Антоновогорского месторождения. Возраст редкометального оруденения составляет на Антоновогорском месторождении – $146,7 \pm 1,7$ млн лет (мусковит из кварц-мусковитовых грейзенов с вольфрамитом); на Букукинском месторождении – $135 \pm 2,8$ млн лет (серцит из кварц-вольфрамитовых жил); на Белухинском месторождении – $155,6 \pm 1,8$ млн лет (серцит из кварц-вольфрамитовых жил).

Выводы. Редкометальная минерализация Кукульбейского рудного района, на примере типовых месторождений, формировалась из высокотемпературных гидротермальных насыщенных восстановленными газами (метан, сероводород, азот и водород) углекислотно-водно-хлоридных растворов магматического происхождения. По глубине становления рассматриваемые рудоносные системы можно отнести к гипабиссальным от 8 до 3 км. Проведенные изотопно-геохронологические исследования показали, что в пределах Кукульбейского рудного района формирования вольфрамового оруденения происходило в позднеюрское-раннемеловое время, основная часть которого связана со становлением магматических пород кукульбейского комплекса, не исключено что позднеюрское оруденение связано со становлением магматических пород шахтаминского комплекса.

Ключевые слова:

Редкометальные месторождения, возраст, условия формирования, связь с магматизмом, Восточное Забайкалье.

Введение

Кукульбейский рудный район расположен в юго-восточном Забайкалье, в Агинской тектонической зоне и содержит крупные минеральные ресурсы вольфрама, позволяющие считать этот рудный район самостоятельной минерально-сырьевой базой вольфрама Забайкалья. Они сосредоточены главным образом на рудных полях, месторождениях Букука-Белухинского рудного узла и отчасти Этакинского. В этом старейшем рудном районе в сороко-

вых–пятидесятых годах эксплуатировались Букукинское, Белухинское, Антоновогорское и другие месторождения. В металлогеническом отношении Агинская зона известна как область наиболее широкого в регионе развития редкометального оруденения. Пространственно и генетически редкометальное оруденение связано с многочисленными массивами кукульбейского (J_3) лейкогранитового комплекса. Наряду с массивами гранитов кукульбейского комплекса в Агинской зоне широко развиты

небольшие интрузии шахтаминского (J_2 – J_3) комплекса габбро-диорит-монцодиорит-гранодиоритового состава [1]. Основную часть вольфрамового оруденения несут кварцевые жилы с грейзенированными зальбандами и штокверки, меньшую часть – кварц-мусковитовые, кварц-топазовые, кварц-турмалиновые и другие грейзены. При этом имеются все переходные типы от собственно грейзеновых к собственно кварцевым рудным телам. Чаще всего минеральные ассоциации в большинстве (пунктов минерализации) рудопроявлений однородны и представлены: вольфрамитом, касситеритом, молибденитом, арсенопиритом, пиритом, пиротином, висмутином, бериллом, флюоритом др. Некоторые отличия были обнаружены лишь в месторождениях с более сложным составом и нередко значительную ролью сульфидов молибдена, свинца, цинка, меди, мышьяка, и других элементов.

Месторождения Восточного Забайкалья рассматривались в работе Е.М. Лазько и др. [2], посвященной выявлению некоторых важнейших физико-химических аспектов генезиса месторождений и выработке поисковых термобарогеохимических критериев, вместе с другими объектами Средней Азии, Северного Кавказа, Рудного Алтая и Забайкалья. В книге приведены результаты исследований, проведенных с использованием актуальных методов и технологий на момент публикации: гомогенизации, декрипитации и криометрии включений, водных и газовых вытяжек. Объекты, обсуждаемые в работе Лазько и др., были рассмотрены не индивидуально, а как члены ряда однотипных месторождений. В данной работе исследовались Букукинское, Белухинское и Антоновгорское месторождения. По которым приводится детальное описание физико-химических условий формирования, полученное современными методами термобарогеохимии, по отдельным рудным минеральным ассоциациям. Предварительные результаты изучения флюидных включений редкометальных месторождений Восточного Забайкалья изложены в работе А.А. Редина и др. [3].

Геологическое строение

Букука-Белухинский рудный узел охватывает территорию, расположенную на стыке оловянно-вольфрамового и золото-молибденового рудных поясов, выделенных С.С. Смирновым. В пределах рудного узла наиболее широко развиты разломы северо-восточного простирания, участки их пересечения с разломами северо-западного направления определяют положение локальных очаговокупольных структур (Букукинской, Белухинской), интрузивных массивов и вольфрамового оруденения. В Букука-Белухинском рудном узле один из главных рудоконтролирующих факторов – связь вольфрамового оруденения с гранитоидами кукульбейского интрузивного комплекса. Площади, на которых отсутствуют проявления специфических гранитных образований, соответственно лишены рудной минерализации. Границей рудно-

го узла является проекция рудоносных массивов гранитов, в том числе не вскрытых эрозией и отмечающихся гравитационными минимумами.

Биотитовые и лейкократовые граниты и гранит-порфиры рудоносного кукульбейского комплекса слагают дайки и небольшие штокообразные тела в пределах Белухинского и Букукинского массивов гранитоидов, в том числе и в районе одноименных вольфрамовых месторождений. Исследованиями установлено, что гранит-порфиры поздней рудоносной фазы в пределах Букука-Белухинского рудного узла пользуются гораздо более широким развитием, чем это считалось ранее. Значительная часть рудоносных гранитоидов залегает на глубине, то есть в целом Букука-Белухинский плутон имеет двухъярусное строение [4].

Букукинское месторождение (рис. 1) занимает площадь около 6 км², хотя вообще вольфрамовое оруденение фиксируется и в ближайших его окрестностях, распространяясь на площади до 10 км². Месторождение сложено гранодиоритами шахтаминского интрузивного комплекса. Известно, что вышеупомянутые гранитоиды являются пассивными по отношению к продуктивному вольфрамовому оруденению. Собственно вольфрамовое оруденение связывается с нескрытым куполом кукульбейских гранитоидов, проявления которых имеются и на поверхности. На месторождении развиты два типа руд: кварц-гюбнерит-сульфидный и вольфрамитсодержащих грезейнов. Жилы сосредоточены среди среднеюрских гранодиоритов шахтаминского интрузивного комплекса. Протяженность жил составляет от 50–800 до 1500–2000 м, мощность до 2–3 м. Они вскрыты горными выработками до глубины 230 м, буровыми скважинами до 400 м и более. Кроме вольфрама в них содержится висмут до 1 %, сульфиды меди, свинца и железа. Околожилные изменения выражены в интенсивной грейзенизации. Вольфраморудные грейзены Букукинского месторождения находятся на двух участках и имеют площадное распространение. На участке «Грейзеновое поле» они мусковитовые, кварц-мусковитовые, кварц-топазовые. Восточный участок грейзенов приурочен к сравнительно пологому (20–40°) контакту штока позднеюрских кварцевых порфиров с гранодиоритами шахтаминского комплекса и перекрывающих их метаморфизованных глинистых сланцев. Грезейны преимущественно кварцевые. Руды штокверковые и представлены вольфрамитом, молибденитом, сфалеритом, иногда шеелитом, висмутином, халькопиритом, бериллом и литиеносными слюдами. Штокверк располагается в зоне трещиноватости, предположительно связанной с апикальным выступом Букукинского гранитного массива, прослеживается в северо-восточном направлении на 160 м при ширине 60 м.

Белухинское месторождение (рис. 1) расположено в экзоконтактной зоне одноименного гранитного массива (в 17 км на северо-восток от Букукинского). Содержит 114 кварц-вольфрамитовых

