

А. Б. МАКЕЕВ (ИГЕМ РАН),
Б. А. МАКЕЕВ (ИГ ФИЦ Коми НЦ УРО РАН),
С. Е. БОРИСОВСКИЙ (ИГЕМ РАН)

Новая минеральная фаза – фосфат тория (Средний Тиман, Республика Коми)

В четырех проявлениях в пределах Среднего Тимана найдена новая минеральная фаза – фосфат тория – в виде отдельных зерен и их агрегатов. Фаза оказалась рентгеноаморфной. Изучены химический состав и некоторые физические свойства двух разновидностей новой фазы. Зерна ториевой фазы из проявления Ичетью отличаются высокими содержаниями кальция, железа, серы, углерода, что предполагает широкий изоморфизм как в катионной, так и анионной частях этого соединения – $(Th, Ca, Fe)[(PO_4)(SO_4)(CO_3)] \times nH_2O$. Методом CHIME оценен возраст преобразования этой фазы в проявлении Ичетью. Он оказался неожиданно очень молодым – $52,7 \pm 6,1$ млн лет (ранний палеоген). Возможно, это время эксгумации первичного залегания конглобрекчиевого пласта Ичетью, ставшего доступным для минерализованных метеорных вод и их взаимодействия с неустойчивой радиоактивной фазой фосфата тория, что привело к усложнению ее состава.

Ключевые слова: Средний Тиман, проявление Ичетью, Ново-Бобровское, р. Мезень, фосфат тория, химический состав, свойства.

А. В. MAKEEV (IGEM RAN),
B. A. MAKEEV (FTC Institute of Geology Komi SC UB RAS),
S. E. BORISOVSKIY (IGEM RAN)

Thorium phosphate: New mineral phase (Middle Timan, Komi Republic)

In four places within the Middle Timan a new mineral phase *thorium phosphate* was found in the form of individual grains and their aggregates. The phase turned out to be X-ray amorphous. The chemical composition and some physical properties of the two varieties of the new phase have been studied. The grains of the thorium phase from the Ichetyu occurrence are characterized by high calcium, iron, sulfur, carbon contents that suggests wide isomorphism in both the cationic and anionic parts of this compound: $(Th, Ca, Fe) \cdot [(PO_4)(SO_4)(CO_3)] \times nH_2O$. The CHIME method was used to estimate the transformation age of this phase in the Ichetyu occurrence. It turned out to be unexpectedly very young – 52.7 ± 6.1 Ma (Early Paleogene). It is assumed that this is the time of exhumation of the primary bedding of the Ichetyu conglobreccia layer, which became accessible to saline meteoric waters and their interaction with the unstable radioactive phase of the thorium phosphate, which resulted in the complication of its composition.

Keywords: the Middle Timan, Ichetyu, Novo-Bobrovskoe occurrences, the Mezen River, thorium phosphate, chemical composition, properties.

Для цитирования: Макеев А. Б., Макеев Б. А., Борисовский С. Е. Новая минеральная фаза – фосфат тория (Средний Тиман, Республика Коми) // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 87. – С. 110–117. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_87_110-117

Введение. В природе известно более 100 ториевых и торийсодержащих минералов. Во всех них торий присутствует в виде четырехвалентного катиона и имеет координационное число восемь. Торий – типично литофильный элемент. Для него характерно высокое сродство с кислородом, поэтому он встречается исключительно в кислородных соединениях (оксидах, силикатах, фосфатах, карбонатах, фторкарбонатах). В природе не известны сульфиды, селениды и галогениды тория. Отмечается постоянная изоморфная и парагенетическая связь тория с редкоземельными элементами, а также четырехвалентным ураном.

Первое упоминание о тиманском фосфате тория можно найти в монографии [5], где одно его зерно размером 100×200 мкм случайно проанализировано в полированном препарате породы – из метасоматической оторочки вокруг лампрофировой дайки Четласского Камня. На энергодисперсионном микрозонде получен только примитивный состав этого зерна. Химический состав и морфология других зерен фосфата тория изучены с помощью электронного микроскопа JXA-8200 с пятью волновыми спектрометрами.

На Тиманском Кряже встречаются следующие торийсодержащие минералы: монацит, перовскит, самарскит, торианит, торит, ферриторит,

флоренсит [2; 4; 9]. Ранее в пределах Среднего Тимана нами были детально описаны торийсодержащие минералы – монацит (куларит) и флоренсит [4; 7–10].

