

## НАДГРУППА ГРАНАТОВ: НОМЕНКЛАТУРА И ПОТЕНЦИАЛЬНО НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

И.О. Галускина<sup>1</sup>, Е.В. Галускин<sup>1</sup>, Е.А. Вапник<sup>2</sup>, М. Н. Мурашко<sup>3</sup>,  
П. Держановски<sup>4</sup>, В.М. Газеев<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Силезский Университет, Сосновец, Польша, *evgeny.galuskin@us.edu.pl*

<sup>2</sup>Университет им. Бен-Гуриона, Негев, Беэр-Шева, Израиль

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Варшавский Университет, Варшава, Польша

<sup>5</sup>ИГЕМ РАН, Москва, Россия

## GARNET SUPERGROUP: NOMENCLATURE AND POTENTIALLY NEW MINERALS

I.O. Galuskina<sup>1</sup>, E.V. Galuskin<sup>1</sup>, E.A. Vapnik<sup>2</sup>, M.N. Murashko<sup>3</sup>,  
P. Dzierżanowski<sup>4</sup>, V.M. Gazeev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>University of Silesia, Sosnowiec, Poland, *evgeny.galuskin@us.edu.pl*

<sup>2</sup>Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel

<sup>3</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup>University of Warsaw, Warsaw, Poland

<sup>5</sup>IGEM RAS, Moscow, Russia

### Введение

Находка большого числа несиликатных гранатов в измененных ксенолитах в игнимбритах в районе горы Лакарги (Верхнечегемская кальдера, Кабардино-Балкария, Северный Кавказ), образующих твёрдые растворы с силикатными гранатами (Galuskina et al., 2010a, б; 2013), заставила по-другому взглянуть на вопросы систематики минералов, имеющих гранатовый тип структуры. В конце 2010 года была создана рабочая группа при Комиссии новых минералов, Номенклатуры и Систематики (CNMNC-IMA), которая занялась вопросами классификации минералов надгруппы граната. Результатом работы этой комиссии явилась новая номенклатура, опубликованная в 2013 г. (Grew et al., 2013). К надгруппе относятся минералы с гранатовым типом структуры, отвечающие кристаллохимической формуле  $\{X_3\} [Y_2](Z_3)\varphi_{12}$ , где  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  обозначения, соответственно, додекаэдрических, октаэдрических и тетраэдрических позиций,  $\varphi$  – анионная позиция, которая может быть занята O, OH, F. Основой для выделения групп в надгруппе граната является сумма зарядов катионов в тетраэдрической позиции  $Z$ , а минеральные виды выделяются на основании общепризнанных критериев. На сегодняшний день в надгруппу гранатов входят 33 минерала (табл. 1), последний хатчеонит был принят CNMNC-IMA в 2014 (Ma et al., 2014).

### Потенциально новые минералы надгруппы граната и проблемы, связанные с их выделением

Урановый гранат – эльбрусит ( $Ia-3d$ ,  $a \approx 12.55 \text{ \AA}$ ,  $V \approx 1977 \text{ \AA}^3$ ,  $Z = 8$ ), обнаруженный в измененных ксенолитах в игнимбритах Верхнечегемской кальдеры (Северный Кавказ, Кабардино-Балкария), был утвержден CNMNC-IMA под названием «эльбрусит-(Zr)» с формулой  $\text{Ca}_3(\text{U}^{6+}\text{Zr})(\text{Fe}^{3+}_2\text{Fe}^{2+})\text{O}_{12}$  (Galuskina et al., 2010a). Принятая формула не отвечала требованиям, касающимся определения формулы конечного члена, так как имела по два катиона в двух разных структурных позициях. По правилам CNMNC-IMA допускается двойное катионное заполнение только в одной структурной позиции (Hawthorne, 2002). Рабочая группа, которая занималась новой классификацией надгруппы граната, предложила поменять название и формулу конечного члена этого граната, что и было впоследствии утверждено CNMNC-IMA (Grew et al., 2013). На сегодняшний день голотипный урановый, безкремниевый гранат с Кавказа имеет формальную формулу  $\text{Ca}_3(\text{Zr}_{1.5}\text{U}_{0.5}^{6+})\text{Fe}^{3+}_3\text{O}_{12}$  и название – «эльбрусит».

