

Ю. Л. КАПУСТИН

**О НОВОЙ НАХОДКЕ АКЦЕССОРНОГО ЦЕРИЕВОГО
ФЕРГЮСОНИТА В КАРБОНАТИТАХ**

Фергюсонит — один из характерных ниобатов гранитных пегматитов — ранее считался типичным селективным иттриевым минералом (Семенов, 1963). В последние годы обнаружены разновидности фергюсонита комплексного состава, с четкими эрбиево-иттриевым, гадолиниевым и цериевым максимумами (Макарошкин и др., 1965). В единичном случае этот минерал описан и в карбонатитах Сибири, но состав и свойства его остались неизученными (Здорик, Финягина, 1966), хотя в нем предполагался иттриевый состав TR.

Нами акцессорный фергюсонит с резко цериевым составом TR обнаружен в карбонатитах Приазовья.

Карбонатитовое проявление, в котором встречен фергюсонит, представляет собой систему линейных тел северо-восточного простирания, приуроченных к зоне разлома и пересекающих метаморфическую толщу архейского возраста. В этой толще гнейсы переслаиваются с подчиненными линзами амфиболитов. Местами они мигматизированы и содержат пластовые тела гнейсо-гранитов. Метаморфические породы вокруг карбонатитов неравномерно фенитизированы: лейкократовые гнейсы превращены в пироксеновые сиениты, а амфиболиты — в меланократовые пироксен-амфиболовые породы. Местами в фенитах появляется нефелин, в непосредственной близости от карбонатитов они альбитизированы, а вдоль контакта — биотитизированы.

Карбонатиты представлены преимущественно ранним типом (Капустин, 1971). Они сложены кальцитом (70—90%) и содержат высокомагнетизальный флогопит, форстерит, магнетит, апатит и акцессорные минералы: гатчеттолит, пироклор, фергюсонит, бадделейт, циркон, дизаналит, сфен. Контакты карбонатитов преимущественно четкие и резкие. В отдельных участках карбонатиты цементируют брекчированные фениты и содержат от 30 до 70% (по объему) их обломков. В этих участках карбонатиты имеют брекчиевое или такситовое строение, обогащены реликтовыми минералами фенитов и содержат скопления альбита, альбитизированного микроклина, а также — биотит, пироксен, амфибол, иногда — нефелин или канкринит; форстерит, пироклор и магнетит в них отсутствуют, апатит встречается спорадически и в малых количествах, а магнетизальный флогопит уступает место биотиту. Кальцит постоянно образует основную массу породы — среднезернистый торцовый агрегат с размерами зерен 2—15 мм. Кристаллы силикатов распределены между зернами кальцита и имеют меньшие размеры — преимущественно 0,2—5 мм; зерна апатита и ниобатов — 0,1—1 мм. Местами в кальцитовых карбонатитах развита вторичная доломитизация и доломит-анкеритовые

