

С.А.Иншаков, П.С.Мочалов, А.Ф.Ласковенков, В.Я.Герасименко

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛОВ ТАНТАЛА В ГЕОХИМИЧЕСКОМ ПРИЗНАКОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

При систематике минералогических данных, а также в прикладных задачах нередко приходится сталкиваться с вопросом: каковы взаимоотношения всех минералов, для которых определены содержания одного или нескольких элементов? Этот вопрос касается сравнения и классификации минералов по содержаниям химических элементов, и мы кратко рассмотрим его на примере минералов тантала, при этом придется затрагивать и другие минералы и родственные танталу элементы: ниобий, а также титан, кремний. Будем считать, что опубликованные химические анализы допускают упорядочение минералов по величинам содержащихся в них элементов. Поскольку данное сообщение не является подробным систематическим обзором, список всех первоисточников не приводится.

Кадастр минералов тантала, судя по публикациям разных лет, насчитывал в 1964 г. 27 видов, в 1969 г. - 31, в 1979 г. - 40, в 1983 г. - 47. На 1985 г. было известно 85 минеральных видов с содержанием пятиоксида тантала более 5%, на 1988 г. - таковых свыше 100 минералов. Определения содержаний тантала затронули более 200 минеральных видов, исследовались группы и разновидности минералов. Весь кадастр минералов тантала целесообразно разделить на два списка: собственно минералы тантала (табл. 1) и минералы с изоморфным вхождением тантала в кристаллическую решетку (табл. 2). Граница между списками достаточно условная. Несмотря на открытие новых минералов тантала список собственно танталовых минералов пока относительно невелик (учтены обзоры по 1988 г.). Оба списка неизбежно изменятся при систематизации минералов, включая переоценку данных анализов в историческом плане, упорядочение терминов и др.

Этот минеральный кадастр неоднороден и в значительной мере отражает изученность объекта. Как следует из рис. 1, пик распределения изученных по содержанию тантала минералов приблизительно соответствует  $1\% \text{Ta}_2\text{O}_5$ . По такому же закону распределяются и минералы, перерабатываемые промышленностью: танталит, микролит, воджинит, колумбит, касситерит, ильменорутил, лопарит, пироксенол, стрюверит, фергусонит, эвдиалит. Другой пик в распределении принадлежит собственно минералогическим объектам - высокотанталовым минералам, часть из которых открыта недавно. Пик около  $0,001\%$ , вероятно, связан с округлением малых величин на пределе чувствительности обычных химических анализов. Различным физико-химическим определениям малых содержаний тантала соответствуют уменьшающиеся повторяемости содержаний в интервале  $0,00001-0,0001\%$ . В целом распределение асимметричное и аппроксимируется степенной функцией, что делает более удобными логарифмические шкалы.

Пунктирными линиями на рис. 1 показаны распределения собственно танталовых минералов (I) и минералов с изоморфным вхождением тантала (II). Пользуясь разными кривыми распределения можно приблизительно разбить и списки минералов тантала в общем кадастре - соответственно табл. 1 и 2. Понятно, что такое разбиение предварительное, и в любом случае некоторые минералы искусственно оказываются в одной из групп. Таков, например, колумбит с широким диапазоном величин содержаний  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , условно отнесенный к списку табл. 2.

Прикладные аспекты, например интересы промышленной переработки сырья или требования машинной обработки данных, зачастую не позволяют использо-

