

РУДОНОСНЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ, СОПРЯЖЕННЫЕ С ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫМИ ГРАНИТАМИ СЕВЕРНОГО МАССИВА (ЧАУН-ЧУКОТКА)

В.И. Алексеев

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru*

Поступила в редакцию 25 июня 2024 г.

На основе крупномасштабного геологического картирования, петрографических и минералого-геохимических данных исследованы фациальный состав и стадии формирования гидротермально-метасоматических образований, пространственно сопряженных с литий-фтористыми гранитами Северного массива на Чаун-Чукотке. Выделены цвиттеры Северного массива – кварц-топаз-циннвальдитовые грейзены, сопровождающие Li-F граниты и несущие редкометалльную (Nb, REE, Y, Li, Bi, Sn, W) минерализацию. Основной объем цвиттеровой минерализации распределен по площади массива в составе умеренно измененных биотитовых лейкогранитов. Установлено фациальное разнообразие турмалинитовых метасоматитов. Выделены мусковит-кварц-турмалиновая, альбит-турмалин-кварцевая, хлорит-мусковит-турмалиновая и адуляр-турмалиновая метасоматические фации с турмалином трех типов. Разработана схема фациального расчленения рудоносных метасоматитов и последовательность стадий их образования: 1) альбититы, 2) цвиттеры, 3) турмалиниты, 4) хлорититы, 5) аргиллизиты. Цвиттер-турмалинитовый метасоматический комплекс массива характеризуется тесной пространственной связью с литий-фтористыми гранитами, закономерной последовательностью образования и геохимической эволюцией, общностью акцессорной и рудной минерализации метасоматитов. Перспективы рудоносности Северного массива связаны с оловоносными турмалинитами, ураноносными аргиллизитами и редкометалльными цвиттерами.

Ключевые слова: цвиттер, турмалинит, хлоритит, литий-фтористый гранит, метасоматический комплекс, олово, редкие металлы, Чаун-Чукотка.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии со «Стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2035 года» на Чукотке производится освоение новых перспективных территорий, таких как Баимская рудная зона, Кайемравемский рудный узел, Иультинский рудный узел и др. Большой интерес представляет Куйвиеем-Пыркакайский рудный район, включающий месторождения Северного гранитного массива и уникальную группу месторождений олова Пыркакайские штокверки с запасами 231.6 тыс. т [4, 8, 20]. Одной из основ металлогенической оценки территорий является изучение состава, истории формирования и рудоносности гидротермально-метасоматических образований [10]. Признаком крупных редкометалльно-оловянных месторождений является сочетание рудоносных цвиттеров и турмалинитов [4, 23].

Цель статьи – представить результаты исследования состава и последовательности формирования

комплекса рудоносных метасоматитов в ассоциации с Li-F гранитами (ЛФГ), которые могут быть использованы при поисках оловянного и редкометалльного оруденения Куйвиеем-Пыркакайского рудного района. Результаты работы могут быть использованы при актуализации Чукотской серийной легенды Госгеолкарты-1000/3 [16, 19].

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования основаны на материалах экспедиций на Чаун-Чукотку Санкт-Петербургского горного университета (Ленинградского горного института) в 1990–2011 гг. При поддержке Чаунского горно-геологического предприятия проведено крупномасштабное геологическое картирование метасоматитов Северного массива по методике Института Карпинского [15, 19]. На поисковых участках Левый Ергувеем, Кекурный, Нижний, Валунный, Стремительный, Восточный, Утиный и Глубокий проведены минералого-пе-

трографические и геохимические исследования рудоносных метасоматитов.

Методологической основой исследований являлась пульсационная концепция образования гидротермальных пород, развитая академиком С.С. Смирновым (1937) и изложенная в работе [10]. Большое внимание уделено составу, анатомии и взаимоотношению минералов (турмалина, слюды, топаза, касситерита, вольфрамооксиолита, алланита) – индикаторов условий образования метасоматитов [1]. Используются принципы онтогенетического анализа минеральных индивидов и агрегатов [14].

Исследование метасоматитов проведено с помощью микроскопов Полам P211, Полам P312, LeicaDM2500 M, OlympusBX51. При изучении минералов использованы электронные микроскопы JEOL-JSM-6460LV, JSM-7001F, JIB-4500, CamecaMS-46 (Горный университет императрицы Екатерины II и Институт Карпинского, Санкт-Петербург). Химический состав пород и минералов определен методами мокрой химии, эмиссионного спектрального и рентгено-спектрального флуоресцентного анализа (ED- 2000, XRF-1800), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICPE-9000) и атомно-абсорбционной спектрометрии (AA6300, AA35EA) в Центральных лабораториях ПГО «Бурятгеология», Института Карпинского и ЦКП Санкт-Петербургского горного университета. Состав турмалина определен микрозондовым анализом (JeolJSM-IT500, МГУ им. М.В. Ломоносова). Диагностика слюды и турмалина выполнена с учетом классификаций [35, 39].

Была организована база геохимических данных (3255 проб), включающая информацию о видах, фациальных разновидностях и химическом составе метасоматитов и вмещающих пород Северного массива, интенсивности гидротермальных изменений. Установлены статистические параметры распределения содержаний химических элементов в выборках вмещающих гранитов и рудоносных метасоматитов. Выявлены геохимические ассоциации редких элементов в метасоматитах и вмещающих породах.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Северный массив расположен на побережье Восточно-Сибирского моря, восточнее Чаунской губы (рис. 1, а). В 1937 г. вторая Чаунская экспедиция Арктического института Главсевморпути открыла оловорудные проявления в западном контакте массива. С момента основания в 1939 г. Чаун-Чукотского геологоразведочного управления на территории проведены государственная геологическая съемка м-ба 1:1 000 000 (лист R-59, новая серия), масшта-

ба 1:200 000 (листы R-59-XXII, XXIII, первое поколение), крупномасштабная геологическая съемка с общими поисками. Гранитоиды Северного массива прорывают верхнетриасовые алевролитовые и верхнеюрские туфопесчаные толщи Паляваамского синклинория Чукотской складчатой системы, а сам массив входит в состав одноименного батолитового пояса [4, 5, 7, 25]. Район исследований расположен на северном продолжении альб-сеноманской окраинно-континентальной магматической провинции Тихоокеанской Азии [26].

Северный массив представляет слабо эродированный батолит с пологой многокупольной кровлей, сложенный в основном лейкократовыми гранитами. В районе выделены интрузии четырех плутонических комплексов: 1) купола биотит-роговообманковых гранитов пургинского комплекса; 2) дайки порфировидных монцогранитов, граносиенитов ичувеевского комплекса; 3) главная фаза крупно-среднезернистых лейкогранитов и дополнительная фаза порфировидных и аплитовидных лейкогранитов чаунского комплекса (89.4 ± 0.7 млн лет); 4) малые интрузии ЛФГ пыркайского комплекса (88.0 ± 0.7 млн лет) [1].

Интрузии ЛФГ представлены штоками среднезернистых микроклин-альбитовых гранитов первой фазы и силлами мелкозернистых микроклин-альбитовых гранитов второй фазы, залегающими в апикальной части главного купола лейкогранитов. В ареале ЛФГ в центральной части массива распространены разнообразные метасоматиты, содержащие редкометалльную, оловянную и урановую минерализацию. Основные сбросо-сдвиги (Переважный, Кулювеевский разломы и др.) имеют северо-западное простирание, а сопряженные сбросы (Дайковый, Восточный разломы и др.) – субмеридиональное простирание. Развита также субширотные сдвиги-сбросы и пологозалегающие разрывные нарушения. Рудоконтролирующими являются субмеридиональные и пологозалегающие структуры, представляющие систему при-сдвиговых раздвигов и определяющие характерную кулисообразную структуру размещения минерализованных зон (рис. 1, б).

МЕТАСОМАТИТЫ СЕВЕРНОГО МАССИВА

Изученность метасоматитов

В результате проведения поисковых работ 1946–1967 гг. на ряде участков Северного массива были установлены коренные и россыпные проявления олова, выявлены танталоносные и ураноносные метасоматиты. На ряде рудопроявлений олова и урана проведена оценка запасов, в южном экзоконтакте массива открыто крупное Пыркайское месторождение олова.

