

## РУДНАЯ НИОБИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И РУДОПРОЯВЛЕНИЙ ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2015 г. И. Л. Недосекова, С. В. Прибавкин

Ильмено-Вишневогорский комплекс (ИВК) – один из крупных щелочных карбонатитовых комплексов мира с редкометалльно-редкоземельной минерализацией и многочисленными месторождениями и рудопроявлениями редкометалльного, редкоземельного и керамического сырья. Еще в начале XIX в. в Ильменских горах разведывались и разрабатывались многочисленные копи – рудопроявления редких металлов, связанные с редкометалльными пегматитами. В 1924 г. в Ильменских горах И. Менге были открыты титано-ниобиевые минералы (колумбит и эшинит), а в 1928 г. Г. Розе был описан пироксид [7].

В 40-х гг. XX в. в северной части ИВК в Вишневогорском массиве миаскитов открыты карбонатиты с пироксидной минерализацией. Во время Великой Отечественной войны страна остро нуждалась в ниобии, и в Вишневых горах были организованы старательские артели для добычи пироксидов и циркона из пегматитовых жил, а также поисково-разведочная экспедиция, возглавляемая М.Г. Исаковым. Работами этой экспедиции в миаскитах седловидной залежи Вишневогорского массива открыта первая наиболее богатая рудная зона Вишневогорского месторождения ниобия (зона 140). В конце 1950-х гг. был организован Вишневогорский ГОК и начата промышленная разработка Вишневогорского месторождения. В последующие 50 лет в результате поисково-съемочных и геолого-разведочных работ Уральской ГСЭ, Вишневогорской ГРП, Челябинской ГРЭ открыты новые месторождения и рудопроявления ниобия и редких земель, связанные с карбонатитами Ильмено-Вишневогорского комплекса – Булдымское REE–Nb-месторождение в карбонатитах Булдымского ультрабазитового массива, Потанинское Nb-месторождение, а также многочисленные рудопроявления Nb и REE (Ишкульское, Байдашевское, Увильдинское, Пургино, Спирихинское и др.) [6].

ИВК состоит из двух миаскитовых массивов – Вишневогорского и Ильменского, соединенных между собой Центральной щелочной полосой (ЦЩП), сложенной мелкими телами миаскитов, сиенитов, щелочных метасоматитов и карбонатитов. Широко развиты миаскит-пегматиты и сиенит-пегматиты, встречающиеся как в эндо-, так и в экзо-

контактах миаскитовых массивов. Наиболее крупные месторождения пироксидных карбонатитов находятся в северной части комплекса в зоне эндо- и экзоконтакта Вишневогорского миаскитового интрузива. Вишневогорское месторождение ниобия связано с пироксидсодержащими карбонатитами, приурочено к СЗ эндоконтакту Вишневогорского массива миаскитов (зона 147), а также к седловидной залежи миаскитов (зона 140). Кроме того, отдельные зоны Вишневогорского месторождения связаны с карбонатитами в фенитах в экзоконтакте Вишневогорского интрузива (зоны 125 и 135).

Карбонатиты образуют пластообразные тела и дайки протяженностью в сотни метров и мощностью до 10 м в апикальной части Вишневогорского массива миаскитов. Ранние карбонатиты (Севиты I) представляют собой массивные и брекчиевидные (“кимберлитоподобные”) разности кальцитового состава, содержащие автолиты – перемещенные округлые включения миаскитов и миаскит-пегматитов и минералы миаскитов (нефелин, полевые шпаты, биотит), а также акцессорные гатчетолит, красно-бурый пироксид, циркон, ильменит, апатит, магнетит, пирротин, пирит. Более поздние разности карбонатитов (севиты II) образуют гнезда и жилы в телах ранних карбонатитов, нефелиновых сиенитов и сиенитов, а также штокверки и жильные тела выполнения в экзоконтактовых фенитовых ореолах миаскитовых интрузивов. Поздние карбонатиты крупнозернистые, с редкими крупными (до 10–20 см) кристаллами биотита, апатита, полевых шпатов, пироксидов, акцессорным ильменитом, пирротином, пиритом.

В 1980-е гг. были открыты карбонатиты в ультраосновных массивах, находящихся в обрамлении ИВК. В Булдымском массиве ультрабазитов, залегающем в 100 м к северу от Вишневогорского миаскитового массива, находится Булдымское месторождение ниобия и редкоземельных элементов, связанное с карбонатитами. Рудопроявления карбонатитов с редкометалльно-редкоземельной минерализацией установлены также в ультрабазитах Спирихинского и Халдихинского массивов, залегающих вблизи западного контакта Вишневогорского интрузива, а также в ультрабазитовых массивах Каганского и Силачского комплексов, находящихся

в 2 км западнее Вишневогорского массива [6, 12]. В обрамлении Ильменогорского миаскитового массива, в ультрабазитах восточного экзоконтакта также установлено рудопоявление редкометалльно-редкоземельных карбонатитов (Ильменское рудопоявление, копь 97) [10]. Ранние карбонатиты в ультрабазитах образуют протяженные (сотни метров) линейные тела, сопровождающиеся зонами щелочных (флогопит-рихтеритовых и флогопитовых) метасоматитов. Ранние карбонатиты доломит-кальцитового состава (севиты III) **массивные, крупнозернистые**, содержат тетраферрифлогопит, рихтерит и рудные акцессорные пироклор, циркон, магнетит, ильменит, пирротин, пирит. Поздние доломитовые карбонатиты (бефорситы IV) образуют менее мощные жилы и содержат редкоземельную акцессорную минерализацию – монацит, эшинит, редкоземельный пироклор, ферсмит, а также флогопит (замещающийся хлоритом), винчит, апатит, магнетит, ильменит, циркон, иногда стронцианит.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ИВК

