

**18 ТИХООКЕАНСКАЯ ГЕОЛОГИЯ, 2025, том 44, № 3, с. 18–32 DOI:
10.30911/0207-4028-2025-44-3-18-32 УДК 553.24:(553.451+553.493)(571.651)**

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

Поступила в редакцию 25 июня 2024 г.

ВВЕДЕНИЕ

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

Цель статьи – представить результаты исследования состава и последовательности формирования **РУДОНОСНЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ, СОПРЯЖЕННЫЕ С ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫМИ ГРАНИТАМИ СЕВЕРНОГО МАССИВА (ЧАУН-ЧУКОТКА)** В.И. Алексеев комплекса рудоносных метасоматитов в ассоциации с Li F гранитами (ЛФГ), которые могут быть использованы при поисках оловянного и редкометалльного оруденения Куйвиеем-Пырकाайского рудного района. Результаты работы могут быть использованы при актуализации Чукотской серийной легенды Госгеол карты-1000/3.

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. На поисковых участках Левый Ергувеем, Кекурный, Нижний, Валунный, Стремительный, Восточный, Утиный и Глубокий проведены минералого-пе.

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.

19 RUDONOSNYE METASOMATITES, ASSOCIATED WITH LITHIUM-FLUORIDE GRANITES

Tectonic and geochemical studies of ore-bearing metasomatites. The methodological basis of the research was the pulsation concept of the formation of hydrothermal rocks, developed by Academician S.S. Smirnov (1937) and outlined in work . Great attention was paid to the composition, anatomy, and interrelationship of minerals (tourmaline, micas, topaz, cassiterite, wolframite, allanite) – indicators of the conditions of metasomatite formation . The principles of ontogenetic analysis of mineral individuals and aggregates were used.

The study of metasomatites was conducted with the help of Polam R211, Polam R312, Leica DM 2500 M, Olympus BX 51 microscopes. When studying minerals, electronic microscopes JEOL JSM-6460 LV, JSM-7001 F, JIB-4500, Cameca MS-46 (Mining University of Empress Catherine II and Karpinsky Institute, St. Petersburg) were used. The chemical composition of rocks and minerals was determined by methods of wet chemistry, emission spectral and X-ray spectral fluorescent analysis (ED 2000, XRF-1800), mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICPE-9000), and atomic absorption spectrometry (AA6300, AA35EA) in the Central Laboratories of PGO "Buryatgeologia", Karpinsky Institute, and the Central Laboratory of St. Petersburg Mining University. The composition of tourmaline was determined by microprobe analysis (Jeol JSM IT 500, M.V. Lomonosov Moscow State University). The diagnostics of micas and tourmaline were performed taking into account classifications . A database of geochemical data (3255 samples) was organized, including information on types, facies varieties, and chemical composition of metasomatites and host rocks of the

Northern Massif, as well as the intensity of hydrothermal changes. Statistical parameters of the distribution of chemical element contents in samples of host granites and ore-bearing metasomatites were established. Geochemical associations of rare elements in metasomatites and host rocks were identified.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE RESEARCH AREA

The Northern Massif is located on the coast of the East Siberian Sea, east of the Chaun Bay (Fig. 1, a). In 1937, the second Chaun expedition of the Arctic Institute of Glavsevmorput discovered lead ore manifestations in the western contact of the massif. Since the establishment of the Chaun-Chukotka Geological Exploration Administration in 1939, state geological surveys have been conducted at a scale of 1:1,000,000 (sheet R-59, new series), a scale of 1:200,000 (sheets R-59XXII, XXIII, first generation), and large-scale geological surveys with general searches. The granitoids of the Northern Massif intrude into the Upper Triassic aleurolitic and Upper Jurassic tuffaceous sandy layers of the Palyavaam synclinorium of the Chukotka fold system, and the massif itself is part of the eponymous batholithic belt. The research area is located on the northern continuation of the Albian-Cenomanian marginal-continental magmatic province of the Pacific Asia.

The Northern Massif represents a weakly eroded batholith with a gently domed roof, composed mainly of leucogranites. Four plutonic complexes are distinguished in the area: 1) domes of biotite-hornblende granites of the Purgin complex; 2) dikes of porphyritic monzogranites, granodiorites of the Chuveem complex; 3) the main phase of coarse-grained leucogranites and an additional phase of porphyritic and aplite-like leucogranites of the Chaun complex (89.4 ± 0.7 million years); 4) small intrusions of LFH of the Pyrkakay complex (88.0 ± 0.7 million years).

The LFH intrusions are represented by stocks of medium-grained microcline-albite granites of the first phase and sills of fine-grained microcline-albite granites of the second phase, lying in the apical part of the main dome of leucogranites. In the LFH area in the central part of the massif, various metasomatites containing rare metal, tin, and uranium mineralization are widespread. The main fault-displacements (Perevalny, Kulyveem faults, etc.) have a northwest extension, while associated faults (Dike, Eastern faults, etc.) have a submeridional extension. Sublatitudinal strike-slip and gently dipping normal faults are also developed. The ore-controlling structures are submeridional and gently dipping structures, representing a system of strike-slip displacements and determining the characteristic curtain-like structure of the distribution of mineralized zones (Fig. 1, b).

METASOMATITES OF THE NORTHERN MASSIF

Study of metasomatites. As a result of exploration work conducted from 1946 to 1967 in several areas of the Northern Massif, primary and placer manifestations of tin were established, and tantalum-bearing and uranium-bearing metasomatites were identified. An assessment of reserves was conducted at several ore manifestations of tin and

uranium, and a large Pyrkakay tin deposit was discovered in the southern exocontact of the massif.

Alekseev 20

Fig. 1. Geographic location (a) and geological map (b) of the Northern massif, Chukotka.

1 – terrigenous alluvial deposits (aQ III IV); 2 – tuff sandstones, tuff aleurolites (J 3); 3 – polymictic aleurolites, sandstones (T 3); 4 – adamellites of the Purga complex, γ J 3 K 1; 5 – dikes of porphyritic monzogranites, granosienites of the Ichuveem complex, γ K 1; 6 – leucogranites of the Chaun complex, γ K 1; 7–8 – microcline-albite Li F granites of the Pyrkakay complex: 7 – first phase, εγ 1 K 2, 8 – second phase, εγ 2 K 2; 9 – dikes of undifferentiated granite-porphyries, γπ K 1-2; 10 – geological boundaries; 11 – fault disturbances: regional (a), local (b); 12 – zones of greisens, tourmalinites, undifferentiated chloritites (a) and deposits (b): 1 – Yerguveem, 2 – Kekurnoe, 3 – Stremitelnoe, 4 – Terrasovoe, 5 – Utiinoe, 6 – Glubokoe, 7 – Pyrkakay.