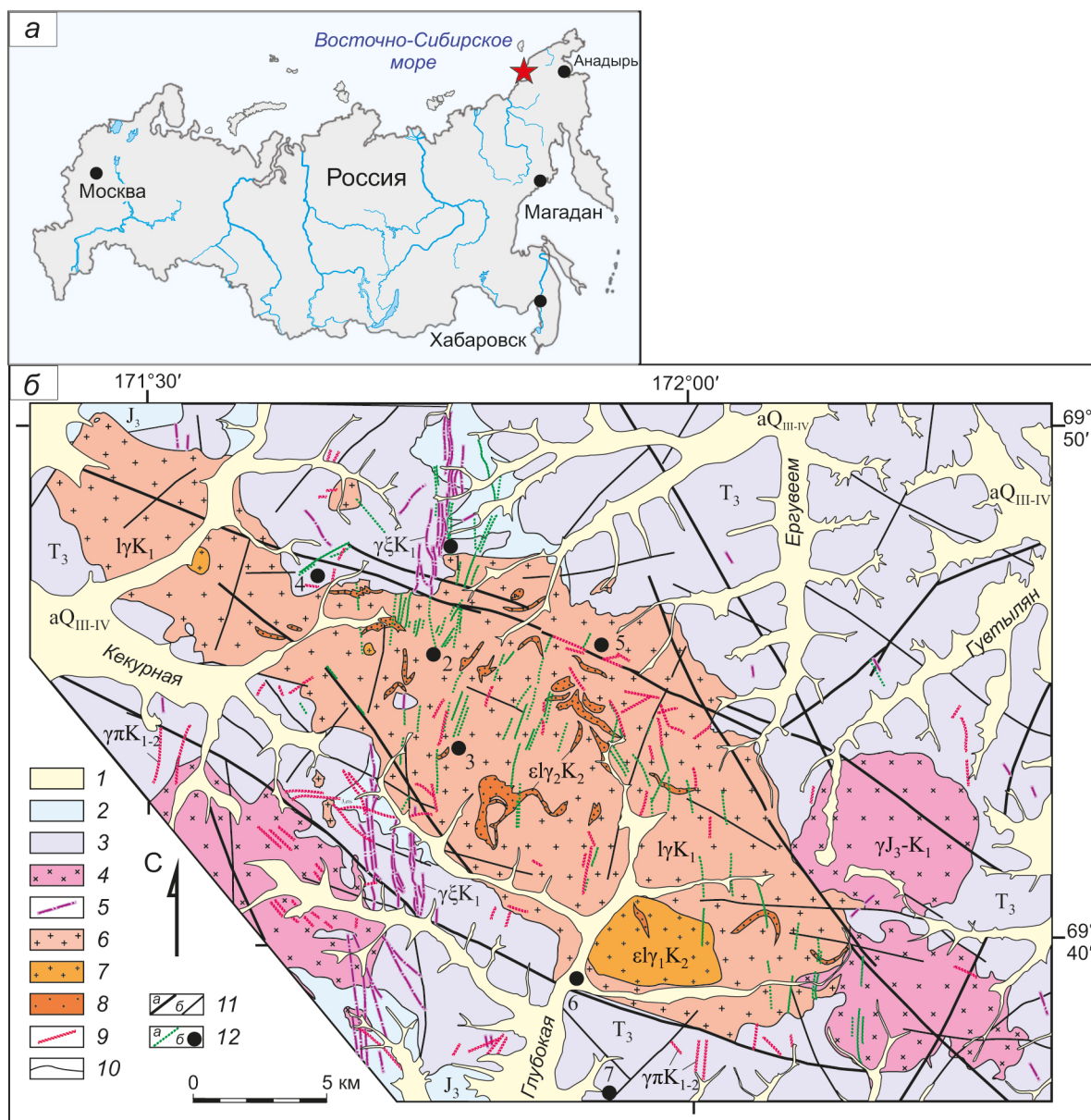


Рис. 1. Географическое положение (а) и геологическая карта (б) Северного массива, Чукотка.

1 – терригенные аллювиальные отложения (аQ_{III-IV}); 2 – туфопесчаники, туфоалевролиты (J₃); 3 – полимиктовые алевролиты, песчаники (T₃); 4 – адамеллиты пургинского комплекса, γJ₃-K₁; 5 – дайки порфировидных монцогранитов, граносиенитов ичувеевского комплекса, γξK₁; 6 – лейкограниты чаунского комплекса, lγK₁; 7–8 – микроклин-альбитовые Li-F граниты пыркайского комплекса: 7 – первая фаза, elγ₁K₂, 8 – вторая фаза, elγ₂K₂; 9 – дайки гранит-порфиров нерасчлененные, γлK₁₋₂; 10 – геологические границы; 11 – разрывные нарушения: региональные (а), локальные (б); 12 – зоны грейзенов, турмалинитов, хлорититов нерасчлененные (а) и месторождения (б): 1 – Ергувеем, 2 – Кекурное, 3 – Стремительное, 4 – Террасовое, 5 – Утиное, 6 – Глубокое, 7 – Пыркакайское.

Исследователи сходятся во мнении о перспективности поисков в исследуемом районе слабо эродированных месторождений олова, тантала и урана, но высказывают противоречивые взгляды на классификацию рудоносных метасоматитов. По представлениям И.В. Тибилова [22], гидротермальные образования и оруденение Центральной Чукотки образуют четыре минеральных комплекса: 1) ергувеевский (кварцевые

метасоматиты); 2) пыркайский (грейзены, турмалиниты, пропициты и пр.); 3) валькумейский (оксиды и вольфраматы); 4) кытэпрынатский (сульфиды и сульфосоли). Взгляды других исследователей изложены в фондовых материалах ЗАО «Чаунское ГПП». Е.С. Котлярова (Таежгеология, 1988) выделила 4 этапа метасоматизма: 1) высокотемпературный (кремнещелочной метасоматоз и грейзенизация); 2) средне-

температурный (пропилитизация и березитизация); 3) низкотемпературный (аргиллизация); 4) гипергенный этап. И.С. Пельцман (ДВИМС, 1988) предложил трех-этапную схему метасоматизма: 1) биотитизация, альбитизация; 2) кварц-турмалиновые, литий-фтористые и сидерофиллитовые грейзены; 3) альбит-хлорит-серицитовые пропилиты. Л.П. Цветков (Чаун-Чукотская ГРЭ, 1989) выделил 13 стадий минерализации: 1) кварц-калишпатовую, 2) (касситерит)-кварц-альбитовую, 3) биотитовую, 4) топаз-мусковит-кварцевую, 5) альбитовую, 8) кварц-серицитовую, 7) кварц-турмалиновую, 8) касситерит-кварцевую, 9) гематит-кварцевую, 10) хлорит-альбитовую, 11) кварц-сульфидно-карбонатную, 12) каолинит-кварцевую, 13) цеолитовую. Проблема поисков оруденения Северного массива требует разработки единой схемы расчленения рудоносных метасоматитов.

Последовательность образования и петрография метасоматитов

Размещение гидротермально-метасоматических образований в Северном массиве контролируется разнонаправленными разрывными нарушениями, что позволяет использовать взаимоотношение метасоматических тел для реконструкции последовательности их образования. На основе принципов, изложенных в [10, 13, 18], выделены пять групп метасоматитов, различающихся по условиям локализации, составу и рудоносности, образующихся последовательно в течение пяти стадий: 1) альбититы, 2) цвиттеры, 3) турмалиниты, 4) хлорититы, 5) аргиллизиты (табл. 1).

Альбититы первой стадии представлены по всей площади массива умеренно изменёнными гранитами. Содержание новообразованного альбита 5–25 %. Альбит образует псевдоморфозы по первичному олигоклазу. В ортоклазе наблюдаются пертиты замещения, реже агрегаты «шахматного» альбита. По границам кристаллов полевого шпата развит «перистый» лейстовый альбит. На альбитизированные граниты наложен цвиттеровый парагенезис: альбит первой стадии замещается топазом, циннвальдитом и флюоритом (рис. 2, б).

Цвиттеры второй стадии представляют высокофтористые грейзены, состоящие из триоктаэдрических слюд (циннвальдита*, сидерофиллита), кварца, топаза и флюорита [1, 3, 11]. Большая часть цвиттеро-

*Циннвальдит – тёмная триоктаэдрическая Li-содержащая слюда ряда сидерофиллит $\text{KFe}^{2+}_2\text{Al}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ – полилитинит $\text{KLi}_2\text{Al}[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{F}_2$ [39].

Примечание к таблице 1. Указаны главные породообразующие минералы в порядке уменьшения содержания, в скобках – рудные минералы. Аббревиатуры минералов по [43].

Таблица 1. Стадии образования и фации гидротермально-метасоматических образований Северного массива.

Стадия минерализации	Метасоматическая фация	Минеральный состав		Формы и участки проявления гидротермалитов
		Метасоматиты	Жилы	
1. Альбитовая	Кварц-альбитовая	Ab	-	Умеренная альбитизация гранитов по площади
2. Цвиттеровая (редкометаллическая)	Циннвальдит-топаз-кварцевая	Qz, Znw, Trpz, Fl (Brl, Wix, Yfl, Mnz, Rt, Apy, Ccp, Bin)	Qz, Trpz, Fl	Умеренное изменение гранитов по площади; залежи с прожилками (Глубокий, Нижний); субмеридиональные зоны (повсеместно)
3. Турмалинитовая (редкоземельно-оловоорудная)	Мусковит-кварц-турмалиновая Альбит-турмалин-кварцевая Хлорит-мусковит-турмалиновая Адуляр-турмалиновая	Ms, Qz, Tur1,2,3(Cst) Ab, Tur3(Cst, Py) Ms, Chl, Tur1 Kfsp, Tur2,3	Qz, Tur1,2,3, Fl (Cst, Mnz) Qz, Tur3(Cst, Aln - (Ce), Aln - (Y)) Tur1, Fl Tur2,3, Kfsp (Cst)	Кварц-турмалиновые жилы с околосильной мусковитизацией (Кекурный, Стремительный). Кварц-турмалиновые прожилки с околосильной альбитизацией (Восточный, Утиный). Турмалиновые прожилки с околосильными изменениями (Нижний). Турмалиновые прожилки с околосильной адуляризацией (Нижний, Стремительный).
4. Хлоритовая (редкоземельная)	Серицит-хлорит-кварцевая Хлорит-нонтронит-кварцевая	Chl, Src, Non (Py, Hem, Aln) Non, Chl, Src (Hem)	Qz, Chl, Fl (Hem, Ant, Py, Cst, Gn) Qz, Non, Kfsp (Hem)	Кругозалегающие зоны кварцевых жил с околосильными ореолами (периферия). Минерализованные зоны дробления (периферия).
5. Аргиллизитовая (ураноносная)	Каолинит-кварцевая	Qz, Kln, Hms (Tor)	Qz, Fl, Ceol, Crb (Urp, Kso, Tor)	Зоны кварцевых жил и метасоматитов. Слабая площадная каолинизация (периферия).

