ТИХООКЕАНСКАЯ ГЕОЛОГИЯ, 2019, том 38, № 2, с. 27–40

DOI: 10.30911/0207-4028-2019-38-2-27-40 УДК 549.02:553.45`493(571-62)

РЕДКОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ОЛОВОРУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ В РАЙОНЕ РАЗВИТИЯ ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫХ ГРАНИТОВ (ВЕРХНЕУРМИЙСКИЙ РУДНЫЙ УЗЕЛ, ПРИАМУРЬЕ)

В.И. Алексеев, Ю.Б. Марин, В.В. Гавриленко

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет, В.О., 21 линия, 2, г. Санкт-Петербург, 199106;
e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.

Редкие элементы являются попутными компонентами на месторождениях олова Дальнего Востока, связанных с литий-фтористыми гранитами. Изучена петрография и минеральный состав оловоносных метасоматитов Верхнеурмийского рудного узла в Приамурье – фельдшпатитов, грейзенов, цвиттеров, турмалинитов и хлоритов. Исследована многостадийная комплексная редкометалльная минерализация оловорудных проявлений в районе развития литий-фтористых гранитов. Выявлены минералы-концентраторы стратегических редких металлов: Nb, Ta, W, Y, REE (от La до Lu), Be, Li, Rb, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd, Te. Выделены две формы концентрации редких металлов: собственные минералы редких металлов (фергусонит, плюмбопирохлор, алланит, монацит, рокезит, сакураиит и др.) и изоморфная примесь в минералах – рудных (вольфрамит, касситерит, сульфиды Cu, Sn, Fe, Mo, Zn, Pb, самородный висмут и др.) и породообразующих (флюорит, сидерофиллит, мусковит, эпидот). Определены часто встречаемые редкие металлы в составе оловоносных метасоматитов: Y, REE, Nb, In, Sc. Минералы редких металлов образуются в течение всей истории формирования Верхнеурмийского рудного узла – от предрудной стадии фельдшпатитов до пострудной стадии хлоритов. 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, Te). Формирование редкометалльной минерализации Верхнеурмийского рудного узла обусловлено магматическим, метасоматическим и кристаллохимическим факторами. Показана возможность комплексного освоения оловорудных месторождений Дальнего Востока в районах развития литий-фтористых гранитов.

Ключевые слова: **редкие металлы, литий-фтористые граниты, фельдшпатиты, грейзены, цвиттеры, турмалиниты, Верхнеурмийский рудный узел, Приамурье.**

ВВЕДЕНИЕ

Нарастающее использование редких металлов в производстве новых видов материалов и высокотехнологичной продукции, проблемы укрепления обороноспособности и сокращения импортной зависимости России ставят перед геологами задачи обеспечения металлургии и промышленности остродефицитным редкометалльным сырьем. По учтенным запасам редких металлов (РМ), в том числе критических (REE, Nb, Be, Li, Ta, Sc, In, Cd, Hf), наша страна занимает одно из первых мест в мире, но реализации этого потенциала препятствует дефицит информации о попутных РМ в рудах месторождений. Одним из главных направлений развития редкометалльной сырьевой базы становится углубленная минералого-геохимическая переоценка комплексных месторождений и опоискованных участков недр как источников критических РМ [7, 9, 16].

Наряду с редкометалльными месторождениями, источником РМ могут служить оловорудные месторождения, ассоциирующие с литий-фтористыми гранитами [3, 5–7, 9–11, 24, 28, 29]. В статье охарактеризованы оловоносные метасоматиты рудопроявлений касситерит-кварцевой и касситерит-силикатной формаций Верхнеурмийского рудного узла в Приамурье. Исследованы состав и формы концентрации РМ в гидротермальных минералах района, их эволюция во времени. Цель статьи – привлечь внимание специалистов к попутной редкометалльной рудоносности вольфрамово-оловянных месторождений, связанных с литий-фтористыми гранитами.

ОЛОВОРУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ИСТОЧНИК РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Понятие «редкие металлы» со временем меняет свое содержание, в зависимости от развития геологоразведочных и перерабатывающих технологий и конъюнктуры сырьевого рынка [24, 32]. Сравнительно недавнее вовлечение в промышленное использование РМ связано с такими их минералого-геохимическими особенностями, как малое содержание и неоднородное распределение в земной коре, рассеяние в породообразующих и рудных минералах, видовое разнообразие и сложность состава редкометалльных минералов. Геолого-промышленные типы месторождений РМ весьма разнообразны и определяются формационным типом рудоносных магматических комплексов и генетическим классом рудных образований. К продуктивным относятся щелочно-гранитовые, субщелочно-гранитовые, нормально-гранитовые, нефелин-сиенитовые, щелочно-габброидные и щелочно-ультраосновные интрузивные комплексы, с которыми связаны рудоносные плутониты, пегматиты, карбонатиты, вулканиты, метасоматиты, редкометалльные коры выветривания и россыпи [5–7, 9, 16, 24, 32].

Среди месторождений дефицитных РМ (Ta, Be, HREE, Y, Li, Rb, Hf) в России выделяются промышленные объекты, связанные с редкометалльными гранитами. Такие граниты разделены на два типа – щелочные агпаитовые и субщелочные плюмазитовые, существенно различающиеся по геологической позиции, составу и масштабам рудной минерализации. Для щелочных гранитов и сопровождающих их метасоматитов характерны крупные и уникальные комплексные месторождения Ta, Nb, Zr, Be: Катугин в Забайкалье, Улуг-Танзек в Туве, Ермаковское в Бурятии и их аналоги за рубежом. Субщелочные литий-фтористые граниты (ЛФГ) содержат Ta, Li и попутную Nb, Sn, Rb и Cs минерализацию, образуя мелкие и средние месторождения. Вместе с тем, цвиттеры и иные метасоматиты, сопровождающие ЛФГ, несут богатейшее вольфрамово-оловянное оруденение и попутную Ta, Li, Be и флюоритовую минерализацию. Известны десятки месторождений олово-редкометалльных цвиттеров в Европе, Средней и Юго-Восточной Азии, Северной Африке, Южной Америке [2, 5, 7, 9, 13, 16, 24, 30, 31, 33, 34] (табл. 1).

Крупные месторождения редкометалльно-оловорудных цвиттеров распространены в районах развития ЛФГ на Востоке России: Вознесенское, Пограничное, Тигриное, Стланиковое, Олонойское, Правоурмийское, Невское, Кестер, Одинокое, Полярное, Пыркакайское и др. [2–4, 5–7, 9–13, 18–20, 22, 23, 25, 26, 28, 29] (табл. 1). С позиций традиционного рудно-формационного анализа эти месторождения относятся к касситерит-кварцевой формации. На Дальнем Востоке предлагается выделить их в новую «редкометалльно-оловянную» («касситерит-редкометалльную») формацию [13, 26]. Весьма актуальным становится минералого-геохимическое изучение редкометалльного потенциала оловорудных месторождений. Относительно хорошо изучены месторождения флюорит-Be-Li-Rb-Cs типа (Вознесенское и Пограничное в Приморье), Ta-Nb-Li типа (Кестер в Якутии, Тигриное в Приморье), где выявлены колумбит, стрюверит, микролит, воджинит, фенакит, амблигонит, циннвальдит, лепидолит и другие редкометалльные минералы [19, 20, 25, 26, 29]. Однако в целом наличие, распределение и формы концентрации РМ в оловорудных месторождениях Востока России исследованы недостаточно: установлены отдельные редкометалльные минералы и примесь Sc, In в рудных минералах [2, 7, 9–11, 13, 20, 22, 23, 28]. В статьях [3, 4] описано наследование гидротермальными минералами состава редкометалльных акцессориев ЛФГ.

В данной статье для исследования попутной редкометалльной минерализации оловорудных месторождений, связанных с ЛФГ, выбран Верхнеурмийский рудный узел в Приамурье. Здесь выделен правоурмийский комплекс ЛФГ и располагается эксплуатируемое месторождение олова Правоурмийское, для которого в качестве попутных РМ отмечены скандий [9] и индий [7, 10, 11, 22]. В работе рассмотрены минералы-концентраторы РМ оловоносных метасоматитов рудного узла: фельдшпатитов, грейзенов, цвиттеров, турмалинитов и хлорититов.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Верхнеурмийский рудный узел (ВУРУ) входит в состав Баджальского района, расположенного в междуречье рек Кур и Амгунь на склонах одноименного хребта. В строении ВУРУ доминирует мощная меловая толща кислых вулканитов, залегающая на дислоцированных палеозойско-юрских вулканогенно-осадочных образованиях и пронизанная субвулканическими и гипабиссальными интрузиями гранитоидов. Рудный узел занимает площадь Верхнеурмийского гранитового плутона и примыкающего к нему Урмийского игнимбритового вулканогена [12–15] (рис. 1).