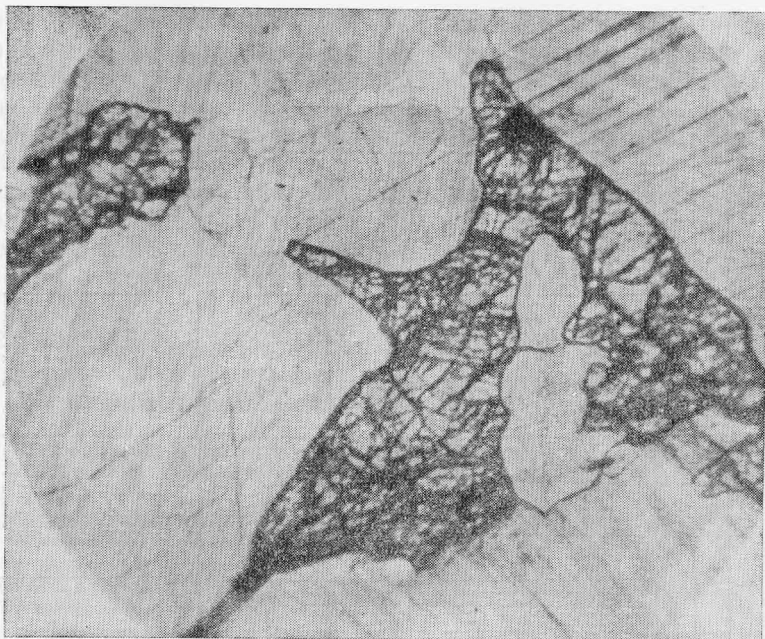


Рис. 1. Ксеноморфные пойкилобласты фергюсонита (темное, с высоким рельефом), прорастающие кальцитовый агрегат в карбонатите. Прозр. шлиф. Увел. 30, без анализатора

прожилки с сульфидами (пиритом, молибденитом), ильменитом, акцессорными: монацитом, колумбитом и анкилитом.

Карбонатиты покрыты с поверхности мощной корой выветривания и перекрыты осадочными породами мезозойского и четвертичного возраста. Фергюсонит обнаружен в массивных лейкократовых кальцитовых карбонатитах с форстеритом, флогопитом и редким магнетитом, содержащим резко пониженное количество апатита (до 2% вместо обычных 10%). Фергюсонит образует бесформенные пойкилитовые выделения до 1 см, прорастающие кальцитовый агрегат или обрастающие кристаллы флогопита, кальцита, магнетита и содержащие включения этих минералов (рис. 1). Исключительно редко встречаются отдельные мелкие дипирамидально-призматические кристаллы его (длиной до 1 мм и толщиной до 0,1 мм) с тусклыми, матовыми гранями и слабо округленными гранями. Кристаллы имеют тетрагональный облик, но из-за дефектов ограничить их не удалось.

Фергюсонит ярко-красного или оранжево-красного цвета, с раковистым или зернистым изломом и сильным алмазным блеском на изломе, чрезвычайно хрупок, микротвердость 720—800 кг/мм². Кристаллы и отдельные крупные выделения минерала однородны, прозрачны и чисты, а пойкилитовые сростки содержат включения других минералов, непрозрачны и имеют более светлую окраску. Микротвердость прозрачных зерен 720—760 кг/мм², а непрозрачных — 760—800 кг/мм². Прочие свойства их близки, хотя и удельный вес, и показатели преломления у непрозрачных зерен выше (табл. 1). Основное отличие между обеими разновидностями заключается в их физическом состоянии: прозрачный минерал метамиктен, изотропен и рентгеноаморфен, а непрозрачный — кристаллический, оптически анизотропный, одноосный, отрицательный. Метамиктный минерал дает дебаеграмму только после прокалывания до 560°, причем восстанавливается тетрагональная структура (табл. 2). Непрозрачный фергюсонит в непрокаленном состоянии дает слабодиффузную дебаеграмму, свойственную низкотемпературной тетрагональной