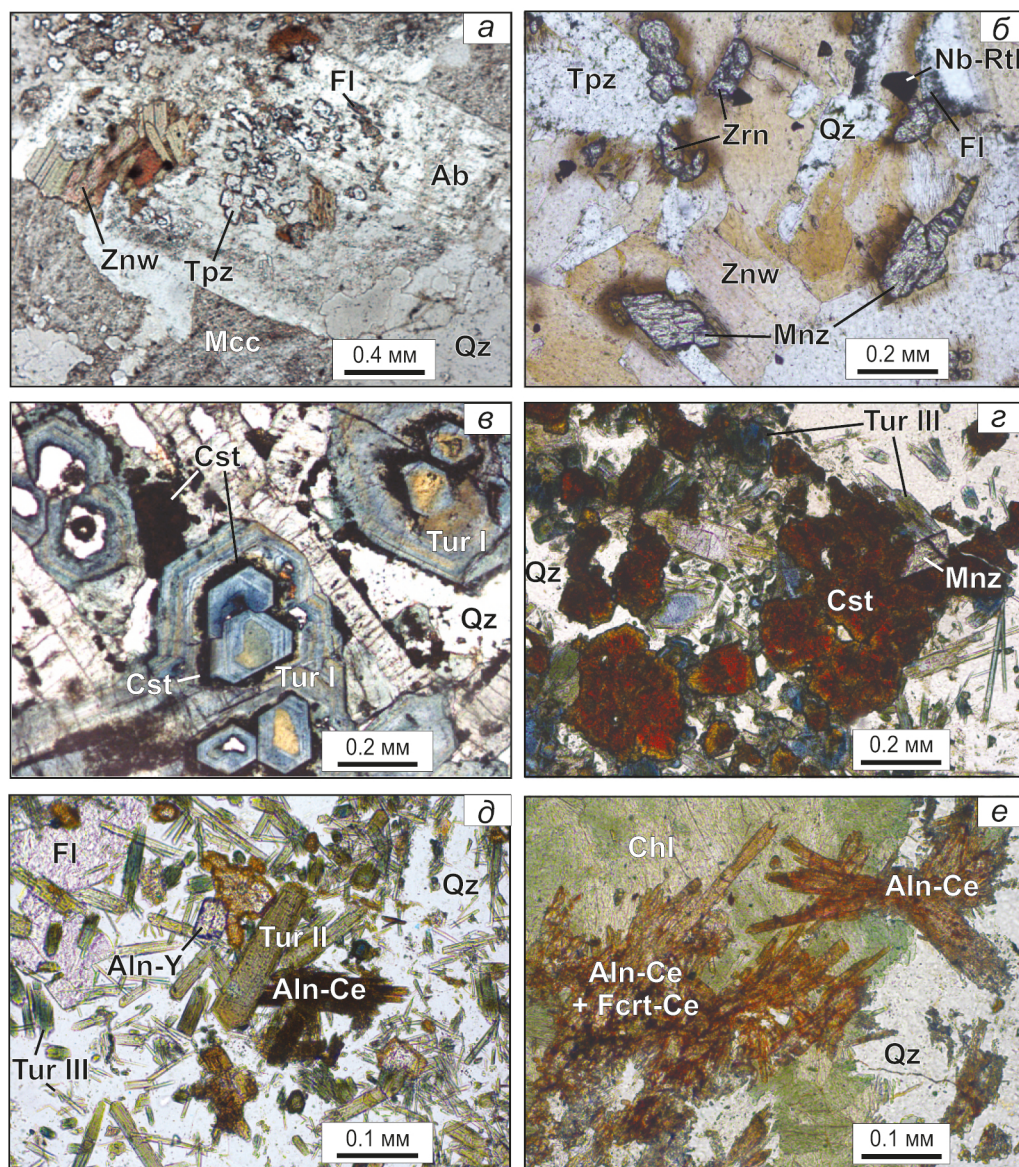


Рис. 2. Оловоносные и редкометалльные метасоматиты Северного массива (фотографии шлифов без анализатора).

a – флюорит-топаз-циннвальдитовая грейзенизация в лейкограните чаунского комплекса (рудопоявление Дайковое); *б* – кварц-топаз-циннвальдитовый цвигтер с монацитом-(Ce), Nb-содержащим рутилом, Hf-содержащим цирконом (Валунное); *в* – топаз-кварц-турмалиновый метасоматит с включениями касситерита (Стремительное); *г* – редкометалльно-оловорудный кварц-турмалиновый метасоматит с касситеритом и монацитом-(Ce) (Кекурное); *д* – редкометалльный флюорит-кварц-турмалиновый метасоматит с алланитом-(Ce), алланитом-(Y) (Кекурное); *е* – редкометалльный кварц-хлоритовый метасоматит с алланитом-(Ce), флюоцеритом-(Ce) (Утинное). Аббревиатуры минералов по [43].

вой минерализации распространена по площади Северного массива в виде слабых и умеренных изменений (2–15 %). Содержание новообразованного кварца в биотитовых лейкогранитах чаунского комплекса составляет 1–10 %; содержание циннвальдита, замещающего первичный биотит, 1–5 %; содержание топаза и флюорита, замещающих альбит, соответственно, 0.1–3 % и 0–0.6 % [27]. Топаз-циннвальдит-кварцевые изменения гранитов распространены на глубину до

400 м и отражаются на облике и составе лейкогранитов чаунского комплекса [9].

В Северном массиве установлены линзо- и плитообразные тела, крутозалегающие зоны цвигтеров мощностью 0.1–4.5 м и длиной 1–70 м. Цвигтеры на месторождениях Кекурное и Глубокое залегают в апикальных частях интрузий ЛФГ, образуя плащеобразные ареалы площадью до 1–2 км². Протолитом цвигтеров служат в основном лейкограниты чаун-

ского комплекса и ЛФГ пыркакайского комплекса. В телах цвиттеров передовая зона циннвальдит-кварцевая, а тыловая – топаз-кварцевая (табл. 1). Циннвальдит-кварцевые метасоматиты – темноокрашенные породы с примесью (10–20 %) циннвальдита или Li-сидерофиллита, топаза (1–10 %) и флюорита. Топаз-кварцевые метасоматиты – светлоокрашенные породы, содержащие 20–30 % (реже до 50 %) топаза и незначительную примесь циннвальдита. Структура цвиттеров мелко- и среднезернистая, лепидогранобластовая, текстура массивная, пятнистая, прожилковая. Темная слюда и топаз образуют гнезда и линзовидные обособления в гетеробластовом кварцевом агрегате. Короткостолбчатый или шестоватый топаз входит в состав флюорит-топазовых и циннвальдит-топазовых агрегатов с аксессуарными минералами (рис. 2, а; 3, а, б). Цвиттеры пересекаются кварц-турмалиновыми оловорудными жилами.

Турмалиниты третьей стадии слагают круто-залегающие жильные тела, разделенные по характеру метасоматической зональности на четыре фации (табл. 1). К наиболее распространенным фациям относятся мусковит-кварц-турмалиновая и альбит-турмалин-кварцевая фации.

Мусковит-кварц-турмалиновая (главная оловорудная) фация развита в центральной части массива в виде зональных плитообразных тел турмалинитов мощностью 1.5–2.5 м (рис. 1). Турмалиниты пересекают гранитоиды всех интрузивных комплексов, иногда локализуются в зальбандах даек гранит-порфиров и монцогранит-порфиров. В составе фации выделяются кварц-турмалиновые жилы, окруженные ореолами мусковитовых метасоматитов с примесью кварца, турмалина, флюорита, касситерита. Между турмалиновой жилой и околожильным слюдитом наблюдается турмалин-кварцевая зона с бластогранитовой структурой.

Выделены три структурных типа мусковитовых метасоматитов. Наиболее распространены мелкозернистые (0.02–0.15 мм) кварц-мусковитовые метасоматиты с реликтовой структурой: зерна магматического кварца заключены в гранолепидобластовый кварц-мусковитовый агрегат с параллельно-шестоватыми и радиально-лучистыми сростками турмалина III, описанного ниже. Характерна вкрапленность ксеноморфных бесцветных или малиновых зерен флюорита, иттрофлюорита размером 0.1–0.5 мм (рис. 3, в). К гнездам мусковита приурочен касситерит. Второй тип околожильных пород – микрозернистые (0.001–0.02 мм) флюорит-мусковитовые метасоматиты с турмалином («серицитовые метасоматиты»). Мусковит относится к железистому фенгиту. Флюорит размером $n \cdot 1.0$ мм образует гнезда и прожилковые обособления; содер-

жание 2–5 %. Третий тип мусковитовых метасоматитов возникает в результате замещения цвиттеров с наследованием их структуры.

Альбит-турмалин-кварцевая (второстепенная оловорудная) фация представлена турмалин-кварцевыми метасоматическими жилами с околожильной альбитизацией, которые распространены на периферии Северного массива. Зоны метасоматоза небольшой мощности (1–15 см) сложены белыми и светло-серыми кварц-альбитовыми породами с небольшим (до 5–8 %, реже до 15–30 %) содержанием синего или зеленого турмалина III. Турмалин образует ксенобласты и игольчатые кристаллы поперечником 0.01–0.1 мм в кварц-альбитовой матрице. В состав альбититов входят также скелетные и короткостолбчатые кристаллы буро-голубого турмалина I и призматические кристаллы турмалина II поперечником 0.3–3.0 мм, ксеноморфные зерна розового флюорита размером 0.5–1.5 мм, микровключения касситерита и рутила. Установлено образование турмалиновых альбититов по гранитам всех видов и по цвиттерам.

Хлорит-мусковит-турмалиновая фация отличается от мусковит-кварц-турмалиновой наличием в метасоматитах хлорита (деллесита), буро-голубого турмалина I, описанного ниже, и распространением на глубоких горизонтах (150–250 м). В состав фации входят тонкие (0.1–3.0 мм) турмалиновые прожилки, содержащие флюорит, касситерит и отороченные маломощными зонами слабой (3–20 %) мусковитизации и хлоритизации вмещающих гранитов. Турмалин-хлорит-мусковитовые метасоматиты, содержащие микрозернистый касситерит, описаны в скважинах на месторождении Кекурном.

Адуляр-турмалиновая фация включает редкие маломощные (до 10 см) жилы, сложенные микрозернистыми турмалиновыми метасоматитами с вкраплениями адуляра. Характерные черты этих пород: почти полное отсутствие кварца, ведущая роль турмалина III и лимонитизация. В адуляр-турмалиновой матрице наблюдаются гнезда относительно крупного турмалина II. С жилами ассоциируют адуляр-турмалин-кварцевые метасоматиты. Секущих взаимоотношений адуляр-турмалиновых жил с ранними гидротермалитами не зафиксировано, но турмалин-содержащие метасоматиты замещают альбитизированные граниты и цвиттеры второй стадии.