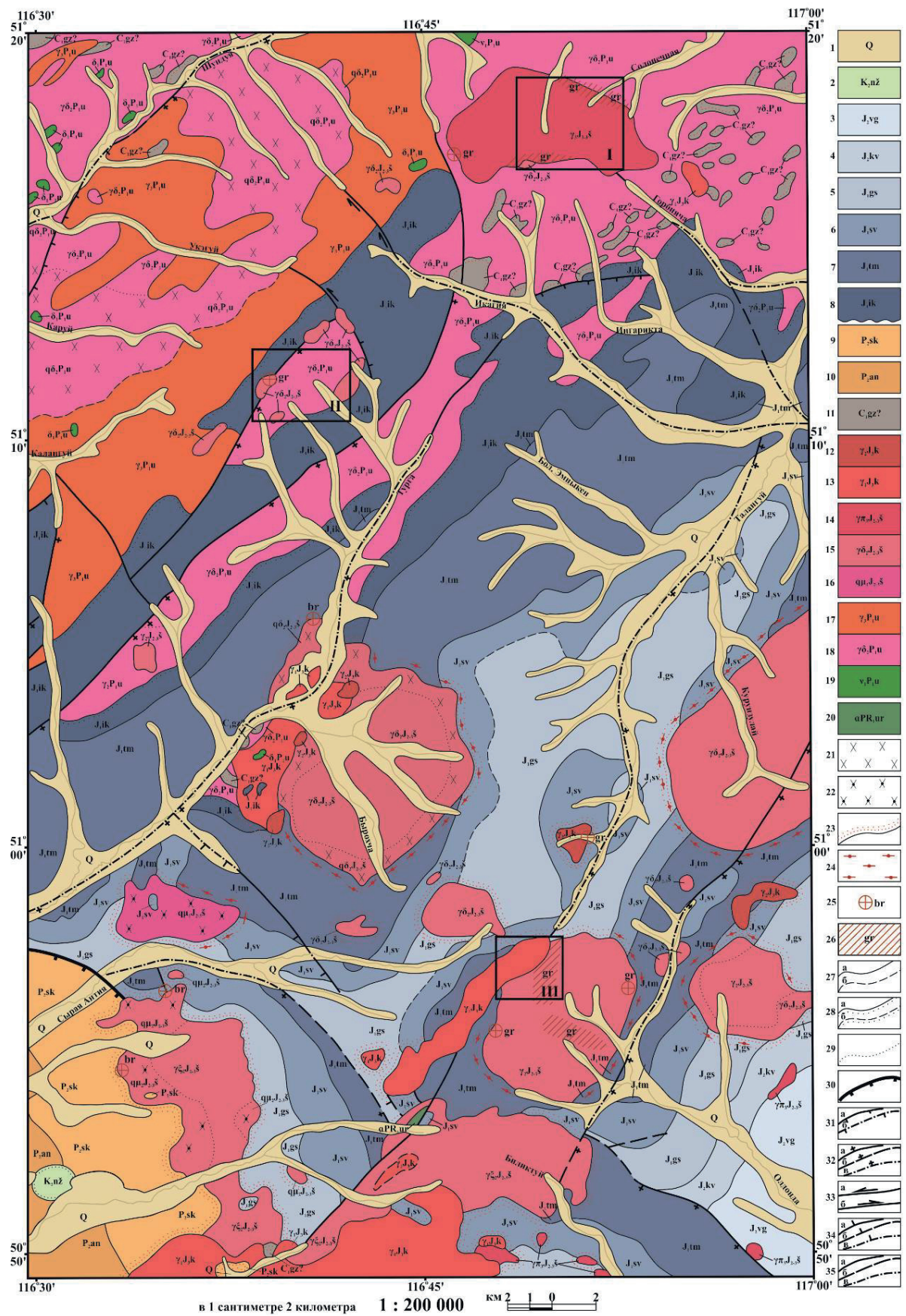
жил. Крутопадающие рудные тела имеют длину от 45 до 765 м, мощность 0,1–0,5 м. Околорудные изменения выразились в грейзенизации, окварцевании и березитизации.

Главные рудные минералы – вольфрамит и шеелит, попутные – висмутин и молибденит. Помимо самого месторождения, в окрестностях выделены ещё несколько участков, на которых имеются площадные грейзены по гранитоидам кукульбейского комплекса. В них установлены содержания вольфрама, свинца и фтора до 1 %, лития – 0,3 % [5]. Проведенные в последнее время петрохимические и геохимические исследования магматических пород Белухинского массива подтвердили неоднократно отмечавшуюся ошибочность отнесения их на геологических картах к шахтаминскому комплексу. Проведенный комплекс исследований показал, что магматические породы Белухинского массива относятся к кукульбейскому комплексу [1].

Антоновогорское месторождение (рис. 1) входит в состав Этыкинского рудного узла, приурочено к контакту одноименного гранитного массива кукульбейского комплекса с нижнеюрскими отложениями и представляет собой главным образом объект жильного типа. На площади месторождения найдено более 200 кварц-вольфрамитовых и кварц-вольфрамит-сульфидных жил с северо-восточным направлением, крутыми углами падения ($75-80^\circ$) на северо-запад и протяжённостью от 45 до 560 м (иногда до 700 м), с мощностями от 0,2 до 1,51 м. Среднее содержание вольфрама в рудах – 0,5 %. Главный жильный рудный минерал – вольфрамит, в осадочных породах – касситерит, также встречаются: шеелит, халькопирит, пирит, арсенипирит, берилл, висмутин, пирротин, сфалерит, марказит. Наиболее распространённые околожильные изменения: окварцевание и грейзенизация [5].

Рис. 1. Фрагмент геологической карты М-50-IX с дополнениями авторов: 1 – четвертичные отложения; 2 – ножийская свита: галечники и валунники; 3 – верхнегазимульская свита: конгломераты с прослоями и линзами гравелитов, песчаников, хлидолитов; 4 – кавыкучинская свита: переслаивание конгломератов, песчаников, гравелитов и алевролитов; 5 – государевская свита: песчаники, алевролиты; 6 – сивачинская свита: конгломераты, гравелиты, прослои и пачки песчаников; 7 – таменгинская свита: песчаники, алевролиты, аргиллиты; 8 – икагийская свита: алевролиты, аргиллиты, песчаники, хлидолиты, в основании дресвяники, гравелиты, конгломераты; 9 – соктуйская свита: песчаники, туфопесчаники, конгломераты, конгломерато-брекчии, гравелиты, алевролиты; 10 – антиинская свита: песчаники, туфопесчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты; 11 – газимурозаводская (?) свита: кварцево-слоистые сланцы, мрамора; 12, 13 – кукульбейский комплекс: 12 – литионит-амазонит-альбитовые граниты (γ_2); 13 – граниты, лейкограниты (γ_1); 14–16 шахтаминский комплекс: 14 – граниты (γ_3); гранит-порфиры ($\gamma\pi_3$); 15 – гранодиориты ($\gamma\delta_2$), граносиениты ($\gamma\xi_2$), кварцевые монцодиориты ($q\mu_2$), кварцевые диориты ($q\delta_2$); 16 – кварцевые монцодиориты ($q\mu_1$); 17–19 ундиинский комплекс: 17 – граниты (γ_3); 18 – гранодиориты ($\gamma\delta_2$), кварцевые диориты ($q\delta_2$); 19 – габбро (ν_1), диориты (δ_1); 20 – урульгинский комплекс метаморфический: амфиболиты (α); 21 – кварцевые диориты; 22 – кварцевые монцодиориты; 23 – контактовые роговики и ороговикованные породы, тектониты; 24 – динамометаморфизованные породы филлиты и эпидот-хлоритовые сланцы; 25, 26 – метасоматиты и метасоматически изменённые породы; 25 – внемасштабные тела: березиты, грейзены; 26 – грейзены; 27 – геологические границы между разновозрастными подразделениями и телами разного состава внутри них: а) достоверные, б) предполагаемые; 28 – несогласное залегание: а) достоверные, б) предполагаемые; 29 – несогласное залегание между фашиально разными образованиями; 30 – структурные швы сложной кинематики с преобладанием листрических взбросов и надвигов; 31–35 – разломы второго порядка: 31 – надвиги: а) достоверные, б) предполагаемые; 32 – взбросы и крутые надвиги: а) достоверные, б) предполагаемые, в) скрытые под вышележащими образованиями, достоверные; 33 – сдвиги: а) левые, б) правые; 34 – сбросы (с указанием наклона сместителя): а) достоверные, б) предполагаемые, в) скрытые под вышележащими образованиями, достоверные; 35 – разломы второго порядка неустановленной кинематики: а) достоверные, б) предполагаемые, в) скрытые под вышележащими образованиями, достоверные. Черными квадратами показаны объекты исследования: I – Белухинское месторождение; II – Букукинское месторождение; III – Антоновогорское месторождение

