



УДК 550.425:549.02:553.45(572-62)

## РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ В МИНЕРАЛАХ ОЛОВОНОСНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ ВЕРХНЕУРМИЙСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК РОССИИ)

В.И.АЛЕКСЕЕВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Исследована редкометалльная минерализация оловоносных метасоматитов Верхнеурмийского рудного узла на Дальнем Востоке России. Изучен минеральный состав метасоматитов пяти стадий формирования цвиттер-турмалинитового оловоносного комплекса: биотит-серицитовый, мусковит-кварцевой, сидерофиллит-топазовой, кварц-турмалиновой и хлорит-серицитовый. Выделены минералы, содержащие редкие металлы, и оценены концентрации редких металлов.

Определена рудно-геохимическая специализация метасоматитов Верхнеурмийского рудного узла. Показано наличие в составе оловоносных метасоматитов района множества минералов редких металлов, имеющих стратегическое значение для развития минерально-сырьевой базы России: Nb, Ta, W, Y, REE (весь спектр от La до Lu), Be, Li, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd. Минералы-концентраторы редких металлов разделены на собственно редкометалльные и минералы ( жильные и рудные) с изоморфными примесями редких металлов.

Изучена последовательность образования минералов-концентраторов редких металлов района и прослежена эволюция их видового состава. Минералы редких металлов образуются в течение всей истории формирования цвиттер-турмалинитовой формации – от прерудной стадии биотитовых фельдшпатолитов до пострудной стадии хлорититов, включая рудную стадию цвиттеров. Выявлено постадийное снижение интенсивности редкометалльного минералообразования и эволюция состава минерализации от литофильных редких металлов к халькофильным: (LREE, Zr, Hf) → (W, Nb, Ta, Y, HREE, Sc) → (Sn, In, Cd, Se).

Выявлены магматический, метасоматический и кристаллохимический факторы образования минералов-концентраторов редких металлов Верхнеурмийского рудного узла. Перспективы узла связаны с наличием литий-фтористых гранитов правоурмийского комплекса, контролирующих размещение вольфрамово-оловорудных цвиттеров и турмалинитов с попутной редкометалльной минерализацией.

**Ключевые слова:** редкие металлы; литий-фтористые граниты; биотититы; грейзены; цвиттеры; турмалиниты; хлорититы; Верхнеурмийский рудный узел; Дальний Восток России

**Как цитировать эту статью:** Алексеев В.И. Редкие металлы в минералах оловоносных метасоматитов верхнеурмийского рудного узла (Дальний Восток России) // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 335-340. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.335

**Введение.** Понятие «редкие металлы» постоянно меняет свое содержание, в зависимости от развития геологоразведочных и перерабатывающих технологий и конъюнктуры сырьевого рынка. Неизменными критериями «редкого металла» со времен Д.И.Менделеева и В.И.Вернадского остаются низкий кларк и технологическая востребованность химического элемента [6, 16]. Россия имеет значительный ресурсный потенциал редких металлов, источниками которых служат, в частности, месторождения с редкометалльными гранитами. Промышленная минерализация таких месторождений (колумбит, пироксид, циркон, фергусонит и др.) связана с фельдшпатолитами, сопровождающими щелочные граниты (Катугин, Забайкалье; Улуг-Танзек, Тува; Ермаковское, Бурятия и др.), тогда как цвиттеры, связанные с субщелочными Li-F-гранитами, несут вольфрамово-оловянную минерализацию (Тигриное, Приморье; Одинокое, Якутия; Иульгин, Чукотка и др.) [15].