В соответствии с последовательностью образования, рудоносностью и типом турмалина турмалиновые образования Северного массива разделены на четыре категории: 1) дорудные шилы турмалина I в пегматоидных гнездах, 2) предрудные жилы с турмалином I, 3) раннерудные жилы с турмалином II, 4) рудные жилы с турмалином III.

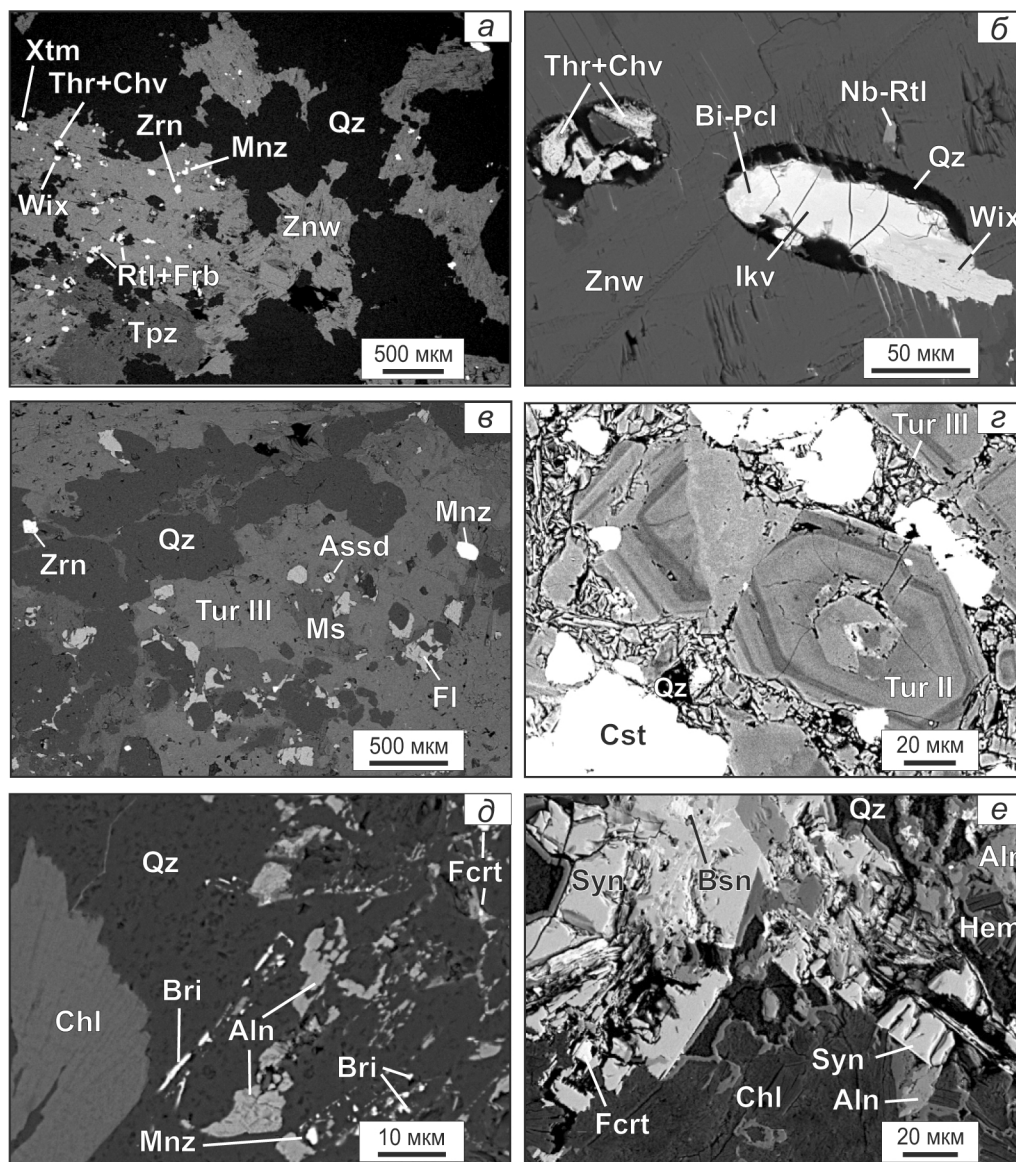


Рис. 3. Оловянно-редкометалльная минерализация метасоматитов Северного массива (изображения в обратно-рассеянных электронах).

a – кварц-топаз-циннвальдитовый цвиттер с Nb-W-Sn-содержащим рутилом, вольфрамоксиолитом, ферберитом, монацитом-(Ce), ксенотимом-(Y), Hf-содержащим цирконом, торитом, черновитом-(Y) (месторождение Кекурное); *b* – включения в циннвальдите цвиттера ишикаваита, висмутопирохлора, вольфрамоксиолита, Nb-содержащего рутила, торита и черновита-(Y) (Глубокоое); *v* – мусковит-кварц-турмалиновый метасоматит с монацитом-(Ce), Hf-содержащим цирконом, иттрофлюоритом и арсениосидеритом (Стремительное); *z* – касситерит в кварц-турмалиновом метасоматите (Стремительное); *d* – кварц-хлоритовый метасоматит с алланитом-(Ce), монацитом-(Ce), бритолином-(Ce), флюоцеритом (Утиное); *e* – гнездо алланита-(Ce) и флюоцерита-(Ce), замещенных синхизитом-(Ce), бастнезитом-(Ce), гематитом в кварц-хлоритовом метасоматите (Утиное). Аббревиатуры минералов по [43].

Дорудные шлиры турмалина I в пегматоидных гнездах размером 1–10 см встречаются в лейкогранитах чаунского комплекса по всей площади массива. Генезис шлиров метасоматический: пегматоиды вокруг шлиров альбитизированы и мусковитизированы, ксеноморфный турмалин размером до нескольких мм образует с кварцем гетеробластовый, реже пойкилобластовый агрегат. Шлиры содержат включения

флюорита, топаза, монацита-(Ce), торита и рутила [1]. Турмалин I в шлифах бледно-бурый с голубыми и синне-зелеными зонами. По химическому составу относится к фтор-шерлу [34, 35]. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ.}$ в турмалине составляет 6.7–9.6 %.

Предрудные жилы с турмалином I – редкие тела мощностью до 0.8 м и протяженностью до 8 м, сложенные разнозернистым (0.1–2 см) кварцевым агре-

гатом с вкрапленностью ксеноморфного турмалина поперечником 0.5–5.0 мм и гнездами шестоватого турмалина длиной до 2–3 см. Турмалин I сложно зональный желто-бурый и светло-голубой, плеохроирующий до бурого и сине-зеленого. Жилы содержат полихромный флюорит, топаз, фенгит, иногда мельчайший темно-бурый касситерит (рис. 2, в). Турмалин I отнесен к фтор-шерлу и шерлу [34, 35]. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ в турмалине 7.8–10.6 %.

Раннерудные жилы с турмалином II мощностью до 0.1 м распространены по всему району и сложены мелко-среднезернистым (0.1–1 мм) кварц-турмалиновым агрегатом с массивной или брекчиевидной текстурой. Обломки турмалина II распространены в рудных жилах с турмалином III (рис. 2, д; 3, в). Кварц ксеноморфный размером 0.1–0.3 мм, в друзовых полостях – игольчатый. Акцессорные минералы жил: иттрофлюорит, топаз, касситерит, монацит-(Ce), Nb-содержащий рутил, алланит-(Ce), алланит-(Y) (рис. 2, д; 3, в). Турмалин II представлен фтор-шерлом, шерлом, окси-шерлом [34, 35]. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ в турмалине 2.5–8.8 %.

Рудные жилы с турмалином III субмеридиональные, крутозалегающие, мощностью до 0.5–1.5 м; образуют жильные системы протяженностью в первые километры (зоны Останцовая, Дайковая, Валунная на месторождении Кекурное) (рис. 1). Форма жил плито- и кулисообразная, встречаются разветвляющиеся и лестничные жилы. Околожильные изменения представлены метасоматитами мусковит-кварц-турмалиновой фации, реже наблюдаются ореолы альбит-турмалин-кварцевой и адуляр-турмалиновой фаций. Жилы сложены микрозернистым кварц-турмалиновым агрегатом с пятнистой или брекчиевидной текстурой. Турмалин III представлен синеваато-зелеными и зелеными игольчатыми кристаллами длиной до 1 мм, шириной от нескольких мкм до 0.1–0.3 мм. По составу турмалин III относится ферро-бозиту, шерлу и окси-шерлу [34, 35]. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ до 13.6 %. Второстепенные и акцессорные минералы жил: флюорит, реликты турмалина II, касситерит, монацит-(Ce) и апатит (рис. 2, г; 3, в, з). Реже встречаются олововольфрам-ниобиевый рутил, халькопирит, пирит, алланит-(Ce), флюоцерит-(Ce), алланит-(Y), тиролит, конихальцит, сакураит. Жилы с турмалином III нередко имеют существенно кварцевый состав, сложены агрегатом кварца с редкими радиально-лучистыми сростками турмалина III. Такие жилы содержат до 5–15 % касситерита.

Хлоритовые метасоматиты (хлорититы) четвертой стадии распространены по всей площади Северного массива и отнесены к двум метасоматиче-

ским фациям: серицит-хлорит-кварцевой и хлорит-нонтронит-кварцевой (табл. 1).

Серицит-хлорит-кварцевая фация включает маломощные (1–10 см) хлорит-кварцевые жилы с ореолами хлоритизации. Хлорититы представляют собой микро-мелкозернистые лепидогранобластовые породы с массивной, пятнистой или брекчиевидной текстурой. Микрогранобластовый кварцевый агрегат включает гнезда хлорита и вкрапления серицита. Количество серицита возрастает к фронтальным частям тел. Встречаются существенно хлоритовые микролепидобластовые, радиально-лучистые агрегаты с псевдоморфозами хлорита по биотиту, гнездами кварца и альбита.