Таблица 1

## Минералы надгруппы граната

	Заряд в Z	Группа, минерал	Класс	X	Y	Z	φ
1	<b>0</b>	Катоит	Гидроксид	Ca <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	□	(OH) <sub>12</sub>
2	<b>3</b>	Криолитионит	Галогенид	Na <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	Li <sub>3</sub>	F <sub>12</sub>
3	<b>6</b>	Яфсоанит	Оксид	Ca <sub>3</sub>	Te <sup>6+</sup> <sub>2</sub>	Zn <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
	<b>8</b>	<b>Генритермьерит</b>	Силикаты				
4		Хольстамит		Ca <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> □	O <sub>8</sub> (OH) <sub>4</sub>
5		Генритермьерит		Ca <sub>3</sub>	Mn <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> □	O <sub>8</sub> (OH) <sub>4</sub>
	<b>9</b>	<b>Битиклеит</b>	Оксиды				
6		Битеклеит		Ca <sub>3</sub>	Sb <sup>5+</sup> Sn <sup>4+</sup>	Al <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
7		Устурит		Ca <sub>3</sub>	Sb <sup>5+</sup> Zr	Fe <sup>3+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
8		Джулуит		Ca <sub>3</sub>	Sb <sup>5+</sup> Sn <sup>4+</sup>	Fe <sup>3+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
9		Эльбрусит		Ca <sub>3</sub>	U <sup>6+</sup> <sub>0.5</sub> Zr <sub>1.5</sub>	Fe <sup>3+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
	<b>10</b>	<b>Шорломит</b>	Силикаты				
10		Кимцеит		Ca <sub>3</sub>	Zr <sub>2</sub>	SiAl <sub>2</sub>	O <sub>12</sub>
11		Иринарассит		Ca <sub>3</sub>	Sn <sup>4+</sup> <sub>2</sub>	SiAl <sub>2</sub>	O <sub>12</sub>
12		Шорломит		Ca <sub>3</sub>	Ti <sub>2</sub>	SiFe <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	O <sub>12</sub>
13		Керимасит		Ca <sub>3</sub>	Zr <sub>2</sub>	SiFe <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	O <sub>12</sub>
14		Тотурит		Ca <sub>3</sub>	Sn <sup>4+</sup> <sub>2</sub>	SiFe <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	O <sub>12</sub>
15		Хатчеонит		Ca <sub>3</sub>	Ti <sub>2</sub>	SiAl <sub>2</sub>	O <sub>12</sub>
	<b>12</b>	<b>Гранат</b>	Силикаты				
16		Мензерит-(Y)		YCa <sub>2</sub>	Mg <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
17		Пироп		Mg <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
18		Гроссулярь		Ca <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
19		Спессартин		Mn <sup>2+</sup> <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
20		Альмандин		Fe <sup>2+</sup> <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
21		Эрингаит		Ca <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
22		Голдманит		Ca <sub>3</sub>	V <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
23		Момоит		Mn <sup>2+</sup> <sub>3</sub>	V <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
24		Кноррингит		Mg <sub>3</sub>	Cr <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
25		Уваровит		Ca <sub>3</sub>	Cr <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
26		Андрадит		Ca <sub>3</sub>	Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
27		Кальдерит		Mn <sup>2+</sup> <sub>3</sub>	Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
28		Мейджорит		Mg <sub>3</sub>	SiMg	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
29		Моримотоит		Ca <sub>3</sub>	TiFe <sup>2+</sup>	Si <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
	<b>15</b>	<b>Берцелиит</b>	Ванадаты, арсенаты				
30		Шаферит		Ca <sub>2</sub> Na	Mg <sub>2</sub>	V <sup>5+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
31		Паленцонаит		Ca <sub>2</sub> Na	Mn <sup>2+</sup> <sub>2</sub>	V <sup>5+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
32		Берцелиит		Ca <sub>2</sub> Na	Mg <sub>2</sub>	As <sup>5+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>
33		Манганберцелиит		Ca <sub>2</sub> Na	Mn <sup>2+</sup> <sub>2</sub>	As <sup>5+</sup> <sub>3</sub>	O <sub>12</sub>

