УДК 553.078

Состав и вероятный коренной источник колумбита из аллювиальных отложений района Маюко (Республика Конго)

И.П.ЛУФУАНДИ МАТОНДО, М.А.ИВАНОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты оптического, электронно-микроскопического и электронно-зондового изучения минералов подгруппы колумбита, пробы которых были получены в процессе шлихового опробования аллювиальных отложений района Маюко (Республика Конго). Исследования нацелены на выяснение природы коренного источника тантало-ниобатов в этом регионе. Установлено, что указанные минералы в рыхлых отложениях представлены двумя гранулометрическими группами зерен: менее 1,6 мм (мелкая фракция) и 1,6-15 мм (крупная фракция). Зерна обеих фракций относятся преимущественно к колумбиту-(Fe), реже к колумбиту-(Mn), танталиту-(Mn) и танталиту-(Fe), содержат примеси Sc, Ti, W. Кристаллы микроразнональные (зоны роста незначительно различаются Ta/Nb отношением), насыщены минеральными включениями и прожилками, в которых определены циркон, минералы группы пироклора и другие. Для колумбита-(Fe) и колумбита-(Mn) характерно повышенное содержание Ta₂O₅ вплоть до перехода к танталиту-(Fe) и танталиту-(Mn), что позволяет исключить из рассмотрения в качестве их коренного источника в районе Маюко породы формирования субщелочных редкометалльных гранитов и их метасоматитов (альбититов и грейзенов) и карбонатиты, а рассматривать в качестве вероятного коренного источника берилловые и комплексные сподуменовые редкометалльные пегматиты смешанного петрогенетического семейства LCT-NYF (по П.Черни). Результаты проведенных исследований важно учитывать при разработке методики проведения поисковых работ в данном районе.

Ключевые слова: минералы подгруппы колумбита; колумбит-(Fe) – ферроколумбит; колумбит-(Mn) – манганоколумбит; танталит-(Mn) – манганотанталит и танталит-(Fe) – ферротанталит; аллювиальные россыпи; коренной источник минералов; редкометалльные пегматиты; район Маюко; Республика Конго

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

Введение. В 1945 г. в районе Маюко, расположенном на юго-западе Республики Конго, во время разработки золотоносных россыпей в тяжелой фракции аллювиальных отложений современных речных долин наряду с золотом были обнаружены зерна колумбита*. С тех пор какие-либо данные о коренном источнике этого тантало-ниобиевого минерала в материалах геологических организаций Республики Конго, а также в научной литературе не появились. Эта находка уже давно обращает на себя внимание в связи с проблемой поисков месторождений редких металлов, стоящей перед геологической службой Республики Конго. Крупные месторождения ниобия и тантала на африканском континенте известны на соседних территориях со сходным геологическим строением – в Демократической Республике Конго, Руанде и других странах. Поэтому результаты исследований, представленные в данной статье, отвечают вполне актуальной задаче по определению природы вероятного коренного источника этого весьма ценного минерального сырья и учету этих данных при выборе оптимальной методики поисковых работ в данном районе.

В основу проведенных исследований положены результаты гранулометрии, изучения химического состава и неоднородности зерен колумбита в десяти шлиховых пробах, которые были получены в процессе опробования аллювиальных отложений и маршрутного изучения района.

Расположение и геология района Маюко. Район Маюко находится в департаменте Ниари в зоне тропических лесов, покрывающих гранитоидный массив Шайю. Этот массив входит в состав кратона Конго и прослеживается на территориях как Республики Конго, так и соседнего Габона. В геологическом отношении этот массив изучен слабо. Маршрутные исследования Коссона (Cosson), Девигна (Devigne), Доннота (Donnot), Буоно (Boineau), Николини (Nicolini), Новикоффа

* Под колумбитом в данной статье понимаются следующие минеральные виды группы колумбита – эвксенита подгруппы колумбита: колумбит-(Fe) – ферроколумбит, колумбит-(Mn) – манганоколумбит, танталит-(Mn) – манганотанталит и танталит-(Fe) – ферротанталит (в соответствии с современной классификацией минералов, принятой Международной минералогической ассоциацией).

(Novikoff) и Кесси (Kessi), изложенные в геологическом отчете N.Watha-Ndoudy*, позволили оконтурить этот массив и построить схематичную геологическую карту. Установлено, что в его пределах широко распространены биотитовые и амфиболовые гранодиориты, кварцевые диориты, в меньшей степени чарнокитоиды. Биотитовые разности гранодиорита характеризуются высоким содержанием микроклина и кислого плагиоклаза. Возраст пород массива оценивается как позднеархейский [10].

Поздние фазы проявления гранитоидного магматизма в массиве представлены гранитами – равномернокристаллическими и с порфировидными выделениями щелочного полевого шпата. Они залегают в виде небольших массивов и жильных тел, сопровождаются дайками аплитов и пегматитов [10]. Кроме того, отмечаются тела пикритов, пироксенитов и долеритов*.

