

## Монациты Большетурупинского проявления (Северный Урал): Th-U-Pb данные

Удоротина О. В.<sup>1</sup>, Вирюс А. А.<sup>2</sup>, Козырева И. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии Коми НЦ УрО РАН им. Н. П. Юшкина, Сыктывкар, [taykey@yandex.ru](mailto:taykey@yandex.ru)

<sup>2</sup> Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, [allavirus@yandex.ru](mailto:allavirus@yandex.ru)

**Аннотация.** Монацит является одним из минералов-концентраторов редкоземельных элементов в комплексных (Be-Ta-Nb-Zr-TR) щелочных метасоматитах Большетурупинского проявления на Северном Урале. Щелочные (альбитовые) метасоматиты развиваются по первично вулканогенно-осадочному субстрату верхнерифей-вендских отложений саблегорской свиты. Монацит (мас. %) цериевый ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ ):  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – до 35, содержания  $\text{La}_2\text{O}_3$  и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  до 13, содержания  $\text{ThO}_2$  до 2. Проведенное Th-U-Pb (CHIME) датирование монацита показало возраст  $384 \pm 95$  млн лет.

**Ключевые слова:** монацит, Th-U-Pb датирование, щелочные метасоматиты, Северный Урал.

## Monazites of the Bolsheturupinsky occurrence (Northern Urals): Th-U-Pb data

Udoratina O. V.<sup>1</sup>, Viryus A. M.<sup>2</sup>, Kozyreva I. V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IG FRC KomiSC, UB RAS, Syktyvkar, [taykey@yandex.ru](mailto:taykey@yandex.ru)

<sup>2</sup> IEM RAS, Chernogolovka, [allavirus@yandex.ru](mailto:allavirus@yandex.ru)

**Abstract.** Monazite is one of the rare earth element concentrating minerals in complex (Be-Ta-Nb-Zr-TR) alkaline metasomatites of the Bolsheturupinsky occurrence in the Northern Urals. Alkaline (albite) metasomatites develop on the primary volcanogenic-sedimentary substrate of the Upper Riphean-Vendian deposits of the Sablegorsk suite. Monazite (wt. %) cerium ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 > \text{La}_2\text{O}_3$ ):  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – up to 35,  $\text{La}_2\text{O}_3$  and  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  contents up to 13,  $\text{ThO}_2$  contents up to 2. The Th-U-Pb (CHIME) dating of monazite showed an age of  $384 \pm 95$  Ma.

**Keywords:** monazite, Th-U-Pb dating, alkaline metasomatites, Northern Urals.

### Введение

Датирование по рудным минералам на сегодняшний день имеет широкое применение при определении времени формирования рудных ассоциаций. Для монацита, наряду с другими минералами-геохронометрами, разработаны различные методики определения возраста. Одной из широко используемых методик является химическое изохронное датирование (chemical Th-U-total Pb isochron method – CHIME), разработанное Сузуки (Suzuki, Kato, 2008). Методом CHIME, основанном на электронно-зондовом рентгеноспектральном определении Th, U и Pb, можно выполнять датирование мелких зерен, отдельных зон неоднородных по составу монацитов непосредственно в шлифах. Метод также является экспрессным и недорогим. В представленной работе методом CHIME было выполнено датирование монацитов Большетурупинского проявления на Северном Урале.

### Краткая характеристика Большетурупинского проявления

Комплексное (Be-Ta-Nb-TR) рудопоявление расположено на восточном склоне Северного Урала в истоках рек Бол. Турупья, Мал. Туяхланья. Структурно район располагается в Центрально-Уральской формационной мегазоне, Ляпинской структурно-формационной зоне, Хобеизско-Маньхамбовской подзоне.

Рудоносные зоны приурочены к надвигу, разделяющему мороинскую ( $\text{RF}_3mr$ ) и саблегорскую ( $\text{RF}_3-V_1sb_2$ ) свиты, вдоль которого образовались узкие тектонические пластины палеозойских пород, представленных хомасьинской ( $\text{O}_{1-2}hm$ ) свитой. Согласно (Геологическая..., 2018) рудоносные породы проявления полностью локализованы в поле саблегорских отложений.

Рудопоявление состоит из трех участков и приурочено к Турупинской кольцевой структуре. Протяженность рудных тел составляет до 1800 м при общем субмеридиональном простира-

нии трех рудных участков на 6 км и ширине до 150 м. Поведение на глубину остается неясным. Щелочно-карбонатные породы слагают линзообразные тела без четких видимых границ, развивающиеся по субстрату первично вулканогенно-осадочных отложений.

Первично-осадочные породы распознаются по присутствию сохранившихся псаммитовых и псаммитоалевритовых структур и окатанных обломков минералов, в том числе с регенерационными каймами.