Минеральный кадастр Среднего Тимана пополняется еще одной минеральной фазой с условным названием «фосфат тория». Эту совсем не редкую фазу мы обнаружили в нескольких проявлениях Среднего Тимана (рис. 1):

- в оторочке лампрофировой дайки р. Косью (гряда Четласский Камень) [1; 2; 5];

- в колумбитовой руде Ново-Бобровского проявления р. Бобровая (Четласский Камень) [11];

- в современном аллювии верховой р. Мезень (Четласский Камень). Новая минеральная фаза фосфат тория встречается не так уж и редко. Расчеты показывают, что ее зерна и агрегаты (размерностью 0,25–0,50 мм), сконцентрированные в тяжелой фракции, составляют первые десятки знаков на десятилитровую пробу аллювия. Здесь р. Мезень размывает по левому борту небольшое редкометалльно-редкоземельное проявление в песчаниках и кварцитопесчаниках визингской свиты (PR_{3U}), которое было вскрыто поисковыми канавами [5]. Морфология, состав и свойства этой фазы приведены на рис. 2, 3 и в табл. 1;

- в конглобрекциевом горизонте полиминерального алмаз-золото-редкометалльно-редкоземельно-титанового проявления Ичетью р. Умба (Вольско-Вымская гряда) [4–10], который залегает на границе среднедевонских кварцевых песчаников пижемской свиты (D_{2PZ}) и древних титаносных песчаников малоручейской толщи PR_{3M} Пижемского месторождения.

Фактический материал. Длительное время мы пытались изучать ториевую фазу как новый минерал, но убедились, что она рентгеноаморфная. Попытки получить картины дифракции обратнорассеянных электронов на двух зернах (мезенском и ичетьюском) в ИГЕМ РАН не увенчались успехом. По причине невозможности установить структуру этой фазы она остается только новой фазой без собственного названия. Цель работы – всестороннее описание морфологии, состава и свойств новой фазы фосфата тория.

Минерал мягкий белого, светло-желтого и коричневатого цветов, мелкозернистый, поликристаллический, размер агрегатов до 0,15–0,50 мм. Химический состав зерна довольно однородный (рис. 2, табл. 1), но неполная сумма и следы «прожига» свидетельствуют о более сложном составе фазы, чем идеальная формула $ThPO_4$. Можно предположить наличие гидроксидных или водных комплексов, которые, впрочем, не нашли отражения в ИК- и КР-спектрах. В качестве включений, заполняющих поровое пространство в полиминеральном агрегате фосфата тория (рис. 2, а), диагностированы глинистый минерал смектит-монтмориллонит, а также сростки с ксенотимом (5–10 мкм) с формулой $(Y_{0,63}Gd_{0,14}Dy_{0,08}Sm_{0,04}Er_{0,03}Eu_{0,02}Yb_{0,02}Tb_{0,02}Th_{0,02})PO_4$.



Рис. 1. Схема размещения четырех мест находок зерен фосфата тория в пределах Среднего Тимана

1 – р. Косью; 2 – Ново-Бобровское проявление; 3 – р. Мезень (Четласский Камень); 4 – проявление Ичетью (Вольско-Вымская гряда)

Изучение характера дисперсии отражения минерала проводилось на микроспектрофотометре МСФ-21. Режимы измерений: щель монохроматора – 0,4 мм; зонд – 0,1 мм. Регистрация автоматическая, замеры через 20 нм и в диапазоне 400–700 нм. Эталон – SiC (Reflexionsstandard 474251, № 545, Германия). В отраженном свете это минерал (в рудной градации) темно-серого цвета, очень слабо анизотропный. Наблюдаются бесцветные по массе внутренние рефлексии; характеризуется низким отражением с $R_{max} = 7,4\%$ с почти нейтральным типом дисперсии (рис. 3), двуотражение не наблюдается (т. к. $\Delta R_{589nm} =$ всего 0,2 %). Твердость VHN (по Виккерсу) при нагрузке – 20 г, число определений 6 (рис. 2, б) варьируется от 107,4 до 169,7 кг/мм²; т. е. среднее значение – 134,2 кг/мм². Твердость по шкале Мооса – 1–2. Следует отметить, что твердость измерена не на монокристалле, а на агрегате. Измерения выполнены Ю. С. Полеховским в Ленинградском государственном университете. Минерал не люминесцирует при возбуждении ультрафиолетом и электронами.

Четвертая находка фосфата тория сделана при изучении минерального состава тяжелой фракции конглобрекции проявления Ичетью [3, 4, 6–12]. Здесь обнаружено два ксеноморфных зерна (рис. 4, табл. 2) размером 250 × 350 мкм в ассоциации с ильменитом, рутилом, ториевым монацитом, торианитом, ильменорутилом,