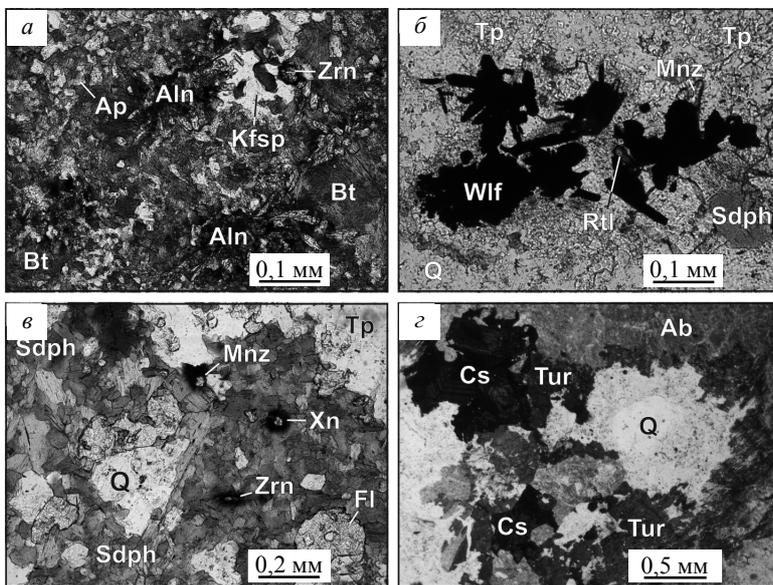
Одним из путей развития сырьевой базы редких металлов России является минералогическая переоценка ранее разведанных вольфрамово-оловорудных месторождений Дальнего Востока, связанных с Li-F-гранитами [2, 12]. Необходимо выяснить, какие редкие элементы и в каких концентрациях заключены в тех или иных минералах этих месторождений, какие минералы являются промышленными носителями редких элементов. Это обеспечит получение критериев оценки вольфрамово-оловорудных месторождений на попутные редкие металлы. В одном из известных районов Приамурья – Верхнеурмийском медь-вольфрам-оловорудном узле, ранее выявлены некоторые минералы редких металлов цвиттер-турмалинитовой метасоматической формации и прослежена эволюция их видового состава [4, 5]. В данной статье исследована редкометалльная минерализация метасоматитов пяти стадий формирования этого рудного узла: биотититов → мусковитовых грейзенов → цвиттеров → турмалинитов → хлорититов [3, 11]. Цель

работы – выявление в составе оловоносных метасоматитов минералов, содержащих редкие металлы, изучение эволюции редкометалльной минерализации и первичная оценка ее практического значения.

**Методология и методы исследования.** Научно-методической основой работы является системно-целевой подход к изучению гидротермально-метасоматических образований. основополагающий принцип исследования – рациональное комплексирование методов изучения структурно-геологической, метасоматической, минералогической, геохимической и рудной зональности на основе крупномасштабного геологического картирования [13]. Минералогическое изучение метасоматитов включает оценку их состава и строения, выделение минералов-индикаторов горных пород, исследование конституции минералов и их роли в петро- и рудогенезе [2, 3, 11].

Особое внимание уделено рудным и жильным минералам, содержащим редкие металлы. На участках минерализации, выявленных по данным геохимического картирования, производился отбор представительных проб метасоматитов, их петрографическое и геохимическое изучение в Центре коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета с помощью эмиссионного спектрального и рентгено-спектрального флуоресцентного анализа (ED-2000, XRF-1800), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICPE-9000). В пробах с повышенным содержанием редких металлов был проведен электронно-микроскопический поиск минералов-носителей (JSM-6460LV, JSM-7001F, JIB-4500, Cameca MS-46). Химический состав слюд, флюорита, вольфрамитов, касситеритов, сульфидов определен методами «мокрой химии», ICP-MS, AAS. Состав микроминералов исследован на электронно-зондовых микроанализаторах с волновыми и энергодисперсионными спектрометрами (CamScan MV2300, JSM-7001F, JXA-8230).

**Оловоносные метасоматиты района.** Верхнеурмийский рудный узел (ВУРУ) входит в состав Баджальского рудного района, расположенного в Хингано-Охотском вулканическом поясе [9, 10]. Баджальский район расположен в эпицентре крупнейшего астеносферного купола, фиксируемого отрицательной аномалией силы тяжести и интенсивным тепловым потоком литосферы [2]. В строении ВУРУ выделяется мощная меловая толща кислых вулканитов, пронизанная



субвулканическими и гипабиссальными гранитовыми интрузиями. Верхнеурмийский рудный узел занимает площадь Верхнеурмийского гранитового плутона и примыкающего к нему Урмийского игнимбритового вулканогена. В Верхнеурмийском массиве биотитовых гранитов выделены литий-фтористые граниты правоурмийского комплекса, под воздействием которых в восточной приконтактной зоне массива происходило формирование рудоносных метасоматитов цвиттертурмалиновой формации и образование крупного Правоурмийского вольфрамово-оловорудного месторождения [1-3, 10, 11, 14].