Fig. 1. Fragment of the geological map M-50-IX with the authors' additions: 1 – quaternary sediments; 2 – nozhisky formation: pebbles and boulders; 3 – verkhnegazimursky formation: conglomerates with interlayers and lenses of gravelites, sandstones, hlihdolites; 4 – kavykuchinsky formation: interbedding of conglomerates, sandstone, gravel and siltstones; 5 – gosudarevsky formation: sandstones, siltstones; 6 – sivashinsky formation: conglomerates, gravel, interlayers and bundles of sandstones; 7 – tamengsky formation: sandstones, siltstones, mudstones; 8 – ikagiysky formation: siltstones, mudstones, sandstones, hlydolites, in the basement dregs, gravelites, conglomerates; 9 – soktuiysky formation: sandstones, tuff sandstones, argillites, conglomerates; 10 – antiinsky formation: sandstones, tuff sandstones, siltstones, argillites, conglomerates; 11 – gazimurozavodsky (?) formation: quartz-micaceous shales, marble; 12, 13 – Kukulbeisky complex: 12 – lytonite-amazonite-albite granites (γ_2); 13 – granites, leucogranites (γ_1); 14–16 – Shakhhtama complex: 14 – granites (γ_3); granite-porphyrus ($\gamma\pi_3$); 15 – granodiorites ($\gamma\delta_2$), granosyenites ($\gamma\xi_2$), quartz monzodiorites ($q\mu_2$), quartz diorites ($q\delta_2$); 16 – quartz monzodiorites ($q\mu_1$); 17–19 – Undine complex: 17 – granites (γ_3); 18 – granodiorites ($\gamma\delta_2$), quartz diorites ($q\delta_2$); 19 – gabbro (ν_1), diorites (δ_1); 20 – Uruiginsky metamorphic complex: amphibolites (α); 21 – quartz diorites; 22 – quartz monzodiorites; 23 – contact hornfels and hornfels, tectonites; 24 – dynamo-metamorphized rocks, phyllites and epidote-chlorite schists; 25, 26 – metasomatites and metasomatically altered rocks: 25 – out-of-scale bodies: berezites, greisens; 26 – greisens; 27 – geological boundaries between different age divisions and bodies of different composition within them: a) reliable, b) assumed; 28 – unconformity: a) reliable, b) assumed; 29 – disagreement between facies of different formations; 30 – structural seams of complex kinematics with predominance of lustretic ups and thrusts; 31–35 – second-order faults: 31 – thrusts: a) reliable, b) assumed; 32 – ups and steep thrusts: a) reliable, b) assumed, в) hidden under the overlying formations, reliable; 33 – shifts: a) left, b) right; 34 – faults (indicating the slope of the displacer): a) reliable, б) assumed, в) hidden in the overlying formations, reliable; 35 – second-order faults of unknown kinematics: a) reliable, б) assumed, в) hidden under the overlying formations, reliable. The black squares show the objects of investigation: I – Belukha deposit; II – Bukuka deposit; III – Antonovogora deposit



Возраст оруденения

Нами были проведены исследования возраста К-содержащих минералов синрудных парагенезисов $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ по методике ступенчатого прогрева, подробно описанной ранее [6]. Полученные возрастные спектры, представленные на рис. 2, могут интерпретироваться как ненарушенные.

Во всех спектрах выделяется плато, соответствующее критериям, предложенным в [7]. Возраст редкометалльного оруденения составляет на Антоновогорском месторождении – $146,7 \pm 1,7$ млн лет (мусковит из кварц-мусковитовых грейзенов с вольфрамитом); на Букукинском месторождении – $135 \pm 2,8$ млн лет (серицит из кварц-вольфрамитовых жил); на Белухинском месторождении – $155,6 \pm 1,8$ млн лет (серицит из кварц-вольфрамитовых жил).

Флюидные включения

По оптическим наблюдениям при комнатной температуре для исследований были отобраны, используя критерии, изложенные в работе Э. Рёддера [8], первичные, псевдотричные и вторичные флюидные включения (ФВ). Первичные ФВ изометричной, овальной или формы негативных кристаллов, размером от 5 до 15 мкм. Они наблюдаются в виде индивидуальных включений, реже образуют небольшие группы. Псевдотричные ФВ имеют удлиненную или изометричную форму вакуоли и размеры 8–17 мкм. Такие включения локализуются в трещинках, залеченных в процессе роста кристалла-хозяина. Вторичные ФВ неправильной формы и размерами 10–25 мкм располагаются по более поздним трещинам, секущим несколько зерен минерала-хозяина. По фазовому со-

ставу при стандартных условиях выделяются три вида ФВ: 1) VL (vapor-liquid) газовой-жидкие; 2) VLC (vapor-liquid- CO_2 liquid) газовой-жидкие, содержащие углекислоту в жидкой форме; 3) VLS (vapor-liquid-solid), содержащие газовую, жидкую и твердую фазы. Исследования ФВ проводились на базе ИГМ СО РАН методами микротермометрии и Раман-спектроскопии. Криво-термометрические измерения осуществлялись при помощи термокамеры THMSG-600 фирмы Linkam. Интерпретация температур эвтектики газовой-жидких ФВ проводилась согласно данным А.С. Борисенко [9]. Кроме того, для двухфазных ФВ концентрация растворов определялась по температуре плавления льда [10]. Давление флюида рассчитано посредством программы FLINCOR [11] с использованием температур гомогенизации CO_2 . Состав газовой фазы установлен на спектрометре Ramanor U-1000 с детектором Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon, лазер Millennium Pro фирмы Spectra-Physics. Результаты всех термобарогеохимических измерений и расчетов приведены в таблице.

Букукинское месторождение. Рудная минерализация представлена бериллом, вольфрамитом, сульфидами Fe, Pb и висмутином. Для исследования были отобраны образцы четырех минеральных ассоциаций: кварц-берилл-мусковитовые грейзены с вольфрамитом, пиритом и молибденитом (образцы Buk-2-1, Buk-2-2) I; кварцевые жилы с вольфрамитом и пиритом (образец Buk-1) II; кварцевые жилы с пиритом, галенитом и вольфрамитом (Buk-3-1, Buk-3-2) III; кварцевые жилы с висмутином, пиритом и вольфрамитом (Buk-4) IV.

Вольфрамит минеральной ассоциации I наблюдается в виде рассеянной вкрапленности и прожил-

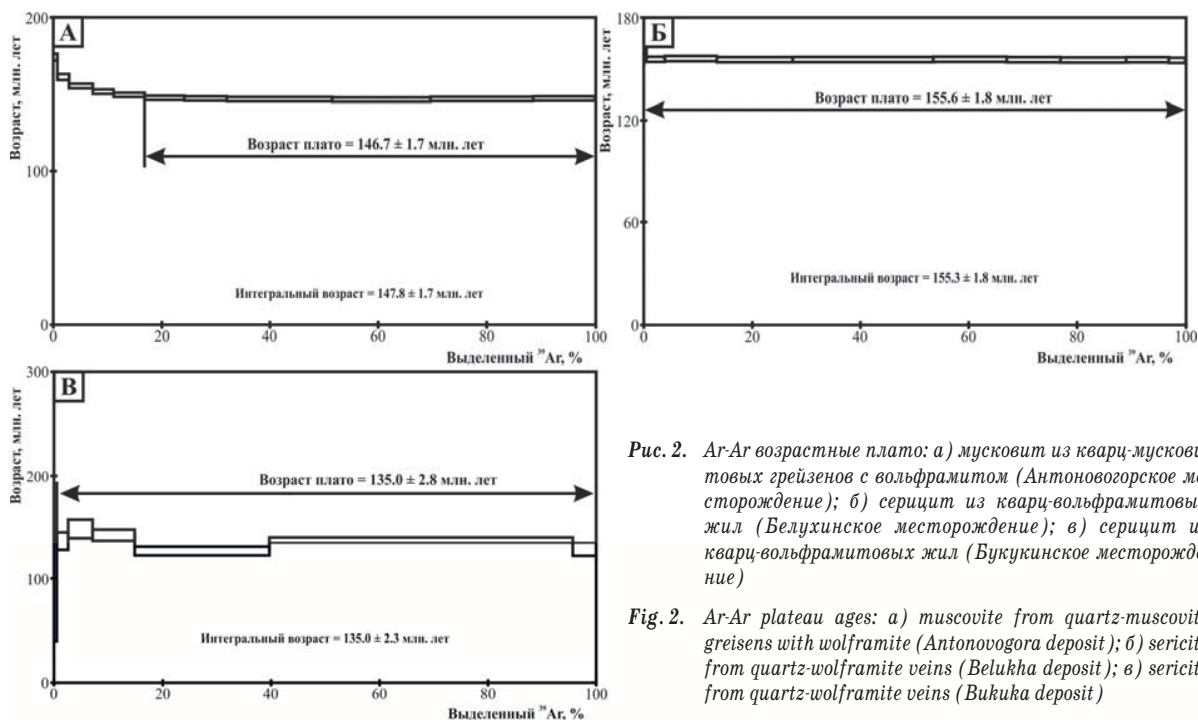


Рис. 2. Ar-Ar возрастное плато: а) мусковит из кварц-мусковитовых грейзенов с вольфрамитом (Антоновогорское месторождение); б) серицит из кварц-вольфрамитовых жил (Белухинское месторождение); в) серицит из кварц-вольфрамитовых жил (Букукинское месторождение)

Fig. 2. Ar-Ar plateau ages: а) muscovite from quartz-muscovite greisens with wolframite (Antonovogora deposit); б) sericite from quartz-wolframite veins (Belukha deposit); в) sericite from quartz-wolframite veins (Bukuka deposit)

ков. Первичные и псевдотворичные ФВ в кварце напрямую характеризуют процесс рудообразования. Первичные VL ФВ гомогенизируются в жидкость при высоких температурах $T_{\text{гом}}$ 350–390 °С. Полученные температуры эвтектики $T_{\text{эвт}}$ –23...–21 °С указывают на присутствие в растворе хлоридов натрия и калия. Концентрация солей в растворе, по температурам плавления льда $T_{\text{пл}}$ –7...–5 °С, эквивалентна 7,9–10,5 мас. % NaCl-экв. Газовая фаза представлена смесью метана и углекислоты, в отдельных случаях с примесью азота и водорода. Для псевдотворичных VL ФВ получены средние температуры гомогенизации в жидкость $T_{\text{гом}}$ 250–280 °С и относительно высокие температуры плавления льда $T_{\text{пл}}$ –6...–2 °С. По этим данным можно определить концентрацию солей, как равную 3,4–9,2 мас. % NaCl-экв. В газовой фазе содержится преимущественно углекислота, редко с примесью метана.