Хлорит-кварцевые жилы имеют друзовидное строение и группируются в серии шириной до нескольких метров. Кварц призматический поперечником 0.5–5 мм, содержание хлорита составляет $n\%$; в призальбандовых частях жил – до 10–15 %. Хлорит образует гнезда, червеобразные и микросферолитовые агрегаты (рис. 2, е; 3, д, е). Хлоритовые породы сменяют во времени образования турмалинитовой стадии: наблюдается замещение турмалина хлоритом и серицитом, брекчирование турмалинитов с цементацией обломков хлорит-кварцевым агрегатом. Хлорититы зоны Валунной на Кекурном месторождении обогащены реликтовым касситеритом, входившим в состав турмалинитов третьей стадии.

Хлорит-нонтронит-кварцевая фация включает метасоматические зоны мощностью $n \cdot 10$ см с нонтронит-кварцевыми прожилками. Нонтронитовые метасоматиты образуются по гидротермалитам более ранних стадий. Наиболее распространенная форма проявления – черные пятна и прожилки с бурым оттенком в турмалинитах. Микролепидобластовый нонтронит замещает турмалин, а полевые шпаты замещаются мусковитом. Полнопроявленные нонтронитовые метасоматиты – темно-серые с бурым или болотно-зеленым оттенком породы с пятнистой, прожилковой, реже брекчиевидной текстурой. Главные минералы – зеленый или желто-бурый микрочешуйчатый (0.01–0.1 мм) нонтронит, хлорит и кварц. К внешней зоне метасоматической колонки приурочен мусковит. Нонтронит и мусковит образуют параллельные сростки с хлоритом.

Нонтронит-кварцевые жилы – относительно редкие образования мощностью 1–20 см с параллельно-шестоватой и коккардовой текстурой. Жилы сложены призматическим кварцем поперечником 1–3 мм с оторочками нонтронита; иногда обогащены фиолетовым флюоритом. Хлорит-кварцевые и нонтронит-кварцевые жилы повсеместно пересекают турмалиновые

жилы и залежи цвиттеров или развиваются в осевых и зальбандовых частях этих тел с образованием телескопированных турмалин-хлоритовых жил.

Аргиллизиты пятой стадии распространены по всей площади Северного массива, интенсивность аргиллизации нарастает к периферии массива. Вкрапленность, гнезда и сферолиты каолинита и гидросерицита развиваются по ортоклазу в гранитах, по турмалину в турмалинитах, по нонтрониту в нонтронит-хлоритовых метасоматитах. Содержание каолинита и гидросерицита составляет не более 1–3 % и увеличивается до 15–20 % возле кварцевых жил. Выделены два типа аргиллизитов: жилы гребенчатого кварца с околожильной аргиллизацией и зоны кремнеподобных аргиллизитов с кварцевыми прожилками и гнездами. Кварцевые жилы мощностью до 10–20 см залегают субвертикально. Кристаллы кварца длиной до 5–8 см образуют параллельно-шестоватые агрегаты. В осевых частях жил наблюдаются друзы расщепленного кварца с флюоритом. Кварцевые жилы рассекают тела турмалинитовой и хлорититовой стадий.

Метасоматические зоны аргиллизитов мощностью 0.5–10 см представляют собой светлые мелкозернистые кварцевые породы с массивной, полосчатой или прожилково-коккардовой текстурой. Кремнеподобный кварцевый агрегат содержит вкрапленность каолинита и гидросерицита.

Минералогические особенности метасоматитов

Эволюция гидротермально-рудной системы Северного массива отчетливо выражена в изменении от стадии к стадии состава акцессорных минеральных комплексов метасоматитов. *Цвиттеры второй стадии* имеют вольфрам-редкометалльную специализацию и содержат: иттрофлюорит, монацит-(Ce), арсенопирит, Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрам-моноксид, W-содержащий ильменит, халькопирит, лёллингит, As-торит, Hf-содержащий циркон, ксенотим-(Y), черновит-(Y), берилл, W-содержащий колумбит-(Mn), ишикаваит, торутит, висмутопироксид, уранополикраз, рузвельтит, висмутин, самородный висмут, молибденит, галенит, пирротин, цейнерит (рис. 2, а, б; 3, а, б). В цвиттерах встречается касситерит в сростках с Sn-Nb-содержащим рутилом.

Турмалиниты третьей стадии характеризуются редкоземельно-оловянной специализацией. В состав метасоматитов входят: монацит-(Ce), висмутопироксид, пироксид, ксенотим-(Y), апатит-(CaF), флюоцерит-(Ce), иттрофлюорит, ишикаваит, поликраз, уранополикраз, As-торит и ряд арсенатов Y, Cu, Fe: черновит-(Y), агардит-(Y), цейнерит, тиролит, конихальцит, арсениосидерит, скородит, сармиентит и др. В жилах с турмалином I наблюдаются монацит-(Ce), торит,

рутил и касситерит. Акцессорные минералы жил с турмалином II и III: касситерит, монацит-(Ce), апатит-(CaF), Sn-W-Nb-содержащий рутил, флюоцерит-(Ce), алланит-(Ce), алланит-(Y), халькопирит, пирит, тиролит, конихальцит, сакураит (рис. 2, в, г; 3, в, д).

Касситерит образует промышленные концентрации в ассоциации с турмалином III (рис. 2, г; 3, г). Характерные примеси в касситерите турмалиновых жил (средний состав на месторождении Кекурное, участок Валунный): FeO 0.97; WO₃ 0.12; TiO₂ 0.06; Nb 0.05; In 0.02; Ce 0.02; Sc 0.01 %. Содержание Fe в касситерите составляет 0.02–0.06 а.ф. В оловоносных жилах содержание касситерита достигает 5–15 % (рис. 2, г). Касситерит представлен двумя формами: мелкозернистый бурый касситерит I и микрозернистый ($n \cdot 0.001$ мм) желтый касситерит II. Для касситерита II характерны парагенезис с монацитом-(Ce) и наиболее высокие концентрации Nb, Sc, Ce.

В касситерите турмалинитовой стадии отмечается высокое содержание In 0.002–0.017 %; отношение Nb/In составляет 1.2–27.5. На дискриминационной диаграмме Н.Н. Никулина [17] касситерит Северного массива близок к касситериту грейзеновых месторождений, связанных с ЛФГ: Альтенберг, Эренфридерсдорф, Гейер (Германия); Шерловая Гора, Орловское (Забайкалье); Кестер (Якутия). Наблюдается также сходство с касситеритом вулканогенных грейзеновых месторождений Дальнего Востока: Карадуб (Приамурье), Мопан (Приамурье) (рис. 4).

На Кекурном месторождении (участок Нижний) встречены турмалиновые жилы, насыщенные редкоземельными минералами: алланитом-(Ce) и флюоцеритом-(Ce). Алланит-(Ce) образует сростки с алланитом-(Y), обогащенным неодимом (рис. 2, д) [2]. Типоморфной особенностью турмалина различных типов является высокая концентрация лития. В турмалине I из дорудных шпиров содержание Li 42–109 г/т, в турмалине I из прорудных жил Li 110–161 г/т, в турмалине II из раннерудных жил Li 130–710 г/т, в турмалине III рудных жил Li до 573 г/т.

Хлорититы четвертой стадии сложены хлоритом, диагностированным как высокожелезистый тюрингит ($Fe_{\text{общ}}/(Fe_{\text{общ}} + Mg) = 88.81–92.46$) с высоким содержанием Na, Ca и K: соответственно, до 0.26, 0.09 и 0.06 а.ф. В шлифах хлорит травяно-зеленый, высокопреломляющий, с незначительной дисперсией, $(Ng-Np) = 0.015–0.017$. Хлоритовые метасоматиты характеризуются редкоземельной специализацией: в их состав входит алланит-(Ce). На рудопоявлении Утиное содержание алланита в хлорититах достигает первых процентов. В ассоциации с алланитом встречаются флюоцерит-(Ce), монацит-(Ce). По алланиту

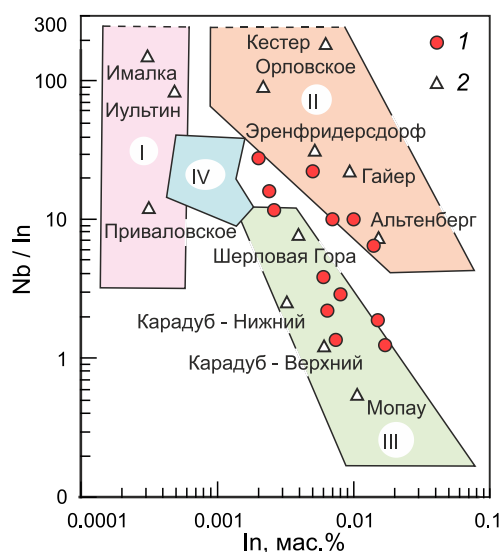


Рис. 4. Касситерит метасоматитов Северного массива на бинарной диаграмме Nb/In–In для оловорудных месторождений различных формаций, по [17].

I – касситерит Северного массива, 2 – касситерит оловорудных месторождений других регионов. Поля фигуративных точек месторождений: I – кварцевый тип касситерит-кварцевой формации, ассоциирующий с глубинными (2–4 км) гранитными интрузиями; II – оловоносные Li-F граниты и грейзеновый, кварцевый и кварц-топазовый типы касситерит-кварцевой формации, ассоциирующие с гиабиссальными (1–1.5 км) гранитными интрузиями; III – грейзеновый, кварцевый и кварц-топазовый типы касситерит-кварцевой формации, ассоциирующие с вулканоплутоническими образованиями; IV – турмалиновый тип касситерит-силикатной формации.

и флюоцериту развиваются бастнезит-(Ce), паризит-(Ce), синхизит-(Ce), бритоцит-(Ce) (рис. 2, e; 3, d, e). В хлоритовых гнездах наблюдается мелкозернистый призматический или игольчатый касситерит с поперечником 0.005–0.3 мм, который ассоциирует с сульфидными – сфалеритом, пиритом, галенитом, халькозином. Встречаются микрогнезда анатаза с рутилом, алланитом-(Ce), монацитом-(Ce). Иногда хлорититы содержат пренит или флюорит. В нонтронитовых метасоматитах встречаются анатаз, пренит и гематит. В хлорит-кварцевых жилах отмечены флюорит и пирит. На рудопроявлении Утиное эти жилы содержат галенит, сфалерит, адуляр.