Таблица 1
Химический состав фергюсонита и гатчеттолита

Компоненты	Фергюсонит									Гатчеттолит		
	Приазовье				Урал, Ильменские горы			Урал	Казахстан	Приазовье		
	1		2		3	4	5	6	7	8		
	вес. %	атомн. колич.	вес. %	атомн. колич.	весовые. %							вес. %
Nb ₂ O ₅	41,65	0,3132	42,01	0,3159	40,51	41,18	47,12	51,65	42,77	34,26	0,2578	
Ta ₂ O ₅	1,00	0,0045	1,00	0,0045	1,31	0,44	5,10	2,50	0,71	8,74	0,0394	
U ₃ O ₈	1,03	0,0038	1,11	0,0040	—	—	3,22	—	9,36	11,98	0,0426	
TiO ₂	сл.	—	0,05	0,0007	4,12	4,25	—	0,50	1,70	7,45	0,0928	
ThO ₂	0,90	0,0031	0,88	0,0030	11,67	12,88	—	—	4,50	—	—	
TR ₂ O ₃	52,17	0,3069	52,26	0,3078	35,01	34,15	40,63	42,60	35,35	10,80	0,0658	
Fe ₂ O ₃	0,42	0,0052	0,13	0,0016	0,94	0,62	—	—	0,40	—	—	
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0,21	—	—	0,25	5,32	0,1043	
FeO	—	—	—	—	—	—	0,71	0,36	—	2,95	0,0375	
CaO	1,10	0,0196	0,81	0,0144	2,90	0,69	1,96	1,40	1,67	11,68	0,2086	
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,52	0,0490	
H ₂ O п. п. п.	1,60	0,1556	1,79	0,1989	—	4,16	—	0,22	1,66	4,95	0,5500	
Прочие	—	—	—	—	1,15	0,54	0,18	1,07	1,57	—	—	
Сумма	99,87	—	99,94	—	97,61	99,12	98,92	100,30	99,94	99,65	—	
Аналитик	А. В. Быкова				Б. А. Макарович		Г. Л. Черник	Ю. К. Книпович	А. В. Быкова			
Уд. вес	5,45		5,48		5,20	—	—	—	—	4,93		
n _g	2,20		2,30		—	—	—	—	—	2,00		
n _p	—		2,20		—	—	—	—	—	—		
a ₀ Å	—		5,15		5,137	—	—	5,05	5,112	10,37		
b ₀ Å	—		11,30		11,21	—	—	10,89	11,08	—		
c ₀ Å	—		5,30		5,445	—	—	5,27	5,349	—		
β	—		—		92°24'	—	—	94°30'	94°31'	—		

Прочие: 3—MgO—0,52; PbO—0,63; 4—SnO₂—0,29; MgO—0,06; PbO—0,19; 5—MgO—0,05; MnO—0,13; 6—SiO₂—0,14; ZrO₂—0,93; 7—SiO₂—0,16; ZrO₂—0,51; PbO—0,90.
Формула анализируемого гатчеттолита: (Na_{0,26}Ca_{1,08}TR_{0,33}Fe_{0,18}U_{0,24})_{2,08}(Nb_{1,33}Ta_{0,21}Ti_{0,46})_{2,00}O_{7,13}1,40 H₂O

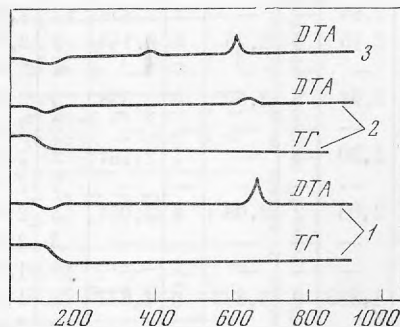
модификации (α -фергюсонит). После прокаливания до 560° характер его дебаграммы не меняется, но качество ее улучшается: линии становятся более четкими и число их возрастает. При дальнейшем прокаливании до 1000° дебаграммы обеих разновидностей приобретают сходный характер, типичный для моноклинной модификации (табл. 2).

На кривой нагревания обеих разновидностей фергюсонита отмечают слабые эффекты: при $120\text{--}150^\circ$ — небольшой эндотермический пик, обусловленный выделением воды (2,5% — кривая ТГ) и при 560° — экзотермический пик рекристаллизации, без потери веса (рис. 2). Пик рекристаллизации отмечается на кривых нагревания (ДТГ) обеих разновид-

Рис. 2. Кривые нагревания (ДТА) и потери веса (ТГ) фергюсонита:

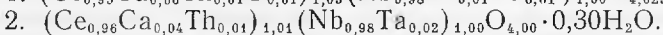
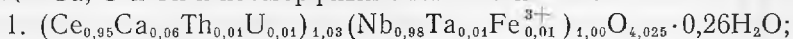
- 1 и 2 — из Приазовья (1 — прозрачный, метамиктный;
2 — непрозрачный, кристаллический;
3 — метамиктный фергюсонит из пегматитов Карелии.

Наличие экзотермического пика ($620\text{--}700^\circ$) свидетельствует о содержании в непрозрачном фергюсоните метамиктной фазы. Потеря веса в образцах 1 и 2 — 1,8%. Данные автора, лаборатория ИМГРЭ, анализатор Н. С. Горохова



ностей минерала, но он значительно слабее выражен у непрозрачной разновидности, свидетельствуя о наличии в ней метамиктной фазы.