Пегматиты массива Шайю связывают со второй фазой гранитоидного магматизма, представленной лейкократовыми гранитами. Пегматиты разделяют на две группы:

- P_1 – залегающие непосредственно в гранитах в виде штоков и жил сложной формы и состоящие из микроклина, кварца, биотита, а также хлорита и гематита*.

- P_2 – находящиеся в крупных массивах метаморфических пород в виде штоков и жил мощностью до 10 м преимущественно согласных форм залегания и состоящие из плагиоклаза, микроклина, кварца, биотита и мусковита; второстепенными минералами являются турмалин (шерл) и хлорит. Характерны структуры блоковые и графические. Размер индивидов полевых шпатов достигает 30 см в поперечнике. В крупно- и гигантокристаллических структурных разновидностях этих пород плагиоклаз преобладает над микроклином. В графическом пегматите, наоборот, главным минералом является микроклин. Тела пегматитов P_2 ассоциируют с кварцевыми жилами.

Породы массива Шайю в нескольких районах перекрыты протерозойскими комплексами пород осадочного чехла – конгломератами, аркозовыми песчаниками, аргиллитами, доломитами, глинистыми и битуминозными сланцами [10].

В гранитоидных полях массива Шайю присутствуют массивы метаморфических пород догранитного мигматито-гнейсового комплекса [10], относящиеся к двум зеленокаменным поясам – Занага и Маюко. Оба массива находятся на территории Республики Конго. В строении их толщ принимают участие амфиболиты, гнейсы, железистые кварциты (итабириты и джеспилиты). Массивы этих пород составляют тела, ограниченные в плане со всех сторон тектоническими контактами с вмещающими гранитоидами. Подобно ксенолитам, такие тела в плане имеют остроугольную форму залегания, но в отличие от обычных ксенолитов характеризуются весьма значительными размерами в плане – до 150 км². Очевидно, что такие образования представляют собой части погребенных метаморфических толщ.

Породы зеленокаменного пояса Маюко представлены амфиболитами, амфиболовыми, биотитовыми и двуслюдяными гнейсами и железистыми кварцитами. Толща этих пород смята в линейные складки северо-восточного простирания и прослеживается в северо-восточном направлении в виде полосы длиной 20 км и шириной 5 км. Их возраст оценивается как архейский в пределах 3000-3100 млн лет*.

Считается, что породы Маюко имеют параметаморфический генезис, сформировались в условиях амфиболитовой фации регионального метаморфизма, хотя первично осадочное происхождение амфиболитов, входящих в их состав, считается недоказанным*.

Метаморфические породы секутся жильными телами пегматитов P_2 . Пегматиты P_1 выявлены на границе метаморфических пород района Маюко с гранитами массива Шайю в долине реки Леую*.

В практическом отношении район Маюко известен проявлениями железистых кварцитов (джеспилитов) и россыпного золота [13]. В речных отложениях известны находки алмаза, корунда, ильменита, рутила и хромита. В связи с обнаружением в аллювиальных отложениях минералов подгруппы колумбита этот район считается перспективным для поисков коренных месторождений руд тантала и ниобия.

* Noël Watha-Ndoudy. Caractéristiques morphologiques et géochimiques des grains d'or: application a la prospection des placers de Mayoko (Congo). 1993. 1993 INPL113N.

До недавнего времени многие исследователи района Маюко считали, что материнскими породами для колумбита в этом районе являются пегматиты P_2 . В материалах заседания Экономического и Социального совета ООН, состоявшегося 5-10 февраля 1968 в г. Аддис-Абеба*, сохранились сведения о том, что в начале 60-х гг. прошлого столетия в районе Маюко были проведены поисковые работы на данный вид полезных ископаемых. Было пройдено 214 шурфов и 66 погонных метров поисковых канав. В результате проведенного опробования и лабораторного изучения отобранных проб признаки колумбитовой минерализации в пегматитах P_2 не были обнаружены. Более поздними работами в пегматитах P_2 были выявлены берилл, монацит, циркон, рутил, а также псевдоморфозы магнетита по гематиту – мартит**.

Методика исследования. Для исследования было отобрано 10 шлиховых проб массой от 62 до 500 г. Первичная обработка шлихов проводилась по стандартной схеме, включающей разделение на гранулометрические фракции по размеру, выделение магнитной, электромагнитной и неэлектромагнитной фракций и выделение мономинеральных фракций под оптическим микроскопом.

Химический состав минералов подгруппы колумбита определялся методами ЭДС-анализа с помощью электронного микроскопа и микроанализатора JEOL-JSM-6510LA (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, оператор О.Л.Галанкина), CamScan MV2300 (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург), Camebax SX50 (МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, оператор Д.А.Ханин). Препараты для микрозондовых исследований (аншлифы) изготавливались авторами статьи на основе связующей массы протокрила с алмазной полировкой.

