

УДК 549.752.321'322

## ТИПОМОРФИЗМ МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ КОЛУМБИТА-ТАНТАЛИТА ИЗ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ТАНТАЛОНОСНЫХ АМАЗОНИТ-АЛЬБИТОВЫХ ГРАНИТОВ

М.Ю. Поваренных

*Государственный Геологический музей им. В.И.Вернадского РАН, Москва, mishapovarennykh@rambler.ru*

Проведено минералогическое изучение трёх массивов танталосодержащих гранитов — Орловского и Этыкинского (Забайкалье) и Майкульского (Казахстан). Выявлены типоморфные особенности минералов группы колумбита-танталита (Кол-Та) в них по приуроченности к разновозрастным фазовым и фациальным разновидностям гранитов. Показано, что в комплексе с другими типоморфными признаками особенности кристалломорфологии минералов группы Кол-Та могут быть успешно применены в практике геолого-разведочных работ как при поиске и оценке танталовых рудопроявлений в массивах амазонит-альбитовых редкометальных гранитов щелочноземельного ряда, так и на стадии детальной и эксплуатационной разведки при проведении минералого-технологического картирования танталовых месторождений в подобных массивах.

В статье 3 рисунка, список литературы из 22 названий.

Ключевые слова: группа колумбита-танталита, манганоколумбит, типоморфизм, фазовая разновидность, фациальная разновидность, редкометальный гранитный массив, кристалломорфология, габитусная форма.

### Введение

Минералы группы колумбита-танталита (Кол-Та) являются наиболее важными в промышленном отношении минералами тантала: с ними связано более 50% мировых запасов этого редкого металла.

Основными поставщиками тантала служат месторождения, приуроченные к гранитным пегматитам и редкометальным гранитам щелочноземельного ряда. В связи с имеющейся тенденцией к исчерпанию богатых по содержанию тантала пегматитовых месторождений всё большее значение приобретают крупные по запасам, но более бедные по содержанию тантала и труднообогатимые месторождения, связанные с редкометальными гранитами щелочноземельного ряда.

В России (в Восточном Забайкалье) есть два подобных месторождения — Орловское и Этыкинское, приуроченные соответственно к одноименным редкометальным гранитным массивам. Первое из них интенсивно разрабатывалось в доперестроечное время (руда гравитационно обогащалась на расположенном неподалеку горно-обогатительном комбинате — Орловском ГОКе), второе тогда же было подготовлено к вводу в эксплуатацию, но не введено, и лишь в последнее время добыча тантала в небольшом объёме начата (руды перерабатываются способом гравитационного обогащения на Первомайском ГОКе). На этих месторождениях значительная часть тантала заключена в минералах группы Кол-Та, которые наряду с пирролор-микролитом (Прх-Микр) и в меньшей

степени — с касситеритом (Кас) являются главными его минералами-носителями. Известная для этих месторождений вертикальная зональность в пространственном распределении рудных минералов (Луговской и др., 1972) с концентрированием Прх-Микр вблизи эндоконтактов гранитных массивов при относительно однородном распределении Кол-Та и Кас позволяет прогнозировать всё большее возрастание роли колумбит-танталитовых руд в балансе тантала по мере карьерной отработки этих месторождений.

Все эти факторы обуславливают важность и актуальность исследования минералов группы колумбита-танталита из месторождений этого типа, выявления их типоморфных свойств и их влияния на показатели технологической переработки руд и при поисках и оценке подобных месторождений.

В основу работы положены материалы, как собранные автором, так и предоставленные для исследования С.М. Бескиным, В.Н. Павловой и А.Е. Цыгановым (ИМГРЭ), В.В. Матиасом (ВИМС), а также Б.А. Левичевым (Орловский ГОК, пос. Орловка), А.М. Гребенниковым и И.И. Курсиновым (Первомайский ГОК), Ю.К. Лебедевым и А.Н. Фёдоровым (Этыкинская ГРП, г. Золотореченск).

Всего изучены 224 протоколные пробы с минералами группы Кол-Та из разных фаз и фаций массивов амазонит-альбитовых редкометальных гранитов щелочноземельного ряда: Орловского и Этыкинского (Восточной Забайкалье) и Майкульского (Южный Казахстан). Изученные массивы близки между со-

бой по ряду признаков: а) позднегерцинскому времени становления; б) формационной принадлежности — приуроченности к единому протяжённому Урало-Монголо-Охотскому геосинклинальному поясу и зонам тектоно-магматической активизации срединных массивов; в) асимметрично-грибообразной (граптолитовой) форме залегания при секущих взаимоотношениях с вмещающими породами существенно силикатного состава; г) широкому проявлению постмагматических автометасоматических процессов альбитизации и грейзенизации; д) набору и количественным соотношениям породообразующих, акцессорных и рудных минералов; е) повышенным по сравнению с кларковыми содержаниями литофильных редких элементов. Сводные геологические характеристики вышеназванных гранитных массивов приведены в нашей статье (Поваренных, 1994) и многочисленных публикациях других исследователей (Залашкова, 1969; Лутовской и др., 1972; Александров, 1989; Зарайский, 2004; А. Руб, М. Руб, 2006; Бескин, 2007).