Researchers agree on the prospectivity of searching in the studied area for weakly eroded deposits of tin, tantalum, and uranium, but express contradictory views on the classification of ore-bearing metasomatites. According to I.V. Tibilov, hydrothermal formations and mineralization of Central Chukotka form four mineral complexes: 1) Yerguveem (quartz metasomatites); 2) Pyrkakay (greisens, tourmalinites, propylites, etc.); 3) Valkumei (oxides and tungstates); 4) Kytéprynnat (sulfides and sulfosalts).

The views of other researchers are presented in the archival materials of JSC "Chaun GGP." E.S. Kotlyarova (Taiga Geology, 1988) identified 4 stages of metasomatism: 1) high-temperature (silicate-alkaline metasomatism and greisenization); 2) medium-

21 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами

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, 6) 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 , 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 Циннвальдит – тёмная триоктаэдрическая Li-содержащая слюда ряда сидерофиллит $KFe^{2+} 2 Al_2$ – полилитионит $KLi_2 Al F_2$).

Примечание к таблице 1. Указаны главные порообразующие минералы в порядке уменьшения содержания, в скобках – рудные минералы. Аббревиатуры минералов по .

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

Alekseev 22

Fig. 2. Tin-bearing and rare metal metasomatites of the Northern massif (photographs of thin sections without analyzer).

a – fluorite-topaz-cinnwalditization in leucogranite of the Chaun complex (ore manifestation Daikovo);

b – quartz-topaz-cinnwalditic zwitter with monazite-(Ce), Nb-containing rutile, Hf-containing zircon (Valunnoe);

c – topaz-quartz tourmaline metasomatite with inclusions of cassiterite (Stremlitelnoye);

d – rare metal-tin ore quartz-tourmaline metasomatite with cassiterite and monazite-(Ce) (Kekurnoye);

e – rare metal quartz-chlorite metasomatite with allanite-(Ce), fluocerite (Ce) (Utinoye).

Abbreviations of minerals according to .

In the mineralization zone, it is widespread over the area of the Northern massif in the form of weak and moderate alterations (2–15%). The content of newly formed quartz in biotite leucogranites of the Chaun complex is 1–10%; the content of cinnwaldit, replacing primary biotite, is 1–5%; the content of topaz and fluorite, replacing albite, is 0.1–3% and 0–0.6% respectively. Topaz-cinnwaldit-quartz alterations of granites are widespread to a depth of up to 400 m and are reflected in the appearance and composition of leucogranites of the Chaun complex.

In the Northern massif, lensoid and plate-like bodies, steeply dipping zones of zwitter with a thickness of 0.1–4.5 m and a length of 1–70 m have been established. Zwitter at the Kekurnoye and Glubokoye deposits lie in the apical parts of the LFG intrusions, forming mantle-like areas with an area of up to 1–2 km². The protolith of zwitter is mainly leucogranites of Chaun.

23 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами
ского комплекса и ЛФГ пыркайского 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 акцессорными минералами (рис. 2, а; 3, а, б). Цвиттеры пересекаются кварц-турмалиновыми оловорудными жилами.

Турмалиниты третьей стадии слагают круто-залегające 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 до 1.0 мм образует гнезда и прожилковые обособления; содержание 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 бурого-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), бурого-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 турмалинсодержащие 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.

23 Ore-bearing Metasomatites Associated with Lithium-Fluoride Granites of the Skoy Complex and LFG of the Pyrkakay Complex.

In the bodies of zwitter, the frontal zone is cinnwaldit-quartz, while the rear zone is topaz-quartz (Table 1). Cinnwaldit-quartz metasomatites are dark-colored rocks with an admixture (10–20%) of cinnwaldit or Li-siderophyllite, topaz (1–10%), and fluorite. Topaz-quartz metasomatites are light-colored rocks containing 20–30% (rarely up to 50%) topaz and a small admixture of cinnwaldit. The structure of zwitter is fine to medium-grained, lepidogranoblastic, with a massive, spotted, and vein-like texture. Dark mica and topaz form nests and lens-like separations in the heteroblast quartz aggregate. Short-columnar or six-sided topaz is part of fluorite-topaz and cinnwaldit-topaz aggregates with accessory minerals (Figures 2, a; 3, a, b). Zwitter are intersected by quartz-tourmaline tin ore veins.

Third-stage tourmalinites compose steeply dipping vein bodies, divided by the nature of metasomatic zonality into four facies (Table 1). The most common facies are muscovite-quartz-tourmaline and albite-tourmaline-quartz facies. The muscovite-quartz-tourmaline (main tin ore) facies is developed in the central part of the massif in the form of zonal plate-like bodies of tourmalinites with a thickness of 1.5–2.5 m (Figure 1). Tourmalinites intersect granites of all intrusive complexes and are sometimes localized in the surrounding dikes of granite-porphyries and monzogranite-porphyries. Within the facies, quartz-tourmaline veins are distinguished, surrounded by halos of muscovite metasomatites with an admixture of quartz, tourmaline, fluorite, and cassiterite. Between the tourmaline vein and the surrounding mica, a tourmaline-quartz zone with a blastogranitoid structure is observed.

Three structural types of muscovite metasomatites have been identified. The most common are fine-grained (0.02–0.15 mm) quartz-muscovite metasomatites with a relic structure: grains of magmatic quartz are enclosed in a granolepidoblastic quartz-muscovite aggregate with parallel-six-sided and radially-radiating intergrowths of tourmaline III, described below. Characteristic is the inclusion of xenomorphic colorless or pink grains of fluorite, yttrium fluorite sized 0.1–0.5 mm (Figure 3, c). Cassiterite is associated with muscovite nests. The second type of surrounding rocks is micro-grained (0.001–0.02 mm) fluorite-muscovite metasomatites with tourmaline ("sericite metasomatites"). Muscovite belongs to iron-bearing phengite. Fluorite sized $n \cdot 1.0$ mm forms nests and vein-like separations; content 2–5%. The third type of muscovite metasomatites arises from the replacement of zwitter while inheriting their structure.