Изучен химический состав 32-х зерен колумбита мелкой фракции (91 определение) и 15 зерен этого минерала крупной фракции (128 определений). В среднем предусматривалось 2-3 определения в одном зерне мелкой фракции, и 3-5 определений в одном зерне крупной фракции. Состав наиболее крупных зерен колумбита определялся по зонам роста (8 определений).

Гранулометрическая характеристика колумбита. Размер зерен колумбита во всех шлиховых пробах меняется от 0,2 до 15 мм в поперечнике. Установлено, что в массе зерен этого минерала по гранулометрическим признакам выделяются две группы (фракции). Первая фракция представлена полуокатанными и окатанными обломками кристаллов величиной 1,6-15 мм. Вторая фракция характеризуется идиоморфными менее окатанными кристаллами преимущественно уплощенного, реже удлиненного облика, а также обломками кристаллов величиной 0,2-1,5 мм. Такие различия послужили основанием для разделения проб этого минерала на две гранулометрические фракции: крупной (более 1,6 мм) и мелкой (менее 1,6 мм).

Особенности химического состава колумбита. Установлено, что кристаллы колумбита неоднородны. Им свойственны зональность и секториальность, минеральные микровключения и прожилки вторичных преобразований (рис.1). Зональность проявляется за счет изменения соотношения содержания Nb_2O_5 и Ta_2O_5 и не коррелируется с изменением содержания FeO и MnO . Минеральные включения представлены ильменорутилом, шеелитом, комаровитом. В минерализованных трещинах и прожилках обнаружены циркон, минералы группы пироклора.

Содержание основных и примесных химических элементов в зернах колумбита обеих гранулометрических фракций (мас.%, см. таблицу) изменяется в следующих диапазонах:

• мелкая фракция: $Nb_2O_5 = 5,82-73,11 \%$; $Ta_2O_5 = 3,28-77,79 \%$; $FeO = 2,28-18,08 \%$; $MnO = 1,98-14,35 \%$; $Sc_2O_3 = 0,08-1,01 \%$; $WO_3 = 0,06-2,04 \%$; $TiO_2 = 0-5,3 \%$; $CaO = 0-3,35 \%$; $SiO_2 = 0-4,32 \%$; $MgO = 0,54$ и $0,78 \%$ (2 опр.);

• крупная фракция: $Nb_2O_5 = 30,69-72,79 \%$; $Ta_2O_5 = 6,97-51,61 \%$; $FeO = 3,56-16,99 \%$; $MnO = 3,18-13,79 \%$; $Sc_2O_3 = 0,36-0,84 \%$; $WO_3 = 0,51-3,04 \%$; $TiO_2 = 0,33-5,04 \%$; $CaO = 0-3,34 \%$; $SiO_2 = 0,45 \%$ (1 опр.); $MgO = 0,02-0,83 \%$.

По содержанию основных компонентов колумбит обеих фракций относится преимущественно к железистой разновидности минералов этой подгруппы – ферроколумбиту (колумбит-(Fe)). В мелкой фракции также встречается ферротанталит, манганоколумбит и манганотанталит, среди зерен крупной фракции отмечают манганоколумбит (рис.2).

* Aperçu documentaire sur la situation du pays pour les minéraux suivant (Communication présentée par le Gouvernement de la République du Congo).

** Noël Watha-Ndoudy. Caractéristiques morphologiques et géochimiques des grains d'or: application à la prospection des placers de Mayoko (Congo). 1993. 1993 INPL113N.

Рис. 1. Изображения зерен минералов в режиме BSE

Mcl – манганоколумбит, Mc – микролит, Fcl – ферроколумбит, Ftn – ферротанталит, Zr – циркон, Pc – пирохлор, Sh – шеелит

Рис.2. Состав минералов подгруппы колумбита района Маюко на диаграмме Ta/(Nb + Ta) и Mn/(Mn + Fe):
а – мелкая фракция, б – крупная фракция

В качестве элементов-примесей отмечаются Sc, W, Ti, Ca, Mg и Si. Зерна крупной фракции по сравнению с мелкими обогащены W (рис.3, а) и обеднены Sc (рис.3, в, з). По содержанию Ca и Ti обе фракции не различаются (рис.3, б, д, е). Однако зерна крупной фракции между собой различаются по содержанию Ti и Sc (рис.3, в, е): одни обеднены Ti и Sc – это ферроколумбит и манганоколумбит с повышенным содержанием Ta₂O₅ (44-51,62 %); другие обогащены Ti и Sc – ферроколумбит и манганоколумбит с пониженным содержанием Ta₂O₅ (до 40 %). Последние в свою очередь разделяются на две подгруппы по содержанию Sc: до 0,3 и 0,3-0,6 мас. %.

Примесь Si отмечается в зернах колумбита только мелкой фракции (рис.3, ё), а примесь Mg, наоборот, в основном только в зернах крупной фракции (рис.3, ж).