Исследования редкометалльной минерализации Вишневогорского месторождения ниобия были проведены Э.М. Бонштедт-Куплетской [1], Е.М. Еськовой и И.И. Назаренко [3], Е.М. Еськовой, А. Жабиным, Г. Мухитдиновым [2], А.Ф. Ефимовым с коллегами [4], В.А. Поповым и В.И. Поповой [11], В.О. Поляковым и И.Л. Недосековой [10], И.О. Лебедевой [5], В.Я. Левиным с коллегами [6], В.А. Муфтаховым [9] и др. В породах ИВК были установлены и изучены минералы группы пироклора (пироклор, U-пироклор, мариньякит, бетафит, гидропироклор), минералы группы эшинита (эшинит, торозэшинит, ниобозэшинит, алюмоэшинит), минералы группы колумбита (колумбит, титанколумбит, магнизоколумбит), циркон, ильменорутил, ферсмит, торианит, бастнезит, кальциостронцианит, монацит, чевкинит, давидит, бритолит, цецрит, ортит, барилит, катаплет.

Основным рудным минералом ниобия ИВК является пироклор. Пироклор в ИВК, как и в других комплексах щелочных пород и карбонатитов, – продукт остаточной кристаллизации карбонатизированной щелочной магмы и образуется на заключительных стадиях функционирования щелочно-силикатно-карбонатной магматической системы (на позднемагматической, пегматитовой, карбонатитовой и пневматолито-гидротермальной стадиях). В результате пироклор является сквозным минералом и присутствует во многих разновидностях пород.

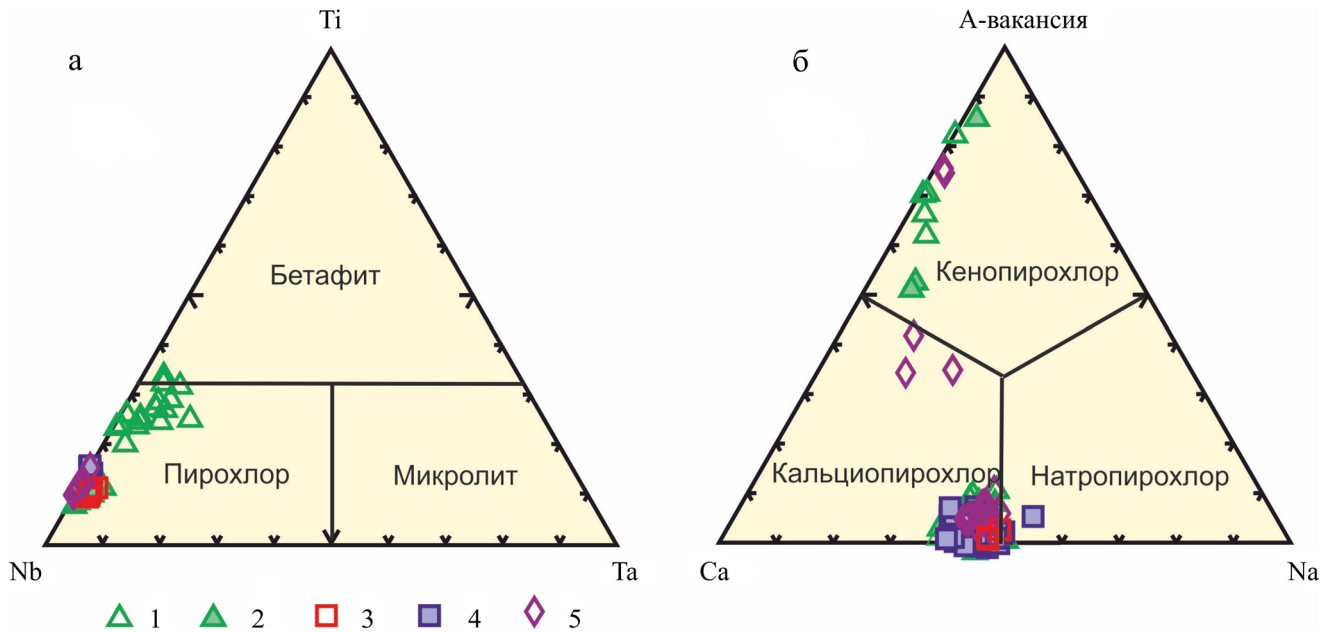
Пироклор широко развит в породах Вишневогорского массива миаскитов (рудная зона 147, 140), в его экзоконтактовом фенитовом ореоле (рудная зона 125), в породах ЦЩП (Потанинское место-

рождение, Увильдинское, Ишкульское, Байдашевское, Пургино, Светлоозерское рудопоявление), а также в породах Ильменогорского массива и его обрамления (Ильменское рудопоявление, копь 97). Пироклор устанавливается в миаскитах и сиенитах, особенно в их пегматоидных разностях, а также в миаскит-пегматитах (биотит-нефелин-микроклиновых), сиенит-пегматитах (биотит-микроклиновых и эгирин-авгит-микроклиновых), в меланократовых карбонатно-силикатных породах и в альбититах. В наиболее значительных количествах пироклор присутствует в карбонатитах как ранних, так и поздних стадий карбонатитообразования (севитах I, севитах II).