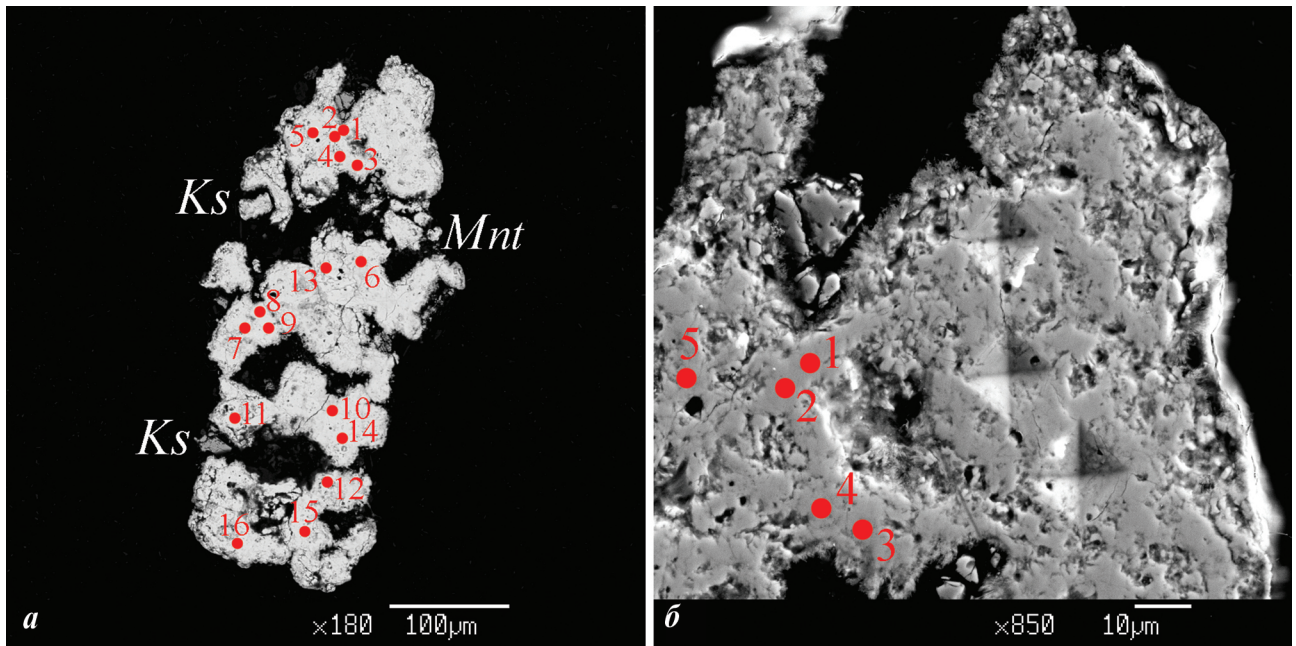


Рис. 2. ЭМ-изображения (*a* – BSE, *б* – SE) агрегата зерен фосфата тория из аллювия верховий р. Мезень
a – отмечены точки анализов, номера которых совпадают с данными в табл. 1, ассоциирующие минералы в примазках: *Mnt* – смектит (монтмориллонит), *Ks* – ксенотим; *б* – отпечатки алмазной пирамидки для измерения твердости на верхней части агрегата

колумбитом, цирконом и другими минералами, типичными для этого полиминерального проявления. Особенностью этой разновидности оказалось то, что она представлена очень неоднородным зернистым агрегатом переменного состава с низкой суммой компонентов 80–87 %, которую можно объяснить дополнительным присутствием карбонатных и водных

комплексов. Это предположение подтверждается спектром ЭДС (рис. 5), в котором присутствуют следы «прожига» (рис. 4, *в*) от электронного зонда. От мезенского типа фосфата тория ичетьюская фаза отличается более сложным составом: наличием переменных количеств кальция, железа, серы. Это дает основание

Таблица 1

Химический состав (мас. %) фазы фосфата тория из современных аллювиальных отложений верховий р. Мезень

Номер анализа	ThO ₂	UO ₂	Dy ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Gd ₂ O ₃	CaO	Сумма
1	70,60	1,41	0,98	0,44	0,10	18,27	0,80	Не обн.	Не обн.	92,62
2	69,12	1,28	0,72	0,45	0,09	17,99	0,80	Не обн.	Не обн.	90,45
3	70,56	1,34	0,63	0,30	0,20	18,49	0,97	Не обн.	Не обн.	92,47
4	70,71	1,35	0,65	0,36	0,11	18,84	0,88	Не обн.	Не обн.	92,91
5	70,94	1,36	0,74	0,40	0,11	19,01	0,88	Не обн.	Не обн.	93,43
6	70,08	1,23	0,67	0,45	0,07	18,61	0,92	Не обн.	Не обн.	92,02
7	69,80	1,32	0,68	0,45	0,13	17,89	0,80	Не обн.	Не обн.	91,06
8	69,77	1,37	0,70	0,41	0,08	18,12	0,95	Не обн.	Не обн.	91,39
9	70,15	1,30	0,68	0,49	0,12	18,20	0,81	Не обн.	Не обн.	91,76
10	70,49	1,23	0,80	0,50	0,13	18,38	0,79	Не обн.	Не обн.	92,33
11	69,52	1,28	0,89	0,46	0,14	18,61	0,81	Не обн.	Не обн.	91,71
12	69,95	1,34	0,71	0,51	0,14	17,88	0,83	Не обн.	Не обн.	91,35
13	70,62	1,35	0,54	0,47	0,11	18,57	0,89	Не обн.	Не обн.	92,55
14	68,73	1,40	0,99	0,43	0,13	18,17	0,86	Не обн.	Не обн.	90,70
15	68,21	1,28	0,65	0,37	0,14	17,49	0,83	0,10	0,44	89,50
16	69,35	1,35	0,55	0,40	0,17	17,69	0,79	0,16	0,45	90,90
Сред.	69,91	1,32	0,72	0,43	0,12	18,26	0,85	–	–	91,70

