

УДК 546.791.6

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ УРАНАТОВ КАЛЬЦИЯ, СТРОНЦИЯ И БАРИЯ

© 2019 г. Н. Г. Черноруков, О. В. Нипрук\*, Г. Н. Черноруков, Р. В. Абражеев, К. А. Чаплиёва

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского,  
пр. Гагарина 23а, Нижний Новгород, 603950 Россия

\*e-mail: nipruk@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 июня 2018 г.

После доработки 28 июня 2018 г.

Принято к печати 9 июля 2018 г.

При взаимодействии синтетического скупита  $\text{UO}_3 \cdot 2.25\text{H}_2\text{O}$  с водными растворами нитратов кальция, стронция и бария в гидротермальных условиях при  $200^\circ\text{C}$  и  $\text{pH} = 7\text{--}8$  получены индивидуальные кристаллические соединения  $\text{M}^{\text{II}}\text{U}_3\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}^{\text{II}} = \text{Ca}, \text{Sr}$ ) и  $\text{BaU}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Методами химического анализа, рентгенофлуоресцентной спектроскопии, рентгенографии, ИК спектроскопии, термографии установлен их состав и строение, изучены процессы дегидратации и термораспада.

**Ключевые слова:** уранаты, кальций, стронций, барий, рентгенография, дегидратация, термораспад

**DOI:** 10.1134/S0044460X1901013X

Уранаты щелочноземельных элементов могут быть отнесены к числу эффективных форм связывания урана в природной среде и в различных технологических процессах. Возможность взаимодействия урана с кальцием обусловлена его значительным содержанием в земной коре (3.20%). Стронций – постоянный спутник урана как продукт деления, и возможность его взаимодействия с ураном с образованием индивидуальных кристаллических фаз весьма важна при получении ядерного топлива и при переработке радиоактивных отходов. Барий в виде его различных изотопов – также один из продуктов деления урана. Значительные количества бария содержатся в радиоактивных отходах – продуктах ядерного топливного цикла. Изучение возможности образования индивидуальных соединений при взаимодействии урана и бария важно для технологий ядерного топливного цикла.

Размерные параметры щелочноземельных элементов в виде ионных радиусов занимают широкий диапазон значений от 0.34 Å для Be до 1.38 Å для Ba. При таком различии размеров координационные числа щелочноземельных элементов весьма разнообразны и лежат в пределах от 4 для Be [ $r(\text{Be}^{2+})/r(\text{O}^{2-}) = 0.25$ ] до 8 и более для

Ba [ $r(\text{Ba}^{2+})/r(\text{O}^{2-}) = 1.01$ ]. Это обстоятельство может служить реальной причиной различий в составе и строении полиуранатов щелочноземельных элементов. Наши попытки получить по гидротермальной методике какой-либо уранат бериллия оказались безуспешными, вероятно, потому, что отношение  $r(\text{Be}^{2+})/r(\text{O}^{2-}) = 0.25$  соответствует тетраэдрической координации Be, что существенно ниже границы октаэдрической и более высокой координации, характерной для большинства известных уранатов. Следующий за бериллием щелочноземельный элемент Mg образует легко воспроизводимый уранат  $\text{MgU}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [1, 2]. Кристаллическая решетка данного соединения имеет слоистое строение. В ней двумерные слои  $[(\text{UO}_2)_3\text{O}_4]_{2\infty}^{\delta-}$ , несущие отрицательные электронные заряды, объединены ионными форами атомов  $\text{Mg}^{\delta+}$  в трехмерную решетку. Молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  образуют координационное окружение атомов Mg и выполняют функцию компенсатора их координационной емкости. Наряду с увеличением координационных возможностей в ряду  $\text{Ca} \rightarrow \text{Sr} \rightarrow \text{Ba}$  следует ожидать возрастания ионных составляющих связей  $\text{M}^{\text{II}}\text{--O}$  и соответствующего этому усилению эффекта ненаправленности и ненасыщаемости связей в силовом поле, создаваемом сферически симметричными s-орбиталями атомов щелочноземельных