Минералы, содержащие редкие металлы, в оловоносных метасоматитах Верхнеурмийского рудного узла (микрофотографии шлифов без анализатора, Leica DM750P):

*a* – калишпат-кварц-биотитовый метасоматит с алланитом-(Ce), Hf-цирконом, Ce-апатитом; *б* – сидерофиллит-кварц-топазовый цвиттер с Nb-вольфрамитом, Nb-W-рутилом, монацитом-(Ce); *в* – топаз-кварц-сидерофиллитовый цвиттер с Y-флюоритом, монацитом-(Ce), ксенотимом-(Y), Hf-цирконом; *г* – альбит-кварц-турмалиновый метасоматит с In-Nb-касситеритом. Минералы: Ab – альбит, Aln – алланит-(Ce), Ap – апатит-(CaF), Cs – касситерит, Fl – флюорит, Kfsp – полевоый шпат, Mnz – монацит-(Ce), Sdph – сидерофиллит, Tp – топаз, Tur – турмалин, Q – кварц, Xn – ксенотим-(Y), Zrn – циркон

Наиболее ранними оловоносными образованиями района являются гидротермалиты *биотит-серицитовой (первой) стадии*, представленные биотит-полевошпатовыми и биотит-серицитовыми метасоматитами. Предрудные биотититы слагают крутопадающие зоны мощностью 0,1-2 м и протяженностью 2-200 м на



рудопроявлениях Осьбаджальского (Вольфрам-Макит, Двойное), Правоурмийского (Правоурмийское, Дождливое, Аленушкино, Сульфидное), Вольфрамового (Лесное) и Сынчугинского (Высокое, Длинное) рудных полей. Биотитовые фельдшпатолиты сложены биотитом, мусковитом, альбитом, калиевым полевым шпатом; содержат в подчиненных количествах кварц, гранат, турмалин. Акцессорные и рудные минералы – пирротин, халькопирит, флюорит, апатит, рутил, шеелит. В составе биотитов выделены минералы, содержащие редкие металлы: алланит-(Ce), циркон, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), апатит-(F), ильменит, торит, биотит (см. рисунок, а).

На биотитовые метасоматиты наложены грейзены *мусковит-кварцевой (второй) стадии*, которыми сложены крутопадающие зоны мощностью 0,1-4,0 м (до 20 м) и протяженностью 200-1800 м на рудопроявлениях Грустное, Гранитное, Улун, Вольфрам-Макит (рудное поле Ось Баджала); Аленушкино, Южное, Геофизическое (Правоурмийское поле); Лесное (Вольфрамовое поле), Высокое, Ветвистое (Сынчугинское поле). Состав метасоматитов мусковит-кварцевый; пронизывающие их кварцевые жилы содержат мусковит, флюорит и сульфиды. Рудные минералы – касситерит, вольфрамит, молибденит, висмутин и арсенопирит. Минералы, содержащие редкие металлы, в мусковитовых грейзенах представлены касситеритом, вольфрамитом, молибденитом и мусковитом.

*Сидерофиллит-топазовая (третья) стадия* включает образование многочисленных тел вольфрамово-оловорудных цвиттеров месторождения Правоурмийское и рудопроявлений Вольфрам-Макит, Двойное (Ось Баджала); Лесное (Вольфрамовое поле), Высокое (Сынчугинское поле) [5, 9, 14]. Цвиттеры слагают мощные (до 40 м) залежи и маломощные (*n* сантиметров) околожилные ореолы в штокверках топазовых и кварцевых прожилков. Метасоматиты сложены кварцем, сидерофиллитом, топазом, мусковитом, а их размещение контролируется Li-F-гранитами [2, 3]. Состав акцессорной и рудной минерализации цвиттеров: флюорит, касситерит, вольфрамит, арсенопирит, леллингит, берилл, шеелит, самородный висмут, висмутин и др. Минералы оловорудных цвиттеров, содержащие редкие металлы: фергусонит-(Y), эвксенит-(Y), плумбопирохлор, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), циркон, берилл, вольфрамит, касситерит, шеелит, сфалерит, самородный висмут, рутил, сидерофиллит, мусковит, флюорит (рисунок, б, в).