Таблица I  
Минералы тантала I

Минерал	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	Минерал	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %
Алюмотантит	81,1	Самарскит-(Y)	1,8-41,4
Баримикролит	71,6	Скандиоксиолит	37-45
Бариопирохлор	0,06-9,6	Соседкоит	91,2
Бехиерит	70-73,8	Станномикролит	47-77,8
Бисмутомикролит	45,5	Станнострюверит	39,0
Виджецит	36,0	Станнотанталит	62,5-71
Висмутомикролит	79,7	Стибиобетафит	19,3
Висмутотанталит	30-48,7	Стибиовисмутотанталит	10,0-57,5
Воджинит	53-75,4	Стибиотанталит	36-58
Зимбабвеит	46,5	Стрюверит	6,0-39,5
Иксиолит	60,6-77,2	Танталильменорутил	23,5
Иртышит	77,6	Танталит	46,5-85,3
Иттробетафит-(Y)	2,7-II,8	Танталоколумбит	12-38,8
Иттропирохлор-(Y)	5,5-49,9	Танталопирохлор	29-58
Иттротанталит-(Y)	37,3-46,2	Танталэшинит	32,1
Ишикаваит	15,0-19,2	тантит	98,3
Карбид тантала	93,8	Тантполикраз	13,0-23,1
Кальциотантит	91,1	Тантэвксенит	23,0
Кимробинсонит	78,5	Титаново-калиевый	
Лиандратит	15,0	рихтерит	69,9-74,9
Литиотантит	71,6	Уранмикролит	64,0-77,8
Манганотапиолит	76,3-79,8	Уранопирохлор	10,5-II,7
Микролит	37,6-79,7	Уранпирохлор	8,0-60,8
Натровистантит	56,4-56,5	Фергусонит-(Y)	0,5-17,0
Натротантит	91,3	Ферриильменорутил	10,5
Ниоботанталит	40,3-60,4	Ферримикролит	73,5-78,0
Ниоботоролит	5-10	Ферриниоботанталит	42,0-46,0
Парабаримикролит	80,6	Ферротанталит	70,5-82,2
Петшикит	46,0	Ферротанталоколумбит	23,2
Пирохлор	0,11-45,0	Форманит-(Y)	55,5
Плюмбомикролит	33,5-53,8	Цезплюмтантит	68,3
Плюмбоиттропирохлор	14,2	Цезстибтантит	72,5
Поликраз	0,22-13,9	Цериопирохлор-(Ce)	0,30-5,9
Ранкамаит	69,5-73,6	Эвксенит	1,0-21,6
Ринерсонит	58,4-66,6		

I

Названия минералов в табл. I и 2 приведены в соответствии с правилами Комиссии по новым минералам ММА (Никель Э., Мандарино Д. Минерал. журн. 1989. Т. II, № I. С. 51-86). В этих правилах перечислены дискредитированные названия минералов, уточнена номенклатура редкоземельных минералов. В нашем случае это помогло упорядочить часть терминов. Предстоит более полная систематизация минералов тантала.

Таблица 2

Минералы с изоморфным вхождением тантала

Минерал	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	Минерал	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %
Айналит	2	Лопарит-(Ce)	0,46-2,0
Алюмобетафит	0,2-14,0	Луешит	0,1-4,2
Анализ	0,09	Магнезиоастрофиллит	0,08
Астрофиллит	0,008-0,1	Магнезиоильменит	1,4
Бадделейт	0,08-1,6	Магнезиоколумбит	10,4-30
Баотит	2,0	Манганнепунит	0,005
Батисит	0,36	Манганоколумбит	2,4-30,6
Белянкинит	0,08-0,93	Манганоильменит	0,015-0,017
Бетафит	0,39-13,9	Натрониобит	0,03-1,0
Бломстрандин	0,62-2,0	Николайит	0,40
Брукит	0,001-0,01	Ниоболунцовит	0,02
Велерит	0-0,1	Ниоболопарит	0,43-0,93
Вольфрамит	0,001-0,89	Ниобозинит	0,75-3,8
Вудьяврит	0,15	Плюмбобетафит	1,6
Вуэннемит	0,23	Плюмбоколумбит	7,2
Герасимовскит	0,02-6,3	Плюмбопирохлор	0,75-5
Гетценит	0,02-0,11	Ризерит	4,0
Гидроастрофиллит	0,82	Рутил	0,02-0,03
Гидромурманит	0,56	Свинцовый уранпирохлор	3,7
Гюбнерит	0,0006	Стибиоколумбит	11-16
Дизаналит	0,028-9,5	Стронциопирохлор	1,4
Джонуолкит	5,1	Танталферсмит	1,5
Дравит	0,0002-0,0006	Титанит	0,07-0,7
Ильменорутил	0,15-23,5	Титанколумбит	1,7-2,5
Ильменит	0,0001-0,08	Титанлуешит	0,8-4,5
Иринит	6,3	Титаноловент	7,0
Иттроколумбит-(Y)	21,5	Ториоферсмит	1,2
Иттроэшинит	0,48	Торозшинит	0,58
Кальциобетафит	2,4	Урановый иттропирохлор	2,5-4,9
Касситерит	0,047-12,5	Ураноторит	5,9
Катаплеит	0,05-0,08	В-Фергусонит-(Ce)	0,09
Кейльгауит	0,05-0,21	В-Фергусонит-(Nd)	0,11
Кнолит	0,16	Ферриторит	0,02-0,08
Кошвит	2	Ферриураноторит	0,19
Кобеит-(Y)	4,8-5,4	Ферроколумбит	2,6-39,6
Колумбит	0,49-60,1	Цериофергусонит	0,44-2,5
Куплетскит	2,5	Цзиньшацзянит	0,07
Лабунцовит	0,08	Циркелит	0,43-3,0
Линдслейит	0,03	Чангбаит	0,37
Ловенит	5,2	Эвдиалит	0,05-1,6
Ломоносовит	0,37-0,38	Янхаугит	0,26