Анализы и определения свойств минералов выполнялись автором и сотрудниками ряда научно-исследовательских институтов и МГУ.

### Типохимизм минералов группы колумбита-танталита

В вариациях химического состава этих минералов проявляется совершенный изоморфизм между двумя парами видообразующих элементов Mn и Fe, Ta и Nb. Сейчас выделяют несколько минеральных видов, относящихся к группе колумбита-танталита: ферроколумбит  $\text{Fe}^{2+}\text{Nb}_2\text{O}_6$ , ферротанталит  $\text{Fe}^{2+}\text{Ta}_2\text{O}_6$ , манганоколумбит  $(\text{Mn}, \text{Fe}^{2+})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$  и манганотанталит  $\text{MnTa}_2\text{O}_6$ , между которыми существуют непрерывные изоморфные ряды. Содержание других изоморфных примесей обычно незначительно и достигает: Ti (<12.8%), W (<4.56%), Sn (<2.5%), TR (<2%), Al (<1.5%), Sc (<1.34%), U (<0.5%) (Поваренных, 1966; Волошин, 1993; Поваренных, 1985, 1991, 2008; А. Руб, М. Руб, 2006).

По содержанию основных видообразующих катионов (Ta, Nb, Fe, Mn), а также по характеристическим отношениям  $\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb})$ ,  $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe})$  образцы минералов группы Кол-Та из следующего ряда объектов разных формационных типов: карбонатиты — щелочные редкометалльные граниты — редкометалльные граниты щёлочноземельного ряда — гранитные пегматиты — весьма значительно отличаются друг от друга. Так, в этом ряду

средние значения характеристического отношения  $\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb})$  в образцах Кол-Та постепенно возрастают от 0.02 (для карбонатитов центрального типа) до 0.93 (для гранитных пегматитов), а значения  $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe})$  варьируют примерно в тех же пределах.

Кол-Та из Майкульского массива редкометалльных гранитов щёлочноземельного ряда (Ю. Казахстан) присущи значения марганцовистости  $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe})$ , варьирующие от 0.28 до 0.37, танталистости  $\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb})$  — от 0.04 до 0.17 и довольно высокие средние содержания элементов-примесей (в вес. %): титана 1.00  $\text{TiO}_2$ , вольфрама 0.46  $\text{WO}_3$ , скандия 0.28  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  и олова 0.17  $\text{SnO}_2$ . Содержания элементов-примесей в Кол-Та определялись микрорентгеноспектральным анализом (Camebax), а также с помощью рентгено-радиометрического метода на приборе «Квант» и инструментального нейтронно-активационного анализа.

В Кол-Та из Орловского массива (Агинский Бурятский автономный округ, Восточное Забайкалье) вариации основных видообразующих катионов и их соотношения следующие:  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  15.7–65.1;  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  26.6–47.8; FeO 0.9–4.6; MnO 12.2–21.5%;  $\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb}) = 0.20–0.94$  (среднее — 0.44),  $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe}) = 0.49–0.97$  (среднее — 0.89). Эти образцы характеризуются повышенными средними содержаниями (вес. %) вольфрама — 0.75  $\text{WO}_3$ , титана — 0.6  $\text{TiO}_2$ , скандия — 0.15  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  и олова — 0.2  $\text{SnO}_2$ .

В Этыкинском массиве редкометалльных гранитов (Восточное Забайкалье) для минералов группы Кол-Та нами установлены следующие вариации химического состава и соотношений основных видообразующих катионов по валовым пробам большой массы (250–300 кг):  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  3.31–40.01;  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  39.26–75.67; FeO 1.94–11.18; MnO 7.93–16.00;  $\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb}) = 0.04–0.53$  (среднее — 0.2),  $\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe}) = 0.29–0.9$  (среднее — 0.66). Содержания элементов-примесей варьируют (в %):  $\text{TiO}_2$  0.11–4.76;  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  0.06–1.34;  $\text{WO}_3$  0.31–4.56;  $\text{SnO}_2$  0.04–0.86;  $\text{UO}_2$  0.0–1.57. Для основных минералообразующих компонентов состава марганцовистость и танталистость являются промежуточными по отношению к таковому для образцов минералов группы Кол-Та из Майкульского и Орловского массивов. Из элементов-примесей для образцов Кол-Та из Этыкинского массива наиболее характерен скандий, средние содержания которого очень высоки (0.54 вес. %  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ), а также титан, вольфрам и олово (средние содержания — 1.15, 0.85 и 0.14 вес. %  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{SnO}_2$  соответственно).