Особенностью продуктов *кварц-турмалиновой (четвертой) стадии* является преобладание существенно турмалиновых метасоматических жил мощностью до 40 см с околожилным окварцеванием и альбитизацией вмещающих пород. На грейзеновых проявлениях (Правоурмийское, Вольфрам-Макит, Гранитное, Лесное, Высокое) они приурочены к телам кварц-топазовых и мусковит-кварцевых оловорудных грейзенов. Существенна роль околожилных метасоматитов в крутопадающих зонах оловорудных турмалинитов мощностью 0,3-9 м и протяженностью 500-600 м рудопроявлений Двойное, Проскурникова, Орокот, Омот-Макит (поле Ось Баджала); Дождливое (Правоурмийское поле); Длинное, Восточное (Сынчугинское поле). Турмалиниты сложены агрегатом кварца, серицита, альбита с примесью турмалина, хлорита, флюорита; содержат вкрапленность и прожилки касситерита, халькопирита и борнита, реже встречаются станнин, станноидит, моусонит, виттихенит, сфалерит, пирротин, пирит, самородный висмут. Минералы турмалинитов, содержащие редкие металлы, – монацит-(Ce), циркон, шеелит, рокезит, касситерит, вольфрамит, халькопирит, станноидит, борнит, самородный висмут, пирит, эпидот, флюорит (рисунок, г).

Метасоматиты *хлорит-серицитовый (пятая) стадия* развиты вдоль крутопадающих разломов и пологих взбросов, образуя зоны мощностью 0,1-83 м, протяженностью 500-1600 м на рудопроявлениях Хлоритовое, Ирунда-Макит (поле Ось Баджала); Правый Омот, Сульфидное (Правоурмийское поле); Восточное (Сынчугинское поле). Породообразующие минералы пострудных хлорититов – хлорит, альбит, серицит, кварц; второстепенные минералы – эпидот, кальцит, турмалин, пренит, цеолиты. Акцессорные и рудные минералы – флюорит, пирит, сфалерит, галенит, касситерит, антимонит. Минералы хлорититов, содержащие редкие металлы, – сфалерит, галенит, флюорит, эпидот.

**Редкие металлы в минералах оловоносных метасоматитов Верхнеурмийского рудного узла.** В метасоматитах *биотит-серицитовый стадия* среди редкометалльных минералов наибольший интерес представляет алланит-(Ce) (рисунок, а). Минерал содержит 4,76-17,52 Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*;

\* Массовое содержание всех элементов и минералов указано в процентах.

общее содержание легких РЗЭ (La, Ce, Nd) 6,78-26,52; ThO<sub>2</sub> до 3,93; SnO<sub>2</sub> до 0,93. На рудопоявлении Сульфидное встречен алланит, содержащий Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 8,56. В биотит-полевошпатовых метасоматитах встречаются микровключения монацита и ксенотима. Монацит содержит LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 52,05-69,54; ThO<sub>2</sub> 0-10,45; ксенотим – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 41,62-48,94; HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6,56-17,28; ThO<sub>2</sub> 0-0,75; UO<sub>2</sub> 0-0,90. Характерно присутствие циртолита: содержание ZrO<sub>2</sub> составляет 54,81-68,42; каймы обогащены HfO<sub>2</sub> до 2,15; ThO<sub>2</sub> до 1,58; UO<sub>2</sub> до 1,88. В редких случаях биотитовые метасоматиты содержат редкоземельный (La, Ce, Nd) апатит-(CaF) (LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,22-32,99; ThO<sub>2</sub> 1,21-2,96), ильменит (WO<sub>3</sub> 3,62-5,56; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 1,24), торит (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 6,65). Минералом-концентратором редких элементов служит биотит: Li<sub>2</sub>O 0,04-0,43; Rb<sub>2</sub>O 0,06-0,32; Cs<sub>2</sub>O 0,01-0,06; ZrO<sub>2</sub> 0,02-0,20; WO<sub>3</sub> 0-0,09; SnO<sub>2</sub> 0-0,01; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,05.