К Булдымскому массиву ультрабазитов приурочена наиболее богатая рудная зона, сложенная пироклорсодержащими карбонатитами и щелочными метасоматитами протяженностью около 500 м и мощностью до 50 м. Пироклор в значительных количествах присутствует в ранних доломит-кальцитовых карбонатитах (севитах III) и сопровождающих их щелочных метасоматитах (флогопит-рихтеритовых породах и слюдитах). Реже и совместно с другими редкометалльными минералами (колумбитом, эшинитом, чевкинитом) пироклор встречается в поздних доломитовых карбонатитах (бефорситах) и сопровождающих их хлорит-карбонат-амфиболовых метасоматитах. Пироклоры Булдымского массива подверглись значительным изменениям (вероятно, на метаморфогенном этапе становления комплекса), что привело к изменению их химического состава и образованию новых ниобиевых фаз (ферсмита, эшинита, колумбита) [5].

В миаскитах и сиенитах пироклор представлен октаэдрическими кристаллами темно-бурого, иногда оранжевого цвета размером 0.01–0.1 мм. В пегматоидных разностях размеры пироклора увеличиваются до 0.5 см, а в пегматитах – до нескольких сантиметров. В альбититах пироклор образует мелкие октаэдрические кристаллы черного, красно-бурого и желтовато-бурого цвета. Распределение пироклора неравномерное: в пегматитах и альбититах он образует струевидные скопления и мелкую рассеянную вкрапленность (размеры кристаллов от 2–3 мм до нескольких сантиметров). В меланократовых карбонатно-силикатных породах и ранних карбонатитах (севитах I) **Центральной щелочной полосы** пироклор образует мелкие кристаллы черного и зеленовато-черного цвета (гатчеттолит), а также темно-бурого и желтого цвета (собственно пироклор). В поздних карбонатитах II пироклор образует октаэдрические кристаллы размером 0.05–1.5 см красно-бурого и желтого цвета, в которых обычно устанавливаются участки (реликты?) раннего более темного, почти черного пироклора со следами растворения и преобразования.

В ранних доломит-кальцитовых карбонатитах Булдымского массива (севитах III) пироклор обра-



**Рис. 1.** Состав пироксенов ИВК на диаграммах Nb–Ti–Ta (а) и Ca–Na–А-вакансия (б) (ф. ед).

1 – U-пироксены (I), 2 – Ta-содержащие пироксены (II), 3 – Ca–Na-пироксены (III), 4 – REE-содержащие пироксены, 5 – Sr-содержащие пироксены.

зует красно-бурые кристаллы и зерна размером 0.5–10 см. Кроме того, мелкая вкрапленность пироксена светло-бурого цвета в значительных количествах присутствует во флогопит-рихтеритовых метасоматитах Булдымского массива. В слюдитях Булдымского массива отмечается гатчеттолит (округлые зерна черного цвета с зеленовато-черными каймами размером 0.1–0.5 см) и темно-коричневый пироксен, образующий крупные кристаллы (до 15 см), обрастающие кристаллами эшинита. В доломитовых карбонатитах присутствуют мелкие кристаллы эшинита, чевкинита и колумбита.

Нами были изучены коллекции пироксена из различных месторождений и рудопроявлений ИВК, переданные нам известным исследователем и первооткрывателем месторождений ИВК В.Я. Левиным, а также пироксены и другие редкометалльные минералы, собранные авторами. Проведено исследование химического и микроэлементного состава 30 проб редкометалльных минералов из различных месторождений ИВК – Вишневогорского, Потанинского и Булдымского месторождений, а также рудопроявлений Пургино и Увильды. Изучены пироксены: а) ранних карбонатитов (севитов I), б) поздних карбонатитов (севитов II), в) доломит-кальцитовых карбонатитов (севитов III), г) доломитовых карбонатитов (бефорситов IV), д) миаскит-пегматитов, е) сиенит-пегматитов, ж) меланократовых силикатно-карбонатных пород, з) флогопит-рихтеритовых метасоматитов и слюдитов.

Химический состав пироксенов и эшинитов ИВК был изучен на микрозонде САМЕВАХ в ИГМ

СО РАН, г. Новосибирск, при 60 нА и 20 кВ, размер пучка зонда 2 мкм (аналитик В.В. Шарыгин) и на микрозонде Cameca-100 в ИГТ УрО РАН (анализы 14 и 15, аналитик Д.В. Замятин). Представительные анализы пироксенов и их пересчет на кристаллохимическую формулу приведены в табл. 1. Составы пироксенов иллюстрируются на рис. 1, 2.

Согласно последней номенклатуре пироксеновой группы минералов (на основе преобладающего катиона или аниона в позициях В, А и Y) [13], пироксены ИВК могут быть классифицированы как фторкальциопироксены, оксикальциопироксены. Отмечаются также единичные составы фторнатропироксенов и оксикальциобетафитов. Измененные пироксены образует тренд к кенопироксеном – пироксеном с вакансией более чем 50% в позиции А (см. табл. 1, рис. 1).

Исследованные нами пироксены ИВК по содержаниям микропримесных элементов могут быть подразделены на пять типов, каждый из которых приурочен к определенным породам и определенной эволюционной стадии функционирования щелочной силикатно-карбонатной магматической системы.

**Тип I. U-пироксен** (также называемый гатчеттолитом в старой литературе, оксикальциопироксен – по [13]). **U-пироксен ИВК образует** мелкие кристаллы черного и зеленовато-черного цвета. Широко развит в породах ЦЩП – в ранних карбонатитах (севитах I) и меланократовых силикатно-карбонатных породах в ассоциации с акцессорными цирконом, сфеном, апатитом, магнетитом,

Таблица 1. Химический состав пироксидов (типов I, II, III, IV, V) Ильмено-Вишневогорского комплекса (мас. %)