Среднее содержание химических элементов в минералах подгруппы колумбита Маяко (крупная фракция), мас.%

Номер пробы (зерна)	1	2	3	8	7	6	9	10	11	12	13	14
Число определений	5	4	3	8	4	3	5	4	4	5	3	7
TiO ₂	0,56	0,57	2,94	3,47	0,49	3,13	3,28	4,62	3,91	3,36	3,91	2,95
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FeO	8,25	3,71	14,98	13,78	11,46	10,21	13,36	14,07	13,76	10,48	13,87	14,26
MnO	9,41	13,59	4,11	5,29	5,83	8,74	5,42	5,11	5,02	8,37	4,86	3,83
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CaO	—	0,13	—	—	—	—	—	—	0,20	0,07	—	—
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc ₂ O ₃	—	—	0,66	0,65	—	0,78	0,6	0,67	0,70	0,56	0,75	0,58
Nb ₂ O ₅	37,07	32,81	60,41	60,80	37,02	61,5	60,14	61,38	62,15	63,14	61,86	57
Ta ₂ O ₅	45,03	48,87	17,31	16,09	45,47	14,43	17,13	13,31	12,77	11,78	13,42	20,57
WO ₃	—	—	—	0,29	—	1,72	0,51	0,46	1,48	1,9	1,86	0,82
Bi ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100,31	99,68	100,39	100,37	100,26	100,53	100,43	99,61	99,99	99,65	100,53	100,01
Номер пробы (зерна)	9-2a	01-3	9-1в	8-1a	8-2a	22.2	21.1	21.2	21.3	21.4	5*1	20.2
Число определений	2	3	10	10	10	7	3	2	2	9	1	1
TiO ₂	2,59	0,66	3,06	2,05	2,24	2,68	1,56	1,99	0,92	1,21	1,13	0,87
Al ₂ O ₃	—	—	0,02	—	0,05	—	—	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FeO	11,57	11,12	11,86	15,05	7,37	12,84	15,45	14,32	14,86	13,68	14,09	14,83
MnO	4,08	4,08	7,51	4,29	10,67	3,99	3,74	4,36	4,34	4,62	4,13	4,88
MgO	—	—	0,13	0,63	0,07	—	—	—	—	—	—	—
CaO	—	—	0,08	0,04	1,73	1,84	—	—	—	0,62	—	0,14
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc ₂ O ₃	0,55	0,00	0,53	0,51	0,73	0,60	0,19	—	—	—	0,21	—
Nb ₂ O ₅	57,81	55,49	58,75	63,05	63,67	63,30	66,23	62,20	65,59	64,60	29,48	64,78
Ta ₂ O ₅	23,48	28,66	17,37	14,60	12,38	14,09	11,37	15,96	15,16	14,82	58,46	14,98
WO ₃	—	—	—	—	—	0,83	1,47	1,17	0,40	0,41	—	—
Bi ₂ O ₃	—	—	0,04	—	0,05	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100	100,01	99,29	100,21	98,71	100,16	100	100	101,26	99,96	100,82	100,49
Номер пробы (зерна)	20.3	20.4	6*2	19.1	19.2	19.3	19.4	18.1	18.2	18.3	18.4	17
Число определений	2	3	1	1	2	2	2	1	1	2	1	4
TiO ₂	0,78	1,08	1,92	1,73	1,24	3,75	2,22	4,59	1,25	1,08	1,09	1,31
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	0,66	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	0,22	—	—	—	—
FeO	14,33	15,44	5,27	14,92	15,56	13,85	15,78	10,85	16,43	14,38	18,08	14,96
MnO	4,12	4,76	12,28	4,74	4,37	4,94	3,09	2	3,17	4,63	1,98	3,90
MgO	—	—	—	—	—	—	0,68	—	—	—	—	—
CaO	—	—	—	—	—	—	—	3,61	—	—	—	—
Na ₂ O	—	—	—	0,41	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc ₂ O ₃	—	—	0,55	0,51	—	0,74	0,04	—	—	—	—	—
Nb ₂ O ₅	44,68	70,01	52,22	65,22	59,87	59,04	66,64	63,84	70,85	63,11	71,15	56,96
Ta ₂ O ₅	35,43	9,63	27,87	12,47	18,97	16,96	10,76	9,24	6,77	15,11	8,61	23,12
WO ₃	—	—	—	—	—	0,73	0,81	—	1,53	1,71	—	—
Bi ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	99,32	100,92	100	100	100,01	100	99,99	94,99	100	100,01	100,91	100,25
Номер пробы (зерна)	16.1	16.2	16.3	16.4	23.1	23.2	23.3	24	26	29	13*4	30.2
Число определений	2	2	1	1	1	2	3	1	2	3	1	1
TiO ₂	1,25	1,36	0,98	1,26	1,62	1,93	3,06	2,07	0,00	1,97	1,22	1,83
Al ₂ O ₃	0,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FeO	12,86	14,52	15,71	11,94	16,66	11,20	15,17	14,20	3,12	14,77	2,78	12,03
MnO	4,32	5,34	4,22	7,84	3,61	8,79	3,97	5,29	12,50	4,47	13,13	5,80
MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CaO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,32	0,13
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc ₂ O ₃	—	—	—	—	0,26	0,47	0,71	0,53	—	0,50	0,21	—
Nb ₂ O ₅	34,98	60,67	60,11	57,60	71,78	63,62	57,85	66,76	7,10	64,72	24,36	40,77
Ta ₂ O ₅	44,95	18,33	19,39	22,26	6,07	13,33	19,32	9,83	76,79	11,84	52,62	39,54
WO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	98,6	100,22	100,4	100,89	100	99,33	100,07	98,68	99,51	98,27	100	100,09