В Верхнеурмийском массиве описаны три фазы позднемеловых биотитовых гранитов баджало-дуссеалинского комплекса. С юга к нему примыкает Аникский массив ранне-позднемеловых гранодиоритов лакского комплекса, а северное обрамление включает экструзивные тела монцонитоидных диоритов

Таблица 1. Сравнительная характеристика геолого-промышленных типов месторождений с редкометалльными гранитами [2, 5–8, 23, 29, 32, 33].

Признак	Щелочно-гранитовый тип		Субщелочно-гранитовый тип	
	Щелочные граниты	Фельдшпатиты	Li-F граниты	Цвиттеры
Минералы редких металлов	Пирохлор, колумбит, циркон, гагаринит, криолит, иттрофлюорит, флюоцерит, ксенотим, монацит, полилитионит	Берилл, фенакит, бертрандит, флюорит, циртолит, пирохлор, колумбит, поликраз, эвксенит, фергусонит	Микролит, танталит-колумбит, стрюверит, касситерит, лепидолит, циннвальдит, амблигонит, флюорит	Касситерит, вольфрамит, берилл, флюорит, лепидолит, циннвальдит, танталит-колумбит
Основные металлы	Ta Nb Zr	Ta Nb Zr Be	Ta Li	Sn W
Попутные редкие металлы	Y HREE Hf криолит	Y HREE Li Hf Rb Cs флюорит криолит	Nb Sn Rb Cs флюорит амазонит	Ta Li Rb Be флюорит
Запасы	Крупные и уникальные	Крупные и уникальные	Мелкие и средние	Крупные и уникальные
Месторождения	Зашихинское, Улуг-Танзек, Снежное (Россия); Верхнее Эспе, Лосевское (Казахстан); Хан-Богдо, Халдзан-Бурегтей (Монголия); Мадейра (Бразилия); **Джос-Букуру** (Нигерия)	Зашихинское, **Ермаковское**, Катугин, Снежное, Бугундинское, Улкан (Россия); Верхнее Эспе, Курменты, (Казахстан); **Тор-Лейк** (Канада); **Каффо** (Нигерия)	**Орловское, Этыкинское**, Алахинское, Биту-Джида (Россия); Голубые сопки (Казахстан); Урт-Гозгор (Монголия); Сучжоу (Китай); Монтебра (Франция); Абу-Даббаб (Египет)	**Этыкинское**, Спокойнинское (Забайкалье); Пограничное, **Вознесенское**, Тигриное, Олонойское, Невское, Правоурмийское, **Кестер**, Одинокое, Полярное, Пыркакайское (Дальний Восток); Майкуль, Карасу (Казахстан); Бага-Газрын, Жанчивлан, Барун-Цогто (Монголия); Крупка, Циновец (Чехия); **Альтенберг** (Германия); **Эшассьер**, Пюи-Ле-Винь (Франция); Тин-Амзи (Алжир); Ичун, **Сянхуалин** (Китай)

Примечание. На выделенных месторождениях производилась добыча редких металлов.

и трахиандезитов силинского комплекса, том числе крупный Куркальтинский массив [12–15]. В северо-восточной части Верхнеурмийского массива и в его экзоконтакте экспедицией Ленинградского горного института под руководством проф. Ю.Б. Марина закартированы дайки циннвальдитовых ЛФГ и онгонитов, в том числе шток Дождливый, которые образуют правоурмийский редкометалльно-гранитовый комплекс [2, 3, 18].

В результате внедрения ЛФГ в биотитовых гранитах и во вмещающих вулканитах происходило формирование рудоносных цвиттеров, турмалинитов и образование многочисленных вольфрамово-оловорудных проявлений [1, 2, 12, 13, 18, 21]. На территории узла находятся три месторождения (крупное Правоурмийское, малые Двойное и Высокое) и десятки проявлений олова и вольфрама. Запасы цветных металлов одного Правоурмийского месторождения составляют (A+B+C1): олова – 115.9 тыс. т, WO_3 – 8.2 тыс. т, меди – 89.4 тыс. т, висмута – 1.3 тыс. т; запасы редких металлов (C2): ниобия – 37.65 т, индия – 385.8 т, скандия – 4.927 т. Прогнозные ресурсы Верхнеурмийского узла: олова – 89 тыс. т; WO_3 – 11.2 тыс. т; меди – 414 тыс. т [14, 15]. В районе выделяют три рудных поля, расположенных в экзоконтакте Верхнеурмийского массива и вытянутых согласно простиранию рудоконтролирующих разломов в субширотном направлении: Осьбаджальское, Правоурмийское и Сынчугинское. Мы выделяем также Вольфрамовое рудное поле, расположенное в северо-восточной части гранитного массива на пересечении субмеридионального Вольфрамитового и субширотных разломов.

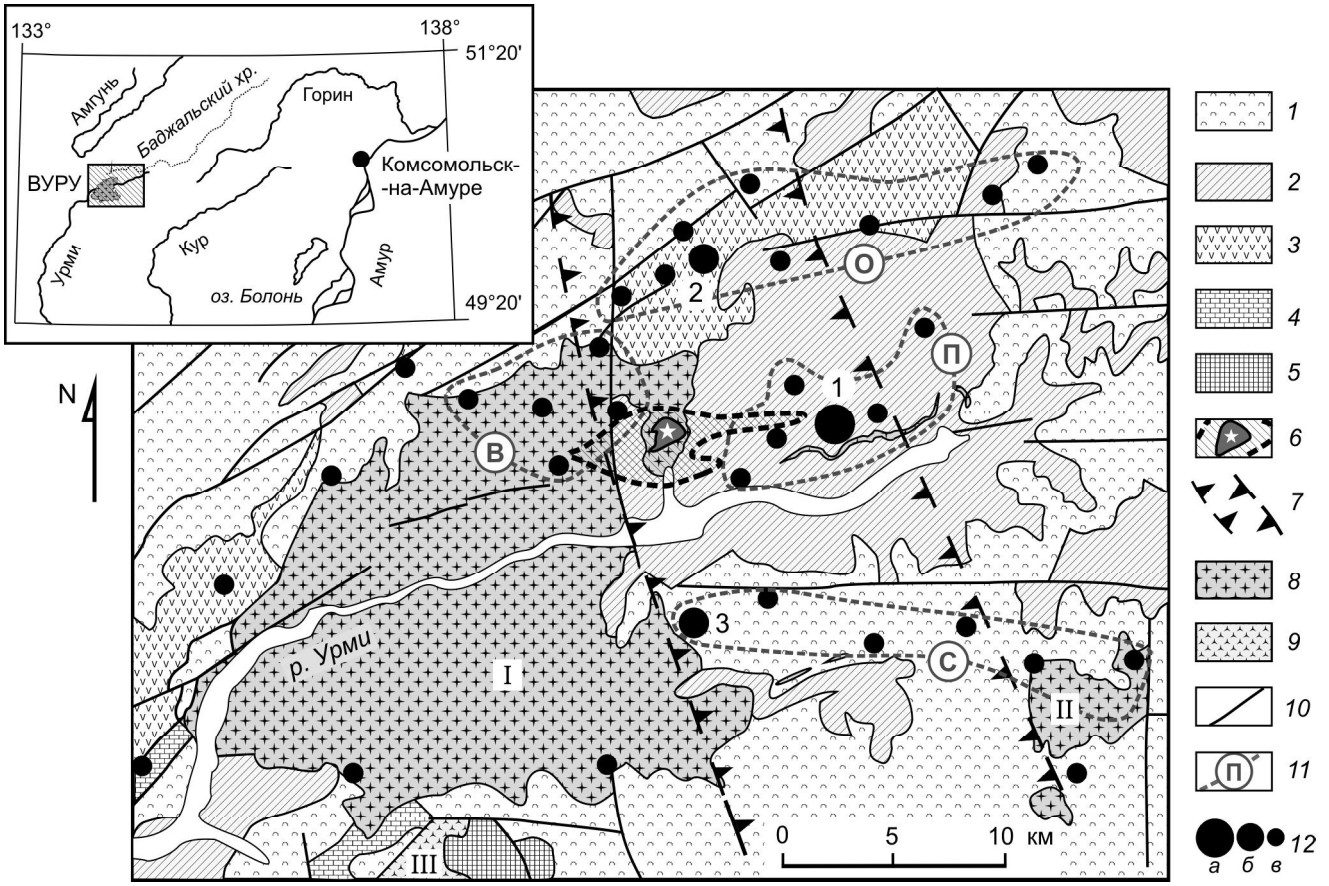

Рис. 1. Геологическая схема Верхнеурмийского рудного узла (на основе [15] с данными Комсомольской ГРЭ ПГО «Дальгеология» и авторов).