№ п/п	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15					
	748-10	U-Ргх	К-37-95	U-Ргх	К2-18	Дол-21	Кгv5-2	Ргх	ВГ-85-727	Ргх	ЛК-147	В-3296	Ргх	Ргх	ВГ-85-727	Ргх	ЛК-147	В-3296	Ргх	Ргх	КК-2	Ргх	Дол-7	Ргх	Ргх	Ргх	Ргх	Ргх	Ргх	Ргх	331	331*alt		
Образец	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	У-Ргх	
Минерал	черный	черный	черный	черный	черный	т-бурый	бурый	желтый	кр.-бур.	желтый	желтый	бурый	бурый	бурый	кр.-бур.	желтый	желтый	бурый	бурый	бурый	бурый	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.	красн.
Точки анализа	2	2с	1	5	2г	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	42.56	38.72	46.29	63.93	62.59	61.66	67.99	65.94	66.95	60.59	60.17	62.47	67.14	66.98	59.08																			
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5.88	4.02	0.84	2.97	1.92	3.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00																				
TiO <sub>2</sub>	11.03	12.50	8.52	4.28	4.08	4.89	3.73	4.16	2.96	6.80	6.64	5.21	3.52	3.24																				
ZrO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.09	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00																				
UO <sub>2</sub>	21.25	22.11	17.57	0.00	1.71	1.80	0.00	0.06	0.00	0.45	0.52	0.04	0.09	0.20																				
ThO <sub>2</sub>	0.05	0.78	0.69	0.53	0.35	1.59	0.27	0.26	0.51	0.75	0.88	0.98	0.41	0.46																				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.00	1.54	0.08	0.00	0.07	0.11	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02																				
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.12	0.11	Н.о.	0.01	Н.о.	Н.о.	0.03	0.00	0.09	0.03	Н.о.	Н.о.	0.15																				
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.31	0.18	0.56	0.01	0.22	0.24	0.13	0.05	0.85	0.95	2.08	0.65	0.68																				
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.72	0.40	1.35	0.08	0.82	0.57	0.22	0.20	1.99	2.49	4.13	1.33	1.96																				
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.94	0.84	0.40	0.12	0.26	0.10	0.07	0.06	0.63	0.81	1.13	0.23	Н.о.																				
MnO	0.00	0.00	0.11	Н.о.	0.01	Н.о.	Н.о.	0.00	0.01	0.01	0.04	Н.о.	Н.о.	0.04																				
MgO	0.00	0.03	0.03	Н.о.	0.00	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.00	0.00	Н.о.	Н.о.	Н.о.																				
CaO	11.77	11.26	13.91	14.91	16.10	15.47	15.94	16.54	16.21	14.68	13.77	11.33	13.74	13.2																				
BaO	0.00	0.00	0.00	Н.о.	0.43	Н.о.	Н.о.	0.00	0.00	0.00	0.00	Н.о.	Н.о.	0.00																				
SrO	0.17	0.28	0.17	0.68	0.72	0.39	0.29	0.71	0.67	0.99	1.03	1.08	2.15	1.80																				
PbO	0.00	0.91	0.95	Н.о.	0.22	Н.о.	Н.о.	0.01	0.04	0.02	0.11	Н.о.	Н.о.	0.46																				
Na <sub>2</sub> O	4.96	5.51	4.88	6.93	7.25	6.51	7.20	7.46	7.50	7.29	7.34	7.72	7.37	6.71																				
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	Н.о.	0.01	Н.о.	Н.о.	0.02	0.01	0.01	0.02	Н.о.	Н.о.	Н.о.																				
F	1.70	1.44	1.99	5.14	5.10	4.74	5.36	5.26	5.03	5.62	5.55	5.16	5.20	4.21																				
Total	99.53	100.42	99.64	101.77	100.72	101.95	101.80	101.02	100.31	101.10	100.78	101.32	101.83	100.11																				
O=F <sub>2</sub>	0.72	0.61	0.84	2.16	2.15	2.00	2.26	2.21	2.12	2.37	2.34	2.17	2.19	1.77																				
Total	98.81	99.81	98.80	99.60	98.58	99.95	99.54	98.81	98.19	98.74	98.45	99.15	99.64	98.3																				
Структурная формула, рассчитанная на 2 катона в В-позиции																																		
Nb	1.317	1.250	1.455	1.752	1.773	1.712	1.828	1.809	1.859	1.686	1.687	1.756	1.840	1.850	1.593																			
Ta	0.109	0.078	0.016	0.049	0.033	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002																			
Ti	0.568	0.672	0.445	0.195	0.192	0.226	0.167	0.190	0.136	0.314	0.309	0.244	0.160	0.149																				
Fe <sup>3+</sup>	0.005	0.000	0.081	0.004	0.000	0.003	0.005	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001																				
Sum B	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000																				
Ca	0.863	0.862	1.036	0.968	1.081	1.018	1.016	1.075	1.066	0.968	0.915	0.755	0.892	0.864	0.738																			
Mn	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.002																				
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000																				