Берилл кварц-берилл-мусковитовых грейзен I трещиноватый почти бесцветный (с легким голубо-зеленым оттенком). В нем содержатся первичные и вторичные ФВ видов VL, VLC и VLS. Первичные ФВ VL гомогенизируются в жидкую фазу при температурах $T_{\text{гом}}$ 240–320 °С. Температуры эвтектики $T_{\text{эвт}}$ –21...–19 °С свидетельствуют о преобладании хлорида натрия в растворе. Судя по полученным температурам плавления льда ($T_{\text{пл}}$ –3,5...–1,5 °С) захваченный раствор слабосоленый 2,6–5,7 мас. % NaCl-экв. В состав газовой фазы входят метан и углекислота, редко примесь азота и водорода. При нагревании первичных VLC ФВ (рис. 3, а) установлено, что углекислота гомогенизируется в газ при температурах $T_{\text{гом}}$ CO₂ 28–30 °С, а полная гомогенизация включений происходит в жидкость при температурах $T_{\text{гом}}$ 250–280 °С. Полученным значениям соответствуют плотность углекислоты ρ_{CO_2} 0,34–0,42 г/см³ и давление 2000–2100 бар. VLS ФВ являются первичными. Оптически выделяются две разновидности минеральных фаз: светлоокрашенные анизотропные (рис. 3, б) и очень мелкие темноокрашенные (вероятно, рудный минерал) (рис. 3, в). Светлоокрашенные твердые фазы представлены силикатами и, вероятно, являются ксеногенными. Идентифицировать темноокрашенные твердые фазы не удалось в виду их малых размеров. Газовая фаза является смесью углекислоты и метана. Температуры гомогенизации не установлены, в связи с растрескиванием включений в процессе нагревания. Вторичные VL ФВ, соответствующие позднему гидротермальному этапу минералообразования, гомогенизируются в жидкость при низких температурах $T_{\text{гом}}$ 140–190 °С. Температуры плавления льда и солености умеренные: $T_{\text{пл}}$ –5...–2,5°, 4,2 до 7,9 мас. % NaCl-экв. В составе газовой фазы доминирует углекислота, в качестве примеси отмечается метан.

Кварцевые жилы II содержат вольфрамитовую минерализацию в виде вкрапленности и прожилков. Для исследования отобраны первичные и псевдотворичные включения, являющиеся синге-

нетичными рудным минералам. Температуры гомогенизации в жидкую фазу $T_{\text{гом}}$ первичных VL ФВ (рис. 3, з) варьируют от 290 до 310 °С. Температуры эвтектики $T_{\text{эвт}}$ –37...–28 °С и плавления льда $T_{\text{пл}}$ –6...–5 °С соответствуют раствору с концентрацией солей 7,9–9,2 мас. % NaCl-экв., представленным хлоридами натрия и железа. В составе газовой фазы содержатся углекислота и метан, редко азот. Псевдотворичные VL ФВ гомогенизируются в жидкость при температурах $T_{\text{гом}}$ 220–250 °С. Солевой состав раствора по полученным температурам эвтектики $T_{\text{эвт}}$ –17...–14 °С хлоридный (хлориды натрия и калия). Концентрация солей соответствует температурам плавления льда $T_{\text{пл}}$ –4...–0,5 °С и равна 0,9–6,5 мас. % NaCl-экв. Газовая фаза преимущественно углекислотная с примесью метана.

Вольфрамит-галенит-пиритовая минерализация Букуинского месторождения локализована в кварцевых жилах III в виде вкрапленности и прожилков, формированию которых соответствуют первичные и псевдотворичные ФВ в кварце. Первичные VL ФВ характеризуются умеренно высокими температурами гомогенизации $T_{\text{гом}}$ 285–325 °С (в жидкость). Принимая во внимание $T_{\text{эвт}}$ –15...–10 °С, можно определить, что в растворе присутствуют хлориды калия и натрия. Температуры плавления льда близки к нулю $T_{\text{пл}}$ –1,5...–0,1 °С, и концентрация солей составляет 0,2–2,6 мас. % NaCl-экв. В составе газовой фазы преобладает углекислота, постоянно присутствует метан и сероводород (редко следы азота и водорода). Термометрия первичных ФВ вида VLC (рис. 3, д) показала, что гомогенизация углекислоты происходит в газовую фазу при температурах 14–27 °С, полная гомогенизация наступает при температурах 295–310 °С. Расчетные плотность углекислоты и давление составляют ρ_{CO_2} 0,15–0,27 г/см³ и 1600–1700 бар соответственно. Первичные VLS ФВ (рис. 3, е) гомогенизируются при температурах $T_{\text{гом}}$ 365–390 °С. Концентрация растворов этого типа включений составляет 43,8–46,4 мас. % NaCl-экв. В газовой фазе VLS ФВ содержатся углекислота, метан и сероводород, примесь азота. Псевдотворичные VL ФВ отличаются относительно низкими температурами гомогенизации в жидкость 190–260 °С. Температуры эвтектики $T_{\text{эвт}}$ –9...–17 °С указывают на присутствие в растворе хлоридов калия и натрия. Концентрация солей соответствует температурам плавления льда –3,5...–0,3 °С и равна 0,5–5,7 мас. % NaCl-экв. Газовая фаза представляет смесь углекислоты и метана.

В кварцевых жилах IV в виде тонкой вкрапленности и прожилков проявлена висмутовая минерализация, которой сингенетичны первичные и псевдотворичные ФВ в кварце. Первичные VL ФВ (рис. 3, ж) гомогенизируются в жидкость в интервале температур $T_{\text{гом}}$ 340–350 °С. Температуры эвтектики $T_{\text{эвт}}$ –12...–10 °С соответствуют наличию хлоридов калия и натрия в растворе. Характерные температуры плавления льда ($T_{\text{пл}}$) ФВ такого вида и генерации находятся в интервале от –7 до –6 °С,

соответствующие значения концентраций растворов равны 9,2–10,5 мас. % NaCl-экв. Доминантным компонентом газовой фазы является углекислота, однако повсеместно присутствует примесь метана и сероводорода (редко следы азота и водорода). Примечательно, что в течение некоторых криометрических измерений VL ФВ (рис. 3, з) наблюдалось формирование каемки жидкой углекислоты. При последующем нагревании препарата произошла гомогенизация углекислоты в газ при температурах $T_{\text{гом}} \text{CO}_2 - 7 \dots -6 \text{ } ^\circ\text{C}$. Рассчитанная плотность составляет $\rho_{\text{CO}_2} \approx 0,08 \text{ г/см}^3$, а давление оценивается в 1500–1700 бар. Псевдотричные VL ФВ отличаются более низкими температурами гомогенизации (в жидкость) $T_{\text{гом}} 205\text{--}245 \text{ } ^\circ\text{C}$. Исходя из схожих с первичными VL ФВ значений температур эвтектики $T_{\text{эвт}} -11 \dots -10 \text{ } ^\circ\text{C}$, раствор также содержит хлори-

ды калия и натрия. Концентрация солей для псевдотричных VL ФВ с $T_{\text{пл}} -4 \dots -3 \text{ } ^\circ\text{C}$ несколько ниже и составляет 5–6,5 мас. % NaCl-экв.