В исследованных массивах Кол-Та закономерно отличаются по химическому составу в зависимости от приуроченности к различным фазовым или фациальным разновидностям (автометасоматически преобразованных и грейзенизированных) редкометалльных гранитов и удалённости от эндоконтакта. Так, в Этыкинском массиве для ранней фазы  $\gamma_3^1$  тонкозернистых альбитовых гранитов (ксенолиты «онгонитов») и ранних фаций амазонит-альбитовых гранитов  $\gamma_3^3$  (среднезернистых, с циннвальдитом, однородной текстуры) свойственен манганоколумбит с отношениями  $Ta/(Ta + Nb) = 0.11$ ,  $Mn/(Mn + Fe) = 0.44$  и относительно пониженными содержаниями (вес. %) олова ( $0.03 SnO_2$ ), скандия ( $0.42 Sc_2O_3$ ), вольфрама ( $0.48 WO_3$ ) и титана ( $0.48 TiO_2$ ). А для Кол-Та из поздних фаций редкометалльных гранитов  $\gamma^{4-6}$  (мелкозернистых, с лепидолитом, однородной текстуры; крупно-среднезернистых, с циннвальдит-лепидолитом, такситовой текстуры; крупнозернистых, жилообразных кварцевых и литиевослюдисто-кварцевых амазонитов) характерен манганоколумбит с более высокими значениями танталистости ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.3$ ) и марганцовистости ( $Mn/(Mn + Fe) = 0.78$ ), повышенными содержаниями (вес. %) олова ( $0.2 SnO_2$ ), скандия ( $0.75 Sc_2O_3$ ), вольфрама ( $1.52 WO_3$ ) и титана ( $2.11 TiO_2$ ). В пределах одной и той же фациальной разновидности редкометалльных гранитов Этыкинского массива отмечается определённая вертикальная зональность: на глубине отмечаются более ниобиевые и железистые разности Кол-Та, а ближе к палеоповрхности или эндоконтакту — более танталистые и марганцовистые.

Для Кол-Та из Орловского массива характер зональности в первом приближении близок к описанному выше для Этыкинского массива. Так, образцы Кол-Та из поздней фации редкометалльных гранитов (мелкозернистых, лепидолит-амазонит-альбитовых) обогащены танталом и марганцем по сравнению с таковыми из ранней фации (среднезернистых криофиллит-амазонит-альбитовых): показатель танталистости  $Ta/(Ta + Nb)$  равняется 0.45 и 0.23, а показатель марганцовистости  $Mn/(Mn + Fe)$  — 0.94 и 0.73 в первом и втором случае соответственно. Однако, наиболее танталистые образцы Кол-Та отмечаются не в непосредственной близости от эндоконтакта, а на удалении от него на 30–40 м (до 60 м), и они характеризуются значениями  $Ta/(Ta + Nb) = 0.7$  и несколько пониженными значениями отношения  $Mn/(Mn + Fe) = 0.78$ . Наличие подобной

своеобразной зоны «вторичного обогащения» танталом минералов группы Кол-Та в Орловском массиве объясняется, по нашему мнению, действием двух факторов: перераспределением тантала между двумя его основными минералами-носителями — Прх-Микр и Кол-Та (их совместное нахождение отмечается исключительно на этих расстояниях от эндоконтакта, где тантал расходуется на образование Прх-Микр с одновременным обеднением этим элементом Кол-Та), а также волнообразным характером эволюции кислотно-основных условий минералообразования в ходе постмагматического высокотемпературного автометасоматического преобразования гранита процессами альбитизации и грейзенизации.

Образцы Кол-Та из Майкульского массива, принадлежащие к одной и той же фазе редкометалльных гранитов — мелко-среднезернистых амазонит-альбитовых, с протоитионит-циннвальдитом — по мере приближения к эндоконтакту с кварцитами майкульской свиты  $O_2mk$  становятся всё более танталистыми и марганцовистыми ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.048–0.172$  и  $Mn/(Mn + Fe) = 0.284–0.367$ ). Пониженной танталистостью отличаются Кол-Та из мелкозернистых альбитовых гранитов дополнительных интрузий, залегающих в амазонит-альбитовых гранитах в виде узких линзовидных ксенолитоподобных тел,  $Ta/(Ta + Nb) = 0.07$ . Также в них падает содержание (вес. %): олова — 0.06 при  $0.19 SnO_2$  для Кол-Та из гранитов основной фазы, титана — 0.4 при  $1.01 TiO_2$ , скандия — 0.15 при  $0.33 Sc_2O_3$  и вольфрама — 0.26 при  $0.44 WO_3$ .

Тренды вариаций химического состава Кол-Та в изученных массивах Забайкалья по сравнению с рядом других амазонит-альбитовых массивов Урало-Монголо-Охотского пояса представлены на рисунке 1 и совпадают по направленности с геохимическим составом, выявленным Г.П. Зарайским для этих массивов по Zr-Hf отношению (Зарайский, 2004), и минерагеническим, установленным С.М. Бескиным (Бескин, 2007). Отчётливую дискретность полей фигуративных точек составов минералов группы Кол-Та в изученных амазонит-альбитовых редкометалльных гранитных массивах Забайкалья и наличие единого тренда можно интерпретировать как результат присутствия двух крупных генераций Кол-Та: ранней, первичной магматогенной (онгонитовой), и поздней, высокотемпературной гидротермально-автометасоматической, генетически связанных с развитием рудно-магматической системы из