Sr	0.007	0.011	0.007	0.024	0.026	0.014	0.010	0.025	0.024	0.035	0.037	0.039	0.076	0.064	0.143
Pb	0.000	0.018	0.018	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.008	0.006
Na	0.658	0.763	0.657	0.815	0.881	0.775	0.830	0.878	0.893	0.869	0.882	0.931	0.866	0.795	0.216
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Y	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.005	0.000
LREE	0.002	0.051	0.036	0.051	0.005	0.029	0.020	0.009	0.007	0.078	0.096	0.167	0.049	0.059	0.107
U	0.324	0.351	0.272	0.000	0.024	0.025	0.000	0.001	0.000	0.006	0.007	0.000	0.001	0.003	0.005
Th	0.001	0.013	0.011	0.007	0.005	0.022	0.004	0.004	0.007	0.010	0.012	0.014	0.006	0.006	0.010
Sum A	1.855	2.077	2.050	1.866	2.037	1.883	1.880	1.994	2.000	1.971	1.956	1.906	1.890	1.806	1.316
A-deficit	0.145	-0.077	-0.050	0.134	-0.037	0.117	0.120	0.006	0.000	0.029	0.044	0.094	0.110	0.194	0.684
F	0.368	0.325	0.438	0.986	1.011	0.921	1.008	1.047	0.977	1.094	1.089	1.015	0.997	0.813	0.353
Sum oxу (O,OH)	6.562	6.751	6.719	6.390	6.531	6.441	6.390	6.884	6.492	6.436	6.426	6.416	6.408	6.374	6.056
	0.070	-0.077	-0.157	-0.375	-0.542	-0.361	-0.398	-0.93	-0.470	-0.530	-0.515	-0.431	-0.405	-0.19	0.59
В-позиция, %															
Пиррохлор	66.04	62.52	75.92	87.77	88.74	85.74	91.64	90.50	93.16	84.28	84.5	87.82	91.98	92.55	89.92
Микролит	5.49	3.90	0.83	2.45	1.64	2.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Бетафит	28.47	33.58	23.25	9.77	9.62	11.31	8.36	9.50	6.84	15.722	15.5	12.18	8.02	7.45	9.98
А-позиция, %															
Са	43.15	43.10	51.80	48.40	54.05	50.90	50.80	53.75	53.30	48.40	45.75	37.75	44.60	43.20	36.90
Na	32.9	38.15	32.85	40.75	44.05	38.75	41.50	43.90	44.65	43.45	44.10	46.55	43.30	39.75	10.80
U	16.2	17.55	13.6	0.00	1.2	1.25	0.00	0.05	0.00	0.30	0.35	0.00	0.05	0.15	0.25
Sr	0.35	0.55	0.35	1.20	1.30	0.70	0.50	1.25	1.20	1.75	1.85	1.95	3.80	3.20	7.15
LREE	0.10	2.55	1.80	2.55	0.25	1.45	1.00	0.45	0.35	3.90	4.80	8.35	2.45	2.95	5.35
A	7.25	-3.85	-2.50	6.70	-1.85	5.85	6.00	0.30	0.00	1.45	2.20	4.70	5.50	9.70	34.20

Примечание. Ptx – пиррохлор, 1–3 – U-пиррохлоры (тип I); 1 – из силикатно-карбонатных пород (Увильдинское рудопроявление, ЦШП), 2 – из севитов I (Потанинское мест-е, ЦШП), 3 – из слюдитов (Булдымский массив); 4–6 – Ta-содержащие пиррохлоры (тип II); 4–5 – из Ne-пегматитов (Вишневогорское мест-е; 4 – зона 147, 5 – жила № 5, гора Ка-равай), 6 – из севитов I (Потанинское мест-е); 7–9 – Na–Ca-пиррохлоры (тип III); 7 – из Fsp-жил в мнаскитах (зона 140, Вишневогорское мест-е), 8 – из севитов I (рудная зо-на 147), 9 – из Do–Ca карбонатитов (севитов III, Булдымское мест-е); 10–12 – REE-содержащие пиррохлоры (тип IV), из Py–Ca карбонатитов с Vt, Art, Ptm, Prg, Prg (севитов II); 10–11 – Потанинское мест-е, 12 – Увильды; 13–15 – Sr-содержащие пиррохлоры (тип V), из кальцитовых карбонатитов с Vt, Art, Ptm, Prg, Prg (севитов II), зона 147, гора Долгая, Вишневогорское мест-е.

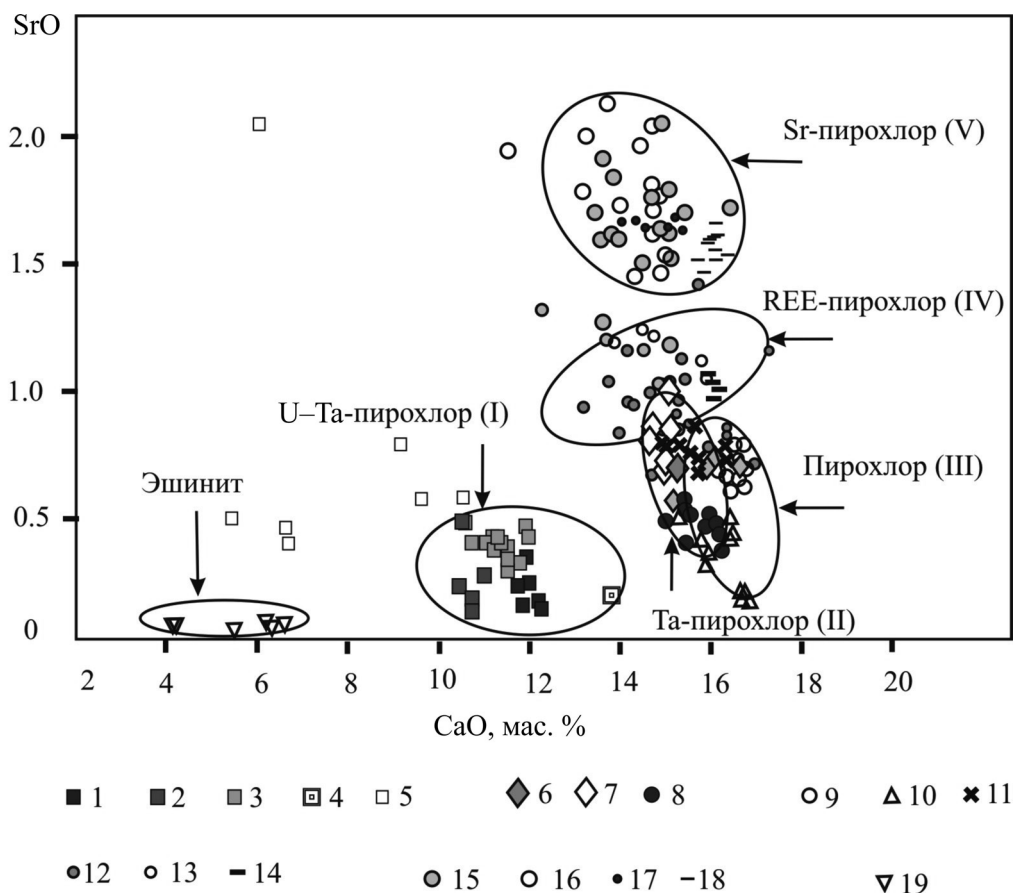


Рис. 2. Диаграмма составов CaO–SrO для пироксолов ИВК (мас. %).