**Таблица 1.** Результаты химического анализа уранатов кальция, стронция и бария

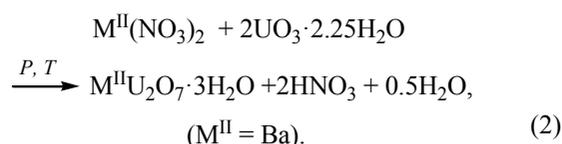
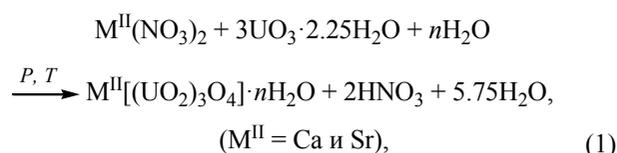
Соединение	M <sup>II</sup> O, мас%		UO <sub>3</sub> , мас%		H <sub>2</sub> O, мас%		r <sub>M<sup>2+</sup></sub> , Å	r <sub>M<sup>2+</sup></sub> /r <sub>O<sup>2-</sup></sub>
	вычислено	найдено	вычислено	найдено	вычислено	найдено		
CaU <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·5H <sub>2</sub> O	5.59	5.49	85.45	85.37	8.97	8.87	1.04	0.76
SrU <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·4H <sub>2</sub> O	10.02	9.93	83.01	82.94	6.97	6.89	1.20	0.88
BaU <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·3H <sub>2</sub> O	19.67	19.40	73.39	72.81	6.93	7.00	1.38	1.01

элементов. В результате возможно искажение формы полиэдров M<sup>II</sup>-O<sub>n</sub> с образованием различных по составу и строению уранатов, что подтверждают имеющиеся данные о различных уранатах щелочноземельных элементов, наиболее достоверными из которых следует считать результаты рентгеноструктурных работ, выполненных на образцах минеральных образований Ca(UO<sub>2</sub>)<sub>6</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>·8H<sub>2</sub>O (becquerelite), Ba(UO<sub>2</sub>)<sub>6</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>·8H<sub>2</sub>O (billietite) и Ba(UO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>O<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O (protasite) [3–6]. Результаты других работ противоречивы и менее достоверны [7–10].

Нами получены уранаты кальция, стронция и бария в виде соединений M<sup>II</sup>[(UO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>]·nH<sub>2</sub>O (M<sup>II</sup> = Ca, Sr) и BaU<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·3H<sub>2</sub>O по реакциям (1) и (2) соответственно.

**Таблица 2.** Рентгенографические характеристики уранатов кальция, стронция и бария

CaU <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·5H <sub>2</sub> O		SrU <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·4H <sub>2</sub> O		BaU <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ·3H <sub>2</sub> O	
d, Å	I, %	d, Å	I, %	d, Å	I, %
6.768	100	6.873	100	7.058	37
6.038	5	6.050	7	3.515	54
3.469	40	3.534	43	3.472	50
3.376	51	3.466	55	3.115	100
3.081	65	3.093	67	2.828	6
2.752	7	2.766	9	2.473	21
2.419	21	2.441	28	2.006	18
2.272	10	2.288	14	1.191	6
2.244	11	2.291	10	1.954	38
2.155	5	2.184	8	1.923	6
2.000	11	2.053	17	1.909	5
1.916	11	2.003	23		
1.884	30	1.907	36		



С применением спектральных и термографических методов изучен химический и функциональный состав полученных соединений, определены их кристаллографические характеристики, исследовано состояние и роль H<sub>2</sub>O в формировании структуры, дана оценка основных факторов, определяющих состав и строение гидратированных уранатов кальция, стронция и бария.

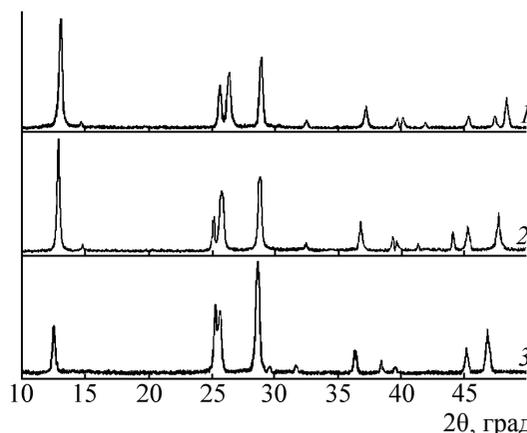
В табл. 1 приведены результаты химического анализа синтезированных нами уранатов Ca, Sr и Ba. Здесь же представлены отношения ионных радиусов  $r(\text{M}^{2+})/r(\text{O}^{2-})$ , величины которых могут служить оценкой наиболее вероятной формы координационных полиэдров M<sup>II</sup>O<sub>n</sub>. Результаты химического анализа показывают, что формульные единицы каждого из уранатов не аналогичны, однако все соединения получены в виде индивидуальных кристаллических фаз. Подтверждением этому может служить полное совпадение в каждом из повторных синтезов дифракционных максимумов отражения по их относительной интенсивности и положению на оси 2θ. Кристаллические решетки кальция и стронция близки между собой по набору дифракционных максимумов отражения hkl и их относительной интенсивности (см. рисунок, табл. 2).