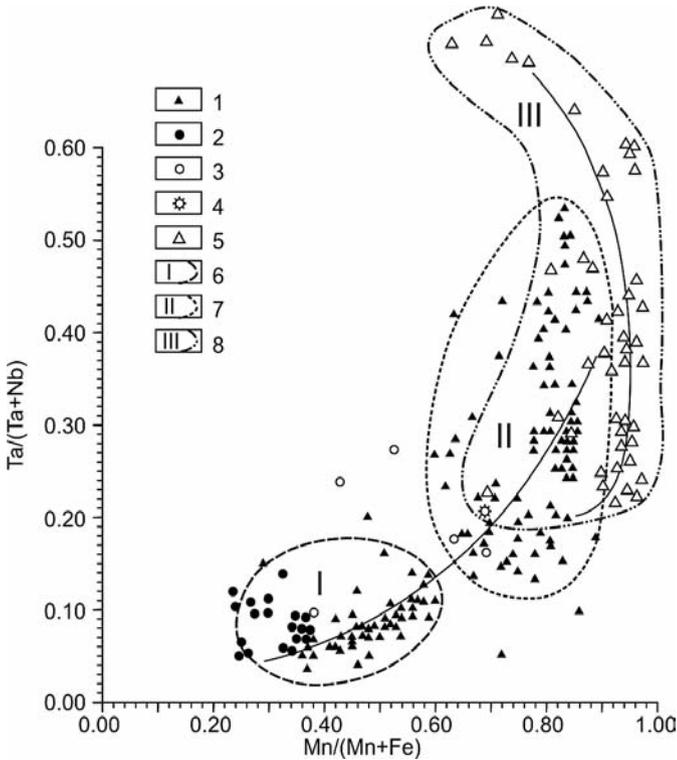


Рис. 1. Распределение фигуративных точек составов минералов группы колумбита-танталита (Кол-Та) из разновозрастных фаз и фациальных разновидностей массивов амазонит-альбитовых редкометалльных гранитов щелочноземельного ряда (по данным 339 микрозондовых и 6 микрохимических анализов) на диаграмме  $Ta/(Ta+Nb) - Mn/(Mn+Fe)$ :

1 – пробы из Этькинского массива (Восточное Забайкалье); 2 – пробы из Майкульского массива (Южный Казахстан); 3 – пробы А.А. Ситнина 1962 г. (Этька); 4 – проба В.В. Матиаса 1964 г. (Этька); 5 – пробы из Орловского массива (Восточное Забайкалье); 6 (I) – область распределения фигуративных точек составов Кол-Та из Майкульского массива и ранних фаз и фацис Этьки; 7 (II) – то же из поздних фацис Этьки; 8 (III) – то же из поздних фацис Орловки. Сплошными линиями показаны тренды изменения составов Кол-Та в изученных массивах.

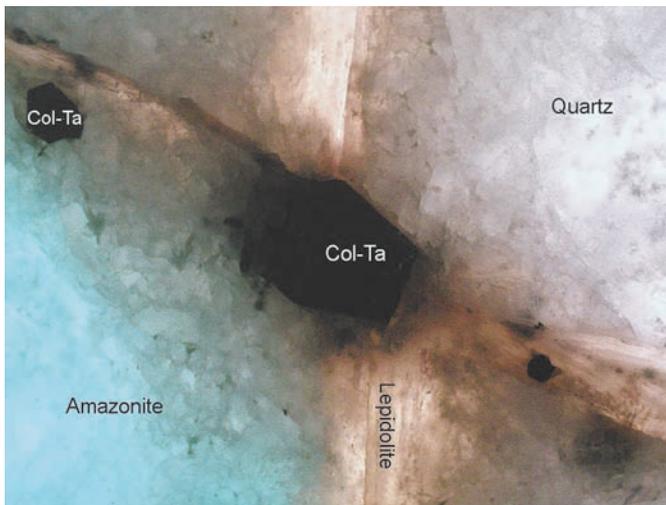


Рис. 2. Образование манганоколумбита (Кол-Та) между чешуек листовидной слюды (цинквальдит-лепидолита) в ходе автометасоматического преобразования редкометалльного амазонит-альбитового гранита щелочноземельного ряда. Этькинский массив (Восточное Забайкалье).

Среднезернистый амазонит-альбитовый гранит однородной и такситовой текстуры ( $\gamma_3^5$ ) апикальных участков массива. Толстый шлиф. Проходящий свет. Увеличение  $\times 15$ .

единого магматического очага без привноса вещества извне.

### Типоморфизм внешней формы (собственно типоморфизм)

Морфология кристаллов минералов группы Кол-Та очень широко варьируется в месторождениях различных генетических типов.