1 – верхнемеловые игнимбриты и туфы риолитов, риодацитов, *2* – субвулканические риолиты, риодациты, гранит-порфиры; *3* – нижнемеловые андезиты, андезидациты и туфы; *4* – девонско-пермские терригенные и глинистые породы, известняки складчатого фундамента; *5* – нижнепротерозойские гнейсы, амфиболиты, кварциты Буреинского массива; *6–8* – верхнемеловые интрузивные образования: *6* – ареал литий-фтористых гранитов со штоком Дождливым (правоурмийский комплекс), *7* – Орокотская зона монцонитоидного дайкового магматизма (силинский комплекс), *8* – биотитовые граниты и гранит-порфиры (баджало-дуссеалинский комплекс): I – Верхнеурмийский массив, II – Сюигачанский массив; *9* – ранне-позднемеловые гранодиориты, кварцевые диориты (лакский комплекс): III – Анникский массив; *10* – разрывные нарушения; *11* – рудные поля: О – Осьбаджальское, П – Правоурмийское, С – Сынчугинское, В – Вольфрамовое; *12* – месторождения крупные (*а*) и мелкие (*б*): 1 – Правоурмийское, 2 – Двойное, 3 – Высокое; рудопроявления (*в*). На врезке прямоугольником показано географическое положение Верхнеурмийского рудного узла (ВУРУ).

Важным элементом геологического строения ВУРУ является поперечная к рудоносным структурам Орокотская тектоно-магматическая зона, контролирующая наиболее богатые оловорудные проявления и насыщенная поздними продуктами субщелочного магматизма – монцонитоидами силинского комплекса, ЛФГ и онгонитами правоурмийского комплекса [2, 17]. Большинство проявлений олова (Правоурмийское, Грустное, Аленушкино, Высокое и др.) и вольфрама (Вольфрамитовое, Сюигачан и др.) сложены телами грейзенов и цвиттеров оловянно-редкометалльной (касситерит-кварцевой) и вольфрамит-кварцевой формаций и связаны с ЛФГ правоурмийского комплекса. Проявления олова Осьбаджальского поля (Двойное, Орокот, Омот-Макит, Улун и др.) сложены турмалиновыми и хлоритовыми метасоматитами касситерит-силикатной рудной формации и связаны с монцонитоидами силинского комплекса [2, 13, 17] (рис. 1).

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Научно-методической основой исследования является системный подход к изучению гидротермально-метасоматических образований с учетом их состава, зональности, стадийности и рудоносности. Основополагающий принцип исследования – рацио-

нальное комплексирование методов структурно-геологического, петрографического, минералогического, геохимического и минерагенического изучения метасоматитов различных стадий на основе крупномасштабного геологического картирования рудных полей масштабов 1: 5 000 – 1:10 000 [8, 18].

Минералогическое изучение метасоматитов включало определение их минерального состава, выявление редкометалльных минералов и механизмов концентрации РМ, изучение их роли в рудогенезе и эволюции на разных стадиях минералообразования [1–4, 8]. На участках минерализации, выделенных по данным геохимического картирования, производился полевой отбор проб типичных метасоматитов различных стадий и фаций, затронутых в минимальной степени поздними метасоматическими и гипергенными процессами. Практиковался пробоотбор генетически близких метасоматитов из различных проявлений рудного узла. Проверка отобранного материала выполнялась с помощью микроскопов Leica DM2500 M, Olympus BX51. Геохимическое изучение проб проведено с помощью эмиссионного спектрального и рентгено-спектрального флуоресцентного анализа (ED-2000, XRF-1800), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICPE-9000) и атомно-абсорбционной спектрометрии (AA6300, AAS5EA) в ЦКП Санкт-Петербургского горного университета.

В пробах с повышенным содержанием РМ был проведен электронно-микроскопический поиск минералов-носителей (JSM-6460LV, JSM-7001F, JIB-4500, Cameca MS-46; Горный университет, ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург). Аналитическая интерпретация выполнена с помощью программного обеспечения INCA Energy (Oxford). Химический состав слюд, флюорита, вольфрамита, касситерита, сульфидов определен в мономинеральных фракциях методами «мокрой химии», ICP-MS, AAS. Состав микроминералов исследован методом рентгеноспектрального микроанализа на микрозондах с волновыми спектрометрами (CamScan MV2300, ВСЕГЕИ; JXA-8230, Горный университет); в качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы.

ОЛОВОНОСНЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ ВЕРХНЕУРМИЙСКОГО РУДНОГО УЗЛА

В районе выделены дорудные метасоматиты пропилитовой формации и оловоносные метасоматиты цвиттер-турмалинитовой формации, образованные в течение пяти стадий: фельдшпатиты → грейзены → цвиттеры → турмалиниты → хлорититы [1, 10, 12, 18]. Наиболее ранними оловоносными образованиями являются фельдшпатиты первой предрудной стадии, представленные биотит-полевошпатовыми и полевошпат-биотит-мусковитовыми метасоматитами. Биотитовые фельдшпатиты слагают крутопадающие субмеридиональные зоны мощностью 0.1–2 м и протяженностью 2–200 м, сгруппированные в полосы биотитизации шириной десятки метров на рудопроявлениях Вольфрам-Макит, Двойное (Осьбаджальское рудное поле), Правоурмийское, Дождливое, Аленушкино, Сульфидное, Правый Омот (Правоурмийское поле), Лесное, Вольфрамитовое (Вольфрамовое поле), Высокое, Длинное (Сынчугинское поле).

Предрудные фельдшпатиты сложены альбитом, калиевым полевым шпатом, биотитом, мусковитом; содержат в подчиненном количестве кварц, гранат, турмалин. Структура пород микролепидогранобластовая или гломеробластовая, текстура пятнистая и струйчатая. Характерны прожилковые обособления калишпата, кварца, сульфидов, граната, насыщенные акцессориями. Акцессорные и рудные минералы биотит-полевошпатовых метасоматитов: пирротин, халькопирит, флюорит, апатит, алланит, монацит, ксенотим, циркон, рутил, ильменит, торит, шеелит.

Вслед за биотитовыми фельдшпатитами образуются грейзены второй предрудной стадии, слагающие субмеридиональные, северо-западные и субширотные зоны мощностью 0.1–4.0 м (до 20 м) и протяженностью 200–1800 м на рудопроявлениях Грустное, Гранитное (Осьбаджальское поле); Аленушкино, Южное (Правоурмийское поле), Лесное, Кресты (Вольфрамовое поле), Высокое, Дайковое (Сынчугинское поле). Состав грейзенов мусковит-кварцевый. Текстура массивная или прожилковая: метасоматиты содержат кварцевые жилы и прожилки с мусковитом, флюоритом, топазом и сульфидами. Рудная минерализация представлена редкими зернами касситерита, вольфрамита, молибденита, висмутина и арсенопирита.

Третья синрудная стадия включает образование вольфрамово-оловорудных цвиттеров месторождения Правоурмийское, проявлений Аленушкино, Сульфидное (Правоурмийское поле); месторождения Двойное, проявлений Вольфрам-Макит, Грустное (Осьбаджальское поле); Лесное, Вольфрамитовое (Вольфрамовое поле); Высокое, Сюигачан, Рогатое (Сынчугинское поле), детально описанных в работах [4, 10, 12, 18, 21]. Цвиттеры слагают многочисленные маломощные (n·см) околожильные ореолы в крупных штокверках топазовых и кварцевых прожилков и мощные (до 40 м) залежи, которые пересекают предрудные тела фельдшпатитов и грейзенов. В составе цвиттеров преобладают кварц, сидерофиллит и топаз, постоянно присутствуют флюорит и мусковит. Зональное размещение фаций цвиттеров – кварц-топазовой, сидерофиллит-топаз-кварцевой, мусковит-сидерофиллит-кварцевой, кварц-топаз-мусковитовой, слюдисто-

полевошпатовой, кварц-альбитовой – контролируется ЛФГ [1, 2, 21].

Для цвиттеров характерна тонко-мелкозернистая (по вулканитам) или мелко-среднезернистая (по гранитам) лепидогранобластовая структура, автоморфная, бластопорфировая или бластогранитовая. Текстура массивная, тонкополосчатая или прожилковая: темно-бурые цвиттеры пронизаны белыми флюорит-кварц-топазовыми, кварцевыми и полевошпат-кварцевыми жилами и прожилками мощностью 0.5–10 см. Состав акцессорной и рудной минерализации цвиттеров: флюорит, касситерит, вольфрамит, арсенопирит, леллингит, шеелит, самородный висмут, висмутин, сфалерит, рутил, фергусонит, эвксенит, пирохлор, берилл, циркон, хедлейит и др.