Мы считаем, что и эта формула эльбрусита не является корректной формулой конечного члена, так как осталась нерешённой одна из основных проблем – валентность урана. Содержания UO<sub>3</sub> в эльбрусите с Верхнечегемской кальдеры достигают 27 мас. % (Galuskina et al., 2010a), что в пересчёте на атомные количества даёт значения около 0.7 а.ф. (а.ф. – атомные количества, рассчитанные на формулу). Это значительно превышает атомные значения урана в принятой для эльбрусита формуле конечного члена. Ещё более высокими содержаниями урана характеризуется эльбрусит, недавно обнаруженный в спурритовых мраморах Иордании (Западная Даба-Сивага, комплекс Хатрурим, рис. 1А; Galuskina et al., 2014). В этом «необычном» эльбрусите часто фиксируются содержания UO<sub>3</sub> выше 35 мас. %, что в пересчёте на формулу даёт около 1 а.ф. U (табл. 2, ан. 4). Решение этой проблемы сильно усложняется тем, что все высокоурановые эльбруситы метамиктны, их выделения обычно не больше 10–20 мкм, и они часто образуют

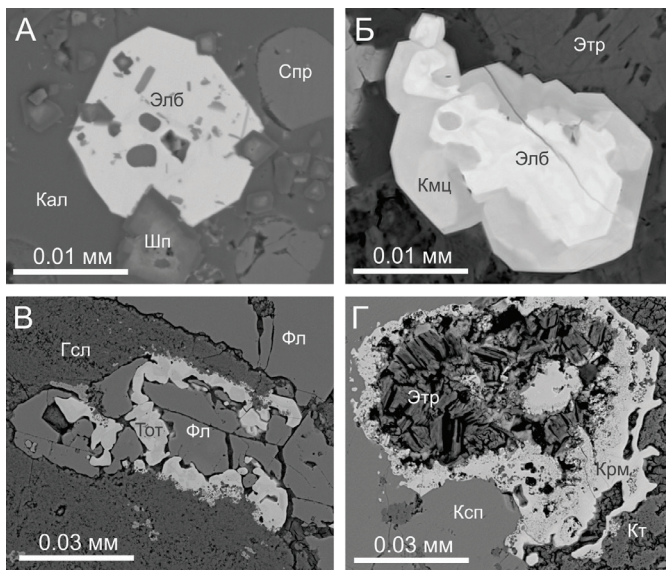


Рис. 1. Потенциально новые гранаты из пирометаморфических пород.

А – «Необычный эльбрусит» с удвоенным содержанием урана; Б – Al-аналог эльбрусита; В –  $^{VI}Ti$ -аналог тотурита; Г –  $^{VI}Ti$ -аналог керимасита. Изображения во вторично-рассеянных электронах. А, Б – Иордания, Западная Даба-Сивага; В, Г – Верхнечегемская кальдера, соответственно 1 и 7 ксенолиты (см. геологическую схему в Galuskina et al., 2015). Элб – эльбрусит, Кал – кальцит, Спр – спуррит, Шп – шпинель, Этр – этрингит, Кмц – кимцеит, Тот – тотурит, Фл – флюорит, Гсл – гидросиликаты Ca, Крм – керимасит, Ксп – куспидин, Кт – катоит.

зональные агрегаты с гранатами группы шорломита и битиклеита (Galuskina et al., 2010a, рис. 1Б). Предварительные данные исследования уранового керимасита из Верхнечегемской кальдеры с использованием метода EELS указывают на то, что уран имеет валентность близкую к  $5^+$  (Galuskina et al., 2014). Но открытым остаётся вопрос: можем ли мы эти данные распространять на все высокоурановые гранаты?