Белухинское месторождение. Редкометалльная минерализация Белухинского месторождения локализуется в кварц-топаз-мусковитовых грейзенах (Bel-1-1, Bel-1-3) с вольфрамитом, пиритом и халькопиритом и в кварцевых жилах с вольфрамитом, молибденитом, пиритом и халькопиритом (Bel-1-2). Формированию рудных минералов кварц-топаз-мусковитовых грейзен, образующих вкрапленники и прожилки, сингенетичны первичные и псевдотричные ФВ в кварце и топазе. Кварц содержит первичные VL ФВ, характеризующиеся температурами гомогенизации в жидкость от 285 до 325 $^\circ\text{C}$. Полученные температуры эвтектики попадают в диапазон $T_{\text{эвт}} -23 \dots -21 \text{ } ^\circ\text{C}$, что ука-

Таблица. Результаты микротермометрии и Раман-спектроскопии флюидных включений

Table. Results of microthermometry and Raman spectroscopy of fluid inclusions

Месторождение Deposit	Образец Sample	Минеральная ассоциация Mineral association	Тип ФВ, минерал- хозяин FI type, host-mineral	Вид ФВ FI sort	$T_{\text{эвт}}$	$T_{\text{пл}}$	Соленость (мас. % NaCl-экв.) Concentration (wt. % NaCl-eq.)	$T_{\text{гом}}$	$T_{\text{гом}}$	Давление (бар) Pressure (bar)	Состав газовой фазы Gas phase composition
					$T_{\text{ву}}$	$T_{\text{ice melt}}$		$T_{\text{гом}}$	$T_{\text{гом}}$		
					- $^\circ\text{C}$				$^\circ\text{C}$		
Букучинское Bukucha	Buk-1	1	п, q/p, q	VL	28–37	5–6	7,9–9,2	290–310	н.о.	н.о.	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \pm \text{N}_2$
			пв, q/ps, q	VL	14–17	0,5–4	0,9–6,5	220–250	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$
	Buk-2-1, Buk-2-2	2	п, q/p, q	VL	21–23	5–7	7,9–10,5	н.о.	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \pm \text{N}_2 \pm \text{H}_2$
			пв, q/ps, q	VL	н.о.	2–6	3,4–9,2	250–280	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$
			п, be/p, be	VL	19–21	1,5–3,5	2,6–5,7	240–320	н.о.	н.о.	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \pm \text{N}_2 \pm \text{H}_2$
			п, be/p, be	VLC	н.о.	н.о.	н.о.	250–280	28–30	2000–2100	CO_2
			п, be/p, be	VLS	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4$
			вт, be/s, be	VL	н.о.	2,5–5	4,2–7,9	140–190	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}$
	Buk-3-1, Buk-3-2	3	п, q/p, q	VL	10–15	0,1–1,5	0,2–2,6	285–325	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{S} \pm \text{N}_2 \pm \text{H}_2$
			п, q/p, q	VLC	н.о.	н.о.	н.о.	295–310	14–27	1600–1700	CO_2
			п, q/p, q	VLS	н.о.	н.о.	43,8–46,4	365–390	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{S} \pm \text{N}_2$
			пв, q/ps, q	VL	9–17	0,3–3,5	0,5–5,7	190–260	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4$
	Buk-4	4	п, q/p, q	VL	10–12	6–7	9,2–10,5	340–350	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{S} \pm \text{N}_2 \pm \text{H}_2$
п, q/p, q			VLC	н.о.	н.о.	н.о.	340–350	-7...-6	1500–1700	CO_2	
пв, q/ps, q			VL	10–11	3–4	5–6,5	205–245	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4$	
Белухинское Belukha	Bel-1-1, Bel-1-3	5	п, q/p, q	VL	21–23	0,1–1,5	0,2–2,6	285–325	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{S}$
			п, q/p, q	VLC	н.о.	н.о.	н.о.	300–320	9–12	1200–1500	CO_2
			п, q/p, q	VLS	н.о.	н.о.	38,9–40,6	310–330	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4$
			пв, q/ps, q	VL	23–28	2,5–3,5	4,2–5,7	240–260	н.о.	н.о.	CO_2
	п, to/p, to	VL	н.о.	2–4	3,4–6,5	290–350	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{S}$		
Bel-1-2	6	п, q/p, q	VL	7–17	3–4	5–6,5	300–360	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 + \text{CH}_4$	
Антоновское Antonovogora	AG-1	1	п, q/p, q	VL	н.о.	2,5–4	4,2–6,5	220–285	н.о.	н.о.	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$
			п, q/p, q	VLC	н.о.	н.о.	н.о.	240–260	-2,5...-1,5	750–850	CO_2

Примечания: п – первичное, пв – псевдотричное, вт – вторичное; н.о. – параметр не определен, q – кварц, be – берилл, to – топаз. 1 – кварцевые жилы с вольфрамитом и пиритом; 2 – кварц-берилл-мусковитовые грейзены с вольфрамитом, пиритом и молибденитом; 3 – кварцевые жилы с пиритом, галенитом и вольфрамитом; 4 – кварцевые жилы с висмутином, пиритом и вольфрамитом; 5 – кварц-топаз-мусковитовые грейзены с вольфрамитом, пиритом и халькопиритом; 6 – кварцевые жилы с вольфрамитом, молибденитом, пиритом и халькопиритом.

Notes: p – primary, ps – pseudosecondary, s – secondary; н.о. – value is undefined, q – quartz, be – beryl, to – topaz. 1 – quartz veins with wolframite and pyrite; 2 – quartz-beryl-muscovite greisen with wolframite, pyrite and molybdenite; 3 – quartz veins with pyrite, galena and wolframite; 4 – quartz veins with bismuthinite, pyrite and wolframite; 5 – quartz-topaz-muscovite greisen with wolframite, pyrite and chalcopyrite; 6 – quartz veins with wolframite, molybdenite, pyrite and chalcopyrite.

зывает на присутствие в растворе хлоридов натрия и калия. Для этих ФВ определены температуры плавления льда $T_{пл}$ $-1,5...-0,1$ °С и концентрации солей 0,2–2,6 мас. % NaCl-экв. Газовая фаза представлена углекислотой и метаном, в отдельных случаях с примесью сероводорода. Для отдельных первичных ФВ VL вида установлено отделение емкости жидкой углекислоты в результате понижения температуры. Ее гомогенизация в процессе последующего нагревания происходит в газовую фазу при температурах $T_{гом CO_2}$ 9–12 °С, при полной гомогенизации включений в интервале температур 300–320 °С. С помощью программного обеспечения получены оценки плотности углекислоты и давления: ρ_{CO_2} 0,13–0,14 г/см³, 1200–1500 бар. Первичные VLS (рис. 3, и) ФВ гомогенизируются в интервале температур 310–330 °С, что соответствует концентрации солей 38,9–40,6 мас. % NaCl-экв. Газовая фаза является смесью углекислоты и метана.

В составе газовой фазы доминирует углекислота. В топазе изучались первичные ФВ вида VL (рис. 3, к). Для них установлены температуры гомогенизации $T_{гом}$ 290–350 °С (в жидкость), температуры плавления льда $T_{пл}$ $-4...-2$ °С и соленость 3,4–6,5 мас. % NaCl-экв. Смесью углекислоты и метана представляет газовую фазу, редко определяется примесь сероводорода.

Для псевдотричных VL ФВ в кварце индикаторным является интервал температур гомогенизации $T_{гом}$ 240–260 °С (в жидкость). Согласно температурам эвтектики $T_{эвт}$ от -28 до -23 °С в растворе присутствуют хлориды натрия, калия и железа. Температуры плавления льда $T_{пл}$ $-3,5...-2,5$ °С, соленость флюида варьирует от 4,2 до 5,7 мас. % NaCl-экв. Кварцевые жилы содержат прожилково-вкрапленную минерализацию, представленную вольфрамитом, молибденитом, пиритом и халькопиритом. В препаратах диагностированы первичные ФВ VL вида (рис. 3, л), отвечающие условиям формирования рудных минералов. Для таких включений получены температуры гомогенизации 300–360 °С. Температуры эвтектики ($-17...-7$ °С) отвечают раствору хлоридов натрия и калия. Оценка концентрации солей по температурам плавления льда $-4...-3$ °С составляет 5–6,5 мас. % NaCl-экв. Газовая фаза является смесью углекислоты и метана.

Антоновогорское месторождение. Рудная минерализация, представленная вкрапленностью вольфрамита и пирита, сосредоточена в кварцевых жилах (AG-1). Для определения физико-химических параметров ее формирования были диагностированы первичные ФВ в кварце вида VL (рис. 3, м). По данным исследований они характеризуются относительно невысокими температурами гомогенизации $T_{гом}$ 220–285 °С (в жидкость). Основываясь на температурах эвтектики $T_{эвт}$ $-9...-8$ °С солевой состав раствора хлоридный, основные катионы – калий, натрий и магний. Температуры плавления льда $T_{пл}$ $-4...-2,5$ °С, концентрация солей в растворе меняется в пределах 4,2–6,5 мас. % NaCl-экв.

В составе газовой фазы преобладает углекислота, в исключительных случаях примесь метана. Криометрия выявила феномен гомогенизации углекислоты в газовую фазу при температурах $T_{гом CO_2}$ $-2,5...-1,5$ °С. Полная гомогенизация таких ФВ происходит в жидкость при температурах $T_{гом}$ 240–260 °С. Эти данные позволили рассчитать плотность углекислоты $\rho_{CO_2} \approx 0,09$ г/см³ и давление флюида 750–850 бар.