В приведенных на рисунке дифрактограммах уранатов кальция и стронция в области малых углов 2θ присутствуют интенсивные максимумы отражения от плоскостей с индексами 00l и

системы соответствующих им пинакоидальных пиков (для ураната кальция  $d = 6.768 \text{ \AA}$ ; для ураната стронция  $d = 6.873 \text{ \AA}$ ). Это указывает на слоистый тип структуры соединений кальция и стронция. Некоторое различие в их строении проявляется в незначительном расщеплении расположенных на больших углах  $2\theta$  дифракционных максимумов отражения. Уранат бария, в сравнении с уранатами кальция и стронция, судя по формульному составу и набору дифракционных данных, полностью отличается по составу и строению.

Для установления причин наблюдаемых различий в составе и строении уранатов Ca, Sr и Ba было выполнено ИК спектроскопическое исследование (табл. 3). ИК спектрах для каждого соединения представлены следующие группы условно независимых колебаний: колебания уранильного фрагмента  $\text{UO}_2^{\delta+}$ , колебания молекулярной  $\text{H}_2\text{O}$  и колебания фрагмента  $\text{UOH}$ . Этих групп колебаний вполне достаточно для оценки их функциональной принадлежности. Наличие в спектрах колебаний уранильного фрагмента  $\nu(\text{UO}_2^{\delta+})$  указывает на то, что весь уран присутствует в соединениях в степени окисления +6 и в этом состоянии проявляет тенденцию к образованию соединений со слоистым типом кристаллической решетки. В уранатах кальция и стронция валентные колебания  $\nu(\text{UO}_2^{\delta+})$  разделены на составляющие  $\nu_{\text{as}}$  и  $\nu_{\text{s}}$ , что указывает на нелинейную и неравноплечную конфигурацию уранильного фрагмента [11]. Для  $\text{CaU}_3\text{O}_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  колебания  $\nu_{\text{as}}(\text{UO}_2^{\delta+})$  и  $\nu_{\text{s}}(\text{UO}_2^{\delta+})$  соответствуют значениям 882 и 851  $\text{см}^{-1}$ . По данным известных корреляций [11], эти значения указывают на семерную координацию в уран-кислородном полиэдре. Аналогичные колебания в  $\text{SrU}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  существенно смещены в область меньших волновых чисел (860 и 828  $\text{см}^{-1}$ ), что может быть обусловлено большим размером атомов Sr и соответствующим увеличением длин уран-кислородных связей в уранильных группах  $\text{UO}_2^{\delta+}$ .

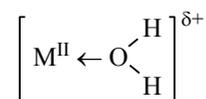
Колебания  $\text{H}_2\text{O}$  представлены в спектрах уранатов кальция и стронция несколькими



Рентгеновские дифрактограммы уранатов кальция (1), стронция (2) и бария (3).

группами полос поглощения. Среди них деформационные колебания молекулярной  $\text{H}_2\text{O}$  в области  $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$ . Некоторое смещение этих полос в коротковолновую область от значения 1595  $\text{см}^{-1}$ , характерного для свободных молекул  $\text{H}_2\text{O}$  в газовой фазе [12], обусловлено участием  $\text{H}_2\text{O}$  в образовании  $\text{H}$ -связей. В силу этой же причины валентные колебания  $\nu(\text{H}-\text{OH})$  не разделены на составляющие  $\nu_{\text{as}}$ ,  $\nu_{\text{s}}$  и представлены в спектрах интегральными полосами с незначительными по интенсивности максимумами поглощения при 3448  $\text{см}^{-1}$  для  $\text{CaU}_3\text{O}_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и 3410  $\text{см}^{-1}$  для  $\text{SrU}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

В спектре присутствуют также полосы валентных и деформационных колебаний  $\text{UOH}$  в области  $\sim 3200$  и  $\sim 1000 \text{ см}^{-1}$  соответственно. Полосы валентных и деформационных колебаний в координационном комплексе



в силу значительных ионных составляющих связей  $\text{M}^{\text{II}}-\text{O}$  в ИК спектрах неактивны.