Рассмотрим три примера: 1) эльбрусит из Иордании с аномально высокими содержаниями урана (рис. 1А, табл. 2, ан. 4) –  $Ca_{3.08}(U^{5+}_{0.98}Zr_{0.95}Mg_{0.03}U^{6+}_{0.04})_{S2}(Fe^{3+}_{1.86}Al_{0.98}Ti^{4+}_{0.08})_{S2.98}O_{12}$ ; 2) Al-аналог эльбрусита из Иордании (рис. 1Б, табл. 2, ан. 5) –  $Ca_{3.01}(Zr_{1.42}U^{5+}_{0.54}Ti^{4+}_{0.04})_{S2}(Al_{1.43}Fe^{3+}_{1.09}Ti^{4+}_{0.31}Si_{0.16})_{S2.99}O_{12}$ ; 3) Sn-аналог эльбрусита из Верхнечегемской кальдеры (Galuskina et al., 2010a, табл. 2, ан. 2) –  $Ca_{3.02}(Sn_{1.14}Zr_{0.09}Ti^{4+}_{0.09}U^{5+}_{0.64}U^{6+}_{0.02}Nb^{5+}_{0.02})_{S2}(Fe^{3+}_{2.30}Al_{0.33}Ti^{4+}_{0.19}Si_{0.16})_{S2.98}O_{12}$ . Представленные выше кристаллохимические формулы урановых гранатов были рассчитаны на основании предположения, что всё Fe является трёхвалентным, поэтому соотношение  $U^{5+}/U^{6+}$  было рассчитано по балансу заряда. Единственной альтернативой такому подходу является расчёт кристаллохимических формул урановых гранатов с  $U^{6+}$  и расчётом соотношения  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  по балансу заряда. При этом в тетраэдрической позиции, кроме  $Fe^{3+}$ , мы получаем от 0.54 до 0.98 а.ф.  $Fe^{2+}$ . Высокие содержания крупного, нетипичного для гранатовой тетраэдрической позиции, катиона  $Fe^{2+}$  являются маловероятными и не соответствуют условиям образования минералов в окислительных условиях санидинитовой фации, когда Fe входит в структуры минералов (браунмиллерит–сребродольскит, магнезиоферрит, вадалит–эльтьюбит, бароферрит и др.) исключительно как  $Fe^{3+}$ .

На данном этапе исследований мы можем сделать вывод, что в высокоурановых гранатах U стабилизируется как  $U^{5+}$ . Этот катион имеет близкий к  $U^{6+}$  ионный радиус, но в отличие от последнего не деформирует вокруг себя кристаллическое пространство для создания ураниловых связей (Burns, 1999). Для урановых гранатов из Верхнечегемской кальдеры, представляющих собой твердые растворы эльбрусита с гранатами группы шорломита, точки анализов на диаграмме  $U-R^{5+}$  арфу (рис. 2) располагаются между линиями  $U^{5+} + R^{4+} + 3R^{3+} = 2R^{3+} + 3R^{4+}$  и  $0.5U^{6+} + 1.5R^{4+} + 3R^{3+} = 2R^{3+} + 3R^{4+}$  ( $R^{4+} = Sn, Zr, Ti, Si$ ;  $R^{3+} = Fe, Al$ ), что может указывать на смешанную валентность  $U^{5+/6+}$ . Вхождение в гранаты  $Sb^{5+}$  (твердые растворы эльбрусит-битиклеит) понижает в них содержание урана (рис. 2). Точки составов урановых гранатов из Иордании располагаются вблизи линии  $U^{5+} + R^{4+} + 3R^{3+} = 2R^{3+} + 3R^{4+}$ , что указывает на преобладание в их составе  $U^{5+}$ . Интересно, что теоретические расчёты указывают на высокую вероятность стабилизации  $U^{5+}$  в октаэдрических позициях гранатовой структуры (Rak et al., 2013).

После рассмотрения проблемы валентности урана в гранатах, мы можем вернуться к обсуждению кристаллохимической формулы эльбрусита и определению формулы конечного члена потенциально новых урановых гранатов. Эмпирические формулы иорданского эльбрусита (табл. 1, ан. 4) и Sn-аналога эльбрусита с Кавказа (табл. 1, ан. 2) легко модифицируются, соответственно, в формулы:  $Ca_3U^{5+}ZrFe^{3+}_3O_{12}$