Особенностью продуктов четвертой синрудной стадии является преобладание метасоматических жил турмалинитов, разделенных на кварц-турмалиновую и альбит-турмалиновую фации. На грейзеновых проявлениях (Правоурмийское, Вольфрам-Макит, Сюигачан, Высокое и др.) мелкие турмалиновые прожилки и мощные (до 20–40 см) турмалиновые жилы со структурами дробления нередко приурочены к телам кварц-топазовых и мусковит-кварцевых оловоносных грейзенов. В таких гетерогенных образованиях мелкозернистый кварц-турмалиновый агрегат служит цементом грейзеновых обломков и частично замещает слагающие их топаз, биотит, касситерит, арсенопирит и др. Околожильные изменения выражены в умеренном окварцевании и турмалинизации вмещающих пород.

Более существенной ролью околожильных кварц-серицитовых и кварц-альбитовых метасоматитов отличаются проявления оловорудных турмалинитов рудопроявлений Двойное, Проскурникова, Орокот, Омот-Макит (Осьбаджальское поле); Дождливое (Правоурмийское поле), Длинное, Восточное, Голубое (Сынчугинское поле). Здесь развиты крутопадающие метасоматические зоны субширотного, субмеридионального и северо-западного простирания, имеющие мощность от 0.3–2 м до 9 м и протяженность 500–600 м. Внешние части зон сложены лепидонематогранобластовыми агрегатами кварца, серицита, альбита с примесью турмалина, хлорита и флюорита; нередко преобладают многочисленные турмалиновые прожилки с околожильными ореолами окварцевания, серицитизации и альбитизации. В осевых частях зон наблюдаются метасоматические кварц-турмалиновые жилы мощностью 5–15 см. Турмалиниты содержат вкрапленность, гнезда и прожилки касситерита, халькопирита и борнита, реже встречаются станнин, станноидит, моусонит, виттихенит, рокезит, сакураит, сфалерит, пирротин, пирит, монацит, тетраэдрит, самородный висмут, REE-эпидот, циркон.

Хлоритовые метасоматиты пятой пострудной стадии развиты вдоль крутопадающих разломов субмеридионального и северо-восточного, реже вдоль пологих взбросов широтного простирания, образуя зоны мощностью 0.1–26 м, протяженностью 500–1600 м на рудопроявлениях Хлоритовое, Ирунгда-Макит (Осьбаджальское поле); Южное, Правый Омот, Сульфидное (Правоурмийское поле); Восточное (Сынчугинское поле). Главные минералы хлорититов: хлорит, альбит, серицит, кварц; второстепенные минералы: эпидот, кальцит, турмалин, пренит, цеолиты. Структура микрозернистая, реже мелко-среднезернистая (0.1–1 мм). Текстура пятнистая и прожилковая, обусловленная кварц-хлоритовыми, эпидот-хлоритовыми и кальцитовыми прожилково-гнездовыми выделениями, обогащенными сульфидами. Встречаются брекчиевидные хлорититы с обломками более ранних метасоматитов. Акцессорные и рудные минералы пострудных метасоматитов: флюорит, пирит, сфалерит, галенит, марказит, стибнит, касситерит.

РЕДКОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МЕТАСОМАТИТОВ ВЕРХНЕУРМИЙСКОГО РУДНОГО УЗЛА

В составе биотитовых фельдшпатитов первой предрудной стадии установлены минералы, содержащие РМ: алланит-(Ce), монацит-(Ce), ксенотим-(Y), циркон, апатит-(CaF), ильменит, торит, биотит (табл. 2). Промышленное значение может иметь алланит-(Ce), встречающийся в виде гипидиоморфных призматических кристаллов с поперечником 3–30 мкм. Минерал образует сростки и линзовидные гнезда размером 30–500 мкм в калишпат-биотитовом агрегате, встречается в калишпатовых прожилках мощностью 10–100 мкм (рис. 2 а).

Алланит содержит 4.76–17.52 % Ce_2O_3; общее содержание легких РЗЭ (La, Ce, Nd) 6.78–26.52 %; встречается примесь ThO_2 до 3.93 %, SnO_2 до 0.93 %. На рудопроявлении Сульфидное (восточный фланг рудного узла) встречен алланит с примесью Y_2O_3 до 8.56 % (табл. 3). В агрегатах алланита встречаются микровключения (1–10 мкм) монацита и ксенотима. Редкоземельные фосфаты представлены в основном одиночными гипидиоморфными бочонковидными зернами поперечником до 50 мкм с закругленными вершинами, реже сростками в биотит-полевошпатовом агрегате (рис. 2 б). Монацит содержит $LREE_2O_3$ 52.05–69.54, ThO_2 0–10.45 %; ксенотим – Y_2O_3 41.62–48.94, $HREE_2O_3$ 6.56–17.28, ThO_2 0–0.75, UO_2 0–0.90 %.

Таблица 2. Минералы-концентраторы главнейших редких металлов, олова и вольфрама в оловоносных метасоматитах Верхнеурмийского рудного узла (Приамурье).

Редкий металл	Метасоматиты различных стадий рудно-метасоматического процесса				
	Фельдшпатиты (1)	Грейзены (2)	Цвиттеры (3)	Турмалиниты (4)	Хлорититы (5)
Y, HREE	Ксенотим, торит, алланит, биотит	Вольфрамит	Ксенотим, фергусонит, эвксенит, пирохлор, флюорит, вольфрамит	Флюорит, вольфрамит	Флюорит
LREE	Монацит, алланит, апатит	Вольфрамит	Монацит, ксенотим, фергусонит, флюорит, вольфрамит	Эпидот, флюорит	Флюорит
Nb	–	Вольфрамит, молибденит, касситерит	Фергусонит, эвксенит, пирохлор, вольфрамит, касситерит	Вольфрамит, касситерит	–
In	–	Касситерит	Касситерит	Рокезит, халькопирит, станноидит, борнит, виттихенит, сакураиит, касситерит	Сфалерит, галенит
Sc	Ильменит	Вольфрамит, касситерит	Вольфрамит, касситерит, флюорит	Вольфрамит, касситерит, флюорит	–
W	Ильменит, биотит	Касситерит, мусковит	Вольфрамит, шеелит, пирохлор, эвксенит, касситерит, мусковит, сидерофиллит	Касситерит	–
Sn	Алланит, биотит	Касситерит, мусковит	Касситерит, сидерофиллит, мусковит, флюорит	Касситерит, станноидит, станнин, моусонит, рокезит, халькопирит, борнит, кестерит, флюорит	Сфалерит, галенит, флюорит

Примечание. Подчеркнуты главные акцессорные и рудные минералы. В скобках – номер стадии.

Для биотит-полевошпатовых метасоматитов характерно постоянное присутствие одиночных короткостолбчатых кристаллов циркона в ассоциации с монацитом, алланитом и ксенотимом, изредка с призматическим редкоземельным фторапатитом (рис. 2 в). Содержание ZrO_2 в цирконе составляет 54.81–68.42 %. Каймы кристаллов обогащены HfO_2 до 2.15 %, ThO_2 до 1.58, UO_2 до 1.88 %. В редких случаях цирконсодержащие фельдшпатиты содержат вкрапления апатита-(CaF) с примесью $LREE_2O_3$ (La, Ce, Nd) 0.22–32.99 %, ThO_2 1.21–2.96 %; ильменита (рис. 2 а) с примесью WO_3 3.62–5.56 % и Sc_2O_3 до 1.24 %; торита с содержанием Y_2O_3 до 6.65 %. Концентратором многих редких элементов служит биотит: Li_2O 0.04–0.43, Rb_2O 0.06–0.32, Cs_2O 0.01–0.06, ZrO_2 0.02–0.20, Y_2O_3 0–0.05 %, WO_3 0–0.09, SnO_2 0–0.01 % (табл. 3).

В мусковит-кварцевых грейзенах второй предрудной стадии носителями редких элементов служат относительно редко встречаемые рудные минералы: касситерит (Nb_2O_5 0.02–0.18, Sc_2O_3 0.001–0.004, WO_3 0.02–0.56 %) и вольфрамит (Nb_2O_5 0.05–1.25, Ta_2O_5 0–0.91, Sc_2O_3 0.01–0.27, La_2O_3 0–0.007 %) (табл. 2, 3). Только в мусковит-кварцевых грейзенах Верхнеурмийского массива и его ближнего экзоконтакта (Вольфрамовое поле и западная часть Осьбаджальского поля) встречается молибденит с содержанием Nb_2O_5 до 0.05 % (рис. 2 г). Молибденит наблюдается в кварцевых прожилках в виде цепочек мелких (n·мм) гипидиоморфных чешуек. В мусковите предрудных грейзенов установлены примеси Li_2O 0.01–0.56, WO_3 0–0.02, SnO_2 0–0.01 % (табл. 3).