Аргиллизиты четвертой стадии имеют минеральный состав, отражающий низкотемпературные условия образования и урановую специализацию. В агрегатах кварца наблюдаются прожилки цеолитов, халцедона и карбонатов мощностью $n \cdot 0.01$ –1.0 мм, гнезда каолинита, монтмориллонита и гидросерпидита (иллита), рассеянная вкрапленность цеолитов, кальцита, шамозита, гидрослюда. Цеолиты представлены стильбитом, а также ломонитом, стеллеритом, на-

тролитом, сколецитом и др. Промышленное значение имеют уранофан, уранофан-бета, казолит, торбернит, цейнерит, отенит, ураноспинит и др. [12].

Геохимические особенности метасоматитов

Геохимический анализ распределения редких элементов в гранитах Северного массива показывает, что они специализированы на три элемента – Li, F и Sn (кларки концентрации более 5.0). Характерны повышенные концентрации Mo, Pb, Sc, Yb, Y, B (2.0–5.0). Большинство элементов имеют близкларковые содержания. Наименьшими концентрациями (< 0.5) отличаются Ti, Mn, Ba, P (табл. 2).

Сравнение кларков концентраций метасоматитов и вмещающих гранитов показало обособление четырех групп редких элементов: 1) выносятся из гранитов при грейзенизации и концентрируются в альбититах и цвиттерах – F, Li, Be, P, Y, Ti, Zr, Pb, Tl (коэффициент концентрации $K_p < 0.70$); 2) максимально концентрируются в оловорудных турмалинитах – Sn, B ($K_p = 242$ и 27, соответственно); 3) соконцентрируются в оловорудных турмалинитах и хлорититах – Ag, Zn, Ge, Cu, As, W, In ($K_p = 4.0$ –1.5); 4) индифферентные элементы, проявляющие неотчетливые тенденции к концентрации – Bi, Sb, Ce, Sc, Cr, Mn ($K_p = 1.0$ –1.41) или деконцентрации – Ga, La, Yb ($K_p = 0.76$ –1.0).

Типоморфные редкие элементы цвиттеров и турмалинитов – соответственно, фтор и олово. Анализ парных коэффициентов корреляции фтора и олова с другими элементами показывает, что для фтора и олова есть устойчивые элементы-коррелянты (+) и элементы-антагонисты (–). Формулы концентрации редких элементов (1), (2)

$$+Mo, W, Cu, Zn, Ag, Sb, Ge, Ga, In, Nb, Sc, Yb, Y, La, Ce, B \quad (1)$$

$$-Cr, Tl, P$$

$$+W, Bi, As, Nb, Yb, Y, La, Li \quad (2)$$

$$-Ni, P$$

позволяют сделать выводы о геохимической специфике метасоматитов. Уточнение геохимических ассоциаций элементов проведено с помощью сравнительного анализа корреляционных матриц рудоносных и нерудоносных пород по методу ветвящихся связей. Установлено, что для нерудоносных пород, представленных гранитами, альбитизированными, грейзенизированными и хлоритизированными гранитами, характерна изотропная структура геохимических связей, в которой намечаются кластеры с повышенной корреляцией. Выделяются группы литофильных элементов гранитов, грейзенизированных гранитов и цвиттеров (Li, Ga, Nb, Ta, Be, Yb, Y, La, Ce, Zr, Sc, Ti) и халькофильных элементов хлоритизированных гранитов (Zn, Cu, Ag, Pb, Mn, Co). Особняком располагаются P, W, Sb, As, Bi, In, Mo, Cr, Ni, V. Отметим, что в неоло-

Таблица 2. Редкоземельный состав метасоматитов цвиттер-турмалинитового комплекса и вмещающих гранитов Северного плутона.

Химический элемент	Содержание, г/т			Кларк концентрации			Кр
	1	2	3	1	2	3	
Ti	426	816	390	0.18	0.35	0.17	0.48
Mn	219	247	302	0.36	0.41	0.50	1.22
Cr	59	25	32	2.36	1.00	1.28	1.28
Ni	9.4	9.2	9.8	1.17	1.15	1.22	1.06
Mo	2.8	3.1	2.9	2.80	3.10	2.90	0.94
W	16	19	30	-	-	-	1.58
Cu	18	15	32	0.90	0.75	1.60	2.13
Pb	29	61	36	1.45	3.05	1.80	0.59
Zn	65	31	105	1.08	0.52	1.75	3.39
Ag	0.11	0.05	0.20	-	-	-	4.00
Sb	43	40	54	-	-	-	1.35
Bi	3.5	2.7	3.8	-	-	-	1.41
As	68	50	85	-	-	-	1.70
Sn	104	18	4360	34.70	6.00	1453	242.2
Ge	3.0	1.9	4.3	2.14	1.36	3.07	2.26
Ga	21	27	22	1.05	1.35	1.10	0.81
In	5.7	5.0	7.8	-	-	-	1.56
Tl	6.0	8.4	5.5	-	-	-	0.65
Zr	68	117	54	0.34	0.59	0.27	0.46
Nb	30	38	37	1.50	1.90	1.85	0.97
Be	11	19	13	2.00	3.45	2.36	0.68
Sc	7.8	7.6	9.8	2.60	2.53	3.27	1.29
Yb	7.9	11.7	8.9	1.97	2.92	2.22	0.76
Y	62	106	68	1.82	3.11	2.00	0.64
La	45	83	64	0.75	1.38	1.07	0.77
Ce	173	162	214	-	-	-	1.32
Ba	83	91	83	0.10	0.11	0.10	0.91
P	223	302	204	0.46	0.43	0.29	0.67
Li	218	501	170	5.45	12.52	4.25	0.34
F	1700	4170	2460	2.12	5.21	3.07	0.59
B	650	44	1170	43.3	2.93	78.0	26.7

Примечание. Приведены параметры геохимических выборок (методы АЭКСА, пламенной фотометрии, Институт Карпинского, аналитики И.Ю. Бунакова, А.И. Мальцев): 1 – генеральная совокупность, 3255 проб; 2 – вмещающие граниты; 3 – метасоматиты. Кларки концентрации – отношение содержания элемента к кларку гранита, по [4]. Пробел – элементы, для которых более 50 % проб имеют содержания ниже порога чувствительности. Кр – коэффициент метасоматической концентрации – отношение кларка концентрации метасоматитов к кларку концентрации гранитов.

воносных породах отсутствуют сильные связи олова с другими элементами (рис. 5, а).

Совершенно иная кластерная структура геохимических связей наблюдается в рудоносных метасоматитах. Выделяются следующие геохимические ассоциации: 1) редкометалльно-редкоземельная (F, Be, Y, REE, P) и редкометалльно-литиевая (Li, Zr, Ga) ассоциации цвиттеров, содержащих циннвальдит, иттрофлюорит, берилл, ишикаваит, флюоцерит-(Ce), монацит-(Ce), ксенотим-(Y), Hf-содержащий циркон, торутит и другие редкометалльные минералы; 2) оловорудная (Sn, W, Sb, Nb, In, Sc, Ge) и редкозе-

мельная (REE, Y) ассоциации турмалинитов, содержащих касситерит, Nb-W-Sn-рутил, монацит-(Ce), иттрофлюорит, флюоцерит-(Ce), алланит-(Ce), алланит-(Y), висмутопироксид, пироксид, ксенотим-(Y), ишикаваит, поликраз, самарскит-(Y), тунгстит, пирит и др.; 3) медно-полиметаллическая (Cu, Ag, Pb, Zn, Bi, As, Mn) и редкоземельная (REE, Y) ассоциации хлоритовых метасоматитов, содержащих халькозин, сфалерит, арсенопирит, самородный висмут, галенит, халькопирит, алланит-(Ce), флюоцерит-(Ce), монацит-(Ce), бастнезит-(Ce), паризит-(Ce), синхизит-(Ce), бритоцит-(Ce) и др. (рис. 5, б). Установленные

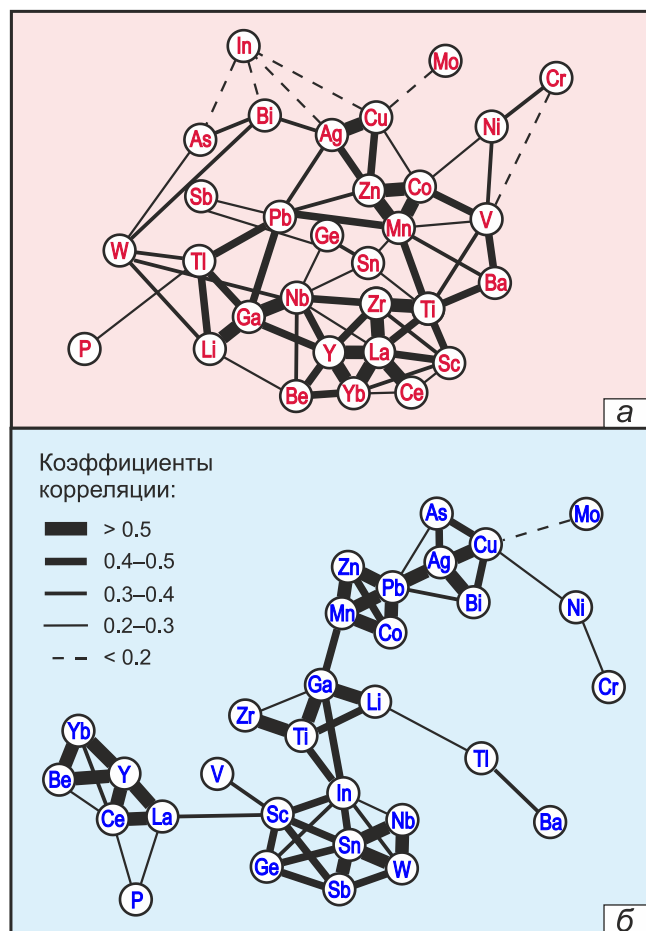


Рис. 5. Корреляционные связи редких элементов вмещающих пород (а) и рудоносных метасоматитов (б) Северного массива.