The albite-tourmaline-quartz (secondary tin ore) facies is represented by tourmaline-quartz metasomatic veins with surrounding albitization, which are widespread on the periphery of the Northern massif. Zones of metasomatism of small thickness (1–15 cm) are composed of white and light gray quartz-albite rocks with a small (up to 5–8%, rarely up to 15–30%) content of blue or green tourmaline III. Tourmaline forms xenoblasts and needle-like crystals with a diameter of 0.01–0.1 mm in the quartz-albite matrix. The composition of albite rocks also includes skeletal and short-columnar crystals of brown-blue tourmaline I and prismatic crystals of tourmaline II with a diameter of 0.3–3.0 mm, xenomorphic grains of pink fluorite sized 0.5–1.5 mm, micro-inclusions of cassiterite and rutile. The formation of tourmaline albite rocks has been established on granites of all types and on zwitter.

The chlorite-muscovite-tourmaline facies differs from the muscovite-quartz-tourmaline by the presence of chlorite (dellessite) in the metasomatites, brown-blue tourmaline I, described below, and its distribution at deep horizons (150–250 m). The facies includes thin (0.1–3.0 mm) tourmaline veins containing fluorite, cassiterite, and bordered by weak (3–20%) muscovitization and chloritization zones in the enclosing granites. Tourmaline chlorite-muscovite metasomatites containing micro-grained cassiterite have been described in wells at the Kekurnoye deposit.

The adular-tourmaline facies includes rare low-power (up to 10 cm) veins composed of micro-grained tourmaline metasomatites with inclusions of adularia. Characteristic features of these rocks include almost complete absence of quartz, the leading role of tourmaline III, and limonitization. In the adular-tourmaline matrix, nests of relatively large tourmaline II are observed. Adular-tourmaline-quartz metasomatites are associated with the veins. No intersecting relationships of adular-tourmaline veins with early hydrothermalites have been recorded, but tourmaline-bearing metasomatites replace albitized granites and zwitter of the second stage.

In accordance with the sequence of formation, ore-bearing capacity, and type of tourmaline, tourmaline formations of the Northern massif are divided into four categories: 1) pre-ore shales of tourmaline I in pegmatitic nests, 2) pre-ore veins with tourmaline I, 3) early ore veins with tourmaline II, 4) ore veins with tourmaline III.

Алексеев24

Рис. 3. Оловянно-редкометалльная минерализация метасоматитов Северного массива (изображения в обратно-рас-

сеянных электронах).
а – кварц-топаз-циннвальдитовый цвиттер с Nb-W-Sn-содержащим рутилом, вольфрамооксиолитом, ферберитом, монацитом-(Ce), ксенотимом-(Y), Hf-содержащим цирконом, торитом, черновитом-(Y) (месторождение Кекурное); б – включения в циннвальдите цвиттера ишикаваита, висмутопирохлора, вольфрамооксиолита, Nb-содержащего рутила, торита и черновита-(Y) (Глубокое); в – мусковит-кварц-турмалиновый метасоматит с монацитом-(Ce), Hf-содержащим цирконом, иттрофлюоритом и арсениосидеритом (Стремительное); г – касситерит в кварц-турмалиновом метасоматите (Стремительное); д – кварц-хлоритовый метасоматит с алланитом-(Ce), монацитом-(Ce), бритолином-(Ce), флюоцеритом (Утиное); е – 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 синими-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 разнотекстурным (0.1–2 см) кварцевым агре-

Alekseev 24

Fig. 3. Tin-rare metal mineralization of metasomatites of the Northern massif (images in backscattered electrons).

a – quartz-topaz-cinnwalditic switter with Nb W Sn-containing rutile, wolframite, ferberite, monazite-(Ce), xenotime-(Y), Hf-containing zircon, thorite, black tourmaline-(Y) (Kekurnoye deposit);

b – inclusions in the cinnwalditic switter of Ishikawaite, bismuth pyrochlore, wolframite, Nb-containing rutile, thorite, and black tourmaline-(Y) (Glubokoye);

c – muscovite-quartz-tourmaline metasomatite with monazite-(Ce), Hf-containing zircon, yttrium-fluorite, and arseniosiderite (Stremlitelnoye);

d – cassiterite in quartz-tourmaline metasomatite (Stremlitelnoye);

e – nest of allanite-(Ce) and fluorite-(Ce), replaced by synchizite-(Ce), bastnäsite-(Ce), hematite in quartz-chlorite metasomatite (Utinoye). Abbreviations of minerals according to .

Tourmaline I shliers in pegmatitic nests measuring 1–10 cm are found in the leucogranite of the Chaun complex throughout the massif area. The genesis of the shliers is metasomatic: pegmatites around the shliers are albitized and muscovitized, xenomorphic tourmaline up to several mm forms a heteroblast, less often a poikilitic aggregate with quartz. The shliers contain inclusions of fluorite, topaz, monazite-(Ce), thorite, and rutile .

Tourmaline I in thin sections is pale-brown with blue and greenish zones. By chemical composition, it belongs to fluor-schorl . The ratio of Fe^{3+}/Fe total in tourmaline is 6.7–9.6%.

Pre-ore veins with tourmaline I are rare bodies with a thickness of up to 0.8 m and a length of up to 8 m, composed of coarse-grained (0.1–2 cm) quartz aggregate.

25 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами 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 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ 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, г). 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 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{общ}}$ в турмалине 2.5–8.8 %.

Рудные жилы с турмалином III субмеридиональные, крутозалегающие, мощностью до 0.5–1.5 м; образуют жилные системы протяженностью в первые километры (зоны Останцовая, Дайковая, Валунная на месторождении Кекурное) (рис. 1). Форма жил плито- и кулисообразная, встречаются разветвляющиеся и лестничные жилы. Околожилные изменения представлены метасоматитами мусковит-кварц-тур-

малиновой 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 синевато-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-бозииту, 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, г). 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 метасоматическим 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 цементированием 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

25 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами

гатов 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 синезеленого. Жилы содержат полихромный флюорит, топаз, фенгит, иногда мельчайший темно-бурый касситерит (рис. 2, в). Турмалин I отнесен к фтор-шерлу и шерлу. 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, г). Кварц ксеноморфный размером 0.1–0.3 мм, в друзеовых 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. 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 плитой кулисообразная, встречаются разветвляющиеся и

лестничные жилы. Околожилные 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 синевато-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-бозииту, шерлу и окси-шерлу. 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, г). Реже встречаются олово вольфрам-ниобиевый рутил, халькопирит, пирит, алланит-(Ce), флюоцерит-(Ce), алланит-(Y), тиролит, конихальцит, сакураит. Жилы с турмалином III не редко имеют существенно кварцевый состав, сложены агрегатом кварца с редкими радиально-лучистыми сростками турмалина III. Такие жилы содержат до 5–15 % касситерида.

Хлоритовые метасоматиты (хлорититы) четвертой стадии распространены по всей площади Северного массива и отнесены к двум метасоматическим 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 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 $n \cdot \%$; в приальбандовых 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 болотным-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 отростками нонтронита; иногда обогащены фиолетовым флюоритом. Хлорит-кварцевые и нонтронит-кварцевые жилы повсеместно пересекают турмалиновые.

Алексеев26

жилы и залежи цвиттеров или развиваются в осевых и зальбандовых частях этих тел с образованием теле-скопированных 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 пересекают тела турмалинитовой и хлорититовой стадий.

Метасоматические зоны аргиллизитов мощностью 0.5–10 см представляют собой светлые микрозернистые 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, вольфрамооксидит, W-содержащий ильменит, халькопирит, лёллингит, As-торит, Hf-содержащий циркон, ксенотим-(Y), черновит-(Y), берилл, W-содержащий ко-

лумбит-(Mn), ишикаваит, торутит, висмутопирохлор, 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), висмутопирохлор, пирохлор, 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=0.001 мм) желтый касситерит II. Для касситерита II характерны парагенезис с монацитом-(Ce) и наиболее высокие концентрации Nb, Sc, Ce.

В касситерите турмалининовой 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), Мопай (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 тур-

малине I из предрудных 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 ($Fe_{общ}/(Fe_{общ} + Mg) = 88.81–92.46$) 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 рудопроявлении Утиное содержание алланита в хлорититах достигает первых процентов. В ассоциации с алланитом встречаются флюоцерит-(Ce), монацит-(Ce). По алланиту

Alekseev 26

Veins and deposits of zwitterites develop in the axial and zonal parts of these bodies with the formation of tourmaline-chlorite veins. Argillites of the fifth stage are widespread across the entire area of the Northern massif, with the intensity of argillization increasing towards the periphery of the massif. Inclusions, nests, and spherulites of kaolinite and hydrosilicate develop on orthoclase in granites, on tourmaline in tourmalinites, and on nontronite in nontronite chlorite metasomatites. The content of kaolinite and hydrosilicate is no more than 1–3% and increases to 15–20% near quartz veins. Two types of argillites have been identified: veins of comb quartz with surrounding argillization and zones of siliceous argillites with quartz veins and nests. Quartz veins with a thickness of up to 10–20 cm lie subvertically. Quartz crystals up to 5–8 cm long form parallel-prismatic aggregates. In the axial parts of the veins, druses of split quartz with fluorite are observed. Quartz veins cut through bodies of tourmalinite and chloritite stages. The metasomatic zones of argillites with a thickness of 0.5–10 cm represent light micro-granular quartz rocks with massive, banded, or veinlet-cockard texture. The siliceous quartz aggregate contains inclusions of kaolinite and hydrosilicate.

Mineralogical Features of Metasomatites

The evolution of the hydrothermal-ore system of the Northern massif is clearly expressed in the change from stage to stage of the composition of accessory mineral complexes of metasomatites. Zwitterites of the second stage have tungsten-rare metal specialization and contain: yttrium-fluorite, monazite-(Ce), arsenopyrite, Sn Nb W-containing rutile, wolframite, W-containing ilmenite, chalcopyrite, lepidolite, As-torite, Hf-containing zircon, xenotime-(Y), black tin-(Y), beryl, W-containing columbite-(Mn), ishikawaite, torutite, bismuth-pyrochlore, uranopolyrase, rooseveltite, bismuthinite, native bismuth, molybdenite, galena, pyrrhotite, ceinerite (fig. 2, a, b; 3, a, b). Cassiterite is found in zwitterites in aggregates with Sn Nb-containing rutile. Tourmalinites of the third stage are characterized by rare earth-tin specialization. The composition of metasomatites includes: monazite-(Ce), bismuth-pyrochlore, pyrochlore, xenotime-(Y),

apatite-(CaF), fluorite-(Ce), yttrium-fluorite, ishikawaite, polycrase, uranopolycrase, As-torite, and a number of arsenates Y, Cu, Fe: black tin-(Y), agardite-(Y), ceinerite, tyrolite, conichalcite, arseniosiderite, scorodite, sarmientite, and others. In veins with tourmaline I, monazite-(Ce), torite, rutile, and cassiterite are observed. Accessory minerals of veins with tourmaline II and III: cassiterite, monazite-(Ce), apatite (CaF), Sn W Nb-containing rutile, fluorite-(Ce), allanite-(Ce), allanite-(Y), chalcopyrite, pyrite, tyrolite, conichalcite, sakuraiite (fig. 2, c, d; 3, c, d). Cassiterite forms industrial concentrations in association with tourmaline III (fig. 2, d; 3, d). Characteristic impurities in cassiterite from tourmaline veins (average composition at the Kekurnoye deposit, Valunny section): FeO 0.97; WO₃ 0.12; TiO₂ 0.06; Nb 0.05; In 0.02; Ce 0.02; Sc 0.01%. The content of Fe in cassiterite is 0.02–0.06 a.f. In tin-bearing veins, the content of cassiterite reaches 5–15% (fig. 2, d). Cassiterite is represented by two forms: fine-grained brown cassiterite I and micro-grained ($n \cdot 0.001$ mm) yellow cassiterite II. For cassiterite II, paragenesis with monazite-(Ce) and the highest concentrations of Nb, Sc, Ce are characteristic. In cassiterite of the tourmalinite stage, a high content of In 0.002–0.017% is noted; the ratio Nb/In is 1.2–27.5. On the discrimination diagram of N.N. Nikulin, cassiterite of the Northern massif is close to cassiterite of greisen deposits associated with LFG: Altenberg, Ehrenfriedersdorf, Geier (Germany); Sherlovaya Gora, Orlovskoye (Transbaikal); Kester (Yakutia). There is also a similarity with cassiterite from volcanic greisen deposits of the Far East: Karadub (Priamurye), Mopau (Priamurye) (fig. 4).

At the Kekurnoye deposit (Lower section), tourmaline veins saturated with rare earth minerals are found: allanite-(Ce) and fluorite-(Ce). Allanite-(Ce) forms aggregates with allanite-(Y), enriched with neodymium (fig. 2, d). A typomorphic feature of tourmaline of various types is the high concentration of lithium. In tourmaline I from pre-ore shales, the content of Li is 42–109 g/t, in tourmaline I from pre-ore veins Li is 110–161 g/t, in tourmaline II from early ore veins Li is 130–710 g/t, in tourmaline III from ore veins Li is up to 573 g/t. Chloritites of the fourth stage are composed of chlorite, diagnosed as high-iron turingite ($\text{Fe total}/(\text{Fe total} + \text{Mg}) = 88.81\text{--}92.46$) with a high content of Na, Ca, and K: respectively, up to 0.26, 0.09, and 0.06 a.f. In thin sections, chlorite is grass-green, highly refractive, with slight dispersion, $(N_g N_p) = 0.015\text{--}0.017$. Chlorite metasomatites are characterized by rare earth specialization: they include allanite-(Ce). At the Utiyno ore manifestation, the content of allanite in chloritites reaches several percent. In association with allanite, fluorite-(Ce) and monazite-(Ce) are found.

27 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами

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

1 – 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 гипабиссальными (1–1.5 км) гранитными интрузиями; III – грейзеновый, кварцевый и кварц-топазовый типы касситерит-кварцевой формации, ассоциирующие

с вулcano-плутоническими образованиями; IV – турмалиновый тип касситерит-силикатной формации.

и флюоцериту развиваются бастнезит-(Ce), паризит-(Ce), синхизит-(Ce), бритоцит-(Ce) (рис. 2, е; 3, д, е). В хлоритовых гнездах наблюдается мелкозернистый призматический или игольчатый касситерит с поперечником 0.005–0.3 мм, который ассоциирует с сульфидами – 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 гидросерпикита (иллита), рассеянная вкрапленность цеолитов, кальцита, шамозита, гидрослюда. Цеолиты представлены стилбитом, а также ломонтитом, 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 (1)

–Cr, Tl, P

+W, Bi, As, Nb, Yb, Y, La, Li (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-

27 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами

Fig. 4. Cassiterite of the metasomatites of the Northern massif on the binary diagram Nb/In–In for tin ore deposits of various formations, according to .

1 – cassiterite of the Northern massif, 2 – cassiterite of tin ore deposits from other regions.

Fields of figurative points of deposits: I – quartz type cassiterite-quartz formation, associated with deep (2–4 km) granite intrusions; II – tin-bearing Li F granites and greisen, quartz, and quartz-topaz types of cassiterite-quartz formation, associated with hypabyssal (1–1.5 km) granite intrusions; III – greisen, quartz, and quartz-topaz types of cassiterite-quartz formation, associated with volcanic-plutonic formations; IV – tourmaline type cassiterite-silicate formation.

And fluocerite develop bastnäsite-(Ce), parisite (Ce), synchizite-(Ce), britholite (Ce) (fig. 2, e; 3, d, e).

In chlorite nests, fine-grained prismatic or acicular cassiterite with a size range of 0.005–0.3 mm is observed, which associates with sulfides – sphalerite, pyrite, galena, chalcopyrite. Micro-nests of anatase with rutile, allanite-(Ce), monazite-(Ce) are found.

Sometimes chloritites contain prehnite or fluorite. In nontronite metasomatites, anatase, prehnite, and hematite are found. In chlorite-quartz veins, fluorite and pyrite are noted.

At the Utiino ore manifestation, these veins contain galena, sphalerite, adularia.

Argillites of the fourth stage have a mineral composition reflecting low-temperature formation conditions and uranium specialization. In quartz aggregates, veins of zeolites, chalcedony, and carbonates with a thickness of $n \cdot 0.01\text{--}1.0$ mm, nests of kaolinite, montmorillonite, and hydrosmeectite (illite), and scattered inclusions of zeolites, calcite, shamosite, hydromica are observed. Zeolites are represented by stilbite, as well as lamontite, stellerite, natrolite, scolecite, and others.

Industrial significance is attributed to uranophane, uranophane-beta, kazolite, torbernite, zeunerite, otenite, uranospinite, and others .

Geochemical Features of Metasomatites

Geochemical analysis of the distribution of rare elements in the granites of the Northern massif shows that they are specialized in three elements – Li, F, and Sn (clarks of concentration over 5.0). Characteristic are elevated concentrations of Mo, Pb, Sc, Yb, Y, B (2.0–5.0). Most elements have close to clark contents. The lowest concentrations (< 0.5) are noted for Ti, Mn, Ba, P (table 2).

Comparison of clarks of concentrations of metasomatites and host granites showed the separation of three groups of rare elements:

1) extracted from granites during greisenization and concentrated in albitites and zwitter – F, Li, Be, P, Y, Ti, Zr, Pb, Tl (concentration coefficient $K_r < 0.70$); 2) maximally concentrated in tin-bearing tourmalinites – Sn, B ($K_r = 242$ and 27 , respectively); 3) concentrated in tin-bearing tourmalinites and chloritites – Ag, Zn, Ge, Cu, As, W, In ($K_r = 4.0\text{--}1.5$); 4) indifferent elements, showing indistinct tendencies to concentration – Bi, Sb, Ce, Sc, Cr, Mn ($K_r = 1.0\text{--}1.41$) or deconcentration – Ga, La, Yb ($K_r = 0.76\text{--}1.0$).

The typomorphic rare elements of zwitter and tourmalinites are, respectively, fluorine and tin. Analysis of paired correlation coefficients of fluorine and tin with other elements shows that for fluorine and tin there are stable correlating elements (+) and antagonistic elements (–).

Formulas for the concentration of rare elements (1), (2)+Mo, W, Cu, Zn, Ag, Sb, Ge, Ga, In, Nb, Sc, Yb, Y, La, Ce, B (1)-Cr, Tl, P +W, Bi, As, Nb, Yb, Y, La, Li (2)-Ni, P

allow conclusions about the geochemical specifics of metasomatites. Clarification of geochemical associations of elements was carried out using comparative analysis of correlation matrices of ore-bearing and non-ore-bearing rocks by the method of branching connections.

It was established that for non-ore-bearing rocks, represented by granites, albitized, greisenized, and chloritized granites, an isotropic structure of geochemical connections is characteristic, in which clusters with increased correlation are outlined. Groups of lithophile elements of granites, greisenized granites, and zwitter (Li, Ga, Nb, Ta, Be, Yb, Y, La, Ce, Zr, Sc, Ti) and chalcophile elements of chloritized granites (Zn, Cu, Ag, Pb, Mn, Co) are distinguished.

Separately, P, W, Sb, As, Bi, In, Mo, Cr, Ni, V are noted. It should be noted that in the neolo-

Алексеев²⁸

Таблица 2. Редкоэлементный 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 –

вещающие 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.

вносных 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 редкоземельная (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

Alekseev 28

Table 2. Rare Element Composition of Metasomatites of the Zwitter-Tourmalinite Complex and Host Granites of the Northern Pluton.

Chemical Element Content, g/t

Clark Concentrations

K r

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 0.5 0 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

Note. The parameters of geochemical samples are provided (methods of AEXSA, flame photometry, Karpinsky Institute, analytics by I.Yu. Bunakov, A.I. Maltsev): 1 – general population, 3255 samples; 2 – host granites; 3 – metasomatites. Clark concentrations – the ratio of the element content to the granite clark, according to . Blank – elements for which more than 50% of samples have contents below the sensitivity threshold. K r – coefficient of metasomatic concentration – the ratio of the metasomatites' concentration clark to the granites' concentration clark.

In the host rocks, there are no strong associations of tin with other elements (Fig. 5, a). A completely different cluster structure of geochemical associations is observed in ore-bearing metasomatites. The following geochemical associations are distinguished: 1) rare metal-rare earth (F, Be, Y, REE, P) and rare metal-lithium (Li, Zr, Ga) associations of zwitterites containing zinnwaldite, ytterbium-fluorite, beryl, ishikawaite, fluocerite-(Ce), monazite-(Ce), xenotime-(Y), Hf-containing zircon, thorutite, and other rare metal minerals; 2) tin ore (Sn, W, Sb, Nb, In, Sc, Ge) and rare earth (REE, Y) associations of tourmalinites containing cassiterite, Nb W Sn-rutile, monazite-(Ce), ytterbium-fluorite, fluocerite-(Ce), allanite-(Ce), allanite-(Y), bismuth-pyrochlore, pyrochlore, xenotime-(Y), ishikawaite, polycrase, samarskite-(Y), tungsten, pyrite, and others; 3) copper-polymetallic (Cu, Ag, Pb, Zn, Bi, As, Mn) and rare earth (REE, Y) associations of chlorite metasomatites containing chalcocite, sphalerite, arsenopyrite, native bismuth, galena, chalcopyrite, allanite-(Ce), fluocerite-(Ce), monazite-(Ce), bastnäsite-(Ce), parisite-(Ce), synchizite-(Ce), britholite-(Ce), and others (Fig. 5, b). Established.

29 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами
геохимические закономерности соответствуют приведенным выше минералогическим 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 Север -

ного массива положены представления академика С.С. Смирнова о пульсационном характере гидротермального 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-Левинь (Франция) [29, 33], Сент-Остелл и Трегон-нинг-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- 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 цвиттеров, турмалинитов и хлорититов, 399 проб.

29 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами

Геохимические закономерности соответствуют приведенным выше минералогическим 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. Проблема стадийности гидротермальных месторождений дискутируется более ста лет. В основу исследования метасоматитов Северного массива положены представления академика С.С. Смирнова о пульсационном характере гидротермального 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» .

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) , Бовуар и Пюи-Ле Винь (Франция) , Сент-Остелл и Трегоннинг-Годольфин (Англия) , Айбеншток и Эренфриденсдорф (Германия) , Викманов (Чехия) , Панаскейра (Португалия) и др. На Дальнем Востоке цвиттер-турмалинитовые комплексы установлены на оловорудных месторождениях: Правоурмийское (Приамурье) , Ярославское (Приморье) , Депутатское, Полярное (Якутия) . Развивается концепция «базовой формации оловорудных цвиттеров» в эндоконтакте гранитов, которые сменяются на верхних ярусах кварц-турмалинитами.

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 цвиттеров, турмалинитов и хлорититов, 399 проб.

Алексеев30

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, Правоурмийское, 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 аксессуарной 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 – Пыркайские 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 допол-

нительных 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.

Alekseev 30

lin-cassiterite and chlorite-cassiterite-sulfide veins . The data presented in the article show the presence in the Northern granite massif in Chaun-Chukotka of the zwitter-tourmalinite complex, which is characterized by a regular sequence of formation and geochemical evolution of zwitter, tourmalinites, and chloritites, as well as the commonality of their accessory and ore mineralization .

The connection of metasomatites of the Northern massif with Li-F granites is observed through the spatial coincidence of zwitter, tourmalinites, and chloritites with LFG intrusions and their controlling structures of extension, featuring right-lateral shifts of the northwest shear. This structural position may be associated with the combination of the studied metasomatites and LFG in deep-seated structures.

The spatial connection of ore-bearing zwitter with LFG is proven in many rare metal provinces of Russia (Transbaikalia, the Far East, Yakutia, Chukotka), Europe (Ore Mountains, Central French Massif, and Central-Iberian Zone), North America (Alaska), Africa (Eastern Egypt, Maghreb Belt), and China (Nanling and Primorsky Belts) . Examples of large deposits of tungsten-tin ores and rare metal zwitter include Abu Dabbab and Nuweibi (Egypt) ; Yichun and Sunshugan (China) ; Panasqueira (Portugal) , and others. In the East of Russia, such deposits include: Odinokoe,

Deputatskoe, Polyarnoye, Ekug, Kester, Pravourmiyskoe, Tigrinoe, Voznesenskoe, and others .

Some hydrothermal systems with zwitterites include vein-metasomatic tourmalinites. Zwitterites develop on microcline, albitites, and form tin-rare metal ore deposits and vein zones in the contact parts of LFG intrusions. Following zwitterites, bodies of tourmaline, chlorite, quartz, fluorite, and other tin-polymetallic hydrothermalites are formed .

In the Northern massif, zwitterites develop on albitites and granitoids of all plutonic complexes, including the LFG of the Pyrkakay complex. The sign of the paragenetic connection of the studied metasomatic complex and LFG is their spatial co-occurrence, inherited by all metasomatites of tin-tungsten-rare metal accessory mineralization of Li-F granites. The connection of tourmalinites with LFG and zwitterites is indicated by high contents of fluorine and lithium in tourmaline.

Ore Potential of Metasomatites of the Northern Massif

The main prospects for ore potential of the Northern massif are associated with tourmalinites, argillites, and zwitterites. Tourmalinites are accompanied by tin (cassiterite, tin-tungsten-niobium rutile) and yttrium-rare earth (monazite-(Ce), allanite-(Ce), yttrium-fluorite, fluocerite-(Ce), uranopolycras, bismuth-pyrochlore, black tin-(Y), allanite-(Y)) mineralization. In the area, small and medium tin deposits are highlighted: Yerguveem, Kekurnoe, Glubokoe, Stremitelnoe, Terrasovoe, Utiinoe, and dozens of primary and placer occurrences of tin. In the southern exocontact of the massif, large tin deposits are located – Pyrkakay stockworks .

The breccia-like veins of muscovite-quartz-tourmaline facies (Kekurnoe) are richest in cassiterite. Massive tourmaline veins with surrounding muscovitization are also ore-bearing, but they show a tendency towards a bonanza distribution of ore mineralization (Stremitelnoe, Terrasovoe). Industrial concentrations of tin are associated with quartz veins of albit-tourmaline-quartz facies (Kekurnoe, Utiinoe, Glubokoe). The prospects of yttrium-rare earth mineralization of tourmaline metasomatites are not studied and require additional geological exploration work.

Uranium specialization of argillites is expressed in secondary U6+-mineralization: uranophane, uranophane-beta, kazolite, torbernite, zeunerite, otenite, uranospinite. Uranium potential of argillites is determined by exploration of the Northern deposit .

Zwitterites of the Northern massif are geochemically specialized in rare metals (Nb, REE, Y, Li, Bi), W, and Sn. W, Nb are part of Nb-containing rutile, wolframite, samarskite. Bi, Y, REE are found in yttrium-fluorite, bismuth-pyrochlore, samarskite, xenotime-(Y), black tin-(Y), bismuth, and others. Ore-bearing zwitterites are not established at the surface. Due to the weak erosion of the Northern massif, it is possible to discover deposits of rare metal and tungsten-bearing zwitterites at depth. The data presented in the article on the mineral and chemical composition of ore-bearing metasomatites can be used in the search for tin and rare metal mineralization of the Northern massif.

CONCLUSIONS

Zwitterites of the Northern massif are highlighted – quartz topaz-cinnwaldite greisens, accompanying Li-F granites and bearing rare metal (Nb, REE, Y, Li, Bi, Sn, W) mineralization.

31 Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами
Установлено фациальное разнообразие турмалинитовых 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-турмалинитовый 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

1. Алексеев В.И. Литий-фтористые граниты Дальнего Востока // Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб., 2014. 244 с.
2. 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.
3. Бородин Н.А., Приставко В.А. Выделение цвиттеров по петрохимическим и геохимическим критериям // Отч. геология. 2012. № 4. С. 49–56.
4. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
5. Геология оловорудных месторождений СССР / Гл. ред. С.Ф. Лугов. Т. 2. Оловорудные месторождения СССР. Кн. 1. М.: Недра, 1986. 429 с.
6. Гоневчук В.Г. Оловоносные магматические системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
7. 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.
8. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. М.: Роснедра, 2021. 572 с.
9. Дудкин Д.В., Ефремов С.В., Козлов В.Д. Литий-фтори-

- стые граниты Чукотки и их геохимические особенности // Геохимия. 1994. № 3. С. 393-402.
10. Кигай И.Н. Проблемы гидротермального рудообразования. М.: МАКС Пресс, 2020. 288 с.
11. 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.
12. Константинов А.К. Урановый потенциал Чукотки // Минеральное сырье. № 16. М.: ВИМС, 2005. 123 с.
13. Летувнинкас А.И. Стадийность гидротермального минералообразования. Томск: ТГУ, 1991. 216 с.
14. 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
15. Методические рекомендации по геолого-геохимическому изучению гидротермально метасоматических образований при ГСР-50 с общими поисками. СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. 64 с.
16. Методические рекомендации к содержанию и оформлению серийных легенд к цифровым геологическим картам комплектов ГК-200/2 и ГК-1000/3. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009, 70 с.
17. 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.
18. Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Изд-е третье, испр. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 199 с.
19. 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.
20. 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.
21. Руб А.К., Руб М.Г. Редкометалльные граниты Приморья. М.: ВИМС, 2006. 86 с.
22. Тибилев И.В. Особенности геологического развития севера Чукотки с позиций термодинамической парадигмы эндогенных процессов. Магадан: СВНЦ; СВКНИИДВО РАН, 2005. 304 с.
23. Томсон И.Н., Тананаева Г.А. Базовая формация оловорудных цвиттеров и их соотношение с сопутствующими жильными месторождениями // Этапы образования рудных формаций. М.: Наука, 1989.
24. Флёров Б.Л. Оловорудные месторождения Яно-Колымской складчатой области. Новосибирск: Наука, 1976. 287 с.
25. Ханчук А.И., Иванов В.В. Геодинамика Востока России в мезо-кайнозойе и золотое оруденение // Геодинамика и металлогения. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 7–30.
26. Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманский окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихо-

океан. геология. 2019. Т. 38, № 3. С. 4–37.

DOI: 10.30911/0207-4028-2018-38-3-4-37.

27. Электронный справочник-определитель околорудных метасоматитов (рудоносных гидротермально-метасоматических образований). URL: <http://esprav.vsegei.ru/?ruid=142ac22b15744fea85dd656b04d7f323#68605cb568dee8013> (дата обращения: 31.12.2023).

28. 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.

31 RUDONOSNYE METASOMATITES ASSOCIATED WITH LITHIUM-FLUORIDE GRANITES

Established is the facies diversity of tourmaline metasomatites of the Northern massif and three types of tourmaline composing them. A scheme of facies dissection of ore-bearing metasomatites and a sequence of stages of their formation have been developed: 1) albiteites, 2) zwitterites, 3) tourmalinites, 4) chloritites, 5) argillites. The zwitter-tourmalinite metasomatic complex of the massif is characterized by spatial association with Li-F granite intrusions and is controlled by extension structures that dominate right-lateral first-order faults. A regular evolution of composition and unity of accessory and ore mineralization of metasomatites have been established. The work was carried out with financial support from the Chaun Mining and Geological Enterprise (economic contract 1990–1991), RFBR (projects 11-05-00868 a, 14-05-00364, 2015-50064), Ministry of Education and Science (state contract No. 14.740.11.0192, state assignment No. 5.2115.2014/K; state assignment FSRW-2023-0002).

LIST OF REFERENCES

1. Alekseev V.I. Lithium-fluoride granites of the Far East // National Mineral Raw Materials University "Mining". St. Petersburg, 2014. 244 p.
2. Alekseev V.I., Marin Yu.B. Unique paragenesis of cerium and yttrium allanite in tourmalinite from the Northern massif (Chukotka) // *Dokl. AN*. 2016. Vol. 469, No. 3. P. 333–335.
3. Borodkin N.A., Pristavko V.A. Selection of zwitterites by petrochemical and geochemical criteria // *Otech. geology*. 2012. No. 4. P. 49–56.
4. Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in the main types of volcanic rocks of the Earth's crust // *Geochemistry*. 1962. No. 7. P. 555–571.
5. Geology of tin ore deposits of the USSR / Ed. S.F. Lugov. Vol. 2. Tin ore deposits of the USSR. Book 1. M.: Nedra, 1986. 429 p.
6. Gonevchuk V.G. Tin-bearing magmatic systems of the Far East: magmatism and ore formation. Vladivostok: Dalnauka, 2002. 297 p.