Таблица 2

## Данные микрозондового исследования потенциально новых минералов супергруппы граната

Верхнечегемская Кальдера					Иордания				
	1	с.о.	в.с.	2	3	4	5	с.о.	в.с.
UO <sub>3</sub> *				0.56		1.50			
U <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	0.71	0.12	0.51–0.89	22.77	0.29	34.38	21.79	3.25	18.78–28.95
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9.39	0.87	7.68–10.71	<0.1	4.88	<0.09	<0.1		
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.09			0.29	0.29	<0.08	<0.1		
SiO <sub>2</sub>	1.92	0.13	1.71–2.16	1.22	3.20	<0.02	1.45	0.31	0.82–2.18
TiO <sub>2</sub>	6.01	0.38	5.27–6.49	2.86	5.82	0.82	4.09	1.01	2.07–5.10
ZrO <sub>2</sub>	20.57	2.61	16.92–26.71	1.38	13.94	14.71	25.64	1.97	21.69–28.19
HfO <sub>2</sub>	0.40	0.09	0.25–0.50	<0.1	0.34	<0.1	<0.12		
SnO <sub>2</sub>	8.58	2.38	3.07–12.96	22.12	22.54	<0.1	<0.1		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.35	0.64	5.39–7.21	2.18	5.96	6.32	10.67	0.24	10.18–11.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.85	0.60	17.47–19.32	23.54	17.12	18.79	12.68	0.85	11.11–14.37
MgO	<0.02			<0.02	<0.02	0.15	<0.02		
CaO	25.53	0.22	25.11–25.74	21.74	25.48	21.81	24.65	0.42	23.68–25.32
Сумма	98.31			98.64	99.87	98.48	100.96		
Расчёт на O=12									
<b>Ca/X</b>	<b>3.01</b>			<b>3.02</b>	<b>3.00</b>	<b>3.08</b>	<b>3.01</b>		
Zr	1.10			0.09	0.75	0.95	1.42		
Sn	0.38			1.14	0.99				
U <sup>5+</sup>	0.02			0.64	0.01	0.98	0.54		
U <sup>6+</sup>				0.02		0.04			
Sb <sup>5+</sup>	0.38				0.20				
Hf	0.01				0.01				
Nb <sup>5+</sup>				0.02	0.01				
Ti <sup>4+</sup>	0.11			0.09	0.03		0.04		
Mg						0.03			
<b>Y</b>	<b>2.00</b>			<b>2.00</b>	<b>2.00</b>	<b>2.00</b>	<b>2.00</b>		
Si	0.21			0.16	0.35		0.16		
Ti <sup>4+</sup>	0.39			0.19	0.45	0.08	0.31		
Al	0.82			0.33	0.77	0.98	1.43		
Fe <sup>3+</sup>	1.56			2.30	1.42	1.86	1.09		
<b>Z</b>	<b>2.98</b>			<b>2.98</b>	<b>2.99</b>	<b>2.92</b>	<b>2.99</b>		

Примечание: 1 – «<sup>IV</sup>Ti-керимасит» (среднее из 9-ти ан.), 2 – «Sn-эльбрусит», 3 – «<sup>IV</sup>Ti-тотурит», 4 – «необычный» эльбрусит (среднее из 4-х ан.), 5 – «Al-эльбрусит» (среднее из 15-ти ан.). с.о. – стандартное отклонение, в.с. – вариации состава. Микрозонд CAMECA SX100 (Варшавский Университет), измерения при 15 kV и 30–40 nA с использованием природных и синтетических стандартов; для урана использован ворланит, CaUO<sub>4</sub>. \*) соотношение U<sup>5+</sup>/U<sup>6+</sup> рассчитано по балансу заряда.

(новая формула эльбрусита) и Ca<sub>3</sub>U<sup>5+</sup>SnFe<sup>3+</sup><sub>3</sub>O<sub>12</sub> (потенциально новый минерал), которые аналогичны общей формуле гранатов группы битиклеита. Для Al-аналога эльбрусита из Иордании задача усложняется появлением четырёх катионов в тетраэдрической позиции: Ca<sub>3,01</sub>(Zr<sub>1,42</sub>U<sup>5+</sup><sub>0,54</sub>Ti<sup>4+</sup><sub>0,04</sub>)<sub>S2</sub>(Al<sub>1,43</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>1,09</sub>Ti<sup>4+</sup><sub>0,31</sub>Si<sub>0,16</sub>)<sub>S2,99</sub>O<sub>12</sub>. В данном случае должно использоваться правило «преобладающей валентности катионов» с учётом двойного катионного заполнения позиции (Hatert, Burke, 2008), что даёт формулу Ca<sub>3</sub>U<sup>5+</sup>ZrAl<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (потенциально новый минерал группы битиклеита).