а – выборка гранитов, альбитизированных, грейзенизированных и хлоритизированных гранитов, 1655 проб; б – выборка цинкитов, турмалинитов и хлорититов, 399 проб.

геохимические закономерности соответствуют приведенным выше минералого-петрографическим данным, подтверждают и предложенную схему расчленения рудоносных метасоматитов Северного массива, и их принадлежность к единому метасоматическому процессу (табл. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Последовательность образования метасоматитов Северного массива

Одна из характерных особенностей гидротермальных пород – образование многостадийных комплексов [18]. Проблема стадийности гидротермальных месторождений дискутируется более ста лет [10]. В основу исследования метасоматитов Северного массива положены представления академика С.С. Смирнова о пульсационном характере гидро-

термального процесса. Выделенные метасоматиты пяти типов (табл. 1) представляют собой продукты последовательных стадий гидротермального процесса. На это указывают следующие геологические факты. Изученные гидротермально-метасоматические образования приурочены к экзоконтактовым зонам интрузий ЛФГ пыркайского комплекса (рис. 1). Метасоматиты последовательных стадий сменяют друг друга, занимая все более широкие по площади ареалы и формируя центробежную многостадийную зональность. Многократно зафиксировано пересечение метасоматических тел каждой из пяти групп жилами и прожилками последующей стадии минерализации, брекчирование метасоматитов с цементацией обломков минеральными агрегатами более поздних стадий. Наблюдается закономерная эволюция состава акцессорных комплексов и рудного профиля разностадийных метасоматитов: редкометалльные цвиттеры (Nb, W, Y, REE, Li, Th, As) → оловорудно-редкоземельные турмалиниты (Sn, REE, Y, W) → редкоземельно-полиметаллические хлорититы (Cu, Pb, Zn, Bi, LREE) → ураноносные аргиллизиты (U, As).

Установленная последовательность образования метасоматитов (табл. 1) соответствует кислотно-основной эволюции минералообразующих флюидов. Флюиды, порожденные рудоносными гранитами, вызывают на пике волны кислотных компонентов цвиттеризацию материнских и вмещающих пород. Нарастание pH и смена режима летучих компонентов сопровождаются турмалинизацией, а позднее – хлоритизацией. Продукты нескольких стадий образуют метасоматический комплекс, который «состоит из закономерной зональной композиции щелочных, кислотных и основных пород разных семейств одного цикла развития метасоматической системы» [18, с. 72].

В конце XX века в практике геолого-разведочных работ накопилась обширная информация о цвиттер-турмалинитовых комплексах крупных редкометалльно-оловорудных месторождений: Кугарок и Лост-Ривер (Аляска) [31, 41], Бовуар и Пюи-Ле-Винь (Франция) [29, 33], Сент-Остелл и Трегоннинг-Годольфин (Англия) [30, 32], Айбеншток и Эренфриденсдорф (Германия) [28, 40], Викманов (Чехия) [42], Панаскейра (Португалия) [37] и др. На Дальнем Востоке цвиттер-турмалинитовые комплексы установлены на оловорудных месторождениях: Правоурмийское (Приамурье) [1, 4, 6], Ярославское (Приморье) [6], Депутатское, Полярное (Якутия) [1, 3, 5]. Развивается концепция «базовой формации оловорудных цвиттеров» в эндоконтакте гранитов, которые сменяются на верхних ярусах кварц-турма-

лин-касситеритовыми и хлорит-касситерит-сульфидными жилами [23].

Приведенные в статье данные показывают наличие в Северном гранитном массиве на Чаун-Чукотке цвиттер-турмалинитового комплекса, который характеризуется закономерной последовательностью образования и геохимической эволюцией цвиттеров, турмалинитов и хлорититов, общностью их акцессорной и рудной минерализации [1, 24, 29].

Связь метасоматитов Северного массива с Li-F гранитами

Наблюдается пространственное совмещение цвиттеров, турмалинитов и хлорититов с интрузиями ЛФГ и их контроль структурами растяжения, оперяющими правосторонние сдвиги северо-западного простирания. Такая структурная позиция может быть связана с совмещением изученных метасоматитов и ЛФГ в структурах глубокого заложения. Пространственная связь рудоносных цвиттеров с ЛФГ доказана во многих редкометалльных провинциях России (Забайкалье, Дальний Восток, Якутия, Чукотка), Европы (Рудные Горы, Центральный Французский массив и Центрально-Иберийская зона), Северной Америки (Аляска), Африки (Восточный Египет, Магрибский пояс), Китая (Наньлинский и Приморский пояса) [1,11]. Примерами крупных месторождений вольфрам-оловорудных и редкометалльных цвиттеров служат Абу Даббаб и Нувейби (Египет) [38]; Ичунь и Суншуган (Китай) [36, 44]; Панаскейра (Португалия) [37] и др. На Востоке России к таким месторождениям относятся: Одинокое, Депутатское, Полярное, Экуг, Кестер, Правоярмийское, Тигриное, Вознесенское и др. [1, 3, 4, 21].

Часть гидротермальных систем с цвиттерами включает жильно-метасоматические турмалиниты. Цвиттеры развиваются по микроклинитам, альбитам и слагают оловянно-редкометалльные рудные залежи и жильные зоны в приконтактных частях интрузий ЛФГ. Вслед за цвиттерами формируются тела турмалиновых, хлоритовых, кварцевых, флюоритовых и иных олово-полиметаллических гидротермалитов [1, 11].

В Северном массиве цвиттеры развиваются по альбититам и гранитоидам всех плутонических комплексов, включая ЛФГ пыркайского комплекса. Признаком парагенетической связи изученного метасоматического комплекса и ЛФГ служит их пространственное сонахождение, наследование всеми метасоматитами оловянно-вольфрамово-редкометалльной акцессорной минерализации Li-F гранитов. На связь турмалинитов с ЛФГ и цвиттерами указывают высокие содержания фтора и лития в турмалине.

Рудоносность метасоматитов Северного массива

Основные перспективы рудоносности Северного массива связаны с турмалинитами, аргиллизитами и цвиттерами. Турмалиниты сопровождаются оловянной (касситерит, олово-вольфрам-ниобиевый рутил) и иттрий-редкоземельной (монацит-(Ce), алланит-(Ce), иттрофлюорит, флюоцерит-(Ce), уранополикраз, висмутопирохлор, черновит-(Y), алланит-(Y)) минерализацией. В районе выделены малые и средние месторождения олова Ергувеем, Кекурное, Глубокое, Стремительное, Террасовое, Утиное, десятки коренных и россыпных проявлений олова. В южном экзоконтакте массива расположены крупные месторождения олова – Пыркакайские штокверки [7].

Наиболее богаты касситеритом брекчиевидные жилы мусковит-кварц-турмалиновой фации (Кекурное). Массивные турмалиновые жилы с околожильной мусковитизацией также рудоносны, но в них проявлена тенденция к бонанцевому распределению рудной минерализации (Стремительное, Террасовое). Промышленные концентрации олова связаны с кварцевыми жилами альбит-турмалин-кварцевой фации (Кекурное, Утиное, Глубокое). Перспективы иттрий-редкоземельной минерализации турмалиновых метасоматитов не изучены и требуют проведения дополнительных геолого-разведочных работ.

Урановая специализация аргиллизитов выражена во вторичной U^{6+} -минерализации: уранофан, уранофан-бета, казолит, торбернит, цейнерит, отенит, ураноспинит. Ураноносность аргиллизитов определена разведкой Северного месторождения [12].

Цвиттеры Северного массива геохимически специализированы на редкие металлы (Nb, REE, Y, Li, Bi), W и Sn. W, Nb входят в состав Nb-содержащего рутила, вольфрамооксиолита, самарскита. Bi, Y, REE установлены в составе иттрофлюорита, висмутопирохлора, самарскита, ксенотима-(Y), черновита-(Y), висмутина и др. На дневной поверхности рудоносные цвиттеры не установлены. В связи со слабой эродированностью Северного массива возможно обнаружение залежей редкометалльных и вольфрамоносных цвиттеров на глубине. Приведенные в статье данные о минеральном и химическом составе рудоносных метасоматитов могут быть использованы при поисках оловянного и редкометалльного оруденения Северного массива.

ВЫВОДЫ

Выделены цвиттеры Северного массива – кварц-топаз-циннвальдитовые грейзены, сопровождающие Li-F граниты и несущие редкометалльную (Nb, REE, Y, Li, Bi, Sn, W) минерализацию.

Установлено фациальное разнообразие турмалиновых метасоматитов Северного массива и три типа слагающего их турмалина.

Разработаны схема фациального расчленения рудоносных метасоматитов и последовательность стадий их образования: 1) альбититы, 2) цвиттеры, 3) турмалиниты, 4) хлорититы, 5) аргиллизиты.