Минералы, содержащие редкие металлы, особенно разнообразны в цвиттерах третьей синрудной стадии (табл. 2). Среди них выделяются собственно редкометалльные минералы: монацит-(Ce) ($LREE_2O_3$ 49.28–66.86, ThO_2 0.48–10.71, UO_2 0.37–2.14 %), ксенотим-(Y) (Y_2O_3 35.75–51.45, $HREE_2O_3$ 14.34–25.67, $LREE_2O_3$ 0–2.38, ThO_2 0–1.63, UO_2 0.58–3.73 %), циркон (ZrO_2 55.38–70.11, HfO_2 0.29–1.98, ThO_2 0–0.41, UO_2 0–1.48 %) (табл. 4, рис. 3 а). В вольфрамово-оловорудных цвиттерах Вольфрамового рудного поля выявлены тантало-ниобаты: фергусонит-(Y) (Nb_2O_5 49.18–54.16, Y_2O_3 22.15–32.50, $HREE_2O_3$ 9.27–34.41, $LREE_2O_3$ 0–2.71 %), эвксенит-(Y) (Nb_2O_5

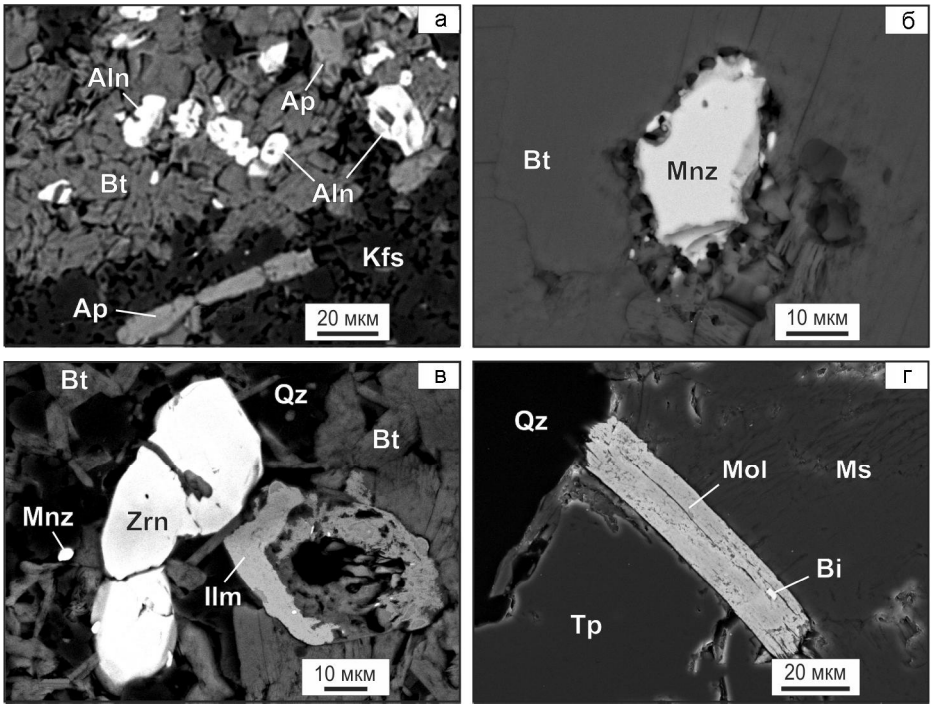

Рис. 2. Минералы-концентраторы редких металлов в предрудных фельдшпатитах и грейзенах Верхнеурмийского рудного узла (изображения в обратно-отраженных электронах, электронные микроскопы JSM-6460LV, JSM-7001F, Горный университет, Санкт-Петербург).

а, б, в – калишпат-биотитовые метасоматиты, содержащие алланит-(Ce), цериевый апатит, монацит-(Ce), гафниевый циркон, скандиевый ильменит; г – топаз-кварц-мусковитовый грейзен с ниобиевым молибденитом. Минералы: Aln – алланит-(Ce), Ap – апатит-(CaF), Bi – самородный висмут, Bt – биотит, Ilm – ильменит, Kfs – калиевый полевой шпат, Mnz – монацит-(Ce), Mol – молибденит, Ms – мусковит, Qz – кварц, Tp – топаз, Zrn – циркон.

52.99–62.81, Y_2O_3 9.88–22.12, WO_3 9.52–13.72 %), плюмбопирохлор (Nb_2O_5 44.56–56.22, Y_2O_3 0–13.98, WO_3 10.34–18.54 %) [3, 4] (рис. 3 б). В мусковит-биотит-полевошпатовых и мусковит-биотит-топазовых метасоматитах Верхнеурмийского массива и Правоурмийского месторождения наблюдались хедлейит (TeO_2 22.30, SeO_2 2.74 %) и слабо исследованный берилл.

Главные рудные минералы цвиттеров содержат редкие металлы в виде примеси: касситерит (Nb_2O_5 0.01–0.13, Sc_2O_3 0.001–0.012, In_2O_3 0–0.001, WO_3 0–0.94 %), вольфрамит (Nb_2O_5 0–2.15, Sc_2O_3 0–1.41, Y_2O_3 0–0.07 %) (рис. 3 б, в). Касситерит распределен в цвиттерах и кварц-топазовых жилах неравномерно в виде гипидиоморфных кристаллов и сростков неправильной формы размером 0,01–3 см, имеет светло- и темно-коричневую зональную окраску. Установлено обогащение (на порядок) темно-коричневых разновидностей ниобием и вольфрамом, а светлоокрашенных – индием. Вольфрамит наблюдается в тесной ассоциации с сульфидами Fe и Cu в кварц-топазовых жилах в виде идиоморфных призматических и таблитчатых кристаллов размером от 0.5–2 до 10–100 мм. Преобладают железистые разновидности вольфрамита ($MnWO_4$ 0.08—0.48). Повышенные концентрации Nb, Sc и других РМ особенно характерны для касситерита и вольфрамита из проявлений Верхнеурмийского массива [4, 10]. На Правоурмийском месторождении наблюдается обогащение этих минералов Nb, In, Sc в верхних частях рудных тел. Электронно-микроскопическое изучение показало отсутствие в касситерите и вольфрамите микровключений редкометалльных минералов.

Второстепенные рудные минералы также обогащены РМ: шеелит (MoO_3 0.36–10.46 %), сфалерит (CdO 0–1.04 %). В отдельных случаях наблюдается обогащение РМ самородного висмута (TeO_2 до 11.43, SeO_2 до 1.50 %); рутила (Nb_2O_5 до 1.30, WO_3 до 4.17 %), ильменита (WO_3 до 2.84 %). Существенные объемы РМ заключены в жильных минералах цвиттеров – флюорите, сидерофиллите и мусковите [10, 23]. Флюорит обогащен Y_2O_3 (до 0.47 %), содержит широкий спектр тяжелых (до 0.14 %) и легких РЗЭ (до 0.07 %). Сидерофиллит содержит Li_2O 0.05–1.53, Rb_2O 0.12–0.60, Cs_2O 0.01–0.15, SnO_2 0.01–0.62, WO_3 0.001–0.015 %; мусковит – Li_2O 0.01–0.65,

Таблица 3. Содержание редких металлов, олова и вольфрама (масс. %) в минералах фельдшпатитов и грейзенов Верхнеурмийского оловорудного узла.

Редкий металл	Фельдшпатиты								Грейзены			
	Aln	Mnz	Xtm	Zrn	Ap	Ilm	Thr	Bt	Wlf	Cst	Mol	Ms
Li_2O								0.17				0.10
Sc_2O_3						1.24			0.13	0.002		
Y_2O_3	0.21		45.09				5.56	0.01	0.07			
ZrO_2				65.95				0.09				
Nb_2O_5									0.57	0.08	0.01	
In_2O_3										0.002		
$LREE_2O_3$	17.50	52.57			17.20				0.001			
$HREE_2O_3$	0.01		12.92									
HfO_2				0.57								
Ta_2O_5									0.14			
SnO_2	0.004							0.005		99.65		0.003
WO_3						4.65		0.03		0.27		0.01
n	229	10	5	80	4	6	3	15	8	4	7	9

Примечание. Приведены средние значения содержания РМ; *n* – количество проб. Обозначение минералов см. на рис. 2. Cst – касситерит, Thr – торит, Wlf – вольфрамит, Xtm – ксенотим-(Y).