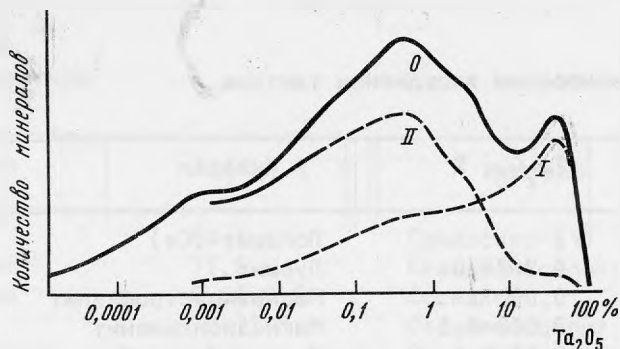


Рис. 1. Распределение пятиоксида тантала в минералах, по опубликованным данным

Для всех минералов построена кривая 0, для собственно танталовых - I, для минералов с изоморфной примесью тантала - II

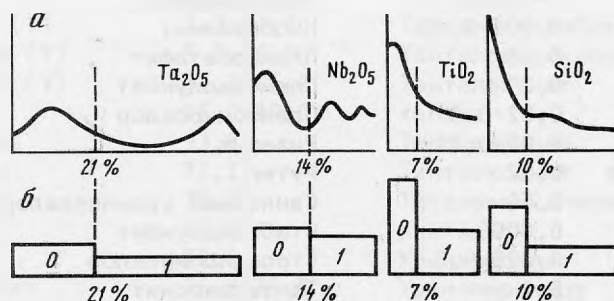


Рис. 2. Разбиение гистограмм с кодированием нулем и единицей

а - распределение содержаний окислов тантала, ниобия, титана и кремния в минералах тантала; б - огрубленные изображения гистограмм и кодовые числа для частей гистограмм

вать одну наилучшую для всех случаев систематику. Так, при первичном построении оперативного банка данных, т.е. при вводе в ЭВМ, нам удобнее формальное упорядочение минералов, как в указателе, по алфавиту при условии последующих машинных выдaч по смысловым признакам: величинам содержаний, классам минералов и др. При составлении промышленных классификаций приходится одновременно учитывать и минералы, и смеси типа лейкоксена или метапарита. Вообще прикладная задача искажает идеальную понятийную схему, зато "искаженная" схема может оказаться весьма жизненной в конкретном случае.

В табл. 1 и 2 даны алфавитные списки минералов с содержаниями тантала. Взятые из ряда публикаций величины содержаний нами округлены для уменьшения разнобоя в цифровых характеристиках. Значения содержаний округлялись до 0,0001% (в интервале величин 0,0001-0,01), до 0,01 (в интервале 0,01-1,0), до 0,1% (в интервале 1,0-100). В кадастр не включены данные по группе минералов, включающих минералы-узники с танталом. Таковы альбит, кварц, микроклин и др., обнаружившие при определениях присутствие тантала. Эти сведения имеются в литературе.

Учитывая набор опубликованных анализов минералов тантала и условно

Таблица 3

Двоичные коды – упрощенные геохимические характеристики минералов тантала

Содержания элементов (много—мало)				Повторяемость минералов с данной характеристикой
тантал	ниобий	титан	кремний	
1	1	1	0	4
1	1	0	0	44
1	0	1	0	2
1	0	1	0	8
1	0	0	0	47
0	1	1	0	11
0	1	1	0	91
0	1	0	0	102
0	0	1	0	83
0	0	1	0	47
0	0	0	1	64
0	0	0	0	7

считая анализы равноценными, можно строить геохимическую систематику минералов. По условию построения такая система не зависит от априорных минералогических и генетических систематик. Главным критерием на первом этапе оказываются величины содержаний пятиокисей тантала и ниобия, двуокисей титана и кремния. Такая система построена на рис. 2 и 3. Вначале для каждого окисла определялись границы "больших" и "малых" содержаний (в %). Было проведено несложное членение надвое гистограмм, как это показано на рис. 2.