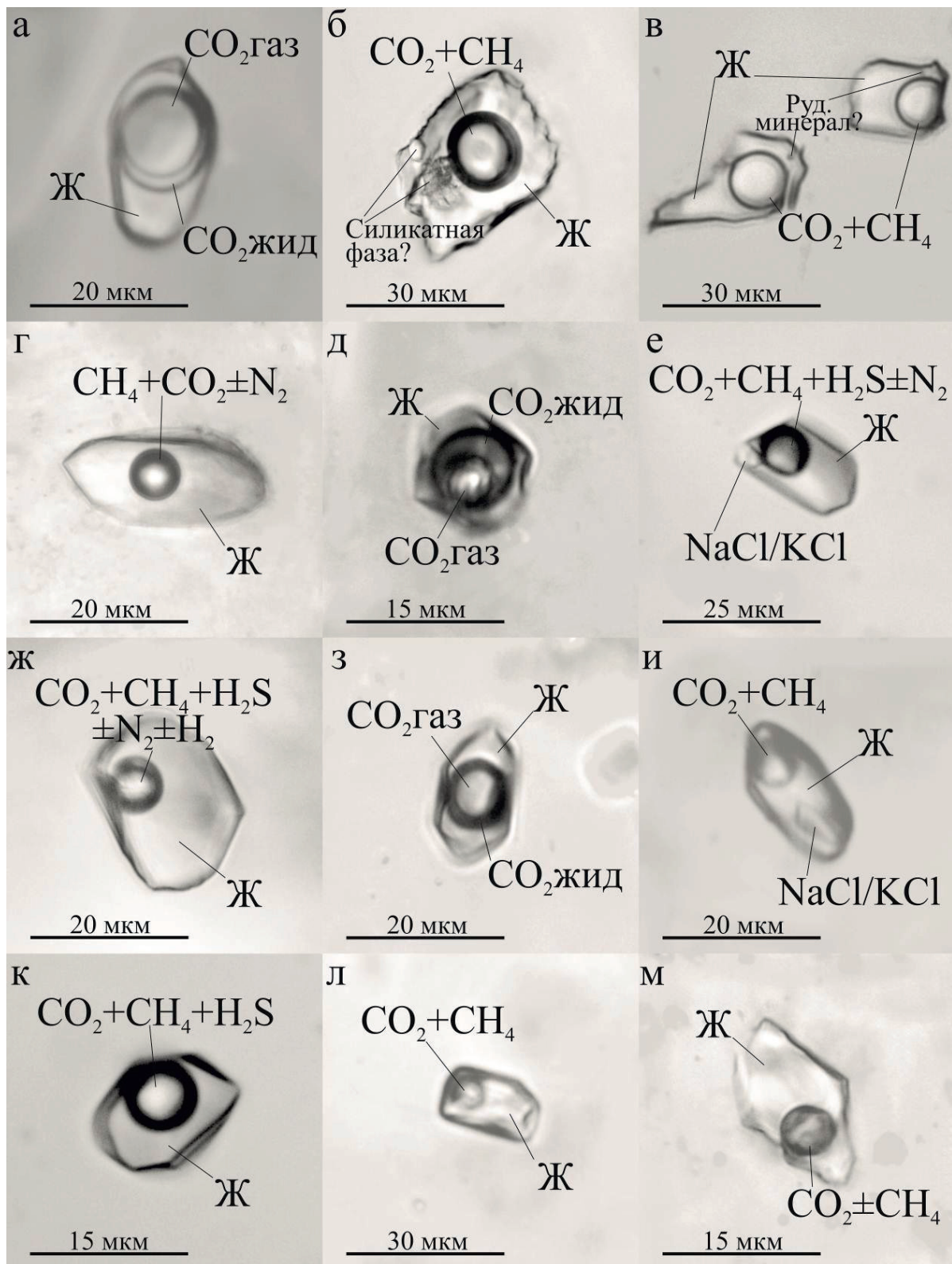
Обсуждение результатов

Рассмотренный ряд минеральных ассоциаций возник в результате многостадийного развития гидротермальных систем, связанных с интрузиями кукульбейского и, вероятно, шахтаминского комплексов. Исследование фазового состава, измерение температур гомогенизации, эвтектики и плавления льда показывают, что на начальном этапе из хлоридных высокотемпературных растворов шло формирование кварц-берилл-мусковитовых и кварц-топаз-мусковитовых грейзенов. Кварц-берилл-мусковитовые грейзены Букукинского месторождения формировались из высоко- и среднетемпературных флюидов (240–320, 350–390 °С), насыщенных углекислотой и восстановленными газами, преобладающим из которых является метан, в меньшей степени азот и водород. В растворе присутствуют хлориды натрия и калия. Совместное нахождение ФВ с жидкой углекислотой и газовой жидкой ФВ с рудным минералом в берилле может свидетельствовать о вскипании флюида в момент захвата [12]. По температурам гомогенизации углекислоты установлены достаточно высокие значения давления минералообразования 2–2,1 кбар, соответствующие умеренным глубинам (~8 км). Рудносные флюиды кварц-топаз-мусковитовых грейзенов Белухинского месторождения средне- и высокотемпературные (240–260, 285–350 °С). В составе газовой фазы повсеместно отмечаются содержания углекислоты, в отдельных случаях – примесь метана и сероводорода. В растворе определены (установлено присутствие) хлориды натрия и калия. Давление в момент рудообразования можно определить, как 1,2–1,5 кбар.

Последующими за грейзенами образованиями можно считать кварцевые жилы с преобладающим рудным минералом – вольфрамитом. На Букукинском месторождении кварцевые жилы с вольфрамитом и пиритом образовывались из высокотемпературного (290–310 °С) хлоридного флюида с умеренными концентрациями солей при постепенном понижении температуры (220–250 °С). Можно отметить смену катионного состава растворов: железо и натрий на натрий и калий. В составе газовой фазы присутствуют: углекислота, метан и азот. Кварцевые жилы с вольфрамитом, молибденитом, пиритом и халькопиритом Белухинского месторождения кристаллизовались при участии высокотемпературных (300–360 °С) слабо концентрированных флюидов (до 6,5 мас. % NaCl-экв.), газовая фаза которых представлена смесью угле-

кислоты и метана. Солевой состав раствора включает хлориды натрия и калия. Кварцевые жилы с вольфрамитом и пиритом Антоновогорского месторождения формировались при участии средне-температурных (220–285 °С) флюидов с низкой

концентрацией солей (до 6,5 мас. % NaCl-экв.). В состав газовой фазы входят углекислота с примесью метана. Для Антоновогорского месторождения получены наиболее низкие значения давления 0,75–0,85 кбар.



На Букукинском месторождении также проявлены вольфрамит-галенит-пирит-кварцевая и вольфрамит-пирит-висмутин-кварцевая минеральные ассоциации. Формирование первой шло при участии хлоридно-натрово-калиевых высокотемпературных (290–390 °С) и высококонцентрированных (до 46,4 мас. % NaCl-экв.) флюидов в условиях снижения температуры (190–260 °С) и концентрации солей (до 0,2 мас. % NaCl-экв.). Состав газовой фазы отличается разнообразием: доминирующий компонент – углекислота, примесь метана и сероводорода, следы азота и водорода. Можно отметить, что первичные VLC и VLS ФВ находятся вместе, и это, вероятно, указывает на гетерогенный захват [13]. Вторая минеральная ассоциация отлагалась из высокотемпературных (340–350 °С) флюидов с умеренной концентрацией солей (9,2–10,5 мас. % NaCl-экв.). В растворе обнаружены хлориды калия и натрия. В составе газовой фазы выявлена углекислота, как главный компонент, метан и сероводород в качестве примесей, следы азота и водорода. Полученные оценки давления для обеих минеральных ассоциаций близки и составляют 1,5–1,7 кбар.

Все изученные нами минеральные ассоциации сформировались при участии хлоридных высокотемпературных флюидов, насыщенных углекислотой. Повсеместно рудоносные флюиды содержат восстановленные газы, из которых превалирует метан, а сероводород, азот и водород находятся в подчиненном количестве. Следует отметить постепенное снижение температуры в процессе формирования каждой отдельно взятой минеральной ассоциации. Катионный состав растворов относительно стабилен. В ранних растворах главную роль среди катионов играл натрий, меньшую – калий. Более поздние растворы содержали преимущественно калий, в подчиненном количестве – натрий. Были получены умеренные значения оценки глубин образования руды. Месторождение Букукинское является наиболее глубинным из рассматриваемых объектов (6–8 км). Наиболее приближенное к поверхности месторождение по полученным данным Антоновское (3–3,5 км), что может объяснять наименьшее разнообразие компонентов газовой фазы. По совокупности эмпириче-

ских данных можно предположить, что рудообразующий флюид являлся магматическим (отделялся от ближнего ассоциирующего плутона) [14].