Рис.3. Диаграммы соотношения содержания компонентов в минералах подгруппы колумбита Маюко: а – W и Ta/(Ta + Nb); б – Ca и Ta/(Ta + Nb); в, г – Sc и Ta/(Ta + Nb); д, е – Ti и Ta/(Ta + Nb); ё – Si и Ta/(Ta + Nb); ж – Mg и Ta/(Ta + Nb)

Рис.4. Диаграммы зависимости содержания компонентов в минералах подгруппы колумбита Маюко:
а – (Ti + Sc) и (Fe + Mn) + Ta + Nb); б – 3Ti и (Fe + Mn) + 2(Ta + Nb); в – Sc и Ti; г – W и (Ta + Nb)

О форме нахождения Ti в минералах подгруппы колумбита можно судить исходя из следующих теоретически обоснованных схем изоморфного вхождения этого элемента в структуру минералов [26, 31]:

Эвксенитовый тип вхождения Ti вместо Nb не всегда допустим, так как соотношение катионов A и B в структуре колумбита составляет 1:2, в то время как в структуре эвксенита это соотношение 1:1. Но присутствие в колумбите примеси Sc обуславливает возможность вхождения Ti именно в позицию Nb (рис.4, в) [26]. Зависимость содержания перечисленных элементов в зернах колумбита (рис.4, а, б) позволяют предположить, что Ti изоморфно входит в структуру изученного минерала по двум схемам замещения: эвксенитовой и рутиловой.

Содержание вольфрама в изученном минерале слабо коррелируется с содержанием Nb и Ta, так что можно предположить, что его содержание связано с тончайшей минеральной примесью какого-либо минерала, например, шеелита, обнаруженного в виде микровключений (рис.4, г).

Вероятный коренной источник. Как известно, тантало-ниобиевая минерализация, главным рудным минералом которой являются минералы подгруппы колумбита, может быть связана с пегматитами и редкометалльными гранитами [11, 12, 15, 17, 18]. С этими же породами связаны и основные геолого-промышленные типы танталовых и тантало-ниобиевых месторождений. Показателем генетической связи минералов подгруппы колумбита с теми или иными породами является содержание в этих минералах основных химических компонентов [2, 5, 6, 26, 29].

Проведенные исследования показали, что в ферроколумбите и манганоколумбите района Маюко содержание Ta_2O_5 в основном меняется от 14 до 40 % со средним значением 19 для крупной гранулометрической фракции, и 21 % – для мелкой фракции зерен. Лишь в 14 точках изме-

рений содержание Ta_2O_5 ниже 10, но более 5 %. По этому показателю ферроколумбит и манганоколумбит Маюко не может быть отнесен к акцессорным минералам пород формации субщелочных редкометалльных гранитов и их метасоматитов (альбититов и грейзенов), так как для этих пород характерен преимущественно ферро- или манганоколумбит с более низким содержанием пятиокси тантала (Ta_2O_5) – до 3 (по данным К.А.Власова с соавторами [6, 7]) или меньше 10 % (по данным С.М.Бескина [2]). В указанных метасоматитах очень редко в единичных кристаллах содержание пятиокси тантала доходит до 28 % и часто кристаллы ферроколумбита находятся в сростании с минералами Fe и Ti [28].

Принадлежность изученных минералов к карбонатитам и щелочным пегматитам также исключается из-за их существенного отличия от колумбита по содержанию пятиокси тантала. Кроме того, в карбонатитах и щелочных пегматитах минералы подгруппы колумбита обычно находятся в сростании с пироксеном или гатчеттолитом [1], что не отмечается для колумбита изучаемого района.

В качестве вероятного коренного источника колумбита Маюко можно рассматривать два типа пород, в которых ферроколумбит и манганоколумбит имеют сходные показатели содержания Ta_2O_5 : литий-фтористые редкометалльные граниты и их метасоматиты; гранитные пегматиты.

Первый тип можно исключать из рассмотрения потому, что минералы подгруппы колумбита в таких породах являются типичными акцессориями с размером кристаллов от 0,01 до 0,2, редко достигающими 0,5 мм [22, 25, 27]. Для них характерно нахождение в виде микровключений как в пороодообразующих минералах – кварце, мусковите, альбите, лепидолите [22, 27], так и в других акцессорных минералах – топазе и берилле [27]. Как видим, колумбит Маюко характеризуется совершенно другими гранулометрическими и минералогическими показателями.