В результате соответствующей замены содержаний на знаки "0" – МАЛО и "1" – МНОГО исходная таблица величин, здесь неприводимая, превратилась в несложный набор двоичных кодов для минералов. Такое огрубление позволило далее соединить вместе характеристики минералов, кодируемых одинаково. В информатике такие соединения называют классами условной эквивалентности. Тогда каждый набор содержаний можно снабдить повторяемостью соответствующих условно эквивалентных минералов (табл. 3). Четырехзначные двоичные числа (наборы содержаний) здесь упорядочены по их уменьшению. Все показатели "1", или МНОГО, обведены единым контуром и заштрихованы. Это нагляднее выделило важнейшие показатели всех сопоставленных минералов. Но в табл. 3 все сочетания равноценны, хотя одни из них редкие, другие – частые. Следовало бы подчеркнуть различия в повторяемостях главных характеристик танталовых минералов. Для этого построена специальная диаграмма (рис. 3). Благодаря учету повторяемости величин содержаний, огрубленных до "0" и "1", полученное изображение и является эмпирической группировкой минералов тантала. Для простоты диаграмм группы переставлены так, чтобы изменения их составов (кодовых чисел) протекали наиболее равномерно, без скачков.

Такие группы могут пополняться, детализироваться, могут соединяться в геохимическую систематику минералов не только одного элемента, но и родственной группы, например тантала, ниобия, циркония и олова. Для процедур машинной группировки такого типа была создана и опробована программа на языке ФОРТРАН-4 с использованием в алгоритме идеи перехода от дво-



Рис. 3. Группы минералов тантала в зависимости от содержаний 4 окислов  
Штриховка соответствует признаку МНОГО данного элемента. Высота столбца-группы соответствует количеству минералов в группе или повторяемости минералов с данным кодовым числом. Редкие сочетания в группировке не учтены

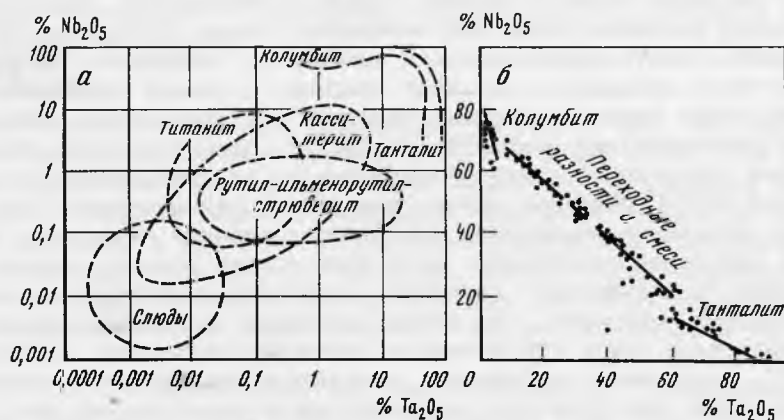


Рис. 4. Некоторые группы минералов в системе координат тантал-ниобий  
а - логарифмические шкалы; б - арифметические шкалы

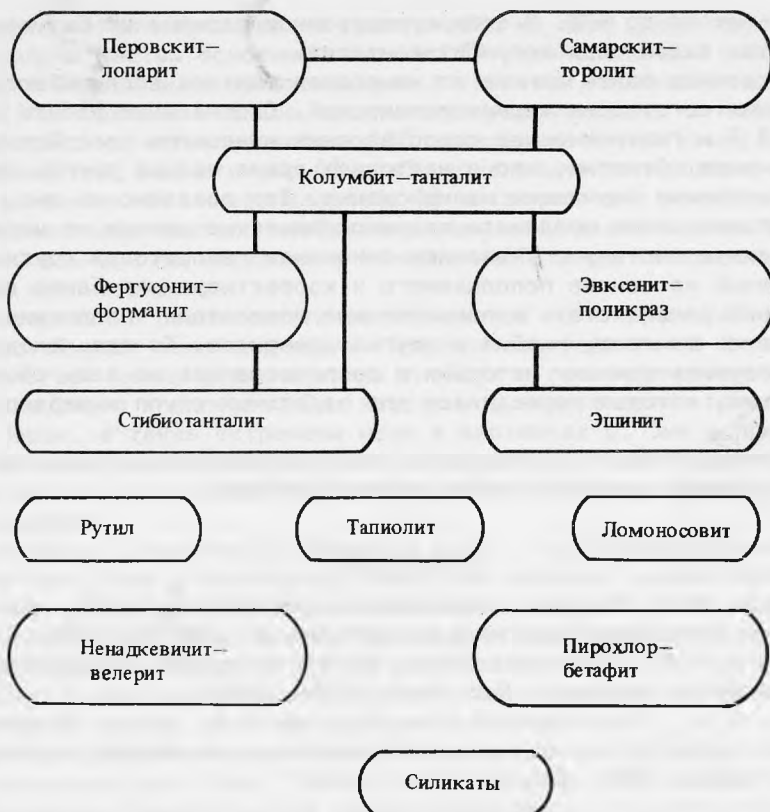


Рис. 5. Минералы тантала согласно группировке М. В. Кузьменко, Е. М. Еськовой  
Соединены группы, включившие минералы со сходными названиями, например иттрийтанталит в группе фергусонит-форманит и танталит в группе колумбит-танталит

ичного кода к коду Грея и обратно. Это позволило быстро и наглядно группировать минералы с определениями в них различных окислов.