Полученные данные о возрасте оруденения позволяют рассмотреть вопрос о генетической связи с конкретными магматическими комплексами. Так, полученный Ar-Ar возраст по Букукинскому месторождению хорошо согласуется с данными, полученными Л.Ф. Сырицо и др. [15]. Возраст формирования кварц-вольфрамитовых жил и даек риолит-порфиров (Rb-Sr и Sm-Nd системы) составляет $138,7 \pm 1,5$ и $138 \pm 1,9$ млн лет соответственно. Сопadaющие в пределах погрешности возраст и первичные отношения стронция даек и кварц-вольфрамитовых жил при значении величины $\epsilon Nd = -3,6$ дают основание предполагать их одновременное формирование и, вероятно, единый источник. Полученные нами данные о возрасте вольфрамового оруденения Букукинское и Антоновское месторождений позволяют предположить генетическую связь с магматическими породами кукульбейского комплекса, возраст которых оценивается 145–132 млн лет [15]. В то же время полученный позднерудный возраст кварц-вольфрамитовых жил Белухинского месторождения наводит на мысль о связи вольфрамового оруденения с шахтаминским интрузивным комплексом. Близкие значения возраста получены для многих золоторудных и комплексных золотосодержащих месторождений Восточного Забайкалья, которые находятся в тесной пространственной и генетической связи с магматическими породами шахтаминского комплекса [16–20]. Формирование вольфрамового оруденения на Белухинском месторождении может быть связано или со становлением заключительных фаз шахтаминского комплекса, или с наиболее ранними фазами кукульбейского комплекса, для прояснения этого вопроса требуется проведения изотопно-геохронологических исследований магматических пород, развитых в пределах месторождения.

Заключение

Редкометальная минерализация Кукульбейского рудного района, на примере Букукинское, Белухинское и Антоновское месторождений, формировалась при участии высокотемпера-

Рис. 3. Флюидные включения. Первичные ФВ Букукинское месторождения: кварц-берилл-мусковитовых грезен с вольфрамитом, пиритом и молибденитом в берилле видов VLC (а) и VLS (б, в); кварцевых жил с вольфрамитом и пиритом в кварце вида VL (г); кварцевых жил с пиритом, галенитом и вольфрамитом в кварце видов VLC (д) и VLS (е); кварцевых жил с висмутином, пиритом и вольфрамитом в кварце видов VL (ж) и VLC (з). Первичные ФВ Белухинское месторождения: кварц-топаз-мусковитовых грейзен в кварце вида VLS (и) и в топазе вида VL (к); кварцевых жил с вольфрамитом, молибденитом, пиритом и халькопиритом в кварце вида VL (л). Первичные ФВ Антоновское месторождения кварцевых жил с вольфрамитом и пиритом в кварце вида VL (м). CO₂жид – жидкая углекислота, CO₂газ – углекислый газ, Ж – жидкая фаза

Fig. 3. Fluid inclusions. Primary FI of the Bukuka deposit: quartz-beryl-muscovite greisen with wolframite, pyrite and molybdenite in beryl VLC-type (a) and VLS-type (b, v); quartz veins with wolframite and pyrite in quartz VL-type (g); quartz veins with pyrite, galena and wolframite in quartz VL-type (d) and VLS-type (e); quartz veins with bismuthinine, pyrite and wolframite in quartz VL-type (ж) and VLC-type (z). Primary FI of the Belukha deposit: quartz-topaz-muscovite greisen in quartz VLS-type (и) and in topaz VL-type (к); quartz veins with wolframite, molybdenite, pyrite and chalcopyrite in a quartz VL-type (л). Primary FI of the Antonovogora deposit of quartz veins with wolframite and pyrite in quartz VL-type (m). CO₂жид – liquid carbon dioxide, CO₂газ – gaseous carbon dioxide, Ж – liquid phase

турных гидротермальных углекислотно-водно-хлоридных растворов. Характерной чертой рудоносных флюидов является насыщенность восстановленными газами, такими как метан, сероводород, азот и водород. В течение формирования отдельных минеральных ассоциаций прослеживается эволюционный характер изменения физико-химических условий: понижение температуры и солёности флюида и уменьшение разнообразия в составе газовой фазы. Обнаружены свидетельства эпизодического вскипания растворов, которое, вероятно, способствовало разрушению рудоносных комплексов и отложению рудных минералов. Рудообразование протекало в условиях умеренных давлений, на глубинах от 8 км (для Букукинского

месторождения) до 3 км (для Антоновгорского месторождения). По полученным термобарогеохимическим данным можно сделать вывод о магматической природе рудообразующего флюида. Проведенные изотопно-геохронологические исследования показали, что формирование вольфрамового оруденения Кукульбейского рудного района происходило в поздней юре – раннем мелу и связано со становлением магматических пород кукульбейского комплекса. Однако не исключено, что позднеюрское оруденение генетически связано со становлением пород шахтаминского комплекса.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, проект № 0330–2016–0001 и проект № 0330–2016–0002, а также при поддержке гранта РФФИ № 16–35–00253.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlov V.D. Trace-element composition and origin of granitoids from the Shakhtama complex and Kukul'bei rare-metal complex (Aga zone, Transbaikalia) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – V. 52. – Iss. 5. – P. 526–536.
2. Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Пизнюр А.В. Физико-химические основы прогнозирования постмагматического оруденения (по термобарогеохимическим данным). – М.: Недра, 1981. – 256 с.
3. Физико-химические условия формирования редкометального W-Мо (Вi) оруденения Восточного Забайкалья: на примере Шахтаминского, Букукинского, Белухинского и Антоновгорского месторождений / А.А. Редина, Ю.О. Редин, И.Р. Прокопьев, В.Ф. Дульцев // *Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты. Сборник материалов Всероссийской конференции, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика А.Г. Бетехтина*. – М.: ИГЕМ РАН, 2017. – С. 218–221.
4. Гайворонский Б.А. Букукинский месторождение // *Месторождения Забайкалья*. – Чита; М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. 1. – Кн. 1. – С. 146–148.
5. Скурский М.Д. Недра Забайкалья. – Чита: Читинская Областная Типография, 1996. – 692 с.
6. Thermochronology of the Chernorud granulite zone, Ol'khon region, Western Baikal area / A.V. Travin, D.S. Yudin, A.G. Vladimirov, S.V. Khromykh, N.I. Volkova, A.S. Mekhonoshin, T.B. Kolotilina // *Geochemistry international*. – 2009. – V. 47. – № 9. – P. 1107–1124.
7. Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of discordant ⁴⁰Ar/³⁹Ar age-spectra of mesozoic tholeiites from antarctica // *Geochimica et cosmochimica acta*. – 1977. – V. 41. – № 1. – P. 15–32.
8. Roedder E. Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy – Washington: Mineralogical Society of America, 1984. – 644 p.
9. Борисенко А.С. Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений*. – М.: Недра, 1982. – С. 37–46.
10. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. – Blacksburg, VA: Virginia Tech, 1994. – P. 117–130.
11. Brown P.E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // *American Mineralogist*. – 1989. – V. 64. – № 11–12. – P. 1390–1393.
12. Higgins N.C. Fluid inclusion evidence for the transport of tungsten by carbonate complexes in hydrothermal solutions // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1980. – V. 17. – № 7. – P. 823–830.
13. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit // *Lithos*. – 2001. – V. 55. – Iss. 1–4. – P. 229–272.
14. Pirajno F. Hydrothermal processes and mineral systems. – Dordrecht: Springer, 2009. – 1250 p.
15. Продуктивность редкометальных плюмазитовых гранитов и условия образования месторождений вольфрама / Л.Ф. Сырицо, Е.В. Баданина, В.С. Абушкевич, Е.В. Волкова, А.В. Терехов // *Геология рудных месторождений*. – 2018. – Т. 60. – № 1. – С. 38–56.
16. Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. – Новосибирск: Академическое издательство «ГЕО», 2006. – 291 с.
17. The Zhireken porphyry Mo ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): U-Pb age, sources, and geodynamic setting / A.P. Berzina, A.N. Berzina, V.O. Gimon, V.Y. Kiseleva, S.V. Palesskii, T.B. Bayanova, R.S. Krymskii, E.N. Lepekina // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – V. 5. – № 3. – P. 446–465.
18. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A. Gold-bismuth mineralization of the Lugokan ore field (Eastern Transbaikalia): age, mineral composition and relationship with magmatism // *Ore Geology Review*. – 2015. – V. 70. – P. 228–240.
19. New data on the age of gold mineralization of the Lugokan ore cluster (Eastern Transbaikalia) / Yu.O. Redin, V.F. Dultsev, P.A. Nevolko, A.V. Ponomarchuk // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – V. 469. – Iss. 2. – P. 851–854.
20. The large Bystrinskoe Cu-Au-Fe deposit (eastern trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn-porphyry ore-forming system related to adakite / V.A. Kovalenker, S.S. Abramov, G.D. Kiseleva, T.I. Krylova, Y.I. Yazykova, N.S. Bortnikov // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – V. 468. – Iss. 2. – P. 566–570.