Второй тип пород (гранитные пегматиты) более вероятен в качестве коренного источника колумбита Маюко. Именно в некоторых из них кристаллы колумбита (как в нашем случае) достигают значительных размеров и характеризуются сходным химическим составом [3, 4, 21, 26, 29].

Гранитные пегматиты мусковитовой, а тем более керамической формации можно исключить из рассмотрения, так как тантало-ниобаты для них не характерны. Очень редко (единичные находки Б.М.Шмакина и других исследователей) они обнаруживаются в пегматитах мусковитовой формации [8, 19]. Тем более, что в таких пегматитах эти минералы представлены существенно ниобиевыми минеральными видами [1].

Отсюда делаем вывод, что коренным источником колумбита аллювиальных отложений района Маюко могут являться пегматиты редкометалльной формации, так как именно для этих образований характерны минералы подгруппы колумбита с таким же высоким содержанием пятиокси тантала, как в колумбите Маюко [3, 4, 20, 21, 29]. Именно в редкометалльных пегматитах присутствуют представители всех минеральных видов системы ферроколумбит-манганоколумбит-манганотанталит-ферротанталит [1, 9, 15, 21, 29]. Такая ситуация сложилась в районе Маюко: здесь обнаружены как ферро- и манганоколумбит, так и ферро- и манганотанталит.

В этой связи следует обратиться к петрогенетической классификации пегматитов, разработанной П.Черни [24]. Как известно, в ней редкометалльные пегматиты разделены на петрогенетические семейства: LCT, NYF и смешанные (LCT-NYF). Пегматиты семейства LCT в зависимости от состава преобладающей минерализации разделены на берилловые, комплексные, альбит-сподуменовые и альбитовые типы. На диаграмме П.Черни (рис.5) показана общая тенденция изменения состава минералов подгруппы колумбита в эволюционном ряду образования берилловых и комплексных редкометалльных пегматитов. Сопоставляя эту диаграмму с данными проведенных исследований, можно сделать вывод, что мелкая фракция колумбита района Маюко соответствует берилловым и сподуменовым подтипам пегматитов (рис.5, а), а крупная – сподуменовым и комплексным сподуменовым подтипам этих пород (рис.5, б).

Менее определенно решается вопрос об отнесении изученных минералов к альбит-сподуменовому и альбитовому типу редкометалльных пегматитов. Известно, что для альбит-сподуменовых пегматитов характерен собственно колумбит, в то время как альбитовым пегматитам свойственны средние члены минералов подгруппы колумбита [14-16]. Вместе с тем, состав колумбита в таких пегматитах, как отмечают исследователи, еще слабо изучен, и поэтому вариант отнесения к таким породам колумбита Маюко в данном случае не рассматривается.

Рис.5. Значения состава минералов подгруппы колумбита района Маюко на диаграмме $Ta/(Nb+Ta)$ и $Mn/(Mn+Fe)$ в сравнении с составом минералов этой подгруппы в эволюционных рядах образования берилловых и комплексных редкометалльных пегматитов (стрелки) по данным П.Черни [23]: а – мелкая фракция, б – крупная фракция

1 – берилловые пегматиты, 2 – сподуменовые пегматиты, 3 – комплексные сподуменовые пегматиты, 4 – комплексные лепидолитовые пегматиты, 5 – комплексные петалитовые пегматиты

Пегматиты семейства NYF характеризуются следующими геохимическими признаками минералов подгруппы колумбита: повышенным содержанием Y, Ti, Sc, U, Th, Zr, F, Nb > Ta [24, 26, 30]. В этом семействе выделяются редкоземельные пегматиты, которые П.Черни относил к типам редкометалльных пегматитов. По содержанию элементов-примесей минералы подгруппы колумбита района Маюко отличаются от минералов этой подгруппы из пегматитов семейства LCT повышенным содержанием Ti (до 5 %), Sc (до 1 %) и полным отсутствием Sn, что сближает их с пегматитами семейства NYF [26].

Поисковые работы и минералогические исследования, ранее проведенные в районе Маюко, не выявили колумбитовую минерализацию в гранитных пегматитах Π_1 и Π_2 . Поэтому эти породы не могут рассматриваться в качестве потенциальных промышленных источников минералов подгруппы колумбита, так как не обладают какими-либо минералогическими признаками редкометалльности. По наблюдениям авторов статьи, в этих породах не обнаруживаются типичные для редкометалльных пегматитов второстепенные и акцессорные минералы, такие как альбит в виде клевеландита, светлоокрашенные и полихромные разновидности турмалина (эльбаита), сподумен, лепидолит и другие. По-видимому, их следует относить к безрудным пегматитам, образование которых было связано или с процессами регионального метаморфизма и ультраметаморфизма, или сопряженного с ним гранитоидного магматизма в толще пород, представленных в районе Маюко гнейсами, сланцами и амфиболитами. Выходы на поверхность тел редкометалльных пегматитов, явившиеся источником колумбита в россыпях данного района, вероятно, остаются погребенными под толщей рыхлых отложений в тропических лесах Маюко.