1–5 – U-пироксолов (I): 1 – из меланократовых силикатно-карбонатных пород, 2–3 – из севитов I (2 – Увильды, 3 – Потанино), 4 – из слюдитов (Булдым), 5 – измененные U-пироксолов (Потанино); 6–8 – Ta-содержащие пироксолов (II): 6–7 – из Ne-пегматитов (6 – зона 147, гора Долгая, 7 – жила 5, гора Каравай, Вишневогорское мест-е), 8 – из севитов I (Потанино); 9–12 – пироксолов (III): 9–10 – из севитов I (9 – зона 147, 10 – зона 140, Вишневогорское мест-е), 11 – из севитов III и флогопит-рихтеритовых метасоматитов (Булдым); 12–14 – REE-содержащие пироксолов (IV): 12–13 – из севитов II (12 – Потанино, 13 – Увильды), 14 – из фенитов (зона 125, Вишневогорское мест-е); 15–18 – Sr-содержащие пироксолов (V): 15–18 – из севитов II (15 – Потанино, 16 – гора Долгая, Вишневогорское мест-е, 17 – Пургино), 18 – из сиенит-пегматитов (зона 125, Вишневогорское мест-е); 19 – эшиниты (Булдым).

пиррогином, пиритом (Потанинское месторождение и Увильдинское рудопоявление). Кроме того, U-пироксолов установлен нами в щелочных метасоматитах (в слюдитах) Булдымского ультрабазитового массива (Западный карьер). Этот тип пироксолов, вероятно, кристаллизуется раньше, чем другие типы пироксолов.

U-пироксолов ИВК содержат 15.4–22.1 мас. %  $UO_2$  (до 23.8% – в измененных гидратированных разностях), занимая 10–17.5% А-позиции. Содержание  $Ta_2O_5$  0.8–8.4 мас. % (до 13.8 мас. % – в измененных разностях гатчетолита), что составляет 1.2–12.8% В-позиции (микролитового минала). U-пироксолов обогащен Ti (8.5–12.5 мас. %, 23.2–33.6% бетафитового минала), но в большинстве случаев не может классифицироваться как бетафит (лишь в единичных зернах его составы достигают

33% бетафитовой молекулы (см. табл. 1, рис. 1а) и соответствуют бетафиту). U-Ta-пироксолов имеет значительные вариации CaO (10.5–14 мас. %),  $Na_2O$  (6.4–4.9%) и вакансии в А-позиции (2–10%), вероятно связанные с вхождением U в структуру пироксолов, а также вторичными процессами. Характеризуется низкими содержаниями  $Nb_2O_5$  (38.7–46.4 мас. %) и незначительным количеством микропримесей – Sr, REE, а также низкими содержаниями F (1.5–2.5%).

В измененных U-пироксоловах отмечается резкое снижение содержаний CaO (до 6.7–2.5 мас. %), практически полный вынос  $Na_2O$  (до 0–0.6 мас. %), F (до 0.7–0.07 мас. %) и, соответственно, резкое увеличение дефицита в А-позиции (до 60–88%) (см. рис. 1б). Наряду с этим при изменении пироксолов происходит увеличение содержаний  $Ta_2O_5$  (до

13.8 мас. %), а также Ti, Th, Fe, REE и Sr (см. табл. 1). Для U отмечается как увеличение (до 23.8 мас. %  $UO_2$ ), так и уменьшение (до 14.5 мас. %) содержания в процессе гидратации пироклора.

**Тип II. Та-содержащий пироклор** (фторкальциопироклор по [13]). Кроме гатчеттолитов, в ИВК встречаются Та-содержащие (1.5–5%  $Ta_2O_5$ ) разновидности пироклора с более низким содержанием и иногда полным отсутствием U (0–3.5%  $UO_2$ ) (см. табл. 1). Эти разновидности пироклоров кристаллизуются на пегматитовой и ранней карбонатитовой стадиях. Они содержат меньше Ti (3.7–4.7 мас. %  $TiO_2$ , 7.5–11.35% бетафитовой молекулы) и больше  $Nb_2O_5$  (60.08–64.76 мас. %), CaO (14.68–16.07 мас. %),  $Na_2O$  (6.48–7.25 мас. %  $Na_2O$ ), F (4.6–5.2%), а также несколько больше, но весьма незначительные количества Sr, REE, Th по сравнению с гатчеттолитами (см. табл. 1). В измененных (ферсмитизированных) пироклорах повышается содержание Ta, REE, Sr, Si, Fe, падает содержание Ca, Na, F и резко возрастает дефицит в А-позиции.