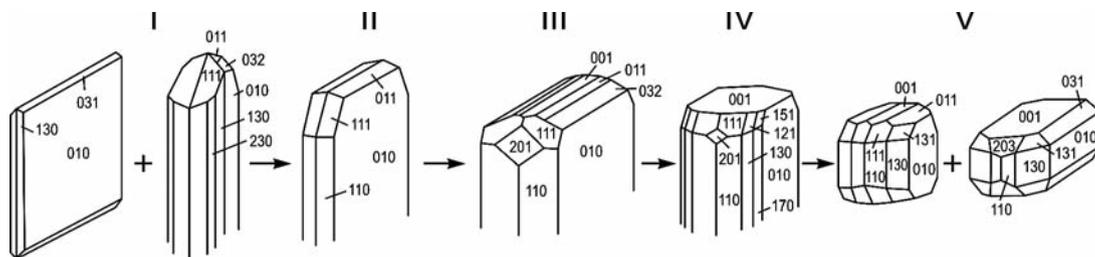
Наиболее простая она в гранитных пегматитах (12–15 простых форм), а наиболее сложная отмечается для кристаллов ферроколумбита из карбонатитов (40–50 простых форм). Образцы из редкометалльных гранитов (по нашим и другим литературным данным по гранитным массивам Приазовья, Украина) занимают по этому показателю промежуточное положение: максимальное число простых

форм, зафиксированное нами с помощью двукружного отражательного гониометра ГД-1 на кристаллах манганоколумбита из Орловского массива, равняется 19 (Поваренных, 1988, 1991, 1994; Матиас и др., 1984).

Образцы Кол-Та из карбонатитов отличаются частым присутствием complicationных простых форм кристаллов, таких, как {321}, {211}, {342}, {121}, {151}, {161} и других, а также скруглённостью рёбер и вершин (Povarennykh, 1990). Для образцов Кол-Та из редкометалльных щелочных гранитов наиболее характерны грани следующих простых форм: {010}, {111}, {130}, {110}, {150} и других. Наряду с обычными для Кол-Та из редкометалльных щелочных гранитов гранями простых форм в исследованных автором массивах амазонит-альбитовых редкометалльных гранитов щёлочноземельного ряда (так называемых кислых) — Этыкинском и Орловском — габитусными являются также и следующие: {021}, {031}, {051}, {230} и {170}. Для индексации граней кристаллов нами помимо гониометра ГД-1 использовались модифицированный для этого столик Фёдорова и фотогониометр с лазерным экспонированием (ИГФМ, Киев, В.М. Крочук). Рисовка кристаллов производилась вручную по известной методике или с помощью ЭВМ ЕС-1033 по адаптированной японской программе рисовки кристаллов KRISTAL.

Наиболее широкая вариация габитусных типов кристаллов Кол-Та свойственна образцам из Орловского массива, по приуроченности которых к разновозрастным фаціальным разновидностям амазонит-альбитовых гранитов построен эволюционный ряд габитусных форм (рис. 3). Кристаллы Кол-Та здесь варьируются от столбчато-игольчатых, вытянутых по [001], пластинчатых, уплощённых по [010], через таблитчатые и толстотаблитчатые, таблитчато-столбчатые, уплощённые по [010] и вытянутые по [001], к изометрическим и короткостолбчатым, укороченным по [001].

Рис. 3. Схематический эволюционный ряд габитусных форм кристаллов минералов группы колумбита-танталита Орловского массива редкометалльных гранитов (Забайкалье) [10, 11, 19]. Габитусные типы: I (столбчато-игольчатые и пластинчатые кристаллы)  $\{010\} + \{031\} + \{130\} + \{hk0\}$ ; II (таблитчатые кристаллы)  $\{010\} + \{110\} + \{011\}$ ; III (толстотаблитчатые кристаллы)  $\{010\} + \{110\} + \{0kl\} + \{111\}$ ; IV (таблитчато-столбчатые кристаллы)  $\{010\} + \{001\} + \{hk0\} + \{hkl\}$ ; V (изометричные и короткостолбчатые кристаллы)  $\{001\} + \{010\} + \{0kl\} + \{hk0\} + \{hkl\} + \{h0l\}$ .



Спектр простых форм и габитусных типов кристаллов Кол-Та не столь широк у образцов из Этыкинского массива: их число не превышает 15, не отмечается отчётливая вытянутость кристаллов по [001], и значительно меньше доля столбчато-игольчатых и толстотаблитчатых индивидов. Ещё более беден набор простых форм (до 11) и габитусных типов у кристаллов Кол-Та из Майкульского массива. Здесь преобладают таблитчатые, пластинчатые, уплощённые по [010] индивиды. Меньше представлены столбчато-игольчатые и толстотаблитчатые индивиды при резко подчинённом значении кристаллов более изометричных форм. В пределах каждого из исследованных массивов редкометалльных гранитов для кристалломорфологии Кол-Та отмечается следующее: 1) кристаллы более изометричной формы приурочены к апикальным частям массивов или их эндоконтактам, анизометричной — к более глубинным их частям; 2) более поздние фаціальные разновидности гранитов содержат, как правило, кристаллы более изометричной формы; 3) для одной и той же фаціальной разновидности гранитов отмечается нахождение более изометричных кристаллов к верхним горизонтам, анизометричных — к нижним.