В грейзенах *мусковит-кварцевой стадии* носителями редких элементов являются главные рудные минералы: касситерит (WO<sub>3</sub> 0,02-0,56; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,02-0,18; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,001-0,004), вольфрамит (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,05-1,25; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0-0,91; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01-0,27; La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,007). Относительно редко встречается молибденит с содержанием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0-0,05; Ag<sub>2</sub>O 0-0,04. В мусковите установлено наличие примесей Li<sub>2</sub>O 0,01-0,56; WO<sub>3</sub> 0-0,02; SnO<sub>2</sub> 0-0,01.

Минералы, содержащие редкие металлы, особенно разнообразны в рудных цвиттерах *сидерофиллит-топазовой стадии* (рисунок, в). В них выявлены редкометалльные минералы: фергусонит (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 49,18-54,16; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 22,15-32,50; HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9,27-34,41; LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-2,71), эвксенит (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 52,99-62,81; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9,88-22,12; WO<sub>3</sub> 9,52-13,72), плюмбопироксид (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44,56-56,22; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-13,98; WO<sub>3</sub> 10,34-18,54), монацит (LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 49,28-66,86; ThO<sub>2</sub> 0,48-10,71; UO<sub>2</sub> 0,37-2,14), ксенотим (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 35,75-51,45; HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14,34-25,67; LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-2,38; ThO<sub>2</sub> 0-1,63; UO<sub>2</sub> 0,58-3,73), циркон (ZrO<sub>2</sub> 55,38-70,11; HfO<sub>2</sub> 0,29-1,98; ThO<sub>2</sub> 0-0,41; UO<sub>2</sub> 0-1,48) [4]. В метасоматитах Верхнеурмийского массива и Правоурмийского месторождения описаны находки берилла.

Главные рудные минералы – вольфрамит и касситерит (рисунок, б), содержат W, Nb, Sc, In: вольфрамит – WO<sub>3</sub> 66,41-77,77; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0-2,15; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-1,41; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,07; касситерит – WO<sub>3</sub> 0-0,94; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,01-0,13; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,001-0,012; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,001. Наиболее высокие концентрации редких элементов характерны для минералов западной части ВУРУ, расположенной в гранитах Верхнеурмийского массива [4, 8]. Второстепенные рудные минералы также обогащены редкими элементами: шеелит – WO<sub>3</sub> 69,66-87,53; MoO<sub>3</sub> 0,36-10,46; сфалерит – CdO 0-1,04. В отдельных случаях наблюдается обогащение редкометалльными примесями самородного висмута (SeO<sub>2</sub> до 1,50); рутила (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> до 1,30; WO<sub>3</sub> до 4,17), ильменита (WO<sub>3</sub> до 2,84). Существенные объемы редких металлов заключены в жильных минералах цвиттеров: флюорите, сидерофиллите и мусковите [8]. Флюорит цвиттеров обогащен Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 0,47, содержит полный спектр тяжелых (до 0,14) и легких (до 0,07) РЗЭ. Сидерофиллит содержит Li<sub>2</sub>O 0,05-1,53; Rb<sub>2</sub>O 0,12-0,60; Cs<sub>2</sub>O 0,01-0,15; SnO<sub>2</sub> 0,01-0,62; WO<sub>3</sub> 0,001-0,015; мусковит – Li<sub>2</sub>O 0,01-0,65; Rb<sub>2</sub>O 0,03-0,11; Cs<sub>2</sub>O 0-0,01; SnO<sub>2</sub> 0-0,03; WO<sub>3</sub> 0,01-0,18.