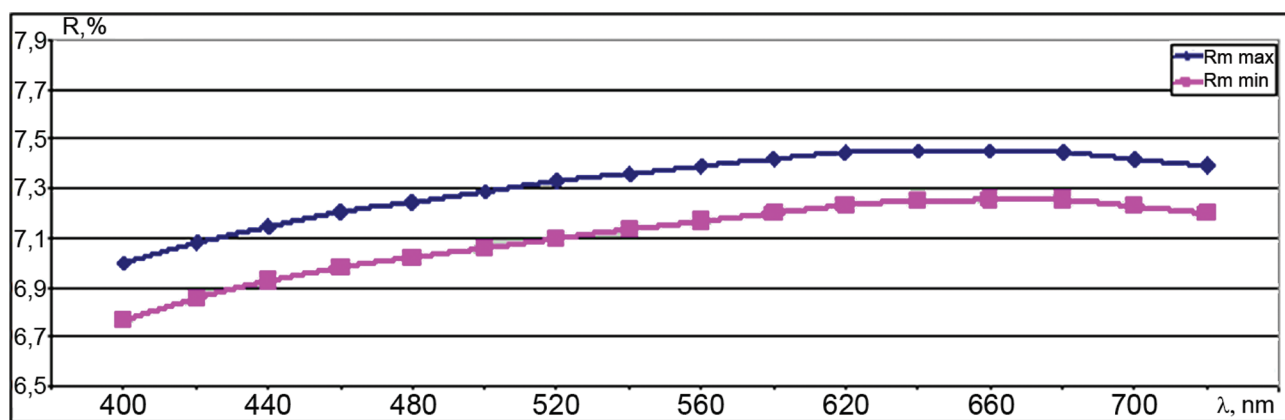


Рис. 3. Дисперсия отражательной способности зерна фосфата тория (р. Мезень)

предполагать, что она представляет собой сульфато-карбонато-фосфат тория, железа и кальция с предполагаемой формулой $(Th, Ca, Fe) \cdot [(PO_4)(SO_4)(CO_3)] \times nH_2O$.

Полный химический анализ двух зерен ичтьюской фазы фосфата тория на содержание тория, урана и свинца (табл. 2) позволил провести оценку возраста этих частиц химическим методом

(СНМЕ) по К. Сузуки [13]. Использованы методические приемы микронзондового анализа, расчета и интерпретации результатов, изложенных в работе [4]. Удалось применить только шесть результатов анализа (табл. 2) с наиболее высокими содержаниями свинца, отвечающих точности анализа (3σ). Результаты расчета возраста оказались весьма неожиданными: средний расчетный