### Типоморфизм внутреннего строения (структурный типоморфизм)

По степени упорядоченности структуры минералов группы Кол-Та вариации для образцов из месторождений разных генетических типов очень широкие. Обычно наиболее упорядоченными, нормальными ромбическими являются ферроколумбиты из карбонатитов. В отличие от них наиболее разупорядоченными, вплоть до иксиолитов (ромбических) и воджинитов (уже моноклинных), являются образцы из гранитных пегматитов. Исследованные автором образцы Кол-Та из редкометалльных гранитов щёлочноземельно-

го ряда по степени упорядоченности структуры занимают промежуточное положение между этими крайними случаями.

Рентгеноструктурные исследования проводились на монокристалльном автодифрактометре Syntex, дифрактометре ДРОН-3.0 и с помощью камеры РКУ с  $D = 114$  мм (геологический факультет МГУ, кафедра кристаллографии).

Наиболее упорядоченными являются ферроколумбиты из Майкульского массива (отношение параметров элементарной ячейки  $b_0/c_0$  варьирует от 2.817 до 2.818), в разной степени разупорядоченными — образцы из Этыкинского массива ( $b_0/c_0 = 2.780 - 2.827$ ). Наиболее широко варьируются образцы манганоколумбита из Орловского массива — от упорядоченных, нормальных ромбических, до полностью разупорядоченных, ромбических иксиолитов и более редких моноклинных воджинитов.

Значительно отличаются Кол-Та в исследованных массивах по анатомии индивидов, которая изучалась на кристаллографически ориентированных напылённых золотом срезах. Так, в кристаллах Кол-Та из Майкульского массива не визуализируется никакой зонарно-секториальной картины внутреннего строения (зёрна однородно хорошо полируются, не выкрашиваясь, равномерно напыляются). Для образцов Кол-Та из Этыкинского массива выделяются три разных типа зонарно-секториальной картины: 1) невизуализируемая зонарность (проявляется только при точечном микронзондировании); 2) грубая зонарность типа «центр — край», свойственная, как правило, образцам из ранних фаз и фаций массива; 3) усложнённая картина — осциллирующая или типа «структуры песочных часов» (проявляющаяся в наличии разнонаправленных трендов изменения химического состава в разных секторах роста единого монокристалла Кол-Та), свойственная образцам из поздних фаций гранитов. В образцах Кол-Та из Орловского массива почти не отмечено зонарно-секториальной картины I типа, а преобладают индивиды с анатомией II и чаще всего III типов.

В исследованных массивах редкометалльных гранитов минералы группы Кол-Та парагенетически ассоциируют (что устанавливалось как визуально под бинокулярным микроскопом по наличию индукционных поверхностей совместного роста, так и с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ JSMТ-20 при увеличении 1000 — 2000) со следующими породообразующими минералами: альбитом (№ 0 — 5, полисинтетически сдвойникованном, реже —

«шахматном»), литиевыми слюдами ряда циннвальдит-лепидолит (рис. 2), дымчато-серым мелким кварцем или с внешними зонами крупного горошковидного кварца, содержащего ориентированные вростки альбита (так называемого кварца со структурой снежного кома), пойкилобластами топаза, бледно-фиолетовым флюоритом, интенсивно окрашенным голубовато-зелёным мелким идиоморфным микроклином (амазонитом). Для наименее изменённых гранитов Орловского массива типична следующая ассоциация аксессуарных минералов: ильменит, монацит, циркон, окислы титана, апатит. В альбитизированных гранитах она сменяется ассоциацией колумбита с касситеритом и монацитом, а с усилением интенсивности альбитизации колумбит сменяется всё более танталовыми членами ряда Кол-Та, а монацит исчезает. Для зоны амазонитовых интенсивно альбитизированных гранитов с лепидолитом характерно присутствие существенных количеств микролита и топаза в ассоциации с колумбит-танталитом. По данным исследователей этого массива (Залашкова, 1969 и др.), отношение минералов группы Кол-Та к микролиту здесь составляет около 3:1, а при переходе к нижележащим мусковитовым интенсивно альбитизированным гранитам с амазонитом и литиевой слюдой оно возрастает до 7:1. По данным минералогического картирования Орловского массива (Матиас и др., 1984; Поваренных, 1988), распределение минералов группы Кол-Та неравномерное (линзовидно-полосчатое) и не отвечает известной ранее строгой вертикальной зональности, описанной другими исследователями (Луговской и др., 1972; Александров, 1989).