Химический состав обеих разновидностей оказался практически идентичным (см. табл. 1). Анализированный материал характеризуется относительной чистотой. Химическим анализом установлено отсутствие в минерале SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , Na_2O , P_2O_5 , F, MgO и SrO. Кроме основных компонентов, спектральным анализом в фергюсоните обнаружено содержание Mn, V, Pb, Ba, Be, Zn, Sr — в количестве менее 0,01%. Результаты химических анализов пересчитываются на типичную для фергюсонита формулу TRNbO_4 с небольшой примесью катионов, изоморфных с TR—Ca, U и Th и изоморфных с Nb—Ta и Fe^{3+} :



Обычной дефектности в составе фергюсонита не установлено.

Состав редкоземельных элементов в различных разновидностях изученного минерала почти идентичен, со слабым возрастанием содержания TR_{Ce} в непрозрачном материале (табл. 3). Для всех образцов характерен резкий цериевый максимум, при относительно высоком содержании Nd, Sm, Dy, Yb и Y — типично комплексный состав. Фергюсонит из карбонатитов представляет собой разновидность, наиболее обогащенную Ce. Для ранее описанного Се-фергюсонита из Ильменских гор (Макарович и др., 1965) содержание Y не приведено, но судя по содержанию тяжелых лантаноидов ($\text{Dy} + \text{Ho} + \text{Er} + \text{Tm} + \text{Yb} + \text{Lu} = 14,7\%$) или Yb (3,7%), содержание Y в минерале, вероятно, превышает 30% и при пересчете на общую сумму TR, с учетом Y, количество собственно Ce не превысит 25%, Nd — 17% и соотношение $\text{TR}_{\text{Ce}}/\text{TR}_{\text{Y}}$ окажется близким к 1. В изученном нами случае соотношение $\text{TR}_{\text{Ce}}/\text{TR}_{\text{Y}}$ близко к 3.

Обнаружение относительно широкого распространения в карбонатитах фергюсонита является необычным фактом. В этих породах, во всех изученных к настоящему времени провинциях, резко преобладает пироксид (Капустин, 1971), подвергающийся колумбитизации при развитии поздних карбонатитов. Соотношения фергюсонита с минералами группы пироксидов в изучавшихся нами карбонатитах точно установить не удалось из-за пространственной разобщенности этих минералов. Встречен-

Таблица 2
Межплоскостные расстояния фергюсонита

Приазовье				Эталон		Эталон		Приазовье				Эталон		Эталон	
1		2		3		4		1		2		3		4	
I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)	I	d (Å)
4	3,40	2	3,5	6	3,37	3	3,405	7	1,630	5	1,631	8	1,633	9	1,621
—	—	—	—	—	—	2	3,25	5	1,570	4	1,566	7	1,569	10	1,564
—	—	—	—	—	—	10	3,12	1	1,522	1	1,518	3	1,518	3	1,514
10	3,05	10	3,1	10	3,06	1	3,06	—	—	—	—	—	—	5	1,508
1	2,84	—	—	2	2,859	10	2,937	—	—	—	—	—	—	5	1,483
3	2,75	2	2,76	5	2,743	7	2,723	1	1,369	—	—	2	1,367	7	1,370
—	—	—	—	—	—	4	2,621	—	—	—	—	1	1,335	2	1,344
4	2,61	3	2,60	6	2,538	3	2,593	2	—	—	—	—	—	2	1,325
—	—	—	—	—	—	3	2,536	1	1,290	—	—	2	1,288	2	1,290
1	2,20	—	—	1	2,191	2	2,206	—	—	—	—	—	—	3	1,263
—	—	—	—	—	—	5	2,100	—	—	—	—	—	—	2	1,247
3	2,08	2	2,08	4	2,071	3	2,050	—	—	—	—	—	—	1	1,236
—	—	—	—	—	—	3	2,010	5	1,219	1	1,217	5	1,214	10	1,217
—	—	—	—	—	—	10	1,897	5	1,211	2	1,210	6	1,209	3	1,208
10	1,880	9	1,882	9	1,877	2	1,883	—	—	—	—	—	—	9	1,189
—	—	—	—	—	—	9	1,859	—	—	—	—	—	—	1	1,174
2	1,830	2	1,835	3	1,832	2	1,832	—	—	—	—	—	—	1	1,151
—	—	—	—	—	—	1	1,792	—	—	—	—	—	—	6	1,147
—	—	—	—	—	—	4	1,759	—	—	—	—	—	—	5	1,110
1	1,728	1	1,731	2	1,728	4	1,725	1	1,099	1	1,100	1	1,095	5	1,104
—	—	—	—	—	—	8	1,647	—	—	—	—	—	—	—	—