Выводы

1. Минералы подгруппы колумбита аллювиальных отложений района Маюко характеризуются двумя гранулометрическими фракциями зерен, различающихся степенью окатанности и размером: мелкие, слабо окатанные (0,2-1,5 мм); крупные, полуокатанные (1,6-15,0 мм). Среди зерен мелкой фракции встречаются кристаллы уплощенного и короткостолбчатого обликов. Это позволяет предположить, что колумбит оказался в аллювиальных отложениях при разрушении пород, различающихся по вещественно-структурным характеристикам.

2. По содержанию основных компонентов минералы подгруппы колумбита Маюко относятся преимущественно к железистым минеральным видам этой подгруппы. Выделяются ферро- и манганоколумбит, ферро- и манганотанталит. Ферро- и манганоколумбит характеризуются повышенным содержанием Ta_2O_5 (6-51 и 62 %). В качестве главных элементов-примесей отмечаются Sc, W и Ti.

3. Химический состав индивидов минералов подгруппы колумбита осложнен зональностью, минеральными включениями и прожилками вторичных преобразований. Зональность выражена в чередовании микрозон, различающихся по соотношению содержания Nb и Ta. Минеральные включения представлены ильменорутилом, пироксеном, микролитом, шеелитом, камаровитом. Прожилки, образовавшиеся в процессе преобразования, в зернах обеих фракций представлены минералами группы пироксена. В зернах крупной фракции отмечаются прожилки, заполненные цирконом.

4. По содержанию Nb и Ta исследованные минералы подгруппы колумбита соответствуют этим минералам из редкометалльных гранитных пегматитов бериллового и сподуменого комплексного типов (LCT – в соответствии с классификацией П.Черни [23]). С учетом повышенного содержания Sc и Ti многие зерна изученных минералов соответствуют редкометалльным пегматитам смешанного типа (LCT-NYF).

5. Тела коренных редкометалльных пегматитов, являющиеся потенциальными источниками минералов подгруппы колумбита Маюко, вероятно, скрыты под рыхлыми отложениями вблизи развития аллювиальных россыпей, в которых обнаруживаются эти минералы. Наличие в рыхлых отложениях зерен минералов подгруппы колумбита двух гранулометрических фракций позволяет предположить, что вероятным коренным источником наиболее крупных зерен этих минералов являются тела собственно редкометалльных пегматитов, а зерен мелкой фракции – тела мелкокристаллических пород в виде редкометалльных пегматоидных гранитов, характерных для пегматитовых полей многих редкометалльных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас минералов и руд редких элементов / Под ред. А.И.Гинзбурга. М.: Недра, 1977. 264 с.
2. Бескин С.М. Геология и индикаторная геохимия тантал-ниобиевых месторождений России (редкометалльные граниты). М.: Научный мир, 2014. 112 с.
3. Волошин А.В. Минералы и эволюция минералообразования в амазонитовых пегматитах Кольского полуострова / А.В.Волошин, Я.А.Пахомовский. Л.: Наука, 1986. 168 с.
4. Волошин А.В. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах / А.В.Волошин, Я.А.Пахомовский. Л.: Наука, 1988. 242 с.
5. Волошин А.В. Тантало-ниобаты. Систематика, кристаллохимия и эволюция минералообразования в гранитных пегматитах. СПб: Наука, 1993. 298 с.
6. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов / Под ред. К.А.Власова. М.: Наука, 1964. Т. 2: Минералогия редких элементов. 830 с.
7. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов / Под ред. К.А.Власова. М.: Наука, 1966. Т. 3: Генетические типы месторождений редких элементов. 860 с.
8. Гинзбург А.И. Основы геологии гранитных пегматитов / А.И.Гинзбург, И.Н.Тимофеев, Л.Г.Фельдман М.: Недра, 1979. 296 с.
9. Гранитные пегматиты. Том 2. Редкометалльные пегматиты / В.Е.Загорский, Л.Г.Кузнецова, В.А.Макрыгина, В.М.Макагон, Б.М.Шмакин. Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1997. 285 с.
10. Григорьев В.М. Геология и полезные ископаемые Африки / В.М.Григорьев, Е.А.Долгинов, В.П.Поникаров. М.: Недра, 1990. 415 с.
11. Курс рудных месторождений / В.И.Смирнов, А.И.Гинзбург, В.М.Григорьев, Г.Ф.Яковлев. М.: Недра, 1986. 360 с.
12. Минералы. Т. 2. Вып. 3: Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроокислы / Под ред. Ф.В.Чухрова, Э.М.Бонштедт-Куплетской. М.: Наука, 1967. 676 с.
13. Розин М.С. Минеральные богатства Африки. М.: Мысль, 1972. 336 с.
14. Солодов Н.А. Внутреннее строение и геохимия редкометалльных гранитных пегматитов. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 234 с.
15. Солодов Н.А. Геологический справочник по тяжелым литофильным редким металлам / Н.А.Солодов, Е.Н.Семенов, В.В.Бурков, Под ред. Н.П.Лаверова. М.: Недра, 1987. 438 с.
16. Солодов Н.А. Научные основы перспективной оценки редкометалльных пегматитов. М.: Наука, 1971. 292 с.
17. Солодов Н.А. Минералогия редкометалльных формаций. М.: Недра, 1985. 224 с.
18. Так что же такое «редкометалльный гранит»? / С.М.Бескин, Ю.Б.Марин, В.В.Матиас, С.П.Гаврилова // Записки Всероссийского минералогического общества. 1999. № 6. С. 28-40.
19. Шмакин Б.М. Пегматитовые месторождения зарубежных стран. М.: Недра, 1987. 224 с.
20. A geological, geochemical and textural study of a LCT pegmatite: implications for the magmatic versus metasomatic origin of Nb-Ta mineralization in the Moose II pegmatite, Northwest Territories, Canada / M.O.Anderson, D.R.Lentz, C.R.M. Mcfarlane, H.Falck // Journal of Geosciences. 2013. № 58. P. 299-320. DOI: 10.3190/jgeosci.149
21. Analytical fingerprint of columbite-tantalite (coltan) mineralisation in pegmatites – Focus on Africa / F.Melcher, T.Graupner, F.Henjes-Kunst, T.Oberthür, M.Sitnikova, E.Gäbler, A.Gerdes, H.Brätz, D.Davis, S.Dewaele: Ninth International Congress for Applied Mineralogy, Brisbane, QLD, 8-10 September, 2008. P. 615-624.