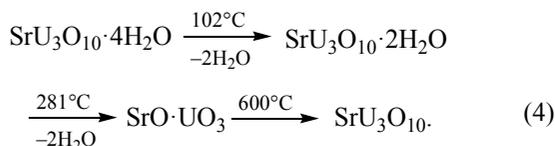
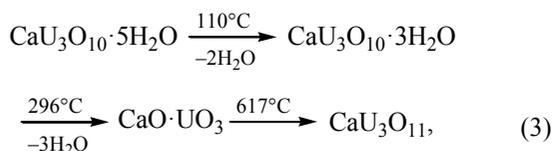
Форма и положение полос поглощения валентных и деформационных колебаний и их групповая принадлежность указывают на

**Таблица 3.** Параметры ИК спектров ( $\text{см}^{-1}$ ) уранатов кальция, стронция и бария

Соединение	$\nu(\text{H}_2\text{O})$	$\nu(\text{U}-\text{OH})$	$\delta(\text{H}_2\text{O})$	$\delta(\text{UOH})$	$\nu_{\text{as}}(\text{UO}_2^{\delta+})$	$\nu_{\text{s}}(\text{UO}_2^{\delta+})$
$\text{CaU}_3\text{O}_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	3448 с	3182 пл	1621 с	1016 с	882 с	851 сл
$\text{SrU}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3410 с	3180 пл	1622 с	1017 с	860 с	828 сл
$\text{BaU}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	3388 с	1178 пл	1623 с	967 с	851 с	–

значительное подобие в строении уранатов кальция и стронция. Однако существенное различие в размерных параметрах атомов Ca и Sr и соответствующий этому не одинаковый вклад в ионную составляющую металл-кислородных связей допускает некоторую вариативность в компоновке структурообразующих элементов U, Ca и Sr.

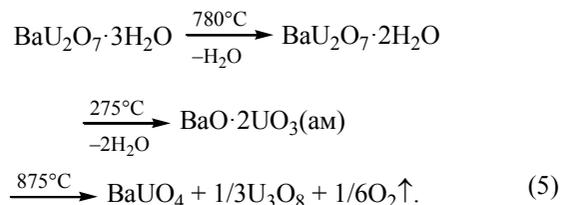
Выше показано, что вода в составе уранатов Ca и Sr сохраняет молекулярную индивидуальность. Для уточнения состояния H<sub>2</sub>O и оценки ее места и роли в структуре было проведено термографическое исследование уранатов Ca и Sr. Термограммы уранатов Ca и Sr аналогичны и имеют близкие температурные интервалы дегидратации. Удаление двух молекул H<sub>2</sub>O из обоих соединений происходит в одну стадию в соответствии с эндоэффектами на кривых ДТА в интервале температур 102–110°C и не сопровождается какими-либо изменениями рентгенографических данных. Это свидетельствует о том, что удаляемые молекулы H<sub>2</sub>O являются слабо-связанными, не занимают самостоятельных кристаллографических позиций, не выполняют функцию компенсатора координационной емкости Ca и Sr, и их удаление не приводит к каким-либо изменениям кристаллических решеток уранатов. Удаление оставшихся молекул H<sub>2</sub>O происходит при более высоких температурах в интервале 281–296°C и сопровождается полным разрушением кристаллических решеток до аморфного состояния, что свидетельствует об участии молекулярной H<sub>2</sub>O в формировании координационного окружения атомов Ca и Sr. При дальнейшем нагревании до 600°C происходит экзотермическая кристаллизация фаз безводных уранатов CaU<sub>3</sub>O<sub>10</sub> и SrU<sub>3</sub>O<sub>10</sub>, информация о которых приведена в ряде публикаций [13–15]. Процессы дегидратации уранатов Ca и Sr могут быть представлены реакциями (3), (4).



Таким образом, проведенные исследования показали, что кристаллогидраты уранатов Ca и Sr – неизвестные ранее соединения CaU<sub>3</sub>O<sub>10</sub>·5H<sub>2</sub>O и

SrU<sub>3</sub>O<sub>10</sub>·4H<sub>2</sub>O. Их кристаллические решетки состоят из слоев [(UO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>]<sub>2∞</sub><sup>δ-</sup>. Слои связаны в трехмерную структуру ионами щелочноземельных элементов M<sup>0+</sup>. Часть воды в составе соединений сохраняет молекулярную индивидуальность и выполняет функцию компенсатора координационной ёмкости щелочноземельных элементов. Другая часть H<sub>2</sub>O в координации не участвует, образует средние по энергии Н-связи и занимает свободные полости в межслоевом пространстве.