Минералы группы Кол-Та в породах Этыкинского массива присутствуют повсеместно в отличие от других рудных танталониобатов и, судя по приуроченности к разновозрастным фациальным разновидностям гранитов (субфазам), в виде нескольких генераций. Наиболее уверенно выделяются две крупные генерации: ранняя, домикролитовая, и поздняя, послемикролитовая. Кол-Та первой генерации, мелкий (0.05 — 0.15 мм по удлинению), по составу отвечающий марганцовистому ферроколумбиту ( $Ta_2O_5$  5.88 — 8.78, FeO 7.89 — 11.16, MnO 8.4 — 10.9 %), резко преобладает в количественном отношении, и в гранитах он отчётливо замещается пироксид-микролитом, содержащим (вес. %) 8.5 — 35  $Ta_2O_5$  и 41 — 69  $Nb_2O_5$ . Кол-Та второй генерации несколько более крупный (0.25 — 1.0 мм по удлинению), более танталистый и марганцовистый (по составу может быть отнесён к манганоколумбиту), содержит

более высокие концентрации таких элементов-примесей, как титан, вольфрам, олово и скандий. Наблюдается чёткая приуроченность минералов группы Кол-Та к разновозрастным субфазам (фациям по степени альбитизации и грейзенизации) гранитов: ферроколумбит — к ранним породам, манганоколумбит — к более поздним. В пегматоидных кварц-амазонитовых и литиевослюдиисто-кварц-амазонитовых жилах, рассекающих среднерзностные и мелкозернистые амазонит-альбитовые граниты со светлой литиевой слюдой, отмечается Кол-Та в виде крупных кристаллов (0.5–1.5 см) изометричного или таблитчато-столбчатого облика, близких по составу Кол-Та второй генерации. В среднерзностных амазонит-альбитовых гранитах однородной и такситовой текстуры ( $\gamma_3^5$ ) апикальных участков массива встречены неполные псевдоморфозы вольфрамита (гюбнерита) по танталоколумбиту (Поваренных, 1991, 1994; Поваренных и др., 1990), а в более поздних фациях отмечены взаимные обростания манганоколумбита и пироклор-микролита.

Для Майкульского массива характерны закономерные сростки ферроколумбита с ферсмитом и самарскитом, а также его псевдоморфозы по пироклору. По наличию индукционных поверхностей совместного роста между ферроколумбитом, амазонитом и литиевым биотитом (растровый электронный микроскоп JSMT-20 при 200-кратном увеличении) установлена близодновременность их образования в граните. Для основных рудных танталосодержащих минералов Майкульского массива по наличию соотношения продуктов замещения установлен ряд последовательности выделения: пироклор — ферсмит — самарскит — ферроколумбит (Поваренных, 1994).

Прочностные характеристики Кол-Та изучались на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 20–100 г. Микротвёрдость образцов Кол-Та в исследованных массивах гранитов варьируется в пределах 320–970 кг/мм<sup>2</sup>. Характер зависимости микротвёрдости от содержания тантала является нелинейным и представляет собой ломаную линию: для колумбитов с содержанием от 5 до 12–15% Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — участок ломаной с крутым наклоном, для танталоколумбитов и колумбит-танталитов с 15–60% Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — с пологим наклоном. Между значениями микротвёрдости и микрорыхлости минералов группы Кол-Та в исследованных массивах отмечается обратно-пропорциональная зависимость. Для образцов из поздних фаций гранитов довольно часто отмечается анизотропия микротвёрдости I и II родов (Поваренных, 1991, 2008).

Кристалломорфологическое картирование минералов группы Кол-Та проводилось на редкометалльно-гранитовых массивах Орловский и Этыкинский в Забайкалье, с которыми связаны танталовые месторождения и в балансе тантала которых роль Кол-Та по сравнению с пироклор-микролитом является главенствующей. Элементом картирования послужил облик и габитус кристаллов Кол-Та (Поваренных, 1988). Строились гистограммы распределения кристаллов Кол-Та разного габитусного типа по сериям проб в каждой из скважин и в поверхностных горных выработках (карьерах, канавах и пр.), сериям скважин в профилях, сериям профилей в блоке и массиве в целом. С использованием данных предыдущих исследований построены блок-диаграммы, показывающие соотношение концентраций Кол-Та в гранитах и особенности его кристалломорфологии. В подсчётном контуре месторождений выделены блоки и участки, содержащие Кол-Та разного габитусного типа и с варьирующимися показателями коэффициента анизотричности  $K_{ан}$  и кристалломорфологической бальности КБ, что в сочетании с данными геохимического опробывания и минералогического картирования даёт возможность предсказывать технологические свойства танталовых руд при гравитационном способе их обогащения.

Для объяснения выявленных кристалломорфологических закономерностей автором применена морфогенетическая гипотеза (Поваренных, 1966) в сочетании с универсальным принципом П. Кюри о влиянии симметрии среды на симметрию индивида. В результате этого удалось получить представление об условиях кристаллогенезиса (хотя бы в отношении симметрии питающей среды) по наблюдаемому природному распределению индивидов Кол-Та разного габитусного типа, а также реконструировать былую геологическую обстановку (и соответственно оценивать, например, уровень современного эрозионного среза гранитного массива). Так, по распространённости в пробах гранитов кристаллов Кол-Та, принадлежащих к разным габитусным типам — членам эволюционного ряда габитусных форм, минимальным оказался срез для западного апикального выступа кровли Этыкинского массива (действительно не выходящего на дневную поверхность), незначительным (0–50 м) для Орловского массива, средним (100–200 м) для основного купола Этыкинского массива, и значительным (300 и более метров) для Майкульского массива. Эти результаты оценки уровня эрозионного среза находятся в хорошем согласии со сделанными ранее по гео-

логическим данным Ю.И. Темниковым для Орловского массива, А.А. Ситниным и В.В. Сункинзяном для Этыкинского массива и П.В. Коваль для Майкульского массива (Бескин, 2007).