Таблица 4. Содержание редких металлов, олова и вольфрама (масс. %) в минералах цвиттеров Верхнеурмийского оловорудного узла.

Редкий металл	Frg	Eux	Pcl	Mnz	Xtm	Zrn	Wlf	Cst	Sch	Sdp	Ms	Sp	Fl
Li_2O										0.40	0.10		
Sc_2O_3							0.15	0.005					0.001
Y_2O_3	29.73	11.98	3.15		41.74		0.001						0.17
ZrO_2						66.79							
Nb_2O_5	52,24	68.47	50.24				0.86	0.05					
CdO												0.60	
In_2O_3								0.001					
$LREE_2O_3$	0.75			59.38	1.54		0.001						0.01
$HREE_2O_3$	16.37				20.12								0.05
HfO_2						0.69							
Ta_2O_5							0.06						
SnO_2								99.74		0.34	0.005		0.003
WO_3		11.61	15.27				74.27	0.20	82.92	0.005	0.03		
n	18	7	12	61	24	31	84	100	24	21	16	17	33

Примечание. См. примечание к табл. 3. Eux – эвксенит, Fl – флюорит, Frg – фергусонит-(Y), Pcl – плюмбопирохлор, Sch – шеелит, Sdp – сидерофиллит, Sp – сфалерит.

Rb_2O 0.03–0.11, Cs_2O 0–0.01, SnO_2 0–0.03, WO_3 0.01–0.18 % (табл. 4).

В турмалинитах четвертой синрудной стадии минералы-концентраторы РМ достаточно разнообразны: касситерит, вольфрамит, рокезит, сакурааиит, станноидит, халькопирит, борнит, самородный висмут, пирит, монацит-(Ce), REE-эпидот, циркон, шеелит, флюорит (табл. 2). В виде включений в турмалине наблюдаются собственные минералы редких металлов: монацит ($LREE_2O_3$ 49.20–51.04, ThO_2 3.17–3.95 %), циркон (ZrO_2 61.68–70.73, HfO_2 0.13–3.04, ThO_2 0.09–1.00, UO_2 0.20–1.25 %). В составе сульфидных выделений

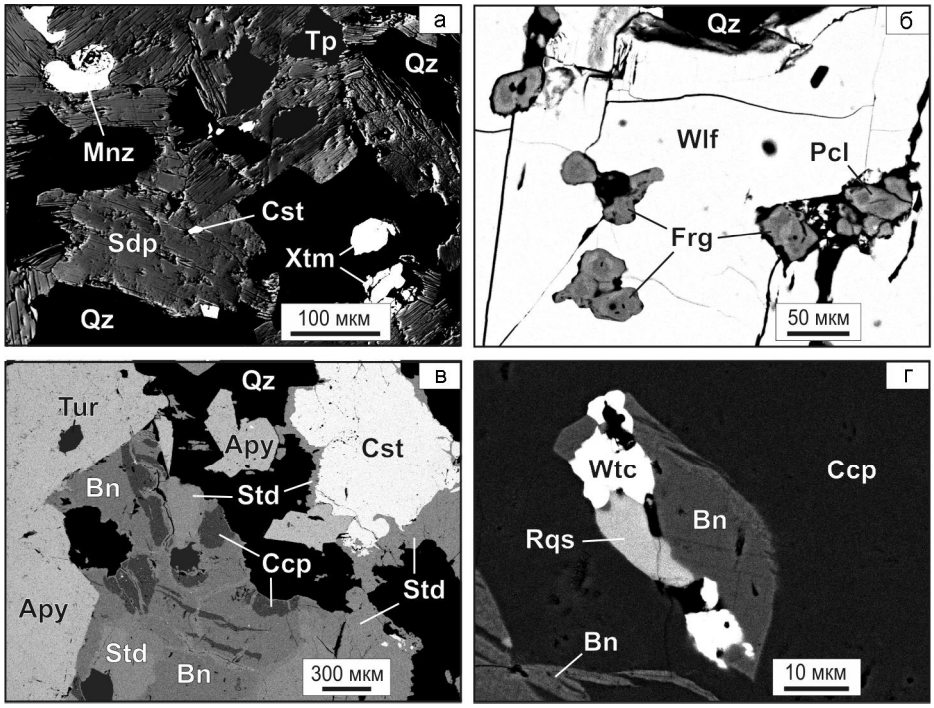

Рис. 3. Минералы-концентраторы редких металлов в рудных цвиттерах и турмалинитах Верхнеурмийского рудного узла (изображения в обратно-отраженных электронах, электронные микроскопы JSM-7001F, JXA-8230, Горный университет, Санкт-Петербург).

а – кварц-топаз-сидерофиллитовый цвиттер, содержащий монацит-(Ce), ксенотим-(Y), индий-ниобиевый касситерит; б – скандий-ниобиевый вольфрамит в цвиттере с включениями фергусонита-(Y) и плюмбопирохлора; в – топаз-сидерофиллитовый цвиттер с индий-ниобиевым касситеритом и арсенопиритом, замещенный турмалин-кварцевым метасоматитом с индиевыми станноидитом и халькопиритом; г – кварц-турмалиновый метасоматит, содержащий рокезит, индиевые виттихенит и борнит.

Обозначение минералов см. на рис. 2, в табл. 3, 4. Apy – арсенопирит, Bn – борнит, Ccp – халькопирит, Rqs – рокезит, Std – станноидит, Tur – турмалин, Wtc – виттихенит.

в турмалинитах выявлены рокезит (In_2O_3 51.26–56.91, CdO 0.55–0.99, SnO_2 0.75–1.16 %) и весьма редкий сакураиит (In_2O_3 38.28–39.44 %) (табл. 5). Рокезит развит на средних горизонтах месторождения Правоурмийское и проявления Сульфидное в виде мельчайших (0.01–0.05 мм) выделений в сростках халькопирита с борнитом, виттихенитом, сфалеритом, станноидитом (рис. 3 г).

В турмалиновых метасоматитах установлено множество минералов, содержащих РМ в виде изоморфной примеси. Среди них главные рудные минералы: касситерит (Nb_2O_5 0–0.07, Sc_2O_3 0–0.01, In_2O_3 0–0.002, WO_3 0.07–0.18 %), вольфрамит (Nb_2O_5 0.05–0.53, Sc_2O_3 0.01–0.03, Y_2O_3 0.001–0.002 %), халькопирит (In_2O_3 0.01–0.94, SnO_2 0.12–3.17 %), станноидит (In_2O_3 0–0.67, CdO 0–0.37, SnO_2 24.42–26.89 %), борнит (In_2O_3 0–0.54, SnO_2 0–3.75 %), висмут (SeO_2 0–1.50, CdO 0–0.63, SnO_2 0–0.83 %), пирит (WO_3 1.69–4.35, SnO_2 0–0.17 %) (рис. 3 в, г). Особенно выделяются индиеносностью широко распространенные сульфиды меди – халькопирит, борнит, халькозин (Правоурмийское, Орокот, Омот-Макит, Сульфидное и др.) и характерные для месторождений (Правоурмийское, Двойное, Высокое) сульфостаннаты меди (станноидит, станнин, моусонит). В турмалинитах отмечены также жильные минералы с примесью иттрия, легких REE (La, Ce, Nd) и иных РМ: эпидот ($LREE_2O_3$ 15.84–21.21, ThO_2 0–0.99, SnO_2 0–0.69 %), флюорит (Y_2O_3 0.01–0.07, $HREE_2O_3$ 0–0.02, $LREE_2O_3$ 0–0.06, Sc_2O_3 0–0.001, SnO_2 0.002–0.007 %) (табл. 5).

Хлоритовые метасоматиты пятой пострудной стадии не содержат редкометалльных минералов. Однако в характерной для них полиметаллической сульфидной минерализации наблюдаются примеси In, Cd, Se и других РМ: в сфалерите – CdO 0.09–2.12, In_2O_3 0.003–1.085, SnO_2 0–0.79 %; в галените – SeO_2 1.57–10.83, SnO_2 0–0.07, In_2O_3 0–0.001 % (табл. 2). Эпидот, встреченный в хлорититах на востоке Правоурмийского поля, содержит $LREE_2O_3$ 1.53–6.87, SnO_2 0.44–6.40 % (табл. 5). Флюорит хлорититов иногда насыщен иттрием и REE (Y_2O_3 0–0.64, $HREE_2O_3$ 0–0.02, $LREE_2O_3$ 0–0.03, SnO_2 0–0.01 %).