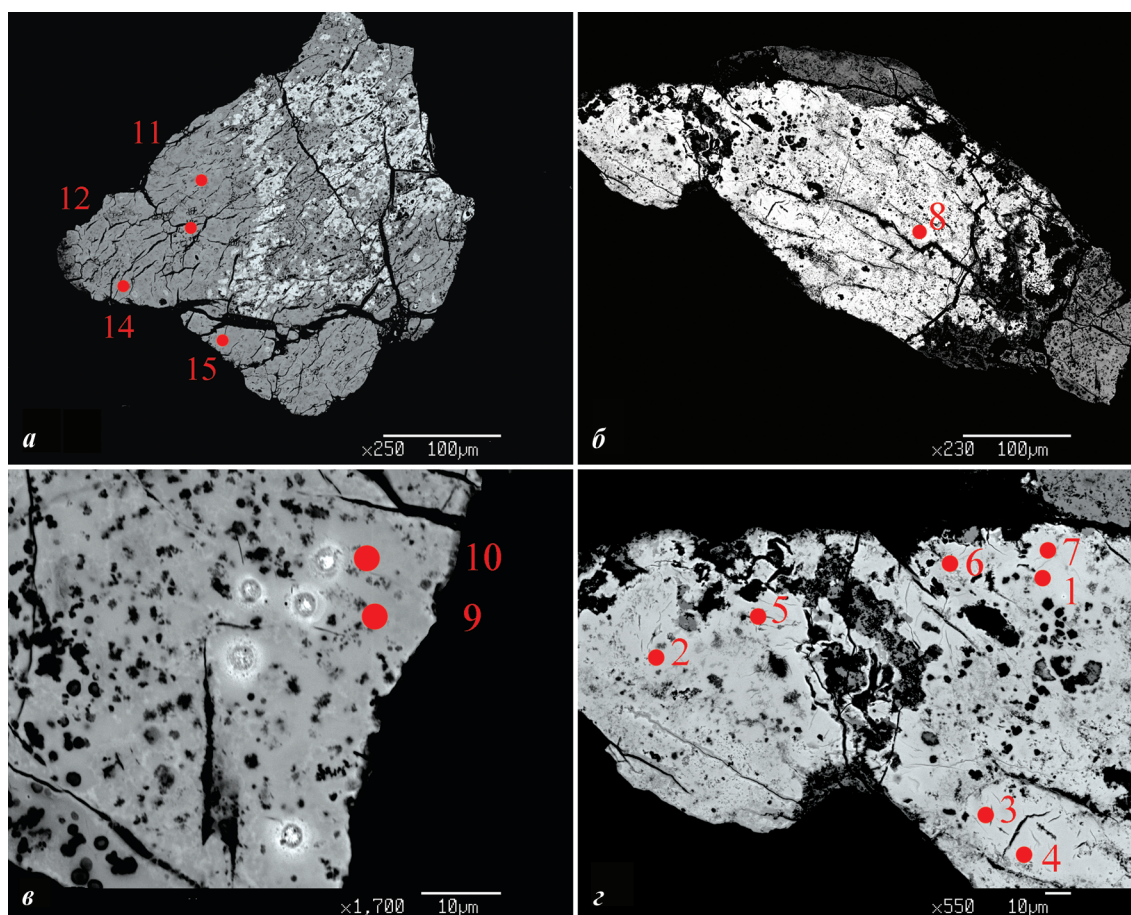


Рис. 4. ЭМ-изображение (BSE) двух зерен фосфата тория из проявления Ичтью

Показаны точки анализов, номера которых совпадают с данными в табл. 2. Светлые точки на изображении в — места «прожига» электронного зонда — свидетельство наличия летучих компонентов в составе изучаемой фазы

Химический состав (мас. %) и возраст (млн лет) фазы фосфата тория из проявления Ичетью

Номер анализа	ThO ₂	Y ₂ O ₃	CaO	PbO	FeO	UO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	Сумма	Возраст	
1	61,31	0,65	1,47	0,125	1,93	0,41	17,03	0,23	0,72	83,87	47,5	
2	64,28	0,66	1,54	0,065	2,75	0,32	16,53	0,43	0,75	87,31		
3	60,77	0,64	0,99	0,058	2,74	0,14	16,78	0,10	0,77	82,99		
4	61,35	0,64	0,85	0,045	2,44	0,08	16,61	0,14	0,81	82,95		
5	60,70	0,68	1,63	0,122	2,43	0,31	16,56	0,44	0,76	83,62		47,1
6	61,41	0,61	1,17	0,084	1,93	0,45	16,65	0,64	0,49	83,42		
7	61,68	0,55	1,86	0,052	2,02	0,51	16,64	0,26	0,71	84,29		
8	61,35	0,63	1,25	0,157	2,70	0,43	17,52	0,13	0,65	84,82		
9	56,98	0,06	1,79	0,049	2,75	0,39	17,69	0,41	0,67	80,79	60,6	
10	57,32	0,06	2,07	0,150	2,36	0,48	17,94	0,69	0,73	81,79		
11	43,70	0,70	8,36	0,041	5,02	0,26	20,08	6,97	0,42	85,54	53,0	
12	44,53	0,60	7,93	0,083	4,77	0,01	19,96	6,89	0,44	85,22		
13	46,32	0,76	8,53	0,108	2,09	0,39	21,02	2,57	0,47	82,25		
14	46,62	0,61	8,24	0,096	3,65	0,19	19,83	5,02	0,46	84,71		

Примечание. Точки анализов 1–8 – светлая зона, 9, 10 – серая неоднородная зона, 11–14 – серая однородная зона на рис. 4. Диаметр зонда 5 мкм. Образец крайне неустойчив под зондом рис. 4, в, что свидетельствует о наличие летучих компонентов, вероятно (CO₃)²⁻, (OH)⁻, H₂O, компенсаторов заряда Th⁴⁺.