Правило «преобладающей валентности» может быть также применено для выделения формул конечного члена ещё для двух потенциально новых гранатов из Верхнечегемской кальдеры, принадлежащих к группе шорломита: 1) <sup>VI</sup>Ti-аналога керимасита Ca<sub>3,01</sub>(Zr<sub>1,10</sub>Sn<sub>0,38</sub>Sb<sup>5+</sup><sub>0,38</sub>Ti<sup>4+</sup><sub>0,11</sub>U<sup>5+</sup><sub>0,02</sub>Hf<sub>0,01</sub>)<sub>S2</sub>(Fe<sup>3+</sup><sub>1,56</sub>Al<sub>0,82</sub>Ti<sup>4+</sup><sub>0,39</sub>Si<sub>0,21</sub>)<sub>S2,98</sub>O<sub>12</sub> (табл. 1, ан. 1, рис. 1B) и 2) <sup>VI</sup>Ti-аналога тотурита Ca<sub>3</sub>(Sn<sub>0,99</sub>Zr<sub>0,75</sub>Sb<sup>5+</sup><sub>0,20</sub>Ti<sup>4+</sup><sub>0,03</sub>Hf<sub>0,01</sub>U<sup>5+</sup><sub>0,01</sub>Nb<sup>5+</sup><sub>0,01</sub>)<sub>S2</sub>(Fe<sup>3+</sup><sub>1,42</sub>Al<sub>0,77</sub>Ti<sup>4+</sup><sub>0,45</sub>Si<sub>0,35</sub>)<sub>S2,99</sub>O<sub>12</sub>. Здесь важное значение имеет факт, что сумма Si+Ti<sup>4+</sup> > 0.5 а.ф. (граница для минералов групп шорломита и битиклеита) и то, что Ti > Si. При разнообразии катионов в октаэдрической и тетраэдрической позициях в этих гранатах, формализование формул

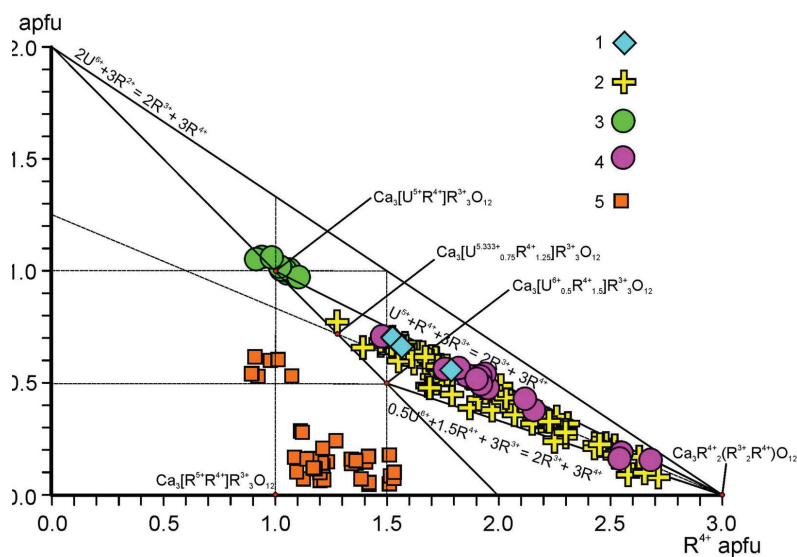


Рис. 2. Точки анализов урансодержащих гранатов на диаграмме U – R<sup>4+</sup> а.ф. (R<sup>4+</sup> = Ti+Si+Sn+Zr). 1 – Sn-аналог эльбрусита, 2 – гранаты серии эльбрусит-керимасит, 3 – «необычный» эльбрусит, 4 – Al-аналог эльбрусита, 5 – гранаты серии эльбрусит-битиклеит. 1, 2, 5 – Верхне-чегемская кальдера; 3, 4 – Иордания.