Цвиттер-турмалиновый метасоматический комплекс массива характеризуется пространственной сопряженностью с интрузиями Li-F гранитов и контролируется структурами растяжения, оперяющими правосторонние сдвиги первого порядка. Установлены закономерная эволюция состава и единство акцессорной и рудной минерализации метасоматитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Чаунского горно-геологического предприятия (хоз. договор 1990–1991 гг.), РФФИ (проекты 11-05-00868-а, 14-05-00364, 20-15-50064), Минобрнауки (гос. контракт № 14.740.11.0192, гос. задание № 5.2115.2014/К; гос. задание FSRW-2023-0002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.И. Литий-фтористые граниты Дальнего Востока // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб., 2014. 244 с.
- Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Уникальный парагенезис цериового и иттриевого алланита в турмалините из Северного массива (Чукотка) // Докл. АН. 2016. Т. 469, № 3. С. 333–335.
- Бородкин Н.А., Приставко В.А. Выделение цвиттеров по петрохимическим и геохимическим критериям // Отеч. геология. 2012. № 4. С. 49–56.
- Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- Геология оловорудных месторождений СССР / Гл.ред. С.Ф. Лугов. Т. 2. Оловорудные месторождения СССР. Кн. 1. М.: Недра, 1986. 429 с.
- Гоневчук В.Г. Оловоносные магматические системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-58-(60) – Билибино: Объясн. зап. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 146 с.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. М.: Роснедра, 2021. 572 с.
- Дудкин Д.В., Ефремов С.В., Козлов В.Д. Литий-фтористые граниты Чукотки и их геохимические особенности // Геохимия. 1994. № 3. С. 393–402.
- Кигаи И.Н. Проблемы гидротермального рудообразования. М.: МАКС Пресс, 2020. 288 с.
- Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Козлов В.Д. Метасоматические цвиттеры и связанное с ними редкометалльное оруденение (на примере месторождений Монголии и Чехословакии) // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука, 1974. С. 42–53.
- Константинов А.К. Урановый потенциал Чукотки // Минеральное сырье. № 16. М.: ВИМС, 2005. 123 с.
- Летувнинкас А.И. Стадийность гидротермального минералообразования. Томск: ТГУ, 1991. 216 с.
- Марин Ю.Б. О минералогических исследованиях и использовании минералогической информации при решении проблем петро- и рудогенеза // Зап. Российского минералогического общ-ва. 2020. Т. 149, № 4. С. 1–15. DOI: 10.31857/S0869605520040048
- Методические рекомендации по геолого-геохимическому изучению гидротермально метасоматических образований при ГСР-50 с общими поисками. СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. 64 с.
- Методические рекомендации к содержанию и оформлению серийных легенд к цифровым геологическим картам комплексов ГК-200/2 и ГК-1000/3. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 70 с.
- Никулин Н.Н. Некоторые особенности химического типоморфизма касситерита и использование их в прикладном аспекте // Минералогия метаморфических и рудных образований Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 109–118.
- Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Изд-е третье, испр. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 199 с.
- Практическое пособие по прогнозу оруденения на основе картирования гидротермально измененных пород при производстве ГСР-200 (ГСР-50) / В.В. Шатов, О.В. Петров, С.В. Кашин и др. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2023. 104 с.
- Прилуков А.Н. Производство минерального сырья на российском Дальнем Востоке и предложения по совершенствованию его организационной структуры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № ОВ 12. С. 213–221.
- Руб А.К., Руб М.Г. Редкометалльные граниты Приморья. М.: ВИМС, 2006. 86 с.
- Тибилев И.В. Особенности геологического развития севера Чукотки с позиций термодинамической парадигмы эндогенных процессов. Магадан: СВНЦ; СВКНИИДВО РАН, 2005. 304 с.
- Томсон И.Н., Тананаева Г.А. Базовая формация оловорудных цвиттеров и их соотношение с сопутствующими жильными месторождениями // Этапы образования рудных формаций. М.: Наука, 1989.
- Флёров Б.Л. Оловорудные месторождения Яно-Колымской складчатой области. Новосибирск: Наука, 1976. 287 с.
- Ханчук А.И., Иванов В.В. Геодинамика Востока России в мезо-кайнозойе и золотое оруденение // Геодинамика и металлогения. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 7–30.
- Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманский окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 3. С. 4–37. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-38-3-4-37.
- Электронный справочник-определитель околорудных метасоматитов (рудоносных гидротермально-метасоматических образований). URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=142ac22b15744fea85dd656b04d7f323#68605cb568dee8013> (дата обращения: 31.12.2023).
- Breiter K., Skoda R., Uher P. Nb-Ta-Ti-W-Sn-oxide minerals as indicators of a peraluminous P- and F- rich granitic system evolution: Podlesi. Czech Republic // Mineralogy and Petrology. 2007. V. 91. P. 225–248.

29. Cuney M., Marignac C., Weisbrod A. The Beauvoir topaz-lepidolite albite granite (Massif Central, France): the disseminated magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be mineralization // *Economic Geology* 1992. V. 87. P. 1766–1794.
30. Dehaine Q., Filippov L.O., Glass H.J., Rollinson G. Rare-metal granites as a potential source of critical metals: A geometallurgical case study // *Ore geology reviews*. 2019. V. 104. P. 384–402.
31. Dobson D.C. Geology and alteration of the Lost River tin-tungsten-fluorine deposit, Alaska // *Economic Geology*. 1982. V. 77, N 4. P. 1033–1052.
32. Duchoslav M., Marks M.A.W., Drost K., McCammon C., Marschall H.R., Wenzel T., Markl G. Changes in tourmaline composition during magmatic and hydrothermal processes leading to tin-ore deposition: The Cornubian Batholith, SW England // *Ore geology reviews*. 2017. V. 83. P. 215–234.
33. Harlaux M., Marignac Ch., Mercadier J., Poujol M., Boiron M.-Ch., Kouzmanov K., Camacho A., Alikouss S., Roméo B., Mouthier B., Cuney M. Multistage development of a hydrothermal W deposit during the Variscan late-orogenic evolution: the Puy-les-Vignes breccia pipe (Massif Central, France) // *BSGF - Earth Sciences Bulletin*. 2021. V. 192, N 33.
34. Hawthorne F.C., Henry D.J. Classification of the minerals of the tourmaline group // *European J. Mineralogy*. 1999. V. 11. P. 201–215.
35. Henry D.J., Novak M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-super group minerals // *American Mineralogist*. 2011. V. 96. P. 895–913. DOI: 10.2138/am.2011.3636
36. Huang Xiao Long, Wang Ru Cheng, Chen Xiao Ming, Hu Huan, Liu Chang Shi Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China // *Canadian mineralogist*. 2002. V. 40, N 4. P. 1047–1068.
37. Marignac Ch., Cuney M., Cathelineau M., Lecomte A., Carocci E., Pinto F. The Panasqueira Rare Metal Granite Suites and Their Involvement in the Genesis of the World-Class Panasqueira W-Sn-Cu Vein Deposit: A Petrographic, Mineralogical, and Geochemical Study // *Minerals*. 2020. V. 10, N 6. 562. DOI: 10.3390/min10060562
38. Melcher F., Graupner T., Oberthür T., Schütte P. Tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and rare-metal granites of Africa // *South African J. Geol.* 2017. V. 120, Iss. 1. P. 77–100. DOI: 10.25131/gssajg.120.1.77
39. Rieder M., Gavazzini G., D'yakonov Y.S., Frank-Kamenetski V.A., Frank-Kamenetskij V.A., Gottardi G., Guggenheim S., Koval P.V., Müller G., Neiva A.M.R., Radoslovich E.W., Robert J.-L., Sassi F.P., Takeda H., Weiss Z., Wones D.R. Nomenclature of the mica // *Clays and clay minerals*. 1998. V. 46, N 5. P. 586–595.
40. Seifert Th., Kempe U. Sn-W-Lagerstätten und spätvariszische Magmatite des Erzgebirges // *Beih. z. Eur. J. Mineral.* 1994. V. 6, N 2. P. 125–172.
41. Soloviev S.G., Kryazhev S., Dvurechenskaya S. Geology, igneous geochemistry, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kougarok tin-tantalum-lithium prospect, Seward Peninsula, Alaska, USA // *Mineralium Deposita*. 2020. V. 55. P. 79–106. DOI: 10.1007/s00126-019-00883-7
42. Štemprok V., Pivec E., Langrova A. The petrogenesis of a wolframite-bearing greisen in the Vykmánov granite stock, Western Krušné hory pluton (Czech Republic) // *Bulletin of Geosciences*. 2005. V. 80, N. 3. P. 163–184.
43. Warr L.N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85. P. 291–320.
44. Wu Mingqian, Samson Iain M., Zhang Dehui Textural and Chemical Constraints on the Formation of Disseminated Granite-hosted W-Ta-Nb Mineralization at the Dajishan Deposit, Nanling Range, Southeastern China // *Economic geology*. 2017. V. 112, N. 4. P. 855–887.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

после доработки 26.12.2024 г.

принята к печати 29.12.2024 г.

ORE-BEARING METASOMATITES ASSOCIATED WITH LITHIUM-FLUORIC GRANITES OF THE SEVERNY MASSIF (CHAUN-CHUKOTKA)

V.I. Alekseev

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia; e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru

The facies composition and stages of formation of hydrothermal-metasomatic units spatially associated with lithium-fluoric granites of the Severny massif in Chaun-Chukotka were studied based on large-scale geological mapping, as well as petrographic, mineralogical and geochemical data. The identification of zwitter types of the Severny massif - quartz-topaz-zinnwaldite greisens accompanying Li-F granites and bearing rare-metal (Nb, REE, Y, Li, Bi, Sn, W) mineralization is justified. The bulk of zwitter mineralization is distributed within the massif in the form of moderate alterations in biotite leucogranites. Facies diversity of tourmalinite metasomatites was established. Muscovite-quartz-tourmaline, albite-tourmaline-quartz, chlorite-muscovite-tourmaline, and adularia-tourmaline metasomatic facies with tourmaline of three types were identified. A scheme of facies division of ore-bearing metasomatites was developed and a sequence of stages of their formation was proposed: 1) albitites, 2) zwitter types, 3) tourmalinites, 4) chloritites, and 5) argillizites. The zwitter-tourmalinite metasomatic complex of the massif is characterized by spatial conjugation with and zonal arrangement relative to intrusions of Li-F granites, orderly nature of formation and geochemical evolution, common accessory and ore mineralization of metasomatites and veins. Ore mineralization potential of the Severny massif is associated with tourmalinite, argillizites, and zwitter types. Tourmalinite make up tin deposits. Industrial uranium mineralization is associated with argillizites. A predictive assessment of bodies of zwitter types, tourmalinite, and chloritites for yttrium-rare-earth and complex rare-metal mineralization is required.

Key words: zwitter, tourmalinite, chloritite, lithium-fluoric granite, metasomatic complex, tin, rare metals, Chaun-Chukotka.