В турмалинитах *кварц-турмалиновой стадии* собственно редкометалльные минералы встречаются редко. В виде включений в турмалине зафиксированы монацит (LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 49,20-51,04; ThO<sub>2</sub> 3,17-3,95), циркон (ZrO<sub>2</sub> 61,68-70,73; HfO<sub>2</sub> 0,13-3,04; ThO<sub>2</sub> 0,09-1,00; UO<sub>2</sub> 0,20-1,25), шеелит (WO<sub>3</sub> 86,90). В составе сульфидных выделений описан рокезит (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 51,26-56,91; CdO 0,55-0,99; SnO<sub>2</sub> 0,75-1,16; Ag<sub>2</sub>O 0,34-0,99). В турмалиновых метасоматитах достаточно широк круг минералов, содержащих редкие металлы в виде примесей (рисунок, г). Среди них главные рудные минералы: касситерит (WO<sub>3</sub> 0,07-0,18; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0-0,07; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,01; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,002), вольфрамит (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,05-0,53; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01-0,03; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,001-0,002), халькопирит (SnO<sub>2</sub> 0,12-3,17; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01-0,94; Ag<sub>2</sub>O 0-0,53), станноидит (SnO<sub>2</sub> 24,42-26,89; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,67; CdO 0-0,37; Ag<sub>2</sub>O 0-0,74), борнит (SnO<sub>2</sub> 0-3,75; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,54; Ag<sub>2</sub>O 0-0,33), самородный висмут (SnO<sub>2</sub> 0-0,83; CdO 0-0,63; Ag<sub>2</sub>O 0-0,67), пирит (WO<sub>3</sub> 1,69-4,35; SnO<sub>2</sub> 0-0,17). Второстепенные минералы турмалинитов содержат примесь легких РЗЭ (La, Ce, Nd), иттрия и иных редких металлов: эпидот (LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15,84-21,21; ThO<sub>2</sub> 0-0,99; SnO<sub>2</sub> 0-0,69), флюорит (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,01-0,07; LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,06; HREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,02; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,001; SnO<sub>2</sub> 0,002-0,007).

Хлоритовые метасоматиты *пострудной хлорит-серицитовой стадии* не содержат редкометалльных минералов. Однако в характерной для них полиметаллической сульфидной минерализации наблюдаются примеси In, Cd, Se и других редких металлов: сфалерит – CdO 0,09-2,12; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,003-1,085; SnO<sub>2</sub> 0-0,79; Ag<sub>2</sub>O 0-0,01; галенит – SeO<sub>2</sub> 1,57-10,83; SnO<sub>2</sub> 0-0,07; In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0-0,001;



$\text{Ag}_2\text{O}$  0,01-6,78. Флюорит хлорититов содержит  $\text{Y}_2\text{O}_3$  0-0,64;  $\text{HREE}_2\text{O}_3$  0-0,02;  $\text{LREE}_2\text{O}_3$  0-0,03;  $\text{SnO}_2$  0-0,01; встречается эпидот с примесью  $\text{SnO}_2$  0,44-6,40.

**Обсуждение результатов.** В статье показано наличие в составе оловоносных метасоматитов Верхнеурмийского рудного узла множества минералов редких металлов, которые имеют стратегическое значение для развития минерально-сырьевой базы России: Nb, Ta, W, Y, REE (весь спектр от La до Lu), Be, Li, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd. В связи с этим возникают задачи исследования происхождения, эволюции редкометалльной минерализации и оценки ее практического значения. К важнейшим факторам формирования редкометалльной минерализации относятся магматический, метасоматический и кристаллохимический [8, 10-13, 15, 16].

*Магматический и метасоматический факторы* редкометалльной минерализации ВУРУ исследованы ранее. В изучаемом районе выделен правоурмийский редкометалльно-гранитовый комплекс, с которым связывается формирование крупных вольфрамово-оловорудных месторождений, несущих редкометалльную минерализацию [1, 2, 5]. Гидротермально-метасоматические условия формирования редкометалльных минералов дополнены в данной статье характеристикой минерального состава оловоносных метасоматитов. Разработана схема многостадийного развития пневматолитово-гидротермального процесса, определившего формирование вольфрамово-оловорудного цвиттер-турмалинового комплекса ВУРУ [1, 3, 8, 11, 14].