Таблица 5. Содержание редких металлов, олова и вольфрама (масс. %) в минералах синрудных турмалинитов и пострудных хлорититов Верхнеурмийского оловорудного узла.

Редкий металл	Турмалиниты											Хлорититы		
	Cst	Wlf	Rqs	Std	Ccp	Bn	Wtc	Bi	Mnz	Zrn	Fl	Ep	Sp	Gn
Sc_2O_3	0.003	0.02									0.001			
SeO_2								1.50						2.29
Y_2O_3		0.001									0.04			
ZrO_2										66.99				
Nb_2O_5	0.04	0.21												
CdO			0.66	0.07				0.15					0.55	
In_2O_3	0.001		55.36	0.11	0.20	0.03	0.92						0.11	0.001
$LREE_2O_3$									50.12		0.01	5.60		
$HREE_2O_3$											0.01			
HfO_2										0.90				
SnO_2	99.81		0.99	25.33	1.27	0.51		0.22			0.003	2.82	0.08	0.03
WO_3	0.15													
n	7	6	27	9	54	24	30	6	2	12	18	22	62	24

Примечание. См. примечание к табл. 3, 4. Обозначение минералов см. на рис. 2, 3. Ep – эпидот, Gn – галенит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наличие редкометалльной минерализации в ВУРУ известно со времен разведки Правоурмийского месторождения, на котором подсчитаны запасы ниобия, индия и скандия [14]. Однако прогнозные ресурсы ВУРУ подсчитаны лишь по олову, вольфраму и меди. Перспективы района в отношении редких металлов, в частности индия и скандия, неясны, так как оцениваются по масштабам концентрации в касситерите, без учета других носителей (вольфрамита, сульфидов и др.) [7–11, 22, 28]. Вместе с тем, как следует из приведенного выше описания, в составе метасоматитов ВУРУ имеется множество не учтенных ранее минералов-концентраторов редких металлов. В статье значительно расширен список стратегических РМ района (Nb, Ta, W, Y, REE (от La до Lu), Be, Li, Rb, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd, Te) и потенциально промышленных редкометалльных минералов (табл. 2). Эти выводы подтверждаются поисковыми данными: в бассейне р. Урми с 1960-х гг. известны шлиховые ореолы фергусонита, алланита, монацита и торита [15]. Особенно важными компонентами оловорудных проявлений ВУРУ, наряду с ниобием, индием и скандием, являются иттрий и редкоземельные металлы, источниками которых служат алланит, монацит, ксенотим, фергусонит, пирохлор, апатит, флюорит (табл. 2–5). Требуют исследования масштабы накопления и распределение Li, Rb, Ta, Cd.

Редкометалльные месторождения характеризуются, как правило, многостадийностью минералообразования и эволюцией редкометалльных ассоциаций. Поэтому мы уделили особое внимание минералогии редких металлов в породах различных стадий формирования цвиттер-турмалинитовой формации. Полученные данные показывают, что минералы-концентраторы РМ образуются в течение всей истории развития ВУРУ – от предрудной стадии фельдшпатитов до пострудной стадии хлорититов, включая синрудные стадии цвиттеров и турмалинитов. На первой щелочной стадии происходит накопление металлов цирконий-редкоземельной ассоциации, в грейзенах и цвиттерах второй и третьей кислотных стадий концентрируются элементы иттрий-ниобий-вольфрамовой ассоциации, а для турмалинитов и хлорититов субщелочных стадий характерны примеси кадмий-индий-оловянной ассоциации: (LREE, Zr, Hf) → (W, Nb, Ta, Y, HREE, Sc) → (Sn, In, Cd, Se, Te). Наблюдается снижение интенсивности редкометалльного минералообразования и эволюция состава редких металлов от литофильных к халькофильным: собственные минералы редких металлов образуются в основном на ранних стадиях рудно-метасоматического процесса (табл. 2).

Формирование редкометалльной минерализации определяется магматическим, метасоматическим и кристаллохимическим факторами [5, 7, 8, 10, 13, 24, 32]. Магматический и метасоматический факторы возникновения редкометалльной минерализации исследованы в целом ряде работ. Важным условием комплексности оловорудных месторождений Дальнего Востока является чередование надсубдукционного и трансформного геодинамических режимов Тихоокеанской континентальной окраины, определяющее

эволюцию магматизма, с которым связано образование крупных месторождений олова и вольфрама [12, 27–29]. В раннем мелу трансформный режим вызвал отрыв и погружение в мантию океанической литосферы, субдуцированной под восточную окраину Азии. Скольжение плит на границе раннего и позднего мела (в сеномане) привело к формированию слэб-виндоу и астеносферных диапиров. В зонах растяжения над диапирами возникали ареалы бимодального магматизма повышенной щелочности, включающие массивы рудоносных монцонитов и Li-F гранитов [27]. В Тихоокеанском подвижном поясе намечен гигантский пояс таких ареалов, получивший название Дальневосточного пояса ЛФГ [2]. На исследуемой территории этот пояс протягивается восточнее Буреинского массива в районе Сынчугинского выступа. Рудоносный магматизм контролируется Орокотской структурой, входящей в систему Куканского регионального разлома. На пересечении этой структуры с поперечным Правоурмийским разломом сформирован комплекс ЛФГ, с которым связаны вольфрамово-оловорудные проявления с попутной редкометалльной минерализацией (рис. 1). Редкометалльно-гранитовый магматизм определяет накопление РМ в остаточных флюидах и многостадийное пневматолито-гидротермальное преобразование вмещающих толщ [1–3, 10, 12–15, 18, 21, 22].

Кристаллохимический фактор определяет разнообразие и формы концентрации РМ в минералах оловянных рудопроявлений ВУРУ. Он реализуется в виде двух минералообразующих процессов: а) формирование редкими металлами в сочетании с родственными элементами (Ti, Al, Mn, Fe, Sn) собственных минералов (фергусонит, эвксенит, плюмбопирохлор, алланит, циркон, монацит, ксенотим, рокезит, сакураиит); б) вхождение РМ (Nb, Sc, Y, REE, In, Se, Te) в виде примеси в состав рудных (вольфрамит, касситерит, сульфиды Cu, Sn, Fe, Mo, Zn, Pb, самородный висмут) и породообразующих (флюорит, сидерофиллит, мусковит, эпидот) минералов (табл. 2). Применение локальных методов анализа позволило установить изоморфный характер примесей РМ и отсутствие в минералах включений редкометалльных фаз.

Яркой особенностью редкометалльных гранитов является присутствие групп геохимически и кристаллохимически родственных минералов – акцессорных парагенезисов [5]. В ЛФГ Дальнего Востока установлены минералого-геохимические ассоциации: W-Nb-Sc-Ti, Sn-Ta-Nb-Li, Y-HREE, LREE-Th, Zr-Hf-U-Y [2]. Геохимическая эволюция рудно-магматической системы ВУРУ определила накопление редких элементов в постмагматических флюидах и наследование оловоносными метасоматитами рудно-геохимической специализации магматических минералов: W-Nb-Sc-Ti (вольфрамит, эвксенит, фергусонит, пирохлор), Y-HREE (ксенотим, фергусонит, пирохлор, флюорит), LREE-Th (алланит, монацит, апатит, эпидот). На постмагматическом этапе сформированы гидротермальные минералого-геохимические ассоциации: Sn-Nb-In-Sc (касситерит, рокезит, сакураиит, станноидит, халькопирит), Se-Cd-In (висмут, сфалерит, галенит).

ВЫВОДЫ

1. Исследована многостадийная комплексная редкометалльная минерализация оловорудных проявлений Верхнеурмийского рудного узла в районе развития литий-фтористых гранитов. Выявлены минералы-концентраторы стратегических редких металлов: Nb, Ta, W, Y, REE (от La до Lu), Be, Li, Rb, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd, Te.

2. Выделены две формы концентрации редких металлов: собственные минералы редких металлов (фергусонит, эвксенит, плюмбопирохлор, алланит, циркон, монацит, ксенотим, рокезит, сакураиит и др.) и минералы с примесью редких металлов – рудные (вольфрамит, касситерит, сульфиды Cu, Sn, Fe, Mo, Zn, Pb, самородный висмут и др.) и породообразующие (флюорит, сидерофиллит, мусковит, эпидот). Определены часто встречаемые редкие металлы в составе оловоносных метасоматитов: Y, REE, Nb, In, Sc.

3. Минералы редких металлов образуются в течение всей истории формирования Верхнеурмийского рудного узла – от предрудной стадии фельдшпатитов до пострудной стадии хлоритов, включая синрудные стадии цвиттеров и турмалинитов. 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, Te).