**Тип III. Са-На-пироклор** (фторкальциопироклор по [13]). Кристаллизуется на ранней карбонатитовой стадии. Образует октаэдрические кристаллы и зерна темно-бурого, красно-бурого и светло-бурого цвета. Встречается в пегматоидных разностях миаскитов, полевошпатовых жилах и ранних кальцитовых карбонатитах (севитах I) Вишневогорского (рудные зоны 140, 147) и Потанинского месторождений, а также в ранних доломит-кальцитовых карбонатитах и сопровождающих их тетраферрифлогопит-рихтеритовых метасоматитах Булдымского массива. Пироклор характеризуется стехиометричными составами (т.е.  $Na+Ca \gg Sr+U+Th+LREE$ ) с очень низкими (минимальными по сравнению с другими типами пироклоров) концентрациями Sr (0.14–0.77 мас. %), U, Ta, Th, LREE, а также высокими содержаниями  $Nb_2O_5$  (64.5–68.45 мас. %), CaO (15.77–16.7 мас. %),  $Na_2O$  (7.2–7.76 мас. %  $Na_2O$ ), F (5.0–5.62%) (см. табл. 1). Содержание бетафитовой молекулы варьирует в пределах 7.16–12.4% (2.96–4.4%  $TiO_2$ ), что сопоставимо с Та-содержащими пироклорами пегматитовой стадии.

**Тип IV. REE-содержащий пироклор (до 6% REE)** (фторкальциопироклор и фторнатропироклор по [13]). Встречается в поздних карбонатитах (севитах II) Центральной щелочной полосы (Потанинское месторождение, Увильдинская полоса), а также в сиенит-пегматитах (рудная зона 125, Вишневогорское месторождение). REE-содержащий пироклор известен также в поздних доломит-флогопитовых карбонатитах в зоне слюдитов Булдымского массива (Западный карьер) в ассоциации с апатитом и эшинитом [5]. REE-содержащий пироклор Булдымского массива образует кристаллы темно-бурого цвета. Известен кристалл размером 10 см, метамиктный, эшинитизированный, на

который нарастают удлиненные призматические кристаллы ниобозинита размером 0.5–3 см. Зерна REE-содержащего пироклора Потанинского месторождения ярко-красного и буровато-красного цвета и так же, как Sr-содержащие пироклоры, часто содержат участки (реликты?) темного черно-бурого пироклора.

По составу REE-содержащий пироклор ИВК представляет собой промежуточную разновидность между собственно пироклором и мариньякитом (в старой литературе такие пироклоры называются коппитом) [8]. Составы этого типа пироклора близки пироклорам второго типа (близкие содержания Nb, F, Ca, Na, U, Sr), отличаясь более высоким содержанием LREE (3–5.6 мас. %  $LREE_2O_3$ ), Ti (11.2–15.6% бетафитовой молекулы), и образует с ним почти непрерывный ряд составов. Во включениях темно-бурого пироклора содержится больше  $UO_2$  (0.58–1.49 мас. %), Ta, LREE, Sr и меньше Ca, Na, F по сравнению с красным пироклором. Вероятно, темный пироклор представляет собой реликты раннего Та-пироклора пегматитовой стадии. В REE-пироклорах от центра к краю зерен падает содержание Ca и Na и увеличивается содержание LREE, Sr, Th, U.

**Тип V. Sr-содержащий пироклор (1.5–4.5 мас. % SrO, REE)** (фторкальциопироклор по [13]). Sr-содержащий пироклор образуется на поздней карбонатитовой стадии и широко распространен в северной части ИВК – в породах эндоконтактной части Вишневогорского массива, а также в фенитизированных породах экзоконтакта. Наиболее высокостронциевые разновидности пироклора встречаются в поздних карбонатитах (севитах II) Вишневогорского месторождения – в биотит-кальцитовых карбонатитах с апатитом, ильменитом, пирротином, пиритом (рудная зона 147, апикальная часть Вишневогорского массива миаскитов) и в (эгириновит)-кальцитовых карбонатитах со Sr-apatитом, ильменитом, сфеном, пирротинном, пиритом (рудная зона 125, фенитовое обрамление Вишневогорского массива). Sr-содержащий пироклор образует октаэдрические кристаллы и зерна бурого, светло-бурого (почти желтого) и красно-бурого цвета.

По составу этот тип пироклора близок к пироклору третьего типа (имеет очень близкие содержания Nb, Ti, U, Th, F, нет Ta) и отличается содержанием элементов в А-позиции, прежде всего высокими содержаниями SrO (1.5–4.5 мас. %) и LREE (1–2.5 мас. %) (см. табл. 1, рис. 2). Необходимо отметить, что в пироклорах III часто встречаются участки темного, почти черного пироклора (реликтовый пироклор?), содержащие U (до 3.72%  $UO_2$ ) и Ta (0.3%). Эти пироклоры в значительной степени изменены, что фиксируется большим дефицитом А-позиции (30%), снижением содержаний Ca, Na, F и несколько повышенными содержаниями SrO (до 2 мас. %), LREE (до 1.9 мас. %). Периферическая

часть таких зерен пироклора ярко-красного цвета и характеризуется еще большим увеличением содержания Sr (до 4 мас. %), LREE (до 5 мас. %), резким снижением Nb, Ti, Ca, Na, F и высоким дефицитом в А-позиции и может быть классифицирована как кенопироклор (см. рис. 2).

**Эшиниты.** Образуются на поздней карбонатитовой и сиенит-пегматитовой стадии. Встречаются в сиенит-пегматитах Вишневогорского месторождения (жила 133) и в доломитовых карбонатитах Булдымского гипербазитового массива (Булдымское месторождение), а также в карбонатитах и апогипербазитовых тетраферрифлогопит-рихтеритовых метасоматитах (копь 97, Ильменское рудопроявление). Описан процесс эшинитизации пироклора в доломитовых карбонатитах [5]. В карбонатитах эшиниты ассоциируют с апатитом, монацитом, хроммагнезиоцелвинитом (поляковитом), давидитом, бастнезитом, торитом, ильменорутилом [10].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рудная ниобиевая минерализация основных редкометалльных месторождений ИВК представлена U-пироклором (гагчеттолитом), Ta-содержащим пироклором, собственно пироклором, REE- и Sr-содержащими разновидностями пироклоров, а также эшинитом и колумбитом.