*Кристаллохимический фактор* редкометалльной минерализации включает три самостоятельных условия: а) наличие в материнском расплаве редких элементов, кристаллохимически несовместимых с пороодообразующими элементами и накапливающихся в остаточных расплавах и флюидах; б) формирование редкими металлами в сочетании с родственными элементами (Ti, Al, Mn, Fe, Sn) политипных кристаллических структур, т.е. самостоятельных редкометалльных минералов [7]; в) изоморфное вхождение редких металлов в состав рудных и жильных минералов. Первому условию удовлетворяет рудно-магматическая система ВУРУ, обеспечившая масштабную пневматолито-гидротермальную переработку толщ, вмещающих Li-F-граниты, при участии флюидов, насыщенных F, Nb, Ta, Li, Zr, Be, Y, REE [1, 2, 4, 5, 8-11, 14]. Как показано в статье, в районе реализованы и два последних условия: среди минералов редких металлов отчетливо выделяются две категории – собственно редкометалльные минералы (фергусонит, эвксенит, плюмбопирохлор, алланит, циркон, монацит, ксенотим, рокезит) и минералы с примесями редких металлов – рудные (вольфрамит, касситерит, сульфиды Cu, Sn, Fe, Zn, Pb, Mo, шеелит, рутил, ильменит, самородный висмут) и жильные (флюорит, сидерофиллит, мусковит, эпидот). Применение локальных методов анализа позволило установить изоморфный характер примесей и отсутствие в изученных минералах микровключений редкометалльных фаз.

Пневматолитово-гидротермальные редкометалльные месторождения характеризуются, как правило, многостадийностью минералообразования и эволюцией редкометалльных ассоциаций. Приведенные в статье данные позволяют сделать вывод, что минералы редких металлов образуются в течение всей истории формирования цвиттер-турмалиновой формации ВУРУ – от прерудной стадии биотитовых фельдшпатолитов до пострудной стадии хлорититов, включая рудную стадию цвиттеров. На первой, щелочной, стадии происходит накопление металлов цирконий-редкоземельной ассоциации, в грейзенах второй и третьей кислотных стадий концентрируются элементы иттрий-ниобий-вольфрамовой ассоциации, а для субщелочных метасоматитов четвертой и пятой стадий характерны примеси кадмий-индий-оловянной ассоциации: (LREE, Zr, Hf) → (W, Nb, Ta, Y, HREE, Sc) → (Sn, In, Cd, Se). От ранних стадий к поздним наблюдается эволюция состава редких металлов от литофильных к халькофильным и снижение интенсивности редкометалльного минералообразования: собственные минералы редких металлов образуются преимущественно на ранних пневматолитовых стадиях минералогенеза.

Таким образом, установлена комплексная многостадийная редкометалльная минерализация ВУРУ, обязанная своим происхождением внедрению редкометалльных Li-F-гранитов. Выявлены магматический, метасоматический и кристаллохимический факторы образования минералов редких металлов, что может указывать на попутную редкометалльную рудоносность месторождений ВУРУ. К задачам на будущее относятся изучение соотношения и корреляции содержаний редких металлов и главных рудных компонентов (Sn, W, Cu) в рудах, встречаемость редкометалльных минералов в метасоматитах различной стадийной и фациальной принадлежности, а также распределение редкометалльных минералов на территории района и конкретных рудопроявлений.



## Выводы

1. Установлено наличие в составе оловоносных метасоматитов Верхнеурмийского рудного узла множества минералов стратегических редких металлов: Nb, Ta, W, Y, REE (весь спектр от La до Lu), Be, Li, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd. Выделены две формы концентрации редких металлов: редкометалльные минералы (фергусонит, эвксенит, плюмбопирохлор, алланит, циркон, монацит, ксенотим, рокезит) и изоморфные примеси в составе рудных минералов (вольфрамит, касситерит, сульфиды Cu, Sn, Fe, Zn, Pb, Mo, шеелит, рутил, ильменит, самородный висмут) и жильных минералов (флюорит, сидерофиллит, мусковит, эпидот).