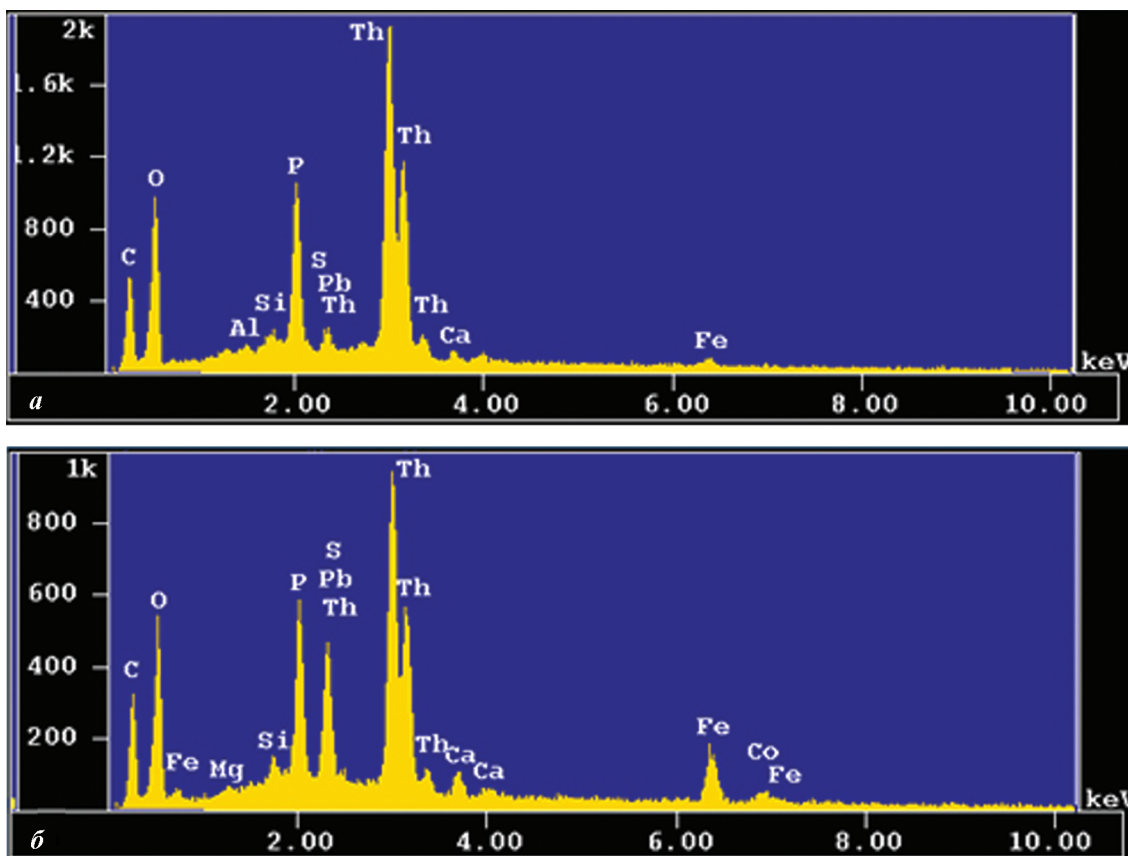


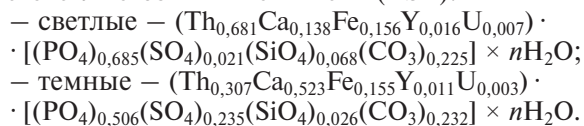
Рис. 5. Спектры ЭДС двух областей зерен фосфата тория

a – светлая зона с высоким содержанием тория (рис. 4, *г*); *б* – темная зона зерен (рис. 4, *в*) с высоким содержанием железа, кальция и серы. В обоих спектрах присутствует углерод комплекса (CO₃)²⁻

возраст очень молодой — $52,7 \pm 6,1$ млн лет (это ранний палеоген E_1).

Обсуждение результатов. При сравнении химического состава новой ториевой фазы из двух областей находок обращает на себя внимание в первую очередь различный набор элементов-примесей. Так, зерно мезенского фосфата тория характеризуется весьма однородным составом, устойчивыми примесями оксидов урана, диспрозия, кремния и скандия с концентрациями около одного массового процента каждый, а также небольшой примесью иттрия (табл. 1). Собственно компонент ThPO_4 в изучаемой фазе составляет около 87–89 %, остальное приходится на уже определенные элементы-примеси около 3,3 % и, вероятно, еще не определенную инструментально воду в количестве до 8 %. Тогда формулу минеральной фазы можно записать $(\text{Th}_{0,930}\text{U}_{0,034}\text{Dy}_{0,014}\text{Sc}_{0,022}) \cdot [(\text{P}_{0,901}\text{Si}_{0,099})\text{O}_4] \times n\text{H}_2\text{O}$.

В двух зернах проявления Ичетью по сравнению с мезенским агрегатом выявлены заметные особенности и отличия химического состава. Они содержат значительно меньше тория (собственно компоненты ThPO_4 67–80 мас. %), но зато присутствует высокое содержание других примесей Ca, Fe, S от 5,4 до 16 мас. %, здесь в 2–3 раза больше иттрия, но в 2–3 раза меньше урана (табл. 2). Оба зерна зональные с нестабильным составом. В BSE-изображениях и ЭДС-спектрах (рис. 4) наблюдаются светлые и темные области, которые контрастно отличаются составом по ЭДС-спектрам (рис. 5): светлые характеризуются более высоким содержанием тория, а в темных очень высоки концентрации оксидов кальция, железа и серы. Черные пятна (рис. 4, в, г) в ичетьюских зернах, судя по ЭДС-спектрам, обладают сложным составом: это водный сульфато-карбонат железа и кальция с очень низким содержанием тория. Имеются переходные зоны и разности с весьма нестабильным составом. Расчет на атомные количества показывает, что в составе фазы существует дефицит анионов, который мы дополнили карбонат-ионом $(\text{CO}_3)^-$. Две контрастные разности ичетьюской ториевой фазы можно представить двумя усредненными формулами: высокоториевые светлые зоны и темные в (BSE):



Конглобрекчиевый горизонт проявления Ичетью залегает в базальной части среднедевонских песчаников пижемской свиты (D_{2pz}) и возраст рентгеноаморфного фосфата тория совершенно не согласуется с оценками возраста по другим минералам-геохронометрам — циркону, рутилу и монациту [6; 8; 12]: так возраст зерен циркона в проявлении Ичетью — 3283–706 [6], рутила — 1980–1000 [12], куларита — 978 ± 31 и монацита — 518 ± 40 млн лет [8], что

свидетельствует о различных источниках поступления рудных минералов в парастерезис. Можно предположить, что рассчитанный возраст фосфата тория (ранний палеоген) — это время эксгумации первичного залегания конглобрекчиевого пласта Ичетью, ставшего доступным для минерализованных метеорных вод и их взаимодействия с неустойчивой радиоактивной фазой фосфата тория. А это привело к усложнению ее состава с обогащением поздней компонентой водным сульфато-карбонатом железа и кальция.