Условия съемки образцов из Приазовья: камера РКД, излучение Fe, аналитик Р. А. Александрова. Образец 1 — прозрачный фергюсонит прокален в течение 1 час. при 750°; образец 2 — непрозрачный фергюсонит; без прокаливания. Эталонные данные для тетрагонального (3) и моноклинного (4) фергюсонита приведены по С. А. Горжевской и др. (1974).

ные редкие реликты гатчеттолита в фергюсоните позволяют предположить, что последний развивается позже гатчеттолита. Однако фергюсонитсодержащие карбонаты содержат форстерит, магниезильный флогопит, магнетит и апатит, следов доломитизации в них нет и приходится предполагать, что фергюсонит в этих породах является характерным первичным аксессуарным минералом. Возможно, он развивается вместо обычного пирохлора (типоморфного для ранних карбонатов) позже гатчеттолита, частично замещая последний. Появление фергюсонита в этом случае может быть связано с повышением активности TR на ранней стадии карбонатитового процесса. Примесь TR обнаружена в кальците и апатите из приазовского карбонатитового проявления, но содержание TR здесь находится на обычном для карбонатитов уровне, несколько повышаясь лишь в апатите из апикальных частей карбонатитовых тел (до 1%). Однако изученный из этих же карбонатитов гатчеттолит также оказался аномальным по составу и резко обогащен TR (10,80% TR₂O₃) при типичном для этого минерала (из карбонатитов) обогащении Ta и U (табл. 1). Интересно, что фергюсонит из карбонатитов, в отличие от ранее описанного цериевого фергюсонита из пегматитов, содержит лишь небольшую примесь Th и Ti. Состав TR в гатчеттолите цериевый, но с повышенным содержанием тяжелых лантаноидов и Y (табл. 3).

Появление фергюсонита и редкоземельного гатчеттолита в карбонатитах Приазовья — явление аномальное, и в этом отношении изученные образования необычны и могут быть выделены в особый, новый тип

Таблица 3
Состав редкоземельных элементов в фергюсоните и ассоциирующих с ним минералах

Минерал	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Местонахождение
Се-фергюсонит	8	30	6	20	3,4	0,5	4,7	0,4	3,1	0,4	2,8	—	2,3	—	13,4	Приазовье
»	6	37	4,6	18	3,2	0,4	5,7	0,3	2,0	0,3	1,8	0,1	1,7	—	18,9	»
»	7,5	38	3,3	16	3	0,2	5,2	0,3	2,0	0,3	2,1	0,1	1,9	0,1	20	»
Гатчеттолит	12	48	3	13	2	0,2	4	0,2	0,9	0,1	0,8	—	0,5	—	15,3	»
Пирохлор	20	51	5	17	1	—	2	—	0,5	—	0,3	—	0,1	—	3	»
Кальцит	23	49	5	15	2	0,2	1,1	—	0,4	—	0,2	—	0,1	—	4	»
Апатит	27	46	5	16	0,5	0,1	1	—	0,2	—	—	—	—	—	5	»
Се-фергюсонит	5,8	35,8	7,3	22,6	0,7	0,7	5,1	0,6	5,8	0,7	3,7	0,1	3,7	0,7	н/о	Ильменские горы
Фергюсонит	0,6	1,3	—	0,6	0,6	0,1	3,4	0,6	9,9	5,1	24,7	3,4	45,3	4,5	»	Урал, Слюдгора
»	3,3	15,0	5,3	15,8	8,6	0,7	9,9	2	9,2	3,3	9,2	1,3	13,8	2,6	»	Акжайляу
»	0,9	1,9	1,4	4,2	21,6	0,9	29,6	5,2	23,5	3,3	4,7	0,9	1,9	—	»	Карелия
»	4,5	11,7	1,3	6,5	6,3	0,2	14,3	1,9	17,2	3,2	13,6	1,3	14,9	2,6	»	Полярный Урал
Апатит	18	48	7	20	4	0,4	1,4	0,1	0,5	—	0,2	—	0,2	0,3	»	Вуориярви
»	16	48	6	19	2	0,2	2,5	0,1	0,7	—	0,2	—	0,3	—	5	»
Моначит	20	52	6	17	2	—	2,4	—	0,4	—	0,1	—	0,1	—	—	Намо — вара