2. Минералы, содержащие редкие металлы, образуются на всех стадиях формирования оловорудной цвиттер-турмалинитовой формации. От ранних стадий к поздним наблюдается снижение интенсивности редкометалльного минералообразования и эволюция состава редких металлов от литофильных к халькофильным: (LREE, Zr, Hf) → (W, Nb, Ta, Y, HREE, Sc) → (Sn, In, Cd, Se).

3. Выявлены магматический, метасоматический и кристаллохимический факторы образования минералов-концентраторов редких металлов, что может указывать на попутную редкометалльную рудоносность месторождений Верхнеурмийского рудного узла.

**Благодарность.** Исследования выполнены в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности № 5.9248.2017/6.7 на 2017-2019 годы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.И. Дальневосточный пояс литий-фтористых гранитов, онгонитов и оловорудных цвиттеров // Записки Горного института. 2015. Т. 212. С. 14-20.
2. Алексеев В.И. Литий-фтористые граниты Дальнего Востока. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. 244 с.
3. Алексеев В.И. Метасоматическая зональность рудных полей Баджальского района (Приамурье) // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1989. Вып. 5. С. 27-37.
4. Алексеев В.И. Ниобиевые минералы – индикаторы генетической связи оловорудных цвиттеров и литий-фтористых гранитов Верхнеурмийского массива (Приамурье) / В.И.Алексеев, К.Г.Суханова, Ю.Б.Марин // Записки Российского минералогического общества. 2018. № 1. С. 85-100.
5. Алексеев В.И. Эволюция минеральных форм накопления редких элементов в рудоносных гранитах и метасоматитах Верхнеурмийского рудного узла (Приамурье) / В.И.Алексеев, К.Г.Суханова, И.М.Гембицкая // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 149-155. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.149
6. Быховский Л.З. Об определении понятия «редкие элементы» («редкие металлы»): исторический и терминологический аспекты / Л.З.Быховский, Л.П.Тигунов, А.В.Темнов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 3. С. 32-38.
7. Волошин А.В. Тантало-ниобаты. Систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб: Наука, 1993. 298 с.
8. Гавриленко В.В. Геохимия, генезис и типоморфизм минералов месторождений олова и вольфрама / В.В.Гавриленко, Е.Г.Панова. СПб: Невский курьер, 2001. 260 с.
9. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: В 2 кн. / Под ред. А.И.Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.
10. Гоневчук В.Г. Оловоносные магматические системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
11. Марин Ю.Б. Минералого-геохимические критерии локального прогнозирования редкометалльных месторождений / Ю.Б.Марин, Г.Т.Скублов, Ю.Л.Гульбин // Минералогическое картирование и индикаторы оруденения. Л.: Наука, 1990. С. 67-94.
12. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития / Н.С.Бортников, А.В.Волков, А.Л.Галямов, И.В.Викентьев, В.В.Аристов, А.В.Лаломов, К.Ю.Мурашов // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97-119.
13. Плющев Е.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований / Е.В.Плющев, В.В.Шатов, С.В.Кашин. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 560 с. (Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Т. 354).
14. Семеняк Б.И. О «цвиттерах» Верхнеурмийского рудного узла // Рудные месторождения Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 20-25.
15. Так что же такое «редкометалльный гранит»? / С.М.Бескин, Ю.Б.Марин, В.В.Матиас, С.П.Гаврилова // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1999. Вып. 6. С. 28-40.
16. Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits / Ed. by Ph.L.Verplanck, M.W.Hitzman; Society of Economic Geologists, Inc. Broomfield, CO, USA. 365 p. (Reviews in Economic Geology. 2016. Vol. 18).

**Автор В.И.Алексеев**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, [Alekseev\\_VI@pers.spmi.ru](mailto:Alekseev_VI@pers.spmi.ru) (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 17.08.2017.

Статья принята к публикации 19.02.2018.