В отличие от уранатов кальция и стронция, уранат бария имеет иной набор стехиометрических коэффициентов в формульной единице, соответствующий составу Ba[(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]·3H<sub>2</sub>O. По данным ИК спектра, в области уранильного фрагмента для него характерны полосы поглощения только антисимметричных валентных колебаний ν<sub>as</sub>(UO<sub>2</sub><sup>δ+</sup>). Отсутствие в спектрах колебаний ν<sub>s</sub>(UO<sub>2</sub><sup>δ+</sup>) указывает на линейную и равноплечную конфигурацию уранильного фрагмента вида [O<sup>δ-</sup>U<sup>δ+</sup>O]<sup>δ+</sup>. Положение этой полосы при 851 см<sup>-1</sup> соответствует семерной координации уран-кислородного полиэдра [11]. По данным ИК спектроскопии и термографии, часть молекул H<sub>2</sub>O в составе ураната бария, так же как и в соединениях кальция и стронция, в количестве одного моля на формульную единицу Ba[(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]·3H<sub>2</sub>O сохраняет молекулярную индивидуальность, не принимает участия в координационном окружении Ba, не занимает самостоятельных кристаллографических позиций в структуре соединения, удерживается в их составе системой Н-связей и удаляется при 78°C с сохранением структуры исходного соединения. Другая часть H<sub>2</sub>O в количестве двух молекул на формульную единицу соединения представлена в ИК спектре полосой ν(UO–H) и полосой δ(UOH). Удаление обеих молекул H<sub>2</sub>O происходит в одну стадию при нагревании до 275°C и приводит к полному разрушению кристаллической решетки ураната бария до аморфного состояния. При дальнейшем нагревании аморфного ураната бария при 875°C происходит экзотермическая кристаллизация моноураната бария BaUO<sub>4</sub> [16]. Процессы дегидратации и термораспада ураната бария могут быть представлены реакцией (5).



Таким образом, вариативность при получении уранатов Ca, Sr и Ba  $\text{CaU}_3\text{O}_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SrU}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{BaU}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , различающихся составом и строением, определяется размерными параметрами щелочноземельных элементов, а не их электронным строением. Увеличение ионных радиусов в ряду  $\text{Mg} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Sr} \rightarrow \text{Ba}$  обуславливает образование уранатов различного состава и строения. Для уранатов щелочноземельных элементов характерны общие принципы структурной компоновки, аналогична роль воды, сохраняющей молекулярную индивидуальность, и выполняющей функцию компенсатора координационной емкости  $\text{M(II)}$ , а также аналогичен функциональный состав с близкими колебательными характеристиками уранильных групп  $\text{UO}_2^{\delta+}$ , молекулярной  $\text{H}_2\text{O}$  и фрагментов  $\text{UOH}$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерение интенсивности флуоресцентного излучения проводили на спектрометре EDX-900 (Shimadzu). Фазовую индивидуальность и рентгенографические характеристики образцов определяли на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu). Функциональный состав соединений устанавливали с помощью ИК спектрометра FTIR-8400s (Shimadzu). Термическую устойчивость изучали методом дифференциально-термического анализа с использованием прибора Labsys фирмы Setaram.

**Уранаты щелочноземельных элементов.** Навеску синтетического скупита [17] массой 0.5 г помещали в раствор нитрата щелочноземельного элемента объемом 100 мл и концентрацией 0.5 моль/л. Стальной автоклав с помещенными в него реагентами нагревали 10 ч при  $200^\circ\text{C}$ . Образовавшуюся твердую фазу отфильтровывали, промывали охлажденной дистиллированной водой и сушили на воздухе до постоянной массы. Полноту протекания реакции контролировали по присутствию на рентгенограмме дифракционных максимумов отражения кристаллической фазы  $\text{UO}_3 \cdot 2.25\text{H}_2\text{O}$ . При необходимости время нагревания реакционной массы увеличивали. Приведенные выше условия оптимальны для получения соединений достаточной степени кристалличности и чистоты. Изменение условий не приводит к получению соединений иного состава и строения, однако, уменьшает выход конечного продукта реакции и увеличивает время синтеза. Количество урана, кальция, стронция и бария в исследуемых образцах определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа по линиям  $\text{UL}_\alpha$ ,  $\text{UL}_\beta$ ,  $\text{CaK}_\alpha$ ,  $\text{SrK}_\beta$ ,  $\text{BaL}_\alpha$ .