Анализы для минералов из Приазовья и типичных карбонатитов массивов Вуориярви и Намо—вара приведены по данным автора. Анализы для фергюсонита из пегматитов Ильменских гор, Слюдгоры, Акжайляу, Карелии и Полярного Урала приведены по Б. А. Макарошкину и др. (1965). Состав TR определен спектральным методом.

редкометалльных карбонатитов. Однако, в целом, они сохраняют обычную резко цериевую специфику, свойственную карбонатитам вообще (Капустин, 1966) и состав TR из различных минералов здесь остается близким к обычному составу TR в этих образованиях (табл. 3). Из всех известных минералов карбонатитов фергюсонит все же наиболее обогащен Y, что также является косвенным доказательством его относительного раннего происхождения, так как в ходе развития карбонатитового процесса обычно отмечается все более резкое преобладание TR_{Св} над TR_У. В монаците и анкилите из поздних доломит-анкеритовых прожилков приазовского проявления состав TR обычный, резко цериевый (табл. 3).

Выраженная тенденция природного фергюсонита к концентрации именно иттриевых TR несомненна и подчеркивается рассмотренным примером. В изученных карбонатитах фергюсонит имеет наиболее иттриевый состав TR из всех минералов и, вероятно, именно появление минерала структурного типа фергюсонита — типичного концентратора Y — позволило выделиться иттриевым TR, поскольку в других минералах в условиях карбонатитообразования (резко щелочная карбонатная среда) иттриевые фиксируются в малых количествах. Ранее (Keller, 1962) был синтезирован весь изоструктурный ряд ниобатов и танталатов типа TR(Nb, Ta)O₄, показана возможность существования в пределах этого типа соединений всех редкоземельных элементов от La до Lu. Редкость в природе цериевого фергюсонита и частая ассоциация в пегматитах нормального иттриевого фергюсонита с монацитом, ортитом и бетафитом, обогащенными резко цериевыми TR, указывает на тенденцию к по-минеральному разделению различных групп редкоземельных элементов, с преимущественным вхождением иттриевых TR в фергюсонит, а цериевых TR — в минералы группы пироклора, ортит, монацит, а в карбонатитах — также в кальцит и апатит. Вероятно, условия, приводящие к появлению цериевого фергюсонита в природе, исключительны и реализуются редко.

ЛИТЕРАТУРА

- Здорик Т. Б., Финягина Н. К. Линдокит и фергюсонит в карбонатитах. — Новые данные о минералах СССР. — Новые данные о минералах СССР, вып. 17, 1966.
- Горжевская С. А., Сидоренко Г. А., Гинзбург А. И. Титано-тантало-ниобаты. Изд-во «Недра», 1974.
- Капустин Ю. Л. Геохимия редкоземельных элементов в карбонатитах. — Геохимия, № 5, 1966.
- Капустин Ю. Л. Минералогия карбонатитов. Изд-во «Наука», 1971.
- Макарошкин Б. А., Минеев Д. А., Александров В. Б. О цериевой разновидности фергюсонита. — Новые данные о минералах СССР, — вып. 16, 1965.
- Семенов Е. И. Минералогия редких земель. Изд-во «Наука», 1963.