Выводы. В четырех проявлениях Среднего Тимана найдена новая рентгеноаморфная минеральная фаза с условным названием «фосфат тория», которая не может быть утверждена ММА (Международной минералогической ассоциацией) как новый минерал с собственным именем, поскольку не имеет дальнего порядка и собственной структуры. Новая ториевая фаза локализуется в различных обстановках, в разновозрастных породах и типах проявлений от магматических породах лампрофиров неопротерозойского возраста, коренных редкометалльных проявлений, до современных аллювиальных отложений. Составы фаз в разных проявлениях отличаются набором примесей и содержанием основной компоненты ThPO_4 в широких пределах 28–93 мол. %. Необходимо продолжить изучение диагностических признаков фосфата тория для расширения ареала ее находок. С фосфатом тория в проявлении Ичетью ассоциируется другой высокоториевый минерал — торианит $(\text{Th}, \text{U}, \text{Pb})\text{O}_2$, который также может быть потенциальным геохронометром.

1. Макеев А. Б., Андреичев В. Л., Брянчанинова Н. И. Возраст лампрофиров Среднего Тимана: первые Rb–Sr данные // Докл. РАН. — 2009. — Т. 426, № 1. — С. 94–97.
2. Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И. Лампрофиры Тимана // Региональная геология и металлогения. — 2009. — № 37. — С. 51–73.
3. Макеев А. Б., Борисовский С. Е. Типоморфизм и источники титановых и ниобиевых минералов проявления Ичетью, Средний Тиман // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2013. — № 2. — С. 30–37.
4. Макеев А. Б., Борисовский С. Е., Красоткина А. О. Химический состав и возраст монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман) // Георесурсы. — 2020. — Т. 22, № 1. — С. 22–31. DOI: 10.18599/grs.2020.1.22-31
5. Макеев А. Б., Лебедев В. А., Брянчанинова Н. И. Магматиты Среднего Тимана. — Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008. — 348 с.
6. Макеев А. Б., Красоткина А. О., Скублов С. Г. Новые данные о U–Pb возрасте и составе циркона (SHRIMP-II, SIMS) из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. — Сыктывкар: Геопринт, 2017. — № 11. — С. 28–42.
7. Макеев А. Б., Магазина Л. О. Типоморфизм минералов переменного состава проявления Ичетью // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геолог. съезда

Республики Коми. — Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. — Т. 2. — С. 323–325.

8. Makeev A. B. Возраст монацита из полиминерального проявления Ичетью (CHIME и LA-ICP-MS методы) / А. Б. Макеев, С. Г. Скублов, А. О. Красоткина, С. Е. Борисовский, Т. Б. Томсен, С. Х. Серре // Записки РМО. — 2020. — Ч. CXLIX, № 1. — С. 76–95. DOI: 10.31857/S0869605520010086

9. Макеев Б. А. Минеральные ассоциации и индикаторы рудоносности Пижемского титанового и Ичетьюского алмазоносного месторождений Среднего Тимана: диссертация на соискание ученой степени канд. геол.-минерал. наук. — Казань: Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, 2012. — 218 с.

10. Макеев Б. А., Макеев А. Б. Редкоземельные и стронциевые аломофосфаты Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман) // Записки Российского минералогического общества. — № 3. — 2010. — С. 95–102.

11. Макеев Б. А., Макеев А. Б. Колумбит проявления Ичетью и Ново-Бобровского месторождения (Средний Тиман) // Материалы III Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования». — Екатеринбург — Миасс: УрО РАН, 2011. — № 3. — С. 216–217.

12. Скублов С. Г. Первые данные о возрасте (U-Pb метод, TIMS, LA-ICP-MS) рутила из полиминерального рудопроявления Ичетью, Средний Тиман / С. Г. Скублов, А. О. Красоткина, А. Б. Макеев, И. Г. Ризванова, Э. Койман // Записки Горного института. — 2018. — Т. 232. — С. 357–363.

13. Suzuki K., Kato T. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data // *Gondwana Research*. — 2008. — Vol. 14. — Pp. 569–586. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005> (дата обращения: 15.05.2021)

1. Makeev A. B., Bryanchaninova N. I., Andreichev V. L. Age of lamprophyres of the Middle Timan: first Rb-Sr data. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 94–97. (In Russian).