Таким образом, в комплексе с другими типоморфными признаками кристалломоρφология минералов группы Кол-Та может успешно применяться в практике геолого-разведочных работ как при поиске и оценке танталовых рудопроявлений в массивах амазонит-альбитовых редкометалльных гранитов щёлочноземельного ряда, так и на стадии детальной и эксплуатационной разведки при проведении минералого-технологического картирования танталовых месторождений в подобных массивах.

## Литература

- Александров И.В.* Геохимические факторы и парагенезисы элементов в гранитоидах. М.: Наука. **1989**. 184 с.
- Бескин С.М.* Металлогеническое районирование областей гранитоидного плутонизма. М.: ИМГРЭ. **2007**. 109 с.
- Волошин А.В.* Тантало-ниобаты: Систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб. **1993**. 297 с.
- Залашкова Н.Е.* Зональность метасоматически изменённых танталоносных гранитов (апогранитов) / Минералого-геохимические и генетические особенности редкометалльных апогранитов. М.: Наука. **1969**. С. 5–29.
- Зарайский Г.П.* Условия образования редкометалльных месторождений, связанных с гранитным магматизмом / Смирновский сборник. **2004**. М.: МГУ. С. 105–192.
- Луговской Г.П., Матиас В.В., Тимофеев И.Н., Фельдман Л.Г.* Строение массивов редкометалльных гранитов и особенности их генезиса / Редкометалльные граниты и проблемы магматической дифференциации. М.: Недра. **1972**. С. 131–161.
- Матиас В.В., Поваренных М.Ю., Арифмамедова М.М., Дорохова Г.И.* Особенности кристалломоρφологии пироклор-микролита и колумбит-танталита из редкометалльных гранитов Восточной Сибири // Минер. Сб. Львовск. Гос. ун-та. **1984**. Вып. 38. № 2. С. 55–62.
- Поваренных А.С.* Кристаллохимическая классификация минеральных видов. Киев: Наукова думка. **1966**. 548 с.
- Поваренных М.Ю.* Новые данные о некоторых редкометалльных минералах из карбонатитов Черниговской зоны // Новые данные о минералах СССР. М.: Наука. Вып. 32. **1985**. С. 82–90.
- Поваренных М.Ю.* Кристалломоρφологическое картирование колумбит-танталита в гранитах // Советская геология. **1988**. № 10. С. 89–93.
- Поваренных М.Ю.* О составе и физических свойствах танталита-колумбита и гюбнерита из разных фаций массива редкометалльных гранитов // ЗВМО. **1991**. № 1. С. 63–73.
- Поваренных М.Ю.* Типоморфизм колумбит-танталита в массивах амазонит-альбитовых редкометалльных гранитов. Автореферат дисс. канд. геол.-мин. наук. **1991**. М.: ИМГРЭ. 25 с.
- Поваренных М.Ю.* О полигенной природе природы рудных танталосодержащих минералов в амазонит-альбитовых редкометалльных гранитах // ЗВМО. **1994**. Часть 123. № 5. С. 33–46.
- Поваренных М.Ю.* Минералы группы колумбита-танталита / В кн. «Энциклопедия Забайкалья. Минералы» Гл. ред. Г.А. Юргенсон. Т. 3. **2008**.
- Поваренных М.Ю., Дякин В.И., Куликова И.М., Погибельный А.А.* Новые данные о тантало-колумбите и вольфрамите из массива амазонитовых редкометалльных гранитов // Докл. АН СССР. Сер. Геол. **1990**. Т. 314. № 2. С. 463–468.
- Пятенко Ю.А., Курова Т.А.* О кристаллохимических основах геохимии ниобия и тантала // Геохимия. **1989**. № 4. С. 516–524.
- Руб А.К., Руб М.Г.* Редкометалльные граниты Приморья. М.: ВИМС. **2006**. 86 с.
- Хвостова В.А., Лебедева С.И., Максимова Н.В.* О минералах группы танталит-колумбита // Минер. Сб. Львовск. Гос. ун-та. **1963**. № 23. Вып. 1. С. 38–52.
- Хвостова В.А., Лебедева С.И., Максимова Н.В.* Оловосодержащие танталониобаты и их типоморфные особенности // Известия АН СССР. Сер. Геол. **1982**. С. 70–82.
- Giese R.F.Jr.* Electrostatic Energy of Kolum-bite/Ixiolite // Nature. **1975**. V. 256. P. 31–32.
- Nickel E.H. a.o.* Ixiolite – a Kolumbite Substructure // Amer. Miner. **1963**. V. 48. N. 9–10. P. 961–979.
- Powarennykh Michael.* Crystal Morphology of the Kolumbite-Tantalite in Rare-Metal Peraluminous Granites // 15<sup>th</sup> Gen. Meeting of the IMA. Abstr. Vol. 2. **1990**. Beijing, China. P. 945–947.