Разновидности пироклоров ИВК приурочены к определенным типам пород и определенной эволюционной стадии функционирования щелочно-магматической системы.

U-пироклоры (гагчеттолиты) встречаются в меланократовых силикатно-карбонатных породах и ранних карбонатитах (севитах I). Широко развиты в месторождениях Центральной щелочной полосы (Потанинском и Увильдинском), известны в Булдымском месторождении. Этот тип пироклоров, вероятно, образуется раньше, чем другие типы пироклоров, на позднемагматической стадии кристаллизации.

Ta-содержащие пироклоры встречаются в Непегматитах, в апикальной части Вишневогорского массива (рудная зона 147 Вишневогорского месторождения), а также известны на Потанинском месторождении. Формируются на пегматитовой стадии кристаллизации щелочного расплава.

Пироклоры с наиболее стехиометричными составами и очень низкими содержаниями микропримесей широко развиты в полевошпатовых жилах и ранних кальцитовых карбонатитах (севитах I). Этими разновидностями пироклоров сложены основные рудные зоны Вишневогорского (рудные зоны 140 и 147) и Булдымского месторождения, они встречаются также на Потанинском месторождении. Образуются на раннекарбонатитовой стадии.

REE-содержащие пироклоры наблюдаются в поздних карбонатитах (севитах II) Центральной

щелочной полосы и поздних доломитовых карбонатитах (бефорситах IV) Булдымского массива, а также в сиенит-пегматитах в фенитовом ореоле Вишневогорского массива. Широко развиты в месторождениях ЦЩП – на Потанинском месторождении, а также на рудопроявлениях Пургино и Увильды, реже встречаются на Вишневогорском (рудная зона 125) месторождении. Формируется на позднекарбонатитовой и сиенит-пегматитовой стадиях.

Sr-содержащие пироклоры также формируются на поздней карбонатитовой стадии и характерны для поздних карбонатитов (севитов II) апикальной части Вишневогорского массива и его фенитового обрамления. Известны на Вишневогорском (рудные зоны 147 и 125) и Потанинском месторождениях.

Таким образом, последовательность образования пироклоров в ИВК подобна таковой в карбонатитовых комплексах ультраосновной щелочной формации [14] и отражает особенности дифференциации щелочно-силикатно-карбонатного расплава – обогащенность Ta, Ti, U силикатно-карбонатных расплавов позднемагматической стадии и накопление REE, Sr, Th, F в карбонатитовых расплавах поздних стадий карбонатитообразования.

Эшиниты формируются на позднекарбонатитовой и сиенит-пегматитовой стадии, встречаются в поздних доломитовых карбонатитах (бефорситах IV) Булдымского массива, а также в сиенит-пегматитах (жила 133) Вишневогорского месторождения. Формирование эшинита происходит на заключительных стадиях карбонатитообразования при снижении щелочности растворов, в результате чего происходит также ферсмидитизация, эшинитизация и колумбитизация пироклоров ранних стадий.

Авторы благодарят В.В. Шарыгина за помощь в проведении аналитических исследований и В.А. Волосатого за предоставление образцов эшинитов.

*Работа выполнена при поддержке программы президиума УрО РАН, проект № 15-11-5-17.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бонштедт-Куплетская Э.М.* Минералогия щелочных пегматитов Вишневых гор. М., 1951. 105 с.
2. *Еськова Е.М., Жабин А., Мухитдинов Г.* Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М.: Наука, 1964. 319 с.
3. *Еськова Е.М., Назаренко И.И.* Пироклор Вишневых гор, его парагенетические ассоциации и особенности химического состава // Вопросы геологии, геохимии и генезиса месторождений редких элементов. Тр. ИМГРЭ. Вып. 4. М., 1960. С. 33–50.
4. *Ефимов А.Ф., Еськова Е.М., Лебедева С.И., Левин В.Я.* Типохимизм акцессорного пироклора в породах щелочного комплекса Урала // Геохимия. 1985. № 2. С. 202–208.



5. *Лебедева И.О., Недосекова И.Л.* О процессе эшенизации пирохлора из карбонатитов Булдымского массива (Вишневые горы, Урал) // Зап. ВМО. 1993. № 2. С. 69–75.
6. *Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С и др.* Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 272 с.
7. *Менге И.* Минералогические наблюдения, сделанные во время путешествия по Ильменским горам // Тр. минер. об-ва. 1830. С. 232–271.
8. Минералы (справочник). М.: Наука, 1967. Вып 3. 675 с.
9. *Муфтахов В.А.* Типохимизм титано-тантало-ниобатов из пегматитов Ильмено-Вишневогорского комплекса: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. 2001. 20 с.
10. *Поляков В.О., Недосекова И.Л.* Минералогия апогипербазитовых фенитов и карбонатитов южной части Ильменских гор // Минералы месторождений и зон техногенеза рудных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 24–35.
11. *Попов В.А., Попова В.И.* Минералогия пегматитов Ильменских гор // Минералогический альманах. 2006. Т. 9. 151 с.
12. *Свяжин Н.В.* Доломитовые карбонатиты Вишневогорского комплекса ультраосновных и щелочных пород // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1966. № 5. С. 65–72.
13. *Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G. et al.* The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // Can. Mineralog. 2010. V. 48. P. 673–698.
14. Phoscorites and Carbonatites from mantle to mine: the key Example of the Kola Alkaline Province / Eds F. Wall, A.N. Zaitsev. L., 2004. 498 p.