22. Belkasmí M. Les columbo-tantalites zonées du granite de Montebas (Massif central français). Implications pétrogénétiques / M.Belkasmí, M.Cuney // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Science 1998. Vol. 326. Iss. 7. P. 459-465. DOI: 10.1016/S1251-8050(98)80060-8
23. Černý P. Characteristics of pegmatite deposits of tantalum: Lanthanides, Tantalum and Niobium // Special Publication № 7 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. 1989. P. 195-239.
24. Černý P. Rare-element Granitic Pegmatites. Part I: Anatomy and Internal Evolution of Pegmatite Deposits // Geoscience Canada. 1991. Vol.18. № 2. P. 49-67.
25. Diversity of Ti-Sn-W-Nb-Ta oxide minerals in the classic granite-related magmatic-hydrothermal Cinovec / Zinnwald Sn-W-Li deposit (Czech Republic) / K.Breiter, Z.Korbelová, Š.Chládek, P.Uher, I.Knesl, P.Rambousek, S.Honig, V.Šešulka // European Journal of Mineralogy. 2017. Vol. № 4. P. 727-738. DOI: 10.1127/ejm/2017/0029-2650
26. Ercit T.S. The geochemistry and crystal chemistry of columbite-group minerals from granitic pegmatites, south western Grenville province, Canadian shield // The Canadian Mineralogist. 1994. Vol. 32. P. 421-438.
27. Geochemical and petrographic studies of Ta mineralization in the Nuweibi albite granite complex, Eastern Desert, Egypt / H.Helba, R.B.Trumbull, G.Morteani, S.O.Khalil, A.Arslan // Mineralium Deposita. 1997. № 32. P. 164-179.
28. Ixer R.A. Accessory mineralogy of the Ririwai biotite granite, Nigeria, and its albitized and greisenized facies / R.A.Ixer, J.R.Ashworth, C.M.Pointer // Geological Journal. 1987. Vol. 22. P. 403-427.
29. Tindle A.G. Columbite-tantalite mineral chemistry from rare-element granitic pegmatites: Separation Lakeharea, N.W. Ontario, Canada / A.G.Tindle, F.W.Brears // Mineralogy and Petrology. 2000. № 70. P. 165-198. DOI: 10.1007/S007100070002
30. U-Pb isotope and trace element analysis of columbite-(Mn) and zircon by laser ablation ICP-MS: Implications for geochronology of pegmatite and associated ore deposits / X.-D.Deng, J.-W.Li, X.-F.Zhao, Z.-C.Hu, H.Hu, D.Selby, Z.S. de Souza // Chemical Geology. 2013. Vol. 344. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.02.014
31. Wise M.A. Scandium substitution in columbite-group minerals and ixiolite / M.A.Wise, P.Cerný, A.U.Falster // The Canadian Mineralogist. 1998. Vol. 36(2). P. 673-680.

Авторы: **И.П.Луфунди Матондо**, аспирант, idypleplachini@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **М.А.Иванов**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, ivanov_ma@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 17.10.2019.

Статья поступила в редакцию 12.02.2020.