Поступила 28.02.2019 г.

Информация об авторах

Редина А.А., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Мокрушников В.П., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Редин Ю.О., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 553.46(550.83:550.93)

FORMATION CONDITIONS AND AGE OF THE RARE-METAL MINERALIZATION OF THE KUKULBEY ORE REGION (EASTERN TRANSBAIKALIA)

Anna A. Redina¹,
redina@igm.nsc.ru

Viktor P. Mokrushnikov¹,
viktorm@igm.nsc.ru

Yury O. Redin¹,
redin@igm.nsc.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS,
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research. Identification of conditions, sources, movements and sequence of formation of rare metal concentrations in different geological settings is primary and fundamental issues of ore geology and geochemistry. To come up with this one the authors have determined the formation conditions of rare-metal mineralization by modern methods and, furthermore, carried out isotope-geochronological investigations, based on the study of the typical deposits of the Kukulbey ore region.

The main aim is to obtain new data on physico-chemical conditions for formation of rare metal mineralization, and determine the age of mineralization.

Objects of the research are Bukuka, Belukha and Antonovogora deposits.

Methods. Fluid inclusions were studied in polished thin sections by cryo-thermometry and Raman spectroscopy. Cryo-thermometric studies were carried out in the THERM-600 microcooler from Linkam. The samples were successively cooled to $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ and heated until the substance of inclusions was completely homogenized. During the observation, the temperatures of the eutectic, melting of ice and homogenization were measured. Melting temperatures of ice for two-phase fluid inclusions and melting of salt crystals for three-phase allowed establishing the concentration of salts in terms of NaCl-equivalent. The composition of gas and mineral phases of the fluid inclusions was studied by Raman spectroscopy – the Ramanor U-1000 spectrometer and the Horiba DU420E-OE-323 detector from Jobin Yvon, the Millennia Pro laser from Spectra-Physics; Confocal Raman Microscope alpha 300R from WITec. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method of isotope-geochronological dating by the method of stepwise heating was used to establish the absolute age of mineralization.

Results. Ore mineral associations of these deposits were formed from chloride high-temperature fluids saturated with carbon dioxide. Ore-bearing fluids ubiquitously contain reduced gases. The dominant one is methane, hydrogen sulfide, nitrogen and hydrogen are subordinate gases. The authors have traced an evolution of ore-bearing fluid within the crystallization of individual mineral associations: decrease in temperature and concentration of the solutions and conversion of cationic composition from essentially sodium to essentially potassium. Moderate estimates of depths were obtained: 6–8 km for the Bukuka, 4,5–6 km for the Belukha and 3–3,5 km for the Antonovogora deposit. The age of rare metal mineralization is established at Antonovogora deposit – $146,7\pm 1,7\text{ Ma}$ (muskovite from quartz-muskovite greisen with wolframite); at the Bukuka deposit – $135\pm 2,8\text{ Ma}$ (sericite from quartz-wolframite veins); at the Belukha deposit – $155,6\pm 1,8\text{ Ma}$ (sericite from quartz-wolframite veins).

Conclusions. Rare-metal mineralization of the Kukulbey ore region, based on the Bukuka, Belukha and Antonovogora deposits, was formed from high-temperature hydrothermal solutions of magmatic origin saturated with reduced gases (methane, hydrogen sulphide, nitrogen and hydrogen). The crystallization depth varies from 8 to 3 km. According to isotope-geochronological studies the formation of tungsten mineralization within the Kukulbey ore region occurred in the Late Jurassic-early Cretaceous. Thus, rare-metal deposits of this area are probably associated with both the Kukulbey and the Shakhtama complexes.

Key words:

Rare-metal deposits, age, formation conditions, relations to magmatism, Eastern Transbaikalia.

The reported study was funded by the scope of the State task, project No. 0330–2016–0001 and 0330–2016–0002, and by RFBR according to the research project No. 16–35–00253.

REFERENCES

1. Kozlov V.D. Trace-element composition and origin of granitoids from the Shakhtama complex and Kukul'bei rare-metal complex (Aga zone, Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, Iss. 5, pp. 526–536.
2. Lazko E.M., Lyakhov Yu.V., Piznyur A.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy prognozirovaniya postmagmaticheskogo orudneniya* [Physico-chemical basis for predicting postmagmatic mineralization]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 256 p.
3. Redina A.A., Redin Yu.O., Prokopyev I.R., Dultsev V.F. *Fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya redkometalnogo W-Mo (Bi) orudneniya Vostochnogo Zabajkalya: na primere Shakhtaminskogo, Bukukinskogo, Belukhinskogo i Antonovogorskogo mestorozhdeniy* [Formation conditions of rare-metal W-Mo (Bi) mineralization of the Eastern Transbaikalia: by the example of the Shakhtama, Bukuka, Belukha and Antonovogora deposits]. *Osnovnye problem v uchenii ob endogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh: novye gorizonty. Sbornik materialov konferentsii, posvyashchennoy 120-yu letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya rossiyanskogo uchenogo akademika A.G. Betekhtina* [The main problems in the study of endogenous ore deposits: new horizons. Proc. of the All-Russian Conference, dedicated to the 120th anniversary of the birth of the outstanding Russian academician A.G. Bethetein]. Moscow, IGEM RAS, 2017. pp. 218–221.
4. Gaivoronskii B.A. Bukukinskoe mestorozhdenie [Bukukinskoe deposit]. *Mestorozhdeniya Zabaikalya* [Deposits of Transbaikalia]. Chita, Geoinformmar Publ., 1995. Vol. 1, B. 1, pp. 146–148.

5. Skursky M.D. *Nedra Zabaikalya* [The depths of the Transbaikalia]. Chita, Chita Regional Printing Office, 1996. 692 p.
6. Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B. Thermochronology of the Chernorud granulite zone, Ol'khon region, Western Baikal area. *Geochemistry international*, 2009, vol. 47, no 9, pp. 1107–1124.
7. Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of discordant $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1977, vol. 41, no. 1, pp. 15–32.
8. Roedder E. *Fluid inclusions: Reviews in Mineralogy*. Washington, Mineralogical Society of America, 1984. 644 p.
9. Borisenko A.S. Analiz solevogo sostava rastvorov gazovo-zhidkikh vklyucheniy v mineralakh metodom kriometrii [Salt composition analysis of solutions of gas-liquid inclusions in minerals using the cryometry method]. *Ispolzovanie metodov termobarogeochemii pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdeniy* [The use of thermobarogeochemical methods in the search and study of ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1982. pp. 37–46.
10. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H_2O - NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Blacksburg, VA, Virginia Tech, 1994. pp. 117–130.
11. Brown P.E. FLINCOR: a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *American Mineralogist*, 1989, vol. 64, no. 11–12, pp. 1390–1393.
12. Higgins N.C. Fluid inclusion evidence for the transport of tungsten by carbonate complexes in hydrothermal solutions. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1980, vol. 17, no. 7, pp. 823–830.
13. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposit. *Lithos*, 2001, vol. 55, Iss. 1–4, pp. 229–272.
14. Pirajno F. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Dordrecht, Springer, 2009. 1250 p.
15. Svyritso L.F., Badanina E.V., Abushkevich V.S., Volkova E.V., Terekhovc A.V. Fertility of rare-metal peraluminous granites and formation conditions of tungsten deposits. *Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 38–56. In Rus.
16. Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.V. *Zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Zabaikalya* [Gold-bearing Ore-magmatic Systems of Transbaikalia]. Novosibirsk, Academic publishing house «GEO», 2006. 291 p.
17. Berzina A.P., Berzina A.N., Gimov V.O., Kiseleva V.Y., Paleskii S.V., Bayanova T.B., Krymskii R.S., Lepekhina E.N. The Zhireken porphyry Mo ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia): U-Pb age, sources, and geodynamic setting. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 446–465.
18. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A. Gold-bismuth mineralization of the Lugokan ore field (Eastern Transbaikalia): age, mineral composition and relationship with magmatism. *Ore Geology Review*, 2015, vol. 70, pp. 228–240.
19. Redin Yu.O., Dultsev V.F., Nevolko P.A., Ponomarchuk A.V. New data on the age of gold mineralization of the Lugokan ore cluster (Eastern Transbaikalia). *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 469, Iss. 2, pp. 851–854.
20. Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.I., Yazykova Y.I., Bortnikov N.S. The large Bystrinskoe Cu-Au-Fe deposit (eastern trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn-porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, Iss. 2, pp. 566–570.

Received: 28 February 2019.

Information about the authors

Anna A. Redina, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS.

Viktor P. Mokrushnikov, engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS.

Yury O. Redin, Cand. Sc., researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS.