ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru




*Научная статья* *Геология*

# Ассоциация грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов в гранитах плутона Северный (Чукотка, Россия)

**В.И.Алексеев**[1]✉, **Ю.Б.Марин**[1], **И.А.Бакшеев**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Бакшеев И.А. Ассоциация грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов в гранитах плутона Северный (Чукотка, Россия) // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 170-183. EDN ACOLQC

***Аннотация***
В плутоне Северный на Чукотке с помощью геологического картирования и минералого-петрографических исследований установлена ассоциация редкометалльно-оловоносных топаз-циннвальдитовых грейзенов (цвиттеров) и турмалиновых метасоматитов, которые генетически связаны с магматизмом, продуцирующим интрузии Li-F гранитов. Исследованы размещение, состав цвиттеров и мусковит-кварц-турмалиновых метасоматитов, образующих ореолы вокруг кварц-турмалиновых жил. Установлен широкий спектр минеральных видов турмалина, встречающегося в пегматоидных гнездах лейкогранитов (турмалин I), дорудных жилах кварц-турмалиновых метасоматитов с флюоритом (турмалин II), раннерудных жилах кварц-турмалиновых метасоматитов (турмалин III), рудных турмалиновых и кварцевых жилах (турмалин IV). Выявлена эволюция турмалина от Sc-содержащего фтор-шерла в дорудных метасоматитах до окси-шерла и оловосодержащего ферро-бозиита в оловорудных метасоматитах при постепенном повышении содержания лития и переменной степени окисления железа. В цвиттерах, мусковит-кварц-турмалиновых метасоматитах и жилах турмалинитов отмечено сочетание оловянной и редкометалльной минерализации. Результаты исследования могут быть использованы для оценки минерагенического потенциала и разработки критериев прогнозирования редкометалльного (Nb, Ce, Y, W, Bi) оруденения плутона Северный.

***Ключевые слова***
грейзен; цвиттер; турмалинит; циннвальдит; турмалин; шерл; фойтит; ферро-бозиит; рудоносность; олово; редкие металлы; литий-фтористый гранит; Чукотка

***Финансирование***
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты 11-05-00868-а, 14-05-00364, 20-15-50064), Минобрнауки (Государственный контракт № 14.740.11.0192, Государственное задание № 5.2115.2014/К), госбюджетной темы «Минералогическое изучение месторождений Арктической зоны России с целью их комплексного освоения» (№ 121061600049-4).

***Поступила: 16.05.2024*** ***Принята: 16.07.2025*** ***Онлайн: 19.12.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

## Введение

Дальний Восток лидирует в России по запасам стратегических видов минерального сырья, таких как олово, золото, флюорит; намечаются перспективы выявления редкометалльного оруденения [1, 2]. Большой интерес представляют рудные районы Чукотки: Баимская рудная зона (крупное Au-Mo-Cu месторождение Песчанка), Кайемравеемский рудный узел (крупное Au-Ag месторождение Купол), Иультинский рудный узел (крупное Sn-W месторождение Светлое), Ичувеем-Паляваамский рудный район (крупное Au месторождение Майское) [3-5]. Внимание геологоразведчиков привлекает гранитный плутон Северный в Чаунском районе Чукотки [6], южнее которого расположена группа крупных месторождений олова – Пыркакайские штокверки [1].

Наряду с совершенствованием добычи и переработки полезных ископаемых, важным направлением развития минерально-сырьевой базы является «диверсификация минерагенического потенциала территорий. Планирование поисковых работ на нетрадиционные геолого-промышленные типы месторождений для отдельных районов с целью выявления крупных и уникальных объектов» [1]. Научно-методическим обеспечением таких работ служат данные о составе и рудоносности гидротермально-метасоматических образований территорий [7].



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

В 1990-2011 гг. Санкт-Петербургским горным университетом были проведены экспедиции на Чукотку под руководством профессора Ю.Б.Марина. В гранитном плутоне Северный выполнено крупномасштабное геологическое картирование метасоматитов. На ряде поисковых участков закартированы поля цвиттеров и изучены жилы оловорудных турмалинитов, выявленные Чаунским горно-геологическим предприятием. Цвиттеры – наиболее высокотемпературные и высокофтористые метасоматиты семейства грейзенов, составляющие основу многих редкометалльных и вольфрамово-оловорудных месторождений [8, 9]. Турмалиниты – существенно турмалиновые метасоматиты, характерные для крупных оловорудных месторождений. Сочетание цвиттеров и турмалинитов наблюдается на крупных редкометалльно-оловянных месторождениях [6, 10, 11]. Цель статьи – минералого-петрографическая характеристика ассоциации цвиттеров и турмалинитов гранитного плутона Северный как основа оценки минерагенического потенциала района.

**Фактический материал и методы**

По методике, рекомендованной в [11, 12], проведены минералого-петрографические исследования более 3000 образцов и 2000 шлифов и аншлифов (микроскопы ПОЛАМ Р-312, Leica DM2500 M, Olympus BX51). В основу исследований заложена структурно-геологическая, петрографическая, минералогическая, геохимическая и минерагеническая информация, полученная при крупномасштабном геологическом картировании.

С целью диагностики и фациального расчленения метасоматитов исследованы их структурно-текстурные особенности, состав и анатомия породообразующих (темные слюды, турмалин) и акцессорных (касситерит, вольфрамоиксиолит, алланит и др.) минералов с учетом работ [13-15]. Как показывает практика, генетическое исследование минералов и минеральных агрегатов позволяет получить информацию о происхождении и условиях образования минералов [16-18]. Для установления генезиса и эволюции метасоматитов использованы принципы онтогенического анализа минеральных индивидов и агрегатов, разработанные научной школой Санкт-Петербургского горного университета [14, 19].

Изучение акцессорных и породообразующих минералов метасоматитов выполнено методом SEM-EDS на электронных микроскопах JEOL JSM-6460LV, JSM-7001F, JIB-4500, Cameca MS-46 Горного университета и Института Карпинского при ускоряющем напряжении 15-30 кВ, токе – 1,5 нА. Интерпретация – с помощью программного обеспечения INCA Energy (Oxford Instruments Ltd.). Составы темных слюд измерены электронно-зондовым микроанализатором JEOL JXA-8230 в Санкт-Петербургском горном университете (аналитик Е.В.Пигова). Условия съемки – ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 100 нА. В качестве стандартов использованы роговая обманка (Si, Al, Ca, Mg, Fe), ортоклаз (K), альбит (Na), спессартин (Fe, Mn, Al), пирофанит (Mn, Ti), апатит (P), флюорит (F, Ca). Для расчета поправок использовался метод ZAF из программного обеспечения JEOL. Примеси определены методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (спектрометр ICPE-9000) и атомно-абсорбционной спектрометрии (спектрометры AA6300, AAS5EA) в ЦКП Санкт-Петербургского горного университета; пределы обнаружения – 0,001 %. Содержание Li, Rb, Cs в слюдах определено с помощью пламенной фотометрии на приборе ПФМ в Институте наук о Земле (аналитик О.В.Волина). Использован геотермометр Ti-in-biotite [20]. Классификация слюд выполнена с учетом [21]. Состав акцессорных тантало-ниобатов определен на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8230 в ЦКП Санкт-Петербургского горного университета (аналитик Е.В.Пигова). Режим WDS-анализа – ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 100 нА. В качестве стандартов использованы: колумбит (Nb), синтетический $ScVO_4$ (Sc), касситерит (Sn), $SrSO_4$ (Sr), синтетический $Ta_2O_5$ (Ta), $TiO_2$ (Ti), металлический W (W), синтетический Y-гранат (Y), циркон (Zr).

Составы турмалинов определены с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-IT500, оборудованного энергодисперсионной приставкой INCA Energy 350, в Лаборатории локальных методов исследования на кафедре петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова (аналитики Н.Н.Коротаева, В.О.Япаскурт). Условия съемки – ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока ~2 нА, диаметр пучка электронов 3 мкм. Использованы стандарты: флюорит M9 (F, Ca), жадеит M3 (Na, Al, Si), энстатит M12 (Mg), волластонит M8 (Ca), $ScPO_4$ (Sc), гематит O21 (Fe), касситерит O1 (Sn). Погрешность измерения главных и второстепенных элементов составила для оксидов 1,5 и 5 отн.%. Для процедуры коррекции использованы


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

XPP поправки. Классификация турмалинов выполнена с учетом [22]. Содержание Li в турмалине измерено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором с использованием масс-спектрометра Element-XR, а также приставки для лазерной абляции LSX-213 G2+ в ГЕОХИ РАН (аналитик М.О.Аносова). При измерении содержания лития использован калибровочный стандарт синтетического стекла NIST-610.

**Геологическая характеристика плутона Северный**

Район исследований расположен на северо-западе Чукотского автономного округа, на побережье Чаунской губы и Восточно-Сибирского моря. История его изучения началась в 1927 г. со знаменитых экспедиций С.В.Обручева. В 1936-1939 гг. экспедиции Арктического института Главсевморпути добыли сведения о россыпной и коренной оловоносности восточного побережья Чаунской губы, в том числе об оловорудных проявлениях в западном контакте плутона Северный. В южном экзоконтакте плутона открыто крупнейшее в России Пыркакайское месторождение олова.

Район исследований находится в Чаунской зоне Новосибирско-Чукотской складчатой системы, включающей верхнетриасовые сланцево-алевролитовые и верхнеюрские песчаные складчатые толщи. Зона гранитоидного магматизма, ограниченная Чаунским и Пытлянским разломами, подстилается полосой гранитизированного фундамента и включает Чаунский криптобатолит с обнаженными на поверхности выступами, среди которых гранитные плутоны Северный, Пырканаянский, Инрогинайский, Янранайский, Куйвиваемский, Шелагский [6, 23]. Плутон Северный площадью 308 км$^2$ вытянут в северо-западном направлении, совпадающем с направлением складчатости. Судя по наличию останцов ороговикованной кровли и пологому (40-45°) падению контактов под вмещающие породы, глубина эрозионного среза плутона невелика. По геофизическим и структурным данным он представляет собой пластообразное тело мощностью 2-3 км с пологой кровлей.

Плутон Северный является полиформационным и образован породами четырех интрузивных комплексов: пургинского комплекса биотит-роговообманковых гранитов; ичуваемского дайкового комплекса монцогранитов, граносиенитов; чаунского комплекса, включающего главную фазу крупно- и среднезернистых лейкогранитов и дополнительную фазу мелкозернистых резкопорфировидных лейкогранитов (89,4±0,7 млн лет); пыркакайского комплекса, включающего первую фазу – штоки среднезернистых литий-фтористых гранитов (ЛФГ), и вторую фазу – силлы мелкозернистых ЛФГ мощностью 1-50 м [24]. Преобладают лейкограниты чаунского комплекса. Пыркакайский комплекс возрастом 88,0±0,7 млн лет входит в состав Дальневосточного пояса ЛФГ и является рудоносным (рис.1).

Внутри гранитного плутона развиты разрывные нарушения северо-западного и субмеридионального направлений, а также оперяющие субширотные сдвиго-сбросы и пологозалегающие разрывные нарушения. Флюидоконтролирующими и рудолокализующими являются субмеридиональные разрывные нарушения в верховьях рек Ергувеем и Глубокая (рис.1).

**Петрографическая характеристика цвиттеров и турмалинитов**

В результате полевых и камеральных исследований в плутоне Северный установлены пять групп метасоматитов: альбититы, грейзены (цвиттеры), турмалиниты, хлорититы, аргиллизиты. Наиболее распространены и являются предметом исследования редкометалльные цвиттеры и редкоземельно-оловоносные турмалиниты.

*Цвиттеры* представляют собой специфические темнослюдистые метасоматиты, состоящие из триоктаэдрических слюд циннвальдита* (литиевого сидерофиллита), кварца и топаза [9]. Главный объем этой минерализации распределен по всей площади главного купола плутона Северный в виде слабых изменений лейкогранитов чаунского комплекса. Содержание новообразованных минералов в биотитовых лейкогранитах, %: кварц 1-10, циннвальдит 1-5, топаз 0,1-3, флюорит 0-0,6. Установлены признаки цвиттеризации биотитовых лейкогранитов чаунского комплекса [16, 25]:

• Наличие двух видов слюды – темно-бурого биотита и более светлого оранжево-бурого циннвальдита II (метасоматический циннвальдит цвиттеров). Реликты первичного биотита наблюдаются

* Циннвальдит – темная триоктаэдрическая Li-содержащая слюда ряда сидерофиллит $KFe^{2+}_2Al[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$ – полилитионит $KLi_2Al[Si_4O_{10}]F_2$.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

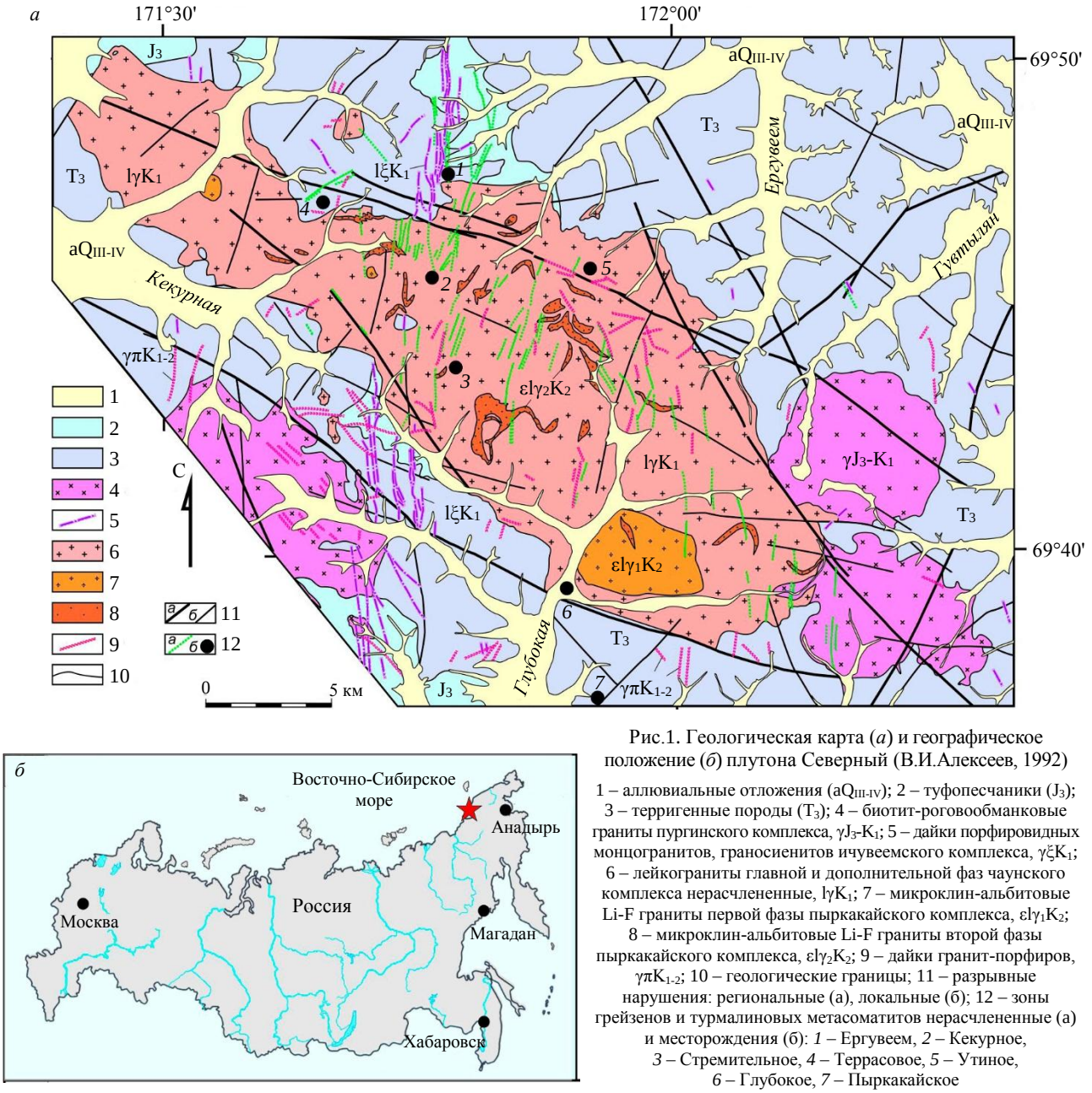



Рис.1. Геологическая карта (*а*) и географическое положение (*б*) плутона Северный (В.И.Алексеев, 1992)

1 – аллювиальные отложения ($aQ_{III-IV}$); 2 – туфопесчаники ($J_3$); 3 – терригенные породы ($T_3$); 4 – биотит-роговообманковые граниты пургинского комплекса, $\gamma J_3$-$K_1$; 5 – дайки порфировидных монцогранитов, граносиенитов ичуваемского комплекса, $\gamma\xi K_1$; 6 – лейкограниты главной и дополнительной фаз чаунского комплекса нерасчлененные, $l\gamma K_1$; 7 – микроклин-альбитовые Li-F граниты первой фазы пыркакайского комплекса, $\varepsilon l\gamma_1 K_2$; 8 – микроклин-альбитовые Li-F граниты второй фазы пыркакайского комплекса, $\varepsilon l\gamma_2 K_2$; 9 – дайки гранит-порфиров, $\gamma\pi K_{1-2}$; 10 – геологические границы; 11 – разрывные нарушения: региональные (а), локальные (б); 12 – зоны грейзенов и турмалиновых метасоматитов нерасчлененные (а) и месторождения (б): *1* – Ергувеем, *2* – Кекурное, *3* – Стремительное, *4* – Террасовое, *5* – Утиное, *6* – Глубокое, *7* – Пыркакайское

в циннвальдитовых псевдоморфозах (рис.2, *б*) и в виде включений в первичном магматическом кварце. Циннвальдит II образует прожилковидные агрегаты с кварцем, флюоритом и топазом, замещает биотит, плагиоклаз, реже ортоклаз.

• Присутствие двух генераций кварца – первичного дипирамидального кварца I (размер кристаллов – 2,5 мм; содержание – 37 % объема гранита) и вторичного метасоматического гранобластового кварца II (0,3-1,5 мм; 5-10 %, редко до 60-70 %). Кварц II замещает ортоклаз и плагиоклаз, образует линзы и гнезда с циннвальдитом и топазом, нарушающие структуру гранита. Кварц I в измененных гранитах дислоцирован и перекристаллизован.

• Наличие зерен топаза двух типов – относительно крупных (0,2-2,0 мм) ксеноморфных зерен в составе гнезд, линз цвиттеров и мелких (0,03-0,3 мм) изометрических или угловатых зерен, замещающих магматический плагиоклаз совместно с кварцем, циннвальдитом II и флюоритом (до 5-10 % объема) (рис.2, *а*). Гранулометрические исследования показали, что размер зерен топаза не коррелирует с размерами зерен полевого шпата и кварца.

По данным бурения, цвиттеровые изменения биотитовых лейкогранитов достигают глубины 280-400 м. Масштабы слабой цвиттеризации таковы, что при содержании вторичных минералов 3 % объем постмагматической минерализации в плутоне достигает почти 1 млрд м$^3$. Цвиттеризация


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*Записки Горного института.* 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 170-183
© В.И.Алексеев, Ю.Б.Марин, И.А.Бакшеев, 2025

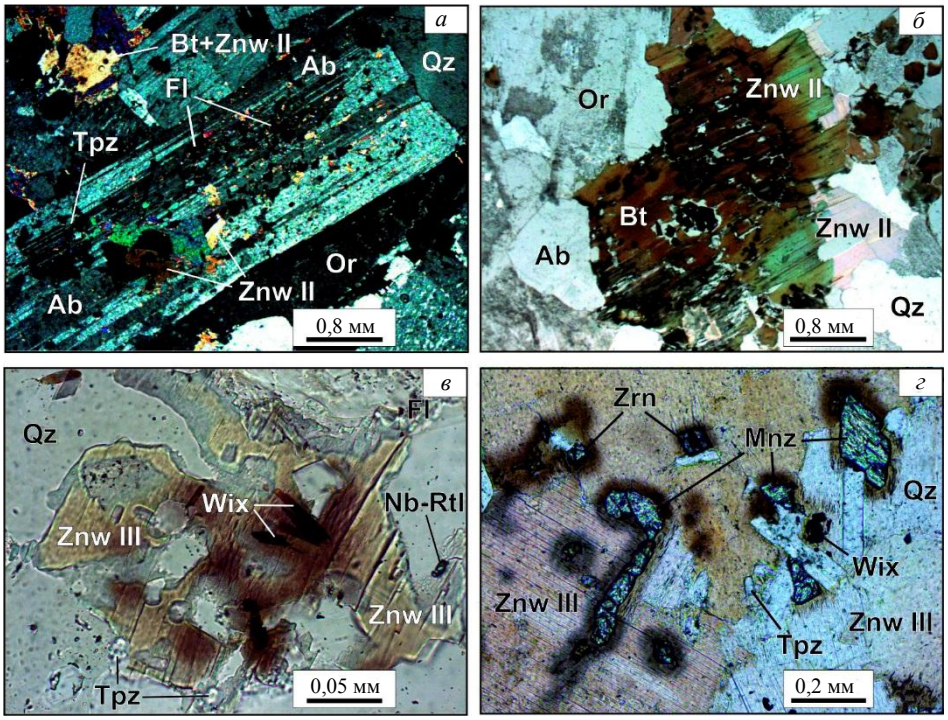



Рис.2. Цвиттеры плутона Северный, фотографии шлифов с анализатором (*а*); без анализатора (*б-г*): *а* – замещение альбита циннвальдитом II, флюоритом, топазом в лейкограните чаунского комплекса (Дайковое); *б* – замещение биотита циннвальдитом II в лейкограните чаунского комплекса (месторождение Кекурное); *в* – топаз-кварц-циннвальдитовый цвиттер с вольфрамоиксиолитом, Nb-содержащим рутилом (рудопроявление Стремительное); *г* – топаз-кварц-циннвальдитовый цвиттер с монацитом-(Ce), Hf-содержащим цирконом, вольфрамоиксиолитом (рудопроявление Валунное). Здесь и далее аббревиатуры минералов по [26]

определяет измененный внешний облик и геохимические особенности лейкогранитов плутона Северный. Это заставило некоторых исследователей представить измененные породы главной фазы чаунского комплекса как ЛФГ [25].

В плутоне Северный закартированы поля полнопроявленных цвиттеров площадью от 200-500 м$^2$ до 1-2 км$^2$, развивающихся по лейкогранитам и Li-F-гранитам. Наиболее крупные поля цвиттеров установлены на месторождениях Кекурное и Глубокое. По данным бурения, плащеобразные ареалы цвиттеров мощностью 5-15 м приурочены к висячим контактам силлов ЛФГ. Отдельные тела представлены небольшими пластовыми залежами, гнездами и субвертикальными зонами мощностью 0,1-4,5 м, длиной 1-70 м, северо-северо-восточного и субширотного простирания. По составу выделены циннвальдит-кварцевые и топаз-кварцевые цвиттеры. Циннвальдит-кварцевые разности состоят из кварца (70-90 %), циннвальдита III или Li-содержащего сидерофиллита (10-20 %), топаза и флюорита (1-10 %). Топаз-кварцевые цвиттеры сложены кварцем (60-90 %) и топазом (20-30 %), содержат примесь флюорита и циннвальдита (1-10 %). В цвиттерах фиксируются сильно корродированные зерна плагиоклаза и ортоклаза исходных гранитов (рис.2, *в*, *г*).

В агрегатах цвиттеров неправильные или гипидиоморфные зерна циннвальдита III образуют цепочки и гнезда в гранобластовом кварцевом агрегате, реже слагают прожилковидные обособления с кварцем и топазом. Топаз распределен по границам слюды и кварца, иногда обрастает слюду, срастается с флюоритом. Флюорит цвиттеров, в отличие от флюорита ЛФГ, почти не встречается в виде включений в слюде. Текстура полнопроявленных цвиттеров массивная, структура мелко- и среднезернистая (0,5-3 мм), лепидогранобластовая. Акцессорные минералы (монацит-(Ce), Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрамоиксиолит, W-содержащий колумбит-(Mn) и др.) тяготеют к слюдяным и топазовым обособлениям [24] (рис.3, *а*, *б*).

*Турмалиниты* слагают жильные тела переменного состава и строения, пересекающие залежи цвиттеров. Наиболее распространены мусковит-кварц-турмалиновые метасоматиты, развитые в центральной части плутона в виде крутозалегающих зональных тел мощностью 1,5-2,5 м. Тыловая


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

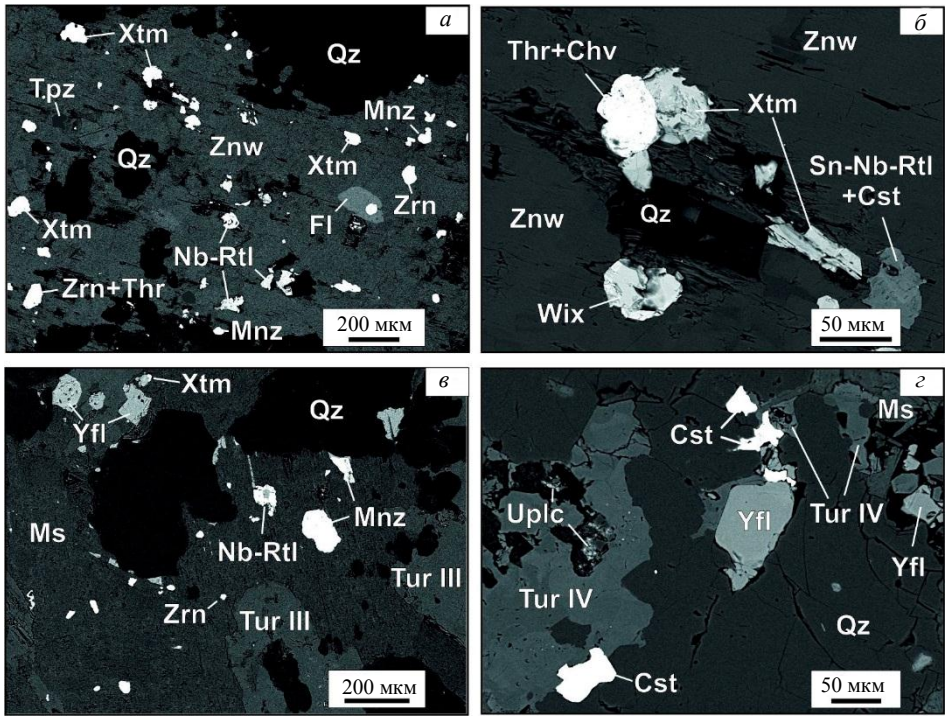



Рис.3. Оловянно-редкометалльные минералы цвиттеров и турмалинитов плутона Северный (изображения в обратнорассеянных электронах):
*а* – топаз-кварц-циннвальдитовый цвиттер с Nb-содержащим рутилом, ксенотимом-(Y), монацитом-(Ce), Hf-содержащим цирконом, торитом (месторождение Кекурное);
*б* – включения в циннвальдите цвиттера вольфрамоиксиолита, ксенотима-(Y), Nb-W-Sn-содержащего рутила, торита, черновита-(Y), касситерита (Кекурное);
*в* – кварц-турмалин-мусковитовый метасоматит с монацитом-(Ce), ксенотимом-(Y), иттрофлюоритом и Hf-цирконом (Стремительное); *г* – касситерит, уранополикраз, иттрофлюорит в рудной турмалин-кварцевой жиле (Утиное)

зона сложена микрозернистым агрегатом турмалина, кварца, касситерита; промежуточная – мелкозернистым кварцем и турмалином с примесью мусковита и флюорита; фронтальная – микро- и мелкозернистым агрегатом мусковита, кварца, флюорита, турмалина. Зоны турмалинитов пересекают гранитоидные интрузии всех комплексов. Во многих случаях турмалинитовые жилы образуются вдоль разрывных нарушений в зальбандах и осевой части даек гранит-порфиров, монцогранит-порфиров (см. рис.1). Многократно отмечены случаи пересечения цвиттеров кварц-турмалиновыми жилами и сопряженными с ними кварц-мусковитовыми метасоматитами с формированием гетерогенных метасоматитов, сложенных псевдоморфозами мусковита по циннвальдиту и топазу, содержащих реликты топаза, арсенопирита и минералы Nb, Ta, REE, Y, W, Bi.

Все турмалиновые образования плутона разделены с учетом их рудоносности и особенностей турмалина на четыре группы: 1) шлиры турмалина I в пегматоидных гнездах; 2) дорудные жилы с турмалином II и флюоритом; 3) раннерудные жилы с турмалином III; 4) рудные жилы с турмалином IV.

1. Многочисленные шлиры турмалина I с кварц-мусковитовыми ореолами приурочены к пегматоидным гнездам размером до 10 см в биотитовых лейкогранитах по всей площади плутона. Шлиры содержат флюорит, топаз, монацит-(Ce), циркон, торит, рутил. Турмалин I образует ксеноморфные и шестоватые сложнозональные кристаллы с поперечником до 5 мм, которые плеохроируют от бледно-бурого и бесцветного до голубого. По краям иногда развита темно-синяя неплеохроирующая кайма.

2. Дорудные жилы с турмалином II и флюоритом представляют собой редкие тела мощностью 2-80 см и протяженностью до 5-8 м. Жилы сложены гетерогранобластовым агрегатом кварца размером 0,1-2 см с густой вкрапленностью турмалина. Турмалин ксеноморфный размером 0,5-5 мм или шестоватый поперечником 1-3 мм и длиной до 2-3 см. Сложнозональные кристаллы турмалина II плеохроируют от светло-коричневого (почти бесцветного) до бурого, от сероватого до


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*Записки Горного института.* 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 170-183
© В.И.Алексеев, Ю.Б.Марин, И.А.Бакшеев, 2025

сине-зеленого. С ними ассоциируют полихромный флюорит, топаз, фенгит, иногда мельчайший темно-бурый касситерит (рис.4, *а*). В кристаллах турмалина II наблюдаются микропрожилки и каемки темно-синего неплеохроирующего турмалина.

3. Раннерудные жилы с турмалином III мощностью до 0,1 м и длиной в первые метры встречаются относительно редко по всей площади плутона. Жилы сложены черными мелко- и среднезернистыми кварц-турмалиновыми метасоматитами массивной текстуры. Турмалин III образует призматические или игольчатые кристаллы поперечником 0,1-0,5 мм, длиной до 5 мм. Окраска турмалина III зональная: темно-бурая в осевой части и темно-синяя по краям. Наблюдаются мелкие (длиной несколько десятков мкм и шириной несколько мкм) кристаллы синего и зеленого неплеохроирующего турмалина IV, которые нарастают на крупные кристаллы турмалина III (бассейны руч. Стремительный и Гусиный) (рис.4, *в*). Турмалин III ассоциирует с акцессорными иттрофлюоритом, топазом, касситеритом, монацитом-(Ce), Nb-содержащим рутилом, алланитом-(Ce), алланитом-(Y) (см. рис.3, *в*, рис.4, *б*, *в*).

4. Жилы с турмалином IV имеют субмеридиональное простирание, крутое падение (80-85°), мощность от первых см до 0,5 м, в раздувах до 1,5 м, длина жил до 200 м. Системы параллельных жил протягиваются на сотни метров и первые километры (см. рис.1). Околожильные изменения гранитов представлены турмалин-кварц-мусковитовыми метасоматитами. Турмалин жил и турмалин околожильных мусковит-кварц-турмалиновых метасоматитов не отличаются по составу и описаны как турмалин IV. Жилы имеют темно-серую окраску, пятнистое или брекчиевидное строение, содержат иттрофлюорит. В жилах, особенно в брекчиевидных разностях, содержится в промышленном количестве касситерит, ассоциирующий с монацитом-(Ce) и апатитом (см. рис.3, *г*, рис.4, *г*). Турмалин IV образует синевато-зеленые слабозональные кристаллы длиной до 1 мм, а шириной от нескольких до нескольких сотен мкм. На месторождениях Пыркакайское, Глубокое, Утиное жилы с турмалином IV имеют существенно кварцевый состав. В среднезернистом кварцевом агрегате наблюдаются линзы и прожилки мелко-среднезернистого кварца с вкраплениями радиально-лучистых агрегатов игольчатого густо-синего турмалина IV, зеленого флюорита и микрозернистого (десятые доли мм) касситерита. Содержание касситерита от 0,1 до 5-15 % объема жил.

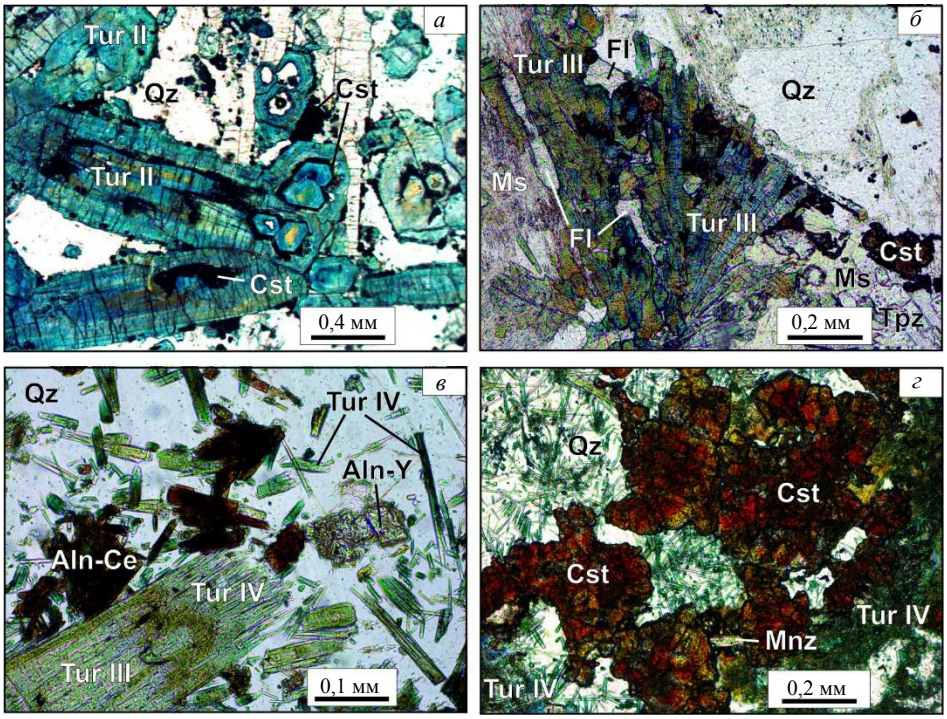



Рис.4. Турмалиниты плутона Северный (фотографии шлифов без анализатора):
*а* – турмалин II с включениями касситерита в дорудной жиле 2-й группы (рудопроявление Стремительное); *б* – флюорит-мусковит-кварцевый метасоматит с турмалином III и касситеритом в раннерудной жиле 3-й группы (месторождение Кекурное); *в* – турмалин III с нарастающим турмалином IV в раннерудной жиле 3-й группы с алланитом-(Ce), алланитом-(Y) (Кекурное); *г* – турмалин IV, касситерит и монацит-(Ce) в рудной жиле 4-й группы (Кекурное)


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

**Минералогические особенности цвиттеров и турмалинитов**

Цвиттеры сложены циннвальдитом III, содержащим редкие щелочи (табл.1) и примеси редких металлов ($Nb_2O_5$ – 0,03-0,14; $Ta_2O_5$ – 0,001-0,002; $Y_2O_3$ – 0,01-0,03; $Yb_2O_3$ – 0,003-0,005 мас.%), для которого характерны высокая железистость и глиноземистость. По данным геотермометра Ti-in-biotite [20], температура кристаллизации циннвальдита цвиттеров – 430 °С. Температура кристаллизации циннвальдита, замещающего магматический биотит в цвиттеризированных гранитах, также < 500 °С.

Цвиттеры содержат вольфрам-редкометалльную акцессорную минерализацию: иттрофлюорит, монацит-(Ce), Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрамоиксиолит, W-содержащий колумбит-(Mn), W-содержащий ильменит, берилл, ксенотим-(Y), черновит-(Y), ишикаваит, висмутопирохлор, уранополикраз, касситерит [24] (см. рис.2, *в*, *г*, рис.3, *а*, *б*).

*Таблица 1*

**Химический состав слюд ряда сидерофиллит – полилитионит в цвиттеризированных лейкогранитах и цвиттерах плутона Северный, мас.%**

| Компонент | Группы проб | | | | Компонент | Группы проб | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $SiO_2$ | 40,16 | 43,31 | 44,81 | 42,09 | Si | 3,02 | 3,18 | 3,26 | 3,10 |
| $TiO_2$ | 0,45 | 0,23 | 0,16 | 0,38 | Ti | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| $Al_2O_3$ | 20 | 19,17 | 18,93 | 19,39 | Al | 1,77 | 1,66 | 1,62 | 1,68 |
| $Fe_2O_3$ | 2,1 | 1,6 | 1,51 | 1,45 | $Fe^{3+}$ | 0,12 | 0,09 | 0,08 | 0,08 |
| FeO | 19,21 | 14,72 | 14,04 | 15,73 | $Fe^{2+}$ | 1,21 | 0,91 | 0,85 | 0,97 |
| MnO | 0,62 | 1,02 | 0,51 | 0,64 | Mn | 0,04 | 0,06 | 0,03 | 0,04 |
| MgO | 0,6 | 0,49 | 0,63 | 0,89 | Mg | 0,07 | 0,05 | 0,07 | 0,10 |
| CaO | 0,68 | 0,57 | 0,51 | 0,65 | Ca | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| $Na_2O$ | 0,86 | 0,93 | 0,87 | 0,81 | Na | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,08 |
| $K_2O$ | 8,57 | 9,11 | 8,97 | 9,21 | K | 0,82 | 0,85 | 0,83 | 0,86 |
| $Li_2O$ | 1,55 | 2,83 | 3,01 | 3,13 | Li | 0,47 | 0,84 | 0,88 | 0,93 |
| $Rb_2O$ | 0,53 | 0,78 | 0,92 | 1,12 | Rb | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |
| $Cs_2O$ | 0,033 | 0,041 | 0,046 | 0,055 | OH | 1,06 | 0,87 | 0,86 | 0,83 |
| F | 3,94 | 4,87 | 4,96 | 5,03 | F | 0,94 | 1,13 | 1,14 | 1,17 |
| O=F | 1,66 | 2,05 | 2,09 | 2,12 | | | | | |
| Сумма | 100,17 | 99,98 | 100,18 | 100,80 | | | | | |
| *n* | 3 | 3 | 2 | 4 | | | | | |

*Примечания.* *n* – число проб; 1-4 – средний состав слюды (1 – измененный биотит в слабо цвиттеризированных (15 %) лейкогранитах, 2 – умеренно цвиттеризированных (40 %) лейкогранитах, 3 – циннвальдит в сильно цвиттеризированных (70 %) лейкогранитах, 4 – цвиттерах). Расчет формул выполнен для 12 атомов кислорода на формульную единицу (O=$F_2$).

Установлены виды турмалина из описанных выше четырех групп турмалиновых образований:

• Турмалин I из шлиров в пегматоидных гнездах в основном относится в фтор-шерлу, некоторые составы классифицируются как фтор-дравит, шерл, фойтит, окси-шерл и окси-фойтит (рис.5, *а*, *в*, *д*). Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ в турмалине шлиров составляет 9-10 %.

• Турмалин II из жил с флюоритом по химическому составу относится в фтор-шерлу и шерлу; некоторые составы классифицируются как фойтит, окси-шерл и окси-фойтит (рис.5, *а*, *в*, *д*). Турмалин II содержит Sc (до 0,24 мас.% $Sc_2O_3$) – это наиболее высокая концентрация элемента, когда-либо зафиксированная в турмалине. Другая особенность турмалина II – высокое содержание Li – 135-163 г/т. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ составляет 7-11 %.

• Турмалин III по составу отнесен к фтор-шерлу, шерлу, окси-шерлу, фойтиту, окси-фойтиту и дравиту (рис.5, *а*, *в*, *д*). Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ варьируется от 3 до 9 %.

• Турмалин IV можно отнести по химическому составу к шерлу, окси-шерлу и, вероятно, ферро-бозииту; меньшее число составов отвечает дравиту, окси-дравиту, фтор-шерлу, фойтиту (рис.5, *б*, *г*, *е*). Ферро-бозиит, слагающий каймы кристаллов, оловосодержащий – до 1,28 мас.% $SnO_2$. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ достигает 14 %.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© В.И.Алексеев, Ю.Б.Марин, И.А.Бакшеев, 2025

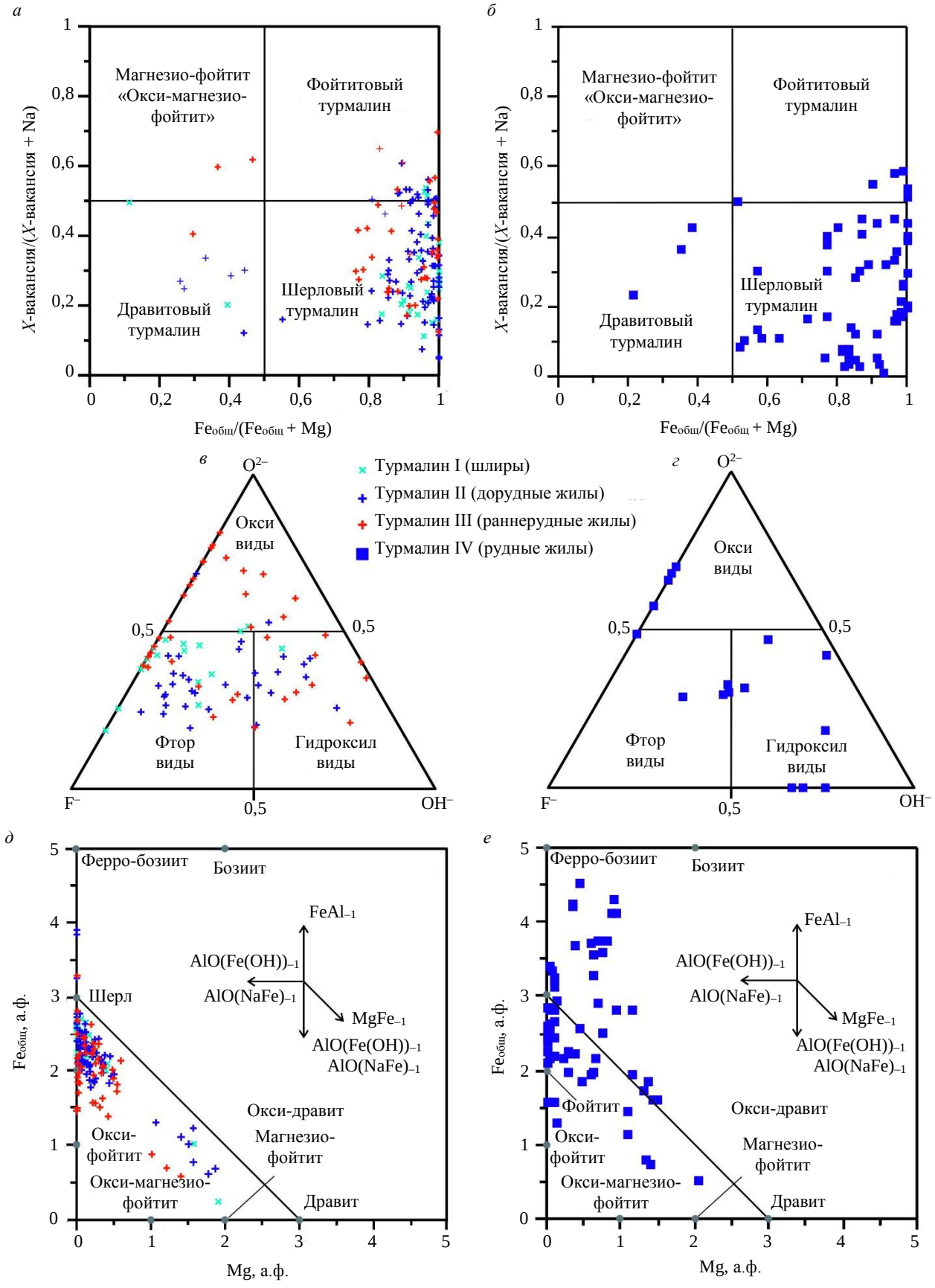



Рис.5. Двойные и треугольные диаграммы [22], иллюстрирующие составы турмалина плутона Северный и возможные замещения:
*а*, *б* – $Fe_{общ}/(Fe_{общ} + Mg)$ – *X*-вакансия/(*X*-вакансия + Na);
*в*, *г* – $O^{2-}$ – $F^-$ – $OH^-$ в позиции *W*; *д*, *е* – Mg – $Fe_{общ}$


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Обобщая данные о минералогии турмалина плутона Северный, отметим, что вариации его состава заключены в пределы шерла, фойтита и бозиита. От дорудных турмалинитов к рудным наблюдается уменьшение роли фтор-шерла и возрастание значения окси-шерла и ферро-бозиита при постепенном повышении содержания лития и переменном отношении $Fe^{3+}/Fe_{общ}$.

В дорудных жилах с турмалином II наблюдаются монацит-(Ce), торит, рутил и очень редко мелкий (0,01-0,3 мм) касситерит (см. рис.4, *а*). Раннерудные жилы с турмалином III содержат редкоземельно-оловянную акцессорную минерализацию: касситерит, монацит-(Ce), висмутопирохлор, ксенотим-(Y), апатит-(CaF), флюоцерит-(Ce), иттрофлюорит, алланит-(Ce), алланит-(Y) (табл.2), ишикаваит, арсенаты Y, Cu, Fe – черновит-(Y), агардит-(Y) и др. (см. рис.3, *в*, рис.4, *б*, *в*). Акцессорные и рудные минералы жил с турмалином IV: касситерит, монацит-(Ce), апатит, олововольфрам-ниобиевый рутил, флюоцерит-(Ce), иттрофлюорит, поликраз, уранополикраз, халькопирит, пирит, сакураиит (см. рис.3, *г*, рис.4, *г*).

*Таблица 2*

**Химический состав алланита-(Ce) и алланита-(Y) в турмалиновых метасоматитах плутона Северный [27], мас.%**

| Компонент | Алланит-(Ce) | | | | Алланит-(Y) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $SiO_2$ | 35,55 | 37,59 | 35,54 | 35,28 | 35,61 | 33,97 | 35,22 | 35,79 |
| $Al_2O_3$ | 14,42 | 13,91 | 13,53 | 14,43 | – | 0,83 | 0,42 | 0,54 |
| FeO* | 17,37 | 15,61 | 19,18 | 17,27 | 9,38 | 8,88 | 7,72 | 8,94 |
| CaO | 12,59 | 9,72 | 14,15 | 11,75 | 12,31 | 10,66 | 8,06 | 10,56 |
| $La_2O_3$ | 4,69 | 4,84 | 4,82 | 4,99 | – | – | – | – |
| $Ce_2O_3$ | 11,28 | 13,61 | 12,47 | 12,63 | – | 0,27 | – | 0,06 |
| $Nd_2O_3$ | 3,81 | 3,41 | 2,68 | 3,05 | – | 0,69 | 1,15 | 0,54 |
| $Sm_2O_3$ | – | – | – | – | – | 1,83 | 0,89 | 0,54 |
| $Gd_2O_3$ | – | – | – | – | – | 1,42 | 3,12 | 0,86 |
| $Dy_2O_3$ | – | – | – | – | – | 3,55 | 3,83 | 1,61 |
| $Er_2O_3$ | – | – | – | – | – | 3,45 | – | 0,51 |
| $Yb_2O_3$ | – | – | – | – | – | 2,89 | – | 0,42 |
| $Y_2O_3$ | – | – | | – | 42,34 | 30,77 | 38,05 | 38,69 |
| $ThO_2$ | – | – | – | 0,01 | – | – | – | 0,03 |
| Сумма | 99,71 | 98,69 | 100,39 | 99,41 | 99,64 | 99,21 | 98,47 | 99,09 |
| Si | 3,28 | 3,48 | 3,15 | 3,28 | 3,53 | 3,55 | 3,63 | 3,59 |
| Al | 1,57 | 1,52 | 1,50 | 1,58 | | 0,10 | 0,05 | 0,06 |
| Fe* | 1,34 | 1,21 | 1,51 | 1,34 | 0,78 | 0,78 | 0,67 | 0,75 |
| Σ M | 2,91 | 3,03 | 3,01 | 2,92 | 0,78 | 0,88 | 0,72 | 0,81 |
| Ca | 1,25 | 0,96 | 1,42 | 1,17 | 1,31 | 1,19 | 0,89 | 1,14 |
| La | 0,16 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | | | | |
| Ce | 0,38 | 0,46 | 0,43 | 0,43 | | 0,01 | | 0,00 |
| Nd | 0,13 | 0,11 | 0,09 | 0,10 | | 0,03 | 0,04 | 0,02 |
| Sm | | | | | | 0,07 | 0,03 | 0,02 |
| Gd | | | | | | 0,05 | 0,11 | 0,03 |
| Dy | | | | | | 0,12 | 0,13 | 0,05 |
| Er | | | | | | 0,11 | | 0,02 |
| Yb | | | | | | 0,09 | | 0,01 |
| Y | | | | | 2,23 | 1,71 | 2,09 | 2,07 |
| Th | | | | 0,00 | | | | 0,00 |
| Σ A | 1,92 | 1,70 | 2,11 | 1,87 | 3,54 | 3,38 | 3,29 | 3,36 |

*Примечания.* 1-3, 5-7 – представительные микрорентгеноспектральные анализы (Санкт-Петербургский горный университет) алланита-(Ce) и алланита-(Y) в турмалинитах; 4, 8 – средний состав алланита-(Ce) и алланита-(Y) (33 и 12 анализов); прочерк – элемент не обнаружен; FeO* = FeO + $Fe_2O_3$. Расчет формул выполнен для 8 катионов с уравновешиванием на 12,5 ионов O.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Жилы с турмалином III являются главными оловорудными образованиями плутона Северный и содержат до 5-15 % касситерита (см. рис.4, *б*, *в*). Характерные примеси в касситерите турмалиновых жил: FeO – 0,82-1,52; $WO_3$ – 0,00-0,37; $TiO_2$ – 0,04-0,12; Nb – 0,01-0,11; In – 0,00-0,02; Ce – 0,00-0,03; Sc – 0,00-0,02 % (табл.3). По составу касситерит Северного плутона близок к касситериту грейзеновых месторождений, связанных с ЛФГ: Альтенберг (Германия), Орловское (Забайкалье), Кестер (Якутия). Наблюдается сходство с касситеритом грейзеновых месторождений Дальнего Востока (Карадубское, Правоурмийское, Приамурье).

*Таблица 3*

**Химический состав касситерита в турмалиновых метасоматитах и жилах Северного массива**

| Компонент | Пробы | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $SnO_2$, % | 99,58 | 98,93 | 98,04 | 99,08 | 97,26 | 97,65 | 97,29 | 99,45 | 99,62 | 99,78 |
| $WO_3$, % | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,00 |
| $Fe_2O_3$, % | 0,00 | 0,82 | 1,59 | 1,09 | 2,51 | 2,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| $TiO_2$, % | 0,00 | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,13 | 0,00 |
| Be, г/т | 0,00 | 14 | 20 | 11 | 31 | 8 | 37 | 100 | 9 | 20 |
| Sc, г/т | 0,01 | 30 | 45 | 15 | 20 | 17 | 10 | 200 | 50 | 260 |
| Ce, г/т | 0,03 | 60 | 90 | 30 | 50 | 1600 | 110 | 1000 | 210 | 70 |
| In, г/т | 0,01 | 170 | 150 | 74 | 60 | 80 | 49 | 50 | 20 | 24 |
| Nb, г/т | 0,09 | 210 | 280 | 100 | 230 | 230 | 200 | 1100 | 550 | 380 |
| Сумма | 99,73 | 99,92 | 99,69 | 100,19 | 99,81 | 99,71 | 98,45 | 99,80 | 99,83 | 99,83 |
| Nb/In | 6,43 | 1,24 | 1,87 | 1,35 | 3,83 | 2,88 | 4,10 | 22,00 | 27,50 | 15,83 |

*Примечания*. 1-10 – представительные анализы касситерита месторождений (1-6 – Кекурное, 7 – Стремительное, 8-10 – Утиное). Sn, W, Fe, Ti – рентгеноспектральный анализ (СПбГУ, аналитик Е.В.Савва). Be, Sc, Ce, In, Nb – SEM-EDS (Санкт-Петербургский горный университет, аналитик Е.В.Пигова).

Встречаются турмалиновые жилы с богатой редкоземельной минерализацией – алланитом-(Ce) и замещающим его флюоцеритом-(Ce). В сростках с алланитом-(Ce) установлен Nd-содержащий алланит-(Y) (см. рис.4, *г*).

**Об ассоциации грейзенов и турмалинитов плутона Северный**

Установленная в плутоне Северный ассоциация минерализованных грейзенов (цвиттеров) и турмалинитов заслуживает внимания и требует минералого-петрографической и минерагенической оценок, так как подобные комплексы характерны для крупных редкометалльно-оловорудных месторождений. К ним относятся Правоурмийское (Приамурье) [6], Ярославское (Приморье) [7], Кугарок и Лост-Ривер (Аляска) [28, 29], Сент-Остелл и Трегоннинг-Годольфин (Англия) [30, 31], Эренфридерсдорф (Германия) [32], Викманов (Чехия) [33], Панаскейра (Португалия) [34] и др.

Главная особенность выявленной ассоциации заключается в пространственной связи рудоносных метасоматитов с ЛФГ, в эндоконтакте и экзоконтакте интрузий которых располагаются залежи цвиттеров, а зоны турмалиновых метасоматитов – в ареалах распространения ЛФГ и цвиттеров (см. рис.1). Если для цвиттеров генетическая связь с ЛФГ установлена [8, 9], то генезис турмалинитов требует изучения. Кварц-турмалиновые жилы и околожильные турмалин-кварц-мусковитовые метасоматиты иногда ошибочно относят к «турмалиновым грейзенам» [31, 35]. Несостоятельность такого определения турмалинитов показал Д.В.Рундквист с соавторами, отмечавший, что «разделение грейзеновых и касситерит-турмалин-хлоритовых типов месторождений вызывает значительные трудности, имеющие, с одной стороны, исторические корни, с другой – объективные причины из-за широкого распространения турмалина как в типичных грейзеновых, так и в касситерит-турмалин-хлоритовых месторождениях...» [36].

Цвиттеры и турмалиниты плутона Северный являются ассоциацией, возникшей в связи с магматизмом, продуцирующим интрузии Li-F гранитов. Генетическое родство метасоматитов отражается в сходстве геохимической специализации цвиттеров (Nb, W, Y, Ce, Li, Sn, Th, As) и турмалинитовых метасоматитов (Sn, Ce, Y, W, Sc, Li). Аргументом в пользу принадлежности цвиттеров


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

и турмалинитов к единой гидротермальной системе служит наличие бора во флюидных включениях в кварце цвиттеров. При ведущей роли в составе летучих компонентов фтора концентрация бора в цвиттерах, по данным анализа водных вытяжек из кварца, составляет 1±0,3 г/кг воды. Рамановская спектроскопия многофазовых включений в кварце цвиттеров показала наличие включений борной кислоты [24]. На связь ассоциации цвиттеры – турмалиниты с ЛФГ указывают и данные о высокой концентрации бора в расплавных включениях ЛФГ известных массивов: Орловский (Восточное Забайкалье, до 2,09 мас.% $B_2O_3$) [37], Ары-Булак (Восточное Забайкалье, до 1138 г/т B) [38], Циннвальд (Германия, до 640 г/т B) [39] и др.

Характерной особенностью турмалинитов, ассоциирующих с цвиттерами, является разнообразие минеральных видов турмалина. В пегматоидных шлирах и дорудных жилах турмалин I относится к шерловым и фойтитовым видам при существенной роли фтор-шерла. Турмалин II дорудных жил содержит повышенную концентрацию скандия. Турмалин III раннерудных жил – это преимущественно окси-шерл и окси-фойтит. Турмалин IV рудных жил представлен окси-шерлом, шерлом и оловосодержащим ферро-бозиитом. От дорудного турмалина I шлиров до синрудного турмалина IV наблюдается усиление отрицательной корреляции между $Fe_{общ}$ и $Al_{общ}$: –0,49 → –0,52 → –0,77 → –0,86. Отношение $Fe^{3+}/Fe_{общ}$ изменяется, %: 9-10 → 7-11 → 3-9 → 14, что указывает на кристаллизацию турмалина при переменном окислительном потенциале минералообразующего флюида.

На связь турмалинитов с ЛФГ и цвиттерами указывают высокие содержания Li и F в турмалине. В целом более низкое содержание F и более высокое Li в турмалине раннерудных и рудных жил по сравнению с турмалином шлиров и дорудных жил указывает на снижение фугитивности фтора и повышение активности Li в процессе минералообразования. Не исключено, что снижение $f_{F2}$ могло быть одним из факторов, обусловивших начало отложения касситерита в раннерудных жилах. В работе [40] показано, что с ростом содержания фтора в гранитном расплаве увеличивается растворимость $SnO_2$. Вполне возможно, что фтор аналогичным образом влияет на растворимость $SnO_2$ и в гидротермальном флюиде. Учитывая наличие ферро-бозиита в рудных жилах, можно предположить увеличение окислительного потенциала растворов, что привело к кристаллизации касситерита в жилах с турмалином IV. Возможность кристаллизации касситерита в окислительных условиях показана в статье [41].

Ассоциация цвиттеров и турмалинитов плутона Северный характеризуется комплексной редкометалльно-оловянной рудоносностью. Оловорудная минерализация, разведанная на ряде месторождений, приурочена к кварцевым жилам (месторождения Пыркакайское, Утиное, Глубокое и др.). В жилах турмалинитов наиболее оловоносными являются брекчиевидные агрегаты, в которых касситерит концентрируется в кварцевых гнездах и прожилках (месторождения Ергувеем, Кекурное, Стремительное). Редкометалльная минерализация сопровождает цвиттеры (Nb, Ce, Y, W, Bi) и турмалиниты (Y, Ce). С учетом редкометалльной минерализации цвиттеров и редкоземельно-оловянной минерализации турмалинитов полученные результаты можно использовать для оценки минерагенического потенциала и разработки критериев прогнозирования редкоземельно-редкометалльного (Nb, Ce, Y, W, Bi) оруденения плутона Северный.

**Заключение**

В плутоне Северный установлена ассоциация редкометалльно-оловоносных метасоматитов, связанных с магматизмом, продуцирующим интрузии Li-F гранитов. Для выявленной метасоматической ассоциации характерны особенности:

• Сонахождение залежей цвиттеров, тел турмалиновых метасоматитов и малых интрузий Li-F гранитов в общих ареалах в центральной части плутона.

• Широкий спектр минеральных видов турмалина в составе турмалинитовых жил и околожильных турмалинсодержащих метасоматитов, связанный с широкими вариациями содержания воды, фтора и лития, а также степени окисления железа.

• Эволюция турмалина от Sc-содержащего фтор-шерла в дорудных метасоматитах до окси-шерла и оловосодержащего ферро-бозиита в оловорудных метасоматитах при постепенном повышении содержания лития и переменной степени окисления железа.

• Сочетание в цвиттерах и турмалинитах касситеритовой и редкометалльной минерализации.

Результаты проведенных комплексных структурно-геологических, петрографических и минералогических исследований цвиттеров и турмалинитов плутона Северный могут быть использованы для оценки минерагенического потенциала района и разработки критериев прогнозирования редкометалльного (Nb, Ce, Y, W, Bi) оруденения.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. М.: Роснедра, 2021. 572 с.

2. *Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100

3. *Артемьев Д.С., Крымский Р.Ш., Беляцкий Б.В., Ашихмин Д.С.* Возраст оруденения Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка): результаты Re-Os изотопного датирования // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 266-278. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.266

4. *Дашко Р.Э., Романов И.С.* Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н) // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 20-32. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.3

5. *Евдокимов А.Н., Фокин В.И., Шануренко Н.К.* Золото-редкометальное и сопутствующее оруденение западной части острова Большевик, архипелаг Северная Земля // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 687-697. DOI: 10.31897/PMI.2022.94

6. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 книгах. Кн. 1 / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 527 с.

7. *Rizvanova N.G., Alenicheva A.A., Skublov S.G. et al.* Early Ordovician Age of Fluorite-Rare-Metal Deposits at the Voznesensky Ore District (Far East, Russia): Evidence from Zircon and Cassiterite U–Pb and Fluorite Sm–Nd Dating Results // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 11. № 1154. DOI: 10.3390/min11111154

8. *Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Козлов В.Д., Владыкин Н.В.* Метасоматические цвиттеры и связанное с ними редкометальное оруденение (на примере месторождений Монголии и Чехословакии) // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука, 1974. С. 42-53.

9. *Бородкин Н.А., Приставко В.А.* Выделение цвиттеров по петрохимическим и геохимическим критериям // Отечественная геология. 2012. № 4. С. 49-56.

10. *Томсон И.Н., Тананаева Г.А.* Базовая формация оловорудных цвиттеров и их соотношение с сопутствующими жильными месторождениями // Этапы образования рудных формаций. М.: Наука, 1989. С. 72-78.

11. *Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В.* Металлогения гидротермально-метасоматических образований. СПб: ВСЕГЕИ, 2012. 560 с.

12. *Плющев Е.В., Ушаков О.П., Шатов В.В., Беляев Г.М.* Методика изучения гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1981. 262 с.

13. *Войтеховский Ю.Л., Захарова А.А.* Петрографические структуры и равновесия Харди – Вайнберга // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 133-138. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.133

14. *Марин Ю.Б.* О минералогических исследованиях и использовании минералогической информации при решении проблем петро- и рудогенеза // Записки Российского минералогического общества. 2020. Ч. 149. № 4. С. 1-15. DOI: 10.31857/S0869605520040048

15. *Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л.* Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов // Записки Российского минералогического общества. 2022. Ч. 151. № 1. С. 114-124. DOI: 10.31857/S0869605522010087

16. *Луфуанди Матондо И.П., Иванов М.А.* Состав и вероятный коренной источник колумбита из аллювиальных отложений района Маюко (Республика Конго) // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 139-149. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.139

17. *Gawad A.E.A., Ene A., Skublov S.G. et al.* Trace Element Geochemistry and Genesis of Beryl from Wadi Nugrus, South Eastern Desert, Egypt // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 2. № 206. DOI: 10.3390/min12020206

18. *Gvozdenko T.A., Baksheev I.A., Khanin D.A. et al.* Iron-bearing to iron-rich tourmalines from granitic pegmatites of the Murzinka pluton, Central Urals, Russia // Mineralogical Magazine. 2022. Vol. 86. Iss. 6. P. 948-965. DOI: 10.1180/mgm.2022.104

19. *Григорьев Д.П.* Онтогения минералов. Львов: Изд-во Львовского университета, 1961. 284 с.

20. *Chun-Ming Wu, Hong-Xu Chen.* Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite- or rutile-bearing crustal metapelites // Science Bulletin. 2015. Vol. 60. Iss. 1. P. 116-121. DOI: 10.1007/s11434-014-0674-y

21. *Rieder M., Cavazzini G., Dyakonov Y.S. et al.* Nomenclature of the Micas // Clays and clay minerals. 1998. Vol. 46. Iss. 5. P. 586-595. DOI: 10.1346/CCMN.1998.0460513

22. *Henry D.J., Novák M., Hawthorne F.C. et al.* Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. Iss. 5-6. P. 895-913. DOI: 10.2138/am.2011.3636

23. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-58-(60) – Билибино. Объяснительная записка. СПб: ВСЕГЕИ, 1999. 146 с.

24. *Кургузова А.В.* Условия формирования цвиттеров и турмалинитов Северного массива (Чукотка): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. 20 с.

25. *Warr L.N.* IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85. Iss. 3. P. 291-320. DOI: 10.1180/mgm.2021.43

26. *Дудкинский Д.В., Ефремов С.В., Козлов В.Д.* Литий-фтористые граниты Чукотки и их геохимические особенности // Геохимия. 1994. № 3. С. 393-402.

27. *Алексеев В.И., Марин Ю.Б., Гембицкая И.М.* Парагенезис алланита-(Y) и алланита-(Ce) в турмалинитах Северного массива (Чукотка) и соотношение иттрия и лантаноидов в алланите // Записки Российского минералогического общества. 2015. Т. 144. № 6. С. 83-93.

28. *Dobson D.C.* Geology and alteration of the Lost River tin-tungsten-fluorine deposit, Alaska // Economic Geology. 1982. Vol. 77. № 4. С. 1033-1052. DOI: 10.2113/gsecongeo.77.4.1033

29. *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. Vol. 55. Iss. 1. P. 79-106. DOI: 10.1007/s00126-019-00883-7

30. *Duchoslav M., Marks M.A.W., Drost K. et al.* Changes in tourmaline composition during magmatic and hydrothermal processes leading to tin-ore deposition: The Cornubian Batholith, SW England // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 83. P. 215-234. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.012



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

31. *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. Vol. 104. P. 384-402. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.11.012

32. *Seifert Th., Kempe U.* Sn-W-Lagerstatten und spatvariszische Magmatite des Erzgebirges // Beiheft zu European Journal of Mineralogy. 1994. Vol. 6. № 2. P. 125-172.

33. *Štemprok M., Pivec E., Langrová A.* The petrogenesis of a wolframite-bearing greisen in the Vykmanov granite stock, Western Krušné hory pluton (Czech Republic) // Bulletin of Geosciences. 2005. Vol. 80. № 3. P. 163-184.

34. *Marignac C., Cuney M., Cathelineau M. et al.* 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. Vol. 10. Iss. 6. № 562. DOI: 10.3390/min10060562

35. *Грачева О.С.* Грейзены Северо-Востока СССР. М.: Недра, 1974. 172 с.

36. *Рундквист Д.В., Денисенко В.К., Павлова И.Г.* Грейзеновые месторождения (онтогенез и филогенез). М.: Недра, 1970. 328 с.

37. *Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф., Волкова Е.В. и др.* Состав расплава Li-F гранитов и его эволюция в процессе формирования рудоносного Орловского массива в Восточном Забайкалье // Петрология. 2010. Т. 18. № 2. С. 139-167.

38. *Кузнецов В.А., Андреева И.А., Коваленко В.И. и др.* Содержание воды и элементов-примесей в онгонитовом расплаве массива Ары-Булак, Восточное Забайкалье (данные изучения расплавных включений) // Доклады Академии наук. 2004. Т. 396. № 4. С. 524-529.

39. *Webster I., Thomas R., Förster H.-J. et al.* Geochemical evolution of halogen-enriched granite magmas and mineralizing fluids of the Zinnwald tin-tungsten mining district, Erzgebirge, Germany // Mineralium Deposita. 2004. Vol. 39. Iss. 4. P. 452-472. DOI: 10.1007/s00126-004-0423-2

40. *Bhalla P., Holtz F., Linnen R.L., Behrens H.* Solubility of cassiterite in evolved granitic melts: effect of *T*, $fO_2$, and additional volatiles // Lithos. 2005. Vol. 80. Iss. 1-4. P. 387-400. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.06.014

41. *Schmidt S., Gottschalk M., Rongqing Zhang, Jianjun Lu.* Oxygen fugacity during tin ore deposition from primary fluid inclusions in cassiterite // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 139. Part A. № 104451. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104451

***Авторы*: Виктор Иванович Алексеев,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *Alekseev_VI@pers.spmi.ru,* *https://orcid.org/0000-0002-1512-9347*, **Юрий Борисович Марин,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-8287-872X*, **Иван Андреевич Бакшеев,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-6920-427X*.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*