Массовую долю  $\text{H}_2\text{O}$  определяли весовым методом, прокаливая исследуемые образцы при  $600^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

### ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 4.5706.2017/БЧ) в рамках базовой части государственного задания.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноруков Н.Г., Нипрук О.В., Князев А.В., Арова М.И., Чаплиева К.А. // ЖНХ. 2013. Т. 58. № 1. С. 11; Chernorukov N.G., Nipruk O.V., Knyazev A.V., Arova M.I., Chaplieva K.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 2013. Vol. 58. N 1. P. 9. doi 10.1134/S0036023613010051
2. Черноруков Н.Г., Нипрук О.В., Черноруков Г.Н., Седелкина О.С. // Радиохимия. 2015. Т. 57. № 4. С. 321; Chernorukov N.G., Nipruk O.V., Chernorukov G.N., Sedelkina O.S. // Radiochemistry. 2015. Vol. 57. N 4. P. 378. doi 10.1134/S1066362215040062
3. Finch R.J., Burns P.C., Hawthorne F.C., Ewing R.C. // Can. Mineralogist. 2006. Vol. 44. P. 1197.
4. Cejka J., Sejkora J., Skala R., Cejka J., Novotna M., Ederova J. // J. Neues Jb. Miner. Mh. 1998. Vol. 174. P. 159.
5. Pagoaga M.K., Appleman D.E., Stewart J.M. // Mineral. Mag. 1986. Vol. 50. P. 125.
6. Pagoaga M.K., Appleman D.E., Stewart J.M. // Am. Mineralogist. 1987. Vol. 72. P. 1230.
7. Sobry R. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1973. Vol. 35. N 5. P. 1516. doi 10.1016/0022-1902(73)80240-4
8. Sobry R. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1973. Vol. 35. N 8. P. 2754. doi 10.1016/0022-1902(73)80506-8
9. Dunn H. X-Ray Diffraction Data for Some Uranium Compounds. ORNL-2092, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, August 1956
10. Peters J. // Mem. Soc. Roy. Sci. Liege. 1967. P. 5.
11. Володько М.В., Комяк А.И., Умрейко Д.С. Ураниловые соединения. Минск.: БГУ, 1981. Т. 1.
12. Юхневич Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды. М.: Наука, 1973.
13. Cordfunke E.H.P., Loopstra B.O. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1967. Vol. 29. P. 51. doi 10.1016/0022-1902(67)80143-X

14. Sali S.K., Sampath S., Venugopal V. // J. Nucl. Mater. 2000. Vol. 277. P. 106. doi 10.1016/S0022-3115(99)00145-2
15. Allen G.C., Griffiths A.J. // J. Chem. Soc. Dalton Trans. 1979. P. 315. doi 10.1039/dt9790000315
16. Loopstra B.O., Rietveld H.M. // Acta Crystallogr. (B). 1969. Vol. 25. P. 787. doi 10.1107/S0567740869002974
17. Нипрук О.В., Князев А.В., Чернорук Г.Н., Пыхова Ю.П. // Радиохимия. 2011. Т.53. № 2. С.128; Nipruk O.V., Knyazev A.V., Chernorukov G.N., Pykhova Y.P. // Radiochemistry. 2011. Vol. 53. N 2. P. 146. doi 10.1134/S1066362211020044

## Synthesis and Study of Calcium, Strontium, and Barium Uranates

N. G. Chernorukov, O. V. Nipruk\*, G. N. Chernorukov, R. V. Abrazheev, and K. A. Chaplieva

*N.I. Lobachevskii Nizhny Novgorod State University, pr. Gagarina 23a, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*\*e-mail: nipruk@yandex.ru*

Received June 28, 2018

Revised June 28, 2018

Accepted July 9, 2018

The reaction of synthetic schoepite  $\text{UO}_3 \cdot 2.25\text{H}_2\text{O}$  with aqueous solutions of calcium, strontium and barium nitrates under hydrothermal conditions at  $200^\circ\text{C}$  and  $\text{pH} = 7\text{--}8$  yielded individual crystalline compounds with general formula  $\text{M}^{\text{II}}\text{U}_3\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{M}^{\text{II}} = \text{Ca}, \text{Sr}$ ) and  $\text{BaU}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Their composition and structure were established using the methods of chemical analysis, X-ray fluorescence spectrometry, X-ray diffraction, IR spectroscopy, thermography. The processes of dehydration and thermal decomposition were studied.

**Keywords:** uranates, calcium, strontium, barium, X-ray diffraction, dehydration, thermal decomposition