7. State geological map of the Russian Federation. 1:1,000,000 (new series). Sheet R-58-(60) – Bilibino: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 1999. 146 p.
8. State report on the state and use of mineral raw materials of the Russian Federation in 2020. M.: Rosnedra, 2021. 572 p.
9. Dudkinsky D.V., Efremov S.V., Kozlov V.D. Lithium-fluoride granites of Chukotka and their geochemical features // *Geochemistry*. 1994. No. 3. P. 393-402.
10. Kigai I.N. Problems of hydrothermal ore formation. M.: MAX Press, 2020. 288 p.
11. Kovalenko V.I., Kuzmin M.I., Kozlov V.D. Metasomatic zwitter and associated rare metal ore formation (based on deposits in Mongolia and Czechoslovakia) // *Metasomatism and ore formation*. M.: Nauka, 1974. P. 42–53.
12. Konstantinov A.K. Uranium potential of Chukotka // *Mineral raw materials*. No. 16. M.: VIMS, 2005. 123 p.
13. Letuvninkas A.I. Stages of hydrothermal mineral formation. Tomsk: TGU, 1991. 216 p.
14. Marin Yu.B. On mineralogical studies and the use of mineralogical information in solving problems of petro-ore formation // *Zap. Russian Mineralogical Society*. 2020. Vol. 149, No. 4. P. 1–15. DOI: 10.31857/S0869605520040048
15. Methodological recommendations for geological-geochemical study of hydrothermal metasomatic formations during GSR-50 with general searches. St. Petersburg: VSEGEI, 1992. 64 p.
16. Methodological recommendations for the content and design of serial legends for digital geological maps of complexes GK-200/2 and GK-1000/3. St. Petersburg: VSEGEI, 2009, 70 p.
17. Nikulin N.N. Some features of the chemical typomorphism of cassiterite and their use in applied aspects // *Mineralogy of metamorphic and ore formations of the Far East*. Vladivostok: DVNC of the USSR Academy of Sciences, 1981. P. 109–118.
18. Petrographic code. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations. 3rd ed., revised and supplemented. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2009. 199 p.
19. Practical guide to ore forecasting based on mapping of hydrothermally altered rocks during the production of GSR-200 (GSR-50) / V.V. Shatov, O.V. Petrov, S.V. Kashin et al. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2023. 104 p.

20. Prilukov A.N. Production of mineral raw materials in the Russian Far East and proposals for improving its organizational structure // Mining information-analytical bulletin. 2013. No. OV 12. P. 213–221.
21. Rub A.K., Rub M.G. Rare metal granites of Primorye. M.: VIMS, 2006. 86 p.
22. Tibilov I.V. Features of geological development in northern Chukotka from the perspective of the thermodynamic paradigm of endogenous processes. Magadan: SVNC; SVKNII DVO RAN, 2005. 304 p.
23. Thomson I.N., Tananaeva G.A. Basic formation of tin ore zwitterers and their relationship with associated vein deposits // Stages of ore formation. M.: Nauka, 1989.
24. Flerov B.L. Tin ore deposits of the Yano-Kolyma folded area. Novosibirsk: Nauka, 1976. 287 p.
25. Khanchuk A.I., Ivanov V.V. Geodynamics of the East of Russia in the Meso-Cenozoic and gold ore formation // Geodynamics and metallogeny. Vladivostok: Dalnauka, 1999. P. 7–30.
26. Khanchuk A.I., Grebenikov A.V., Ivanov V.V. Alb-senomanian marginal-continental orogenic belt and magmatic province of the Pacific Asia // Pacific geology. 2019. Vol. 38, No. 3. P. 4–37. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-38-3-4-37.
27. Electronic reference guide to ore-related metasomatites (ore-bearing hydrothermal-metasomatic formations). URL: (date of access: 31.12.2023).
28. Breiter K., Skoda R., Uher P. Nb-Ta-Ti-W-Sn-oxide minerals as indicators of a peraluminous and Frich granitic system evolution: Podlesi. Czech Republic // Mineralogy and Petrology. 2007. Vol. 91. P. 225–248.

Алексеев32

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 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., Marshall 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-supergroup 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 micas // *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. Tleptrogenesis 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 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, 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. Tourmalinite make up tin deposits. Industrial uranium mineralization is associated with

argillizites. A predictive assessment of bodies of zwitter, 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.

Alekseev 32 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.

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Hawthorne F.C., Henry D.J. Classification of the minerals of the tourmaline group // *European J. Mineralogy*. 1999. V. 11. P. 201–215.

6. Hénry D.J., Novak M., Hawthorne F.C., Ertl A., Dutrow B.L., Uher P., Pezzotta F. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // *American Mineralogist*. 2011. V. 96. P. 895–913. DOI: 10.2138/am.2011.3636
7. 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.
8. 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
9. 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
10. 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 micas // *Clays and clay minerals*. 1998. V. 46, N 5. P. 586–595.
11. 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.
12. Soloviev S.G., Kryazhev S., Dvurechenskaya S. Geology, igneous geochemistry, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kougarak tin-tantalum-lithium prospect, Seward Peninsula, Alaska, USA // *Mineralium Deposita*. 2020. V. 55. P. 79–106. DOI: 10.1007/s00126-019-00883-7
13. Štemprok V., Pivec E., Langrova A. The petrogenesis of a wolframite-bearing greisen in the Vykmanov granite stock, Western Krušné hory pluton (Czech Republic) // *Bulletin of Geosciences*. 2005. V. 80, N. 3. P. 163–184.
14. Warr L.N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // *Mineralogical Magazine*. 2021. V. 85. P. 291–320.
15. 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.

Recommended for publication by N.A. Goryachev after revision 26.12.2024 accepted for publication 29.12.2024.

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 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, 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. Tourmalinite make up tin deposits. Industrial uranium mineralization is associated with argillizites. A predictive assessment of bodies of zwitter, 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.

/15

Instantly translate your PDF documents online for free. Our PDF translator supports English, Spanish, French, and many other languages. Use AI to generate full translations or summaries. Get started for free today, no signup required!

- Translate PDFs to English or any other language
- Trusted by 1.7 billion people since 2013
- Free and easy PDF translator—no installation needed

Free Online PDF Translation

Smallpdf's PDF Translator uses AI to provide free summaries, full translations, and document queries in various languages. Translate any document into your preferred language instantly.

Instant Knowledge in Any Language

Quickly translate your PDF document into any language you need, including Spanish, German, French, Chinese, Arabic, Russian, and many more.