Интересной закономерностью, проявленной на рис. 3, является относительная редкость "тройных" групп, что позволило не учитывать их при общей группировке. Не учтена и редкая (7 минералов) группа с малыми содержаниями всех четырех окислов.

Как иллюстрация такая диаграмма имеет ограничение: более 4 химических элементов отображают картину уже менее наглядную, и группировка минералов при этом хуже.

Для целей систематики удобна и координатная основа. В нашем случае естественно привлечь данные по содержаниям ниобия (рис. 4). При этом более полную систему минералов тантала удобнее отобразить в геометрическом пространстве с логарифмическими шкалами (см. рис. 4, а). Зато минералы с большими содержаниями пятиокисей лучше изображаются в арифметическом пространстве с равномерными шкалами (см. рис. 4, б). При этом намечается "природное" геохимическое разбиение множества точек-составов на рои. Оценка всей совокупности содержаний тантала и ниобия, например, позволяет относить к колумбитам минералы ряда с содержанием  $Ta_2O_5$  от 0 до 10%, а к

танталитам - от 60 до 90%. В этом существенное отличие от бытующих интервалов для этих видов ряда колумбит-танталит.

Опубликованные ранее данные по минералам тантала заслуживают дальнейшего уточнения со стороны терминологической. Специальные работы по систематике [ I-3 ] и геохимические сопоставления минералов способствуют упорядочению терминов. Отметим, что в настоящее время разные группы минералов включают родственно звучащие наименования. Это показано на рис. 5. В ближайшее время предстоит соединить терминологические данные по минералам тантала в единую систему с указанием синонимов, запретов и других необходимых отношений на основе пополняемого и корректируемого банка данных. Основой же банка должны стать количественные показатели - величины содержаний в минералах тантала, ниобия и других элементов. То есть следует продолжить, вооружить точными методами и распространить на весь объект ту систематизацию, которая проводилась для отдельных групп минералов тантала [ I и др. ].

Авторы неоднократно пользовались консультациями М.В.Кузьменко и В.Г.Фекличева, которым выражают глубокую благодарность.

#### Литература

1. Кузьменко М.В. Вопросы систематики и типохимизм группы пироклора // Типохимизм минералов гранитных пегматитов. М.: ИМГРЭ, 1984. С. 5-32.
2. Кузьменко М.В., Еськова Е.М. Тантал и ниобий: Генетические типы месторождений и геохимия. М.: Наука, 1968. 341 с.
3. Солодов Н.А., Капустин Ю.Л., Бурков В.В. и др. Основы прогнозирования, поисков и перспективной оценки месторождений тантала и ниобия. М.: Недра, 1983. 246 с.

УДК 549,647.2(571.52)

Ю.Л.Капустин

#### ПОЛЛУЦИТ ИЗ ПЕГМАТИТОВ САНГИЛЕНА

Поллуцит - относительно редкий минерал. Он встречается только в редко-металльных пегматитах с литиевой и ниобо-танталовой минерализацией, образуя скопления в центральных частях крупных пегматитовых тел с развитой зональностью. В Туве поллуцит до сих пор не описывался.

На территории нагорья Сангилен в Юго-Восточной Туве известны многочисленные пегматитовые поля. Это нагорье сложено преимущественно докембрийскими осадочно-метаморфическими образованиями, в стратиграфическом разрезе которых четко выделяются два разнородных структурно-литологических комплекса: 1) древнедокембрийский гранито-гнейсовый и 2) верхнедокембрийско-нижнекембрийский песчано-сланцево-карбонатный [ I ]. Гнейсовый комплекс метаморфизован в условиях амфиболитовой фации, неравномерно гранитизирован и содержит интрузии разнообразных гранитов, диоритов, габбро-диоритов. Верхний комплекс представлен песчаниками, кварц-серицитовыми, альбит-актинолитовыми, карбонатно-тремолитовыми и кварц-биотитовыми сланцами, песчаниками и мраморами, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой фации.