4. Формирование редкометалльной минерализации Верхнеурмийского рудного узла обусловлено магматическим, метасоматическим и кристаллохимическим факторами. Минералого-геохимическое изучение проявлений Верхнеурмийского рудного узла показывает возможность комплексного освоения оловорудных месторождений Дальнего Востока в районах развития литий-фтористых гранитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности № 5.9248.2017/6.7 на 2017–2019 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.И. Метасоматическая зональность рудных полей Баджальского района (Приамурье) // Записки ВМО. 1989. № 5. С. 27–37.

2. Алексеев В.И. Литий-фтористые граниты Дальнего Востока.

СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. 244 с.

3. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Состав и эволюция акцессорной минерализации литий-фтористых гранитов Дальнего Востока как индикаторы их рудоносности // Зап. РМО. 2014. № 6. С. 1–16.
4. Алексеев В.И., Суханова К.Г., Марин Ю.Б. Ниобиевые минералы – индикаторы генетической связи оловорудных цвиттеров и литий-фтористых гранитов Верхнеурмийского массива (Приамурье) // Зап. РМО. 2018. № 1. С. 55–100.
5. Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б. Редкометальные гранитовые формации. Л.: Недра, 1979. 280 с.
6. Бескин С.М., Марин Ю.Б. Комплексная систематика танталовых и танталово-ниобиевых месторождений // Зап. РМО. 2015. № 3. С. 45–54.
7. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
8. Бродская Р.Л., Марин Ю.Б. Онтогенический анализ на микро- и наноуровне минеральных индивидов и агрегатов для реставрации условий рудообразования и оценки технологических свойств минерального сырья // Зап. Горного ин-та. 2016. Т. 219. С. 369–376.
9. Быховский Л.З., Потанин С.Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений // Минеральное сырьё. Сер. геолого-экономическая. № 28. М.: ВИМС, 2009. 157 с.
10. Гавриленко В.В., Панова Е.Г. Геохимия, генезис и типоморфизм минералов месторождений олова и вольфрама. СПб.: Невский курьер, 2001. 260 с.
11. Гаськов И.В., Владимиров А.Г., Ханчук А.И., Павлова Г.А., Гвоздев В.И. Особенности распределения индия в рудах некоторых полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и Дальнего Востока России // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 1. С. 62–74.
12. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.
13. Гоневчук В.Г. Оловоносные магматические системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
14. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Дальневосточная. Лист М-53 – Хабаровск: Объясн. зап. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 376 с.
15. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Комсомольская. Лист М-53-XV (р. Ярап): Объясн. зап. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2004. 159 с.
16. Кременецкий А.А., Калиш Е.А. Комплексные редкометальные месторождения России и основные направления повышения их инвестиционной привлекательности // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 3–11.
17. Крюков В.Г., Щербак Л.И. Геология и металлогения Баджальского оловорудного района (Приамурье) // Сов. геология. 1987. № 3. С. 55–65.
18. Марин Ю.Б., Скублов Г.Т., Гульбин Ю.Л. Минералого-геохимические критерии локального прогнозирования редкометальных месторождений // Минералогическое картирование и индикаторы оруденения. Л.: Наука. 1990. С. 67–94.
19. Попова В.И., Попов В.А.. Коростелев П.Г. , Орловский В.В. Минералогия руд W–Sn-месторождения Тигриное на Сихотэ-Алине и перспективы его освоения. Екатеринбург: РМО УрО РАН, 2013. 132 с.
20. Руб А.К., Руб М.Г. Редкометальные граниты Приморья. М.: ВИМС, 2006. 86 с.
21. Семеняк Б.И. О «цвиттерах» Верхнеурмийского рудного узла // Руд. месторождения Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 20–25.
22. Семеняк Б.И., Недашковский А.П., Никулин Н.Н. Минералы индия в рудах Правоурмийского месторождения (Дальний Восток России) // Геология руд. месторождений. 1994. Т. 13. № 3. С. 230–236.
23. Смоленский В.В., Гавриленко В.В., Кемпе У., Вольф Д. Редкоземельные элементы в минералах оловорудных месторождений Дальнего Востока // Зап. ВМО. 1998. № 4. С. 101–109.
24. Солодов Н.А. Минерагения редкометальных формаций. М.: Недра, 1985. 224 с.
25. Трунилина В.А., Орлов Ю.С., Зайцев А.И., Роев С.П. Высокофосфористые литий-фтористые граниты Восточной Якутии (Верхояно-Колымская орогенная область) // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38. № 1. С 64–79.
26. Флёров Б.Л., Трунилина В.А., Холмогоров А.И., Яковлев Я.В. Геолого-генетическая модель формирования оловорудных месторождений Якутии // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск: Наука, 1988. С. 262–271.
27. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудн. месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–34.
28. Ханчук А.И., Гореликова Н.В., Павловска-Глэн В., Толозана-Дельгадо Р. Новые данные по распределению микроэлементов в касситерите оловянных месторождений Дальнего Востока // Докл. РАН. 2004. Т. 399, № 1. С. 100–103.
29. Шнайдер А.А., Ручкин Г.В. Оценка перспектив рудоносности Стланикового рудопроявления в Приморье // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 6. С. 111–121.
30. Černy P., Blevin P.L., Cuney M., London D. Granite-related ore deposits // Econ. Geol. 2005. 100th anniversary vol. P. 337–370.
31. Legros H., Marignac C., Tabary T., Mercadier J., Richchard A., Cuney M., Wang R.C., Charles N., Lespinasse M.-Y. The ore-forming magmatic-hydrothermal system of the Piaotang W-Sn deposit (Jiangxi, China) as seen from Li-mica geochemistry // Am. mineralogist. 2018. V. 103, N. 1. P. 39–54.
32. Rare earth and critical elements in ore deposit. Ph.L. Verplanck, M.W. Hitzman // Reviews in Econ. Geol. 2016. V. 18. 365 p.
33. Wang R.C., Xie L., Lu J.J., Zhu J.C., Chen J. Diversity of Mesozoic tin-bearing granites in the Nanling and adjacent regions, South China: Distinctive mineralogical patterns // Sci China Earth Sci. 2017. V. 60, N. 11. P. 1909–1919.
34. Xie L., Wang Z.J., Wang R.C., Zhu J.C., Che X.D., Gao J.F., Zhao X. Mineralogical constraints on the genesis of W-Nb-Ta mineralization in the Laiziling granite (Xianghualing district, south China) // Ore geology reviews. 2018. V. 95. P. 695–712.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

После доработки 11.10.2018 г.
принята к публикации 24.11.2018 г.

V.I. Alekseev, Yu.B. Marin, V.V. Gavrilenko

Rare metal mineralization of tin manifestations in the area of lithium- fluoric granites (Verkhneurmiysk ore cluster, the Amur River Region).

Rare elements are secondary constituents in the tin deposits of the Far East related with lithium- fluoric granites. The petrography and mineral composition of the tin-bearing metasomatites of the Verkhneurmiysk ore cluster in the Amur River region – feldspathites, greisens, zwitters, tourmalinites and chloritites were studied. The multiphase complex rare metal mineralization of tin deposits is studied. In addition to earlier known minerals containing Nb, In, Sc, minerals-concentrators of some strategic rare metals are revealed: Nb, Ta, W, Y, REE (from La to Lu), Be, Li, Rb, Zr, Hf, In, Sc, Se, Cd, and Te. Two forms of rare metals concentration are distinguished: natural minerals of rare earth metals (fergusonite, plumbopyrochlore, allanite, monazite, roquesite, sakuraiite.) and minerals with isomorphic impurity in the minerals of ore origin (wolframite, cassiterite, sul fides Cu, Sn, Fe, Mo, Zn, Pb, bithmus and others, and rock-forming (fluorite, sideroferrite, muscovite, epidote). Rare metals (Y, REE, Nb, In, Sc) often met in stanniferous metasomatites have been determined. Minerals of rare metals were formed throughout the history of the Verkhneurmiysky ore cluster formation, starting from the pre-ore stage of feldspathites to the post-ore stage of chloritites. It is observed that intensity of rare metal-bearing minerals formation and evolution of rare metals composition decrease from lithophilous rare metals to chalcophile ones: (LREE, Zr, Hf) → (W, Nb, Ta, Y, HREE, Sc) → (Sn, In, Cd, Se, Te). The formation of the Verkhneurmiysky ore cluster rare metal mineralization is caused by magmatic, metasomatic and crystal chemical factors. The possibility of the complex exploration of tin deposits of the Far East in the areas of lithium- fluoric granites development is shown.

Key words: **rare metals, lithium-fluoric granite, feldspathites, greisens, zwitters, tourmalinites, Verkhneurmiysky ore cluster, Priamurye.**