2. Makeev A. B., Bryanchaninova N. I. Lamprophyre Timana [Timan lamps]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2009, no. 37, pp. 51–73. (In Russian).

3. Makeyev A. B., Borisovskiy S. E. Typomorphism and sources of titanium and niobium minerals of Ichet'u, Middle Timan. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 30–37. (In Russian).

4. Makeyev A. B., Borisovskiy S. E., Krasotkina A. O. The chemical composition and age of monazite and kularite from titanium ore of Pizhemskeye and Yarega deposits (Middle and Southern Timan). *Georesources*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 22–31. DOI: 10.18599/grs.2020.1.22-31. (In Russian).

5. Makeev A. B., Lebedev V. A., Bryanchaninova N. I. Magmatity Srednego Timana [Magmatites of the Middle Timan]. *Ekaterinburg*, 2008, 348 p.

6. Makeev A. B., Krasotkina A. O., Skublov S. G. New data on U-Pb-age and geochemistry of zircon (Shrimp-II, SIMS) from Ichetu occurrence (Middle Timan). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*. Syktyvkar: Geoprint, 2017, no. 11, pp. 28–42. (In Russian).

7. Makeev A. B., Magazina L. O. Tipomorfizm mineralov peremennogo sostava proyavleniya Ichet'yu [Typomorphism of minerals of variable composition of the Ichet'yu occurrence]. *Geologiya i mineral'nye resursy Evropeyskogo Severo-Vostoka Rossii: Materialy XVI Geologicheskogo s'ezda Respubliki Komi*. Syktyvkar, 2014, vol. 2, pp. 323–325. (In Russian).

8. Makeev A. B., Skublov S. G., Krasotkina A. O., Borisovskiy S. E., Tomsen T. B., Serre S. Kh. Vozrast monatsita iz polimineral'nogo proyavleniya Ichet'yu (CHIME i LA-ICP-MS metody) [Age of monazite from the Ichet'yu polymineral occurrence (CHIME and LA-ICP-MS methods)]. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2020, pt. CXLIX, no. 1, pp. 76–95. (In Russian). DOI: 10.31857/S0869605520010086

9. Makeev B. A. Mineral'nye assotsiatsii i indikatory rudoznosti Pizhemskeye titanovogo i Ichet'yuskogo almazonosnogo mestorozhdeniy Srednego Timana: Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kand. geol.-mineral. Nauk [Mineral associations and indicators of ore content of the Pizhemskeye titanium and Ichet'yusky diamondiferous deposits of the Middle Timan: Dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences]. Kazan', 2012, 218 p.

10. Makeev B. A., Makeev A. B. Rare earth and strontium aluminophosphates from the Vol-Vym Ridge of the Middle Timan. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2010, no. 3, pp. 95–102. (In Russian).

11. Makeev B. A., Makeev A. B. Kolumbit proyavleniya Ichet'yu i Novo-Bobrovskogo mestorozhdeniya (Sredniy Timan) [Columbite occurrence of Ichet'yu and Novo-Bobrovskoe deposits (Middle Timan)]. *Materialy III Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya»*. Ekaterinburg-Miass, 2011, pp. 216–217. (In Russian).

12. Skublov S. G., Krasotkina A. O., Makeev A. B., Rizvanova I. G., Koyman E. Pervye dannye o vozraste (U-Pb metod, TIMS, LA-ICP-MS) ruтила iz polimineral'nogo rudoproyavleniya Ichet'yu, Sredniy Timan [First data on age (U-Pb method, TIMS, LA-ICP-MS) of rutile from polymineral ore occurrences Ichet'yu, Middle Timan]. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 232, pp. 357–363. (In Russian).

13. Suzuki K., Kato T. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data. *Gondwana Research*, 2008, vol. 14, pp. 569–586, available at: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.005> (accessed 15 May 2021).

Макеев Александр Борисович — доктор геол.-минерал. наук, профессор, вед. науч. сотрудник лаборатории геологии рудных месторождений, ИГЕМ РАН ¹. <abmakeev@igem.ru>

Макеев Борис Александрович — канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник лаборатории минералогии, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН ². <makboris@geo.komi.sc>

Борисовский Сергей Евгеньевич — канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории анализа минерального вещества, ИГЕМ РАН ¹.

Makeev Aleksandr Borisovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Professor, Laboratory of Ore Deposits Geology, IGEM RAN ¹. <abmakeev@igem.ru>

Makeev Boris Aleksandrovich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, FTC Institute of Geology Komi SC UB RAS ². <makboris@geo.komi.sc>

Borisovskiy Sergey Evgen'evich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, Laboratory of the Analysis of Minerals, IGEM RAN ¹.

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017.
Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences. 35 Staromonetnyy per., Moscow, Russia, 119017.

² Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина Федерального исследовательского центра «Кomi научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Первомайская ул., 54, Сыктывкар, Россия, 167982.
Institute of Geology of the Komi National Center of the Ural Branch of the RAS (FTC Institute of Geology Komi SC UB RAS). 54 Pervomayskaya ul., Syktivkar, Russia, 167982.