конечных членов на основании принятых CNMNC-IMA правил приводит к следующим формулам потенциально новых несиликатных минералов группы шорломита: Ca<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Fe<sup>3+</sup>Ti<sup>4+</sup>O<sub>12</sub> и Ca<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>Fe<sup>3+</sup>Ti<sup>4+</sup>O<sub>12</sub>. К сожалению, необходимы дополнительные дан-

ные по координации Ti, получение которых усложнено малыми размерами зёрен и невысокой концентрацией Ti в этих гранатах. Правильность наших предположений, касающихся координации и валентности Ti, могут косвенно подтверждаться данными по синтетическим гранатам. В синтетических гранатах конкурирующие с титаном высокозарядные элементы (Zr, Sn, Sb, Nb), занимают преимущественно октаэдрические позиции (Geller, 1967). Высокие содержания этих элементов в октаэдрических позициях природных гранатов определяют высокие содержания Ti в тетраэдрических позициях.

Представленные выше результаты исследования гранатов с Кавказа и Иордании указывают на необходимость ревизии формулы эльбрусита. Гранаты групп битиклеита и шорломита характеризуются наибольшими вариациями состава, и именно в этих группах следует ожидать появления новых минералов.

Исследования были частично финансированы Центром Научных Исследований Польши (NCN), гранты 2012/05/B/ST10/00514 и 2013/11/B/ST10/00272.

## Литература

- Burns P.C. The crystal chemistry of uranium // In P.C. Burns and R. Finch, Eds., Uranium: Mineralogy, geochemistry and the environment. 1999. Vol. 38. P. 23–90. Rev. Mineral. Mineralogical Society of America, Chantilly, Virginia.
- Galuskina I.O., Galuskin E.V., Armbruster T., Lazic B., Kusz J., Dzierżanowski P., Gazeev V.M., Pertsev N.N., Prusik K., Zadov A.E., Winiarski A., Wrzalik R., Gurbanov A.G. Elbrusite-(Zr) — a new uranian garnet from the Upper Chegem caldera, Kabardino-Balkaria, Northern Caucasus, Russia // Am. Min. 2010a. V. 95. P. 1172–1181.
- Galuskina I.O., Galuskin E.V., Armbruster T., Lazic B., Dzierżanowski P., Gazeev V.M., Prusik K., Pertsev N.N., Winiarski A., Zadov A.E., Wrzalik R., Gurbanov A.G. Bitikleite-(SnAl) and bitikleite-(ZrFe): New garnets from xenoliths of the Upper Chegem volcanic structure, Kabardino- Balkaria, Northern Caucasus, Russia // Am. Min. 2010b. V. 95. P. 959–967.
- Galuskina I.O., Galuskin E.V., Kusz J., Dzierżanowski P., Prusik K., Gazeev V.M., Pertsev N. N., Dubrovinsky L. Dzhuluite, Ca<sub>3</sub>SbSnFe<sup>3+</sup>O<sub>12</sub>, a new bitikleite-group garnet from the Upper Chegem Caldera, Northern Caucasus, Kabardino-Balkaria, Russia // Eur. J. Mineral. 2013. V. 25. P. 231–239.
- Galuskina I.O., Galuskin E.V., Utsunomiya S., Nakamatsu Y., Murashko M., Vapnik Y. Uranian garnet from pyrometamorphic rocks of the Hatrurim Complex, Jordan. Problem of crystal chemical formula of elbrusite // Abstract Volume. 2014. 21th General Meeting of IMA, Johannesburg, South Africa. P. 378.
- Geller S. Crystal chemistry of the garnets // Zeitschrift für Kristallographie. 1967. V. 125. P. 1–47.
- Grew E. S., Locock A.J., Mills S.J., Galuskina I.O., Galuskin E.V., Hålenius U. Nomenclature of the garnet supergroup // Am. Min. 2013. V. 98. P. 785–811.
- Hatert F., Burke E.A.J. The IMA–CNMNC dominant-constituent rule revisited and extended // Can. Min. 2008. V. 46. P. 717–728.
- Hawthorne F.C. The use of end-member charge-arrangements in defining new mineral species and heterovalent substitutions in complex minerals // Can. Min. 2002. V. 40. P. 699–710.
- Rak Z., Ewing R.C., Becker U. Electronic structure and thermodynamic stability of uranium-doped yttrium iron garnet // Condens. Matter. 2013. V. 25. P. 495–502.