Прямым свидетельством вулканогенной природы части субстрата является присутствие участков с реликтовыми микрофельзитовой или аплитовой микроструктурами. Наблюдаются линзы первично-осадочных карбонатных пород кальцит-доломитового состава. В породах интенсивно развиты процессы альбитизации, окварцевания, карбонатизации (Никулова, Удоратина, 2008).

Минералы рудного комплекса представлены цирконом, колумбитом (Fe-колумбит и Mn-колумбитом), бастнезитом, монацитом, фенакитом, гентгельвином, эвклазом (Калиновский, Суханов, 1985).

Формационно метасоматические измененные породы рассматриваются в ранге эйситовой формации, фельдшпатитовой (квальмитовой) метасоматической формации, редкоземельно-редкометалльной апогранитовой и щелочных метасоматитов рудной метасоматической формации (Государственная..., 2018).

Нами по данным микрозондовых исследований установлено, что тонкодисперсный рудный комплекс приурочен к маломощным слюдистым прожилкам в слюдисто-карбонат-кварц-альбитовых сланцах. Слюдистые прожилки насыщены тонкими нитеподобными выделениями циркона и изометричной либо неправильной формы зернами колумбита. Наблюдаются участки, обогащенные бастнезитом и монацитом.

Химический состав пород рудных зон показывает обогащение всех пород, как первично осадочных, так и первично вулканогенных  $\text{Na}_2\text{O}$  (до 10 мас. %). С увеличением содержаний  $\text{Na}_2\text{O}$  в породе коррелируют рудные элементы Be, Nb, Ta, Y, Th, REE (LREE>HREE).

Проба 613-6 – альбитовый сланец ( $\text{Ab}>50$ ) по первично вулканогенной кислой породе. Порода тонкозернистая, сланцеватая, микроструктуры гранолепидобластовые, на отдельных участках наблюдаются микропйкилитовые (рис. 1 а). Минеральный состав (об., %): альбит  $\text{An}_5$  (65), кварц (до 20), калиевый полевой шпат (~ 8), эпидот, серицит, хлорит (в сумме до 5), ед. пироксен (эгирин), рудный магнетит. Рудные акцессорные минералы представлены цирконом, монацитом, Fe-колумбитом.

Содержание (мас. %, табл. 1) кремнезема составляет 64, глинозема 19, суммы щелочей ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 10.75, при преобладании  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 8.9$ ). Характерно высокое содержание РЗЭ (408 г/т), преобладание легких РЗЭ над тяжелыми  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.2$ , хорошо выражен небольшой Eu-минимум ( $\text{Eu}_N/\text{Eu}^*_N = 0.1$ ). Характерны высокие содержания (г/т) Y(110), Nb(510), Zr(2130), Ta(104).

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и содержание (г/т) редких и редкоземельных элементов в исследуемой пробе 613-6

Table 1. Chemical composition (wt. %) and content (g/t) of rare and rare earth elements in the test sample

| $\text{SiO}_2$              | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                    | FeO                                      | MnO    | MgO    | CaO     | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$      |
|-----------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|--------|--------|---------|-----------------------|---------------------------|
| 64.44                       | 0.22           | 19.02                   | 2.17                                       | 0.61                                     | 0.12   | 0.33   | 0.33    | 9.66                  | 1.09                      |
| $\text{P}_2\text{O}_5$      | ППП            | $\Sigma$                | $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ | $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ | La     | Ce     | Pr      | Nd                    | Sm                        |
| 0.064                       | 1.59           | 99.65                   | 10.75                                      | 8.90                                     | 116.7  | 196.00 | 20.30   | 75.30                 | 18.50                     |
| Eu                          | Gd             | Tb                      | Dy                                         | Ho                                       | Er     | Tm     | Yb      | Lu                    | $(\text{La}/\text{Yb})_N$ |
| 0.72                        | 24.90          | 4.01                    | 25.30                                      | 5.77                                     | 16.7   | 2.59   | 15.20   | 2.57                  | 5.18                      |
| $\text{Eu}_N/\text{Eu}^*_N$ | Ba             | Sc                      | Cr                                         | Co                                       | Zn     | Se     | As      | Sb                    | Th                        |
| 0.1                         | 1330.0         | 7.42                    | 21.80                                      | 7.95                                     | 420.00 | 0.86   | 6.38    | 1.80                  | 223.90                    |
| U                           | Br             | Hf                      | Ta                                         | Au                                       | Be     | Nb     | Zr      | Y                     | Rb                        |
| 33.80                       | 0.48           | 75.20                   | 103.8                                      | 0.024                                    | 25.00  | 510.00 | 2130.00 | 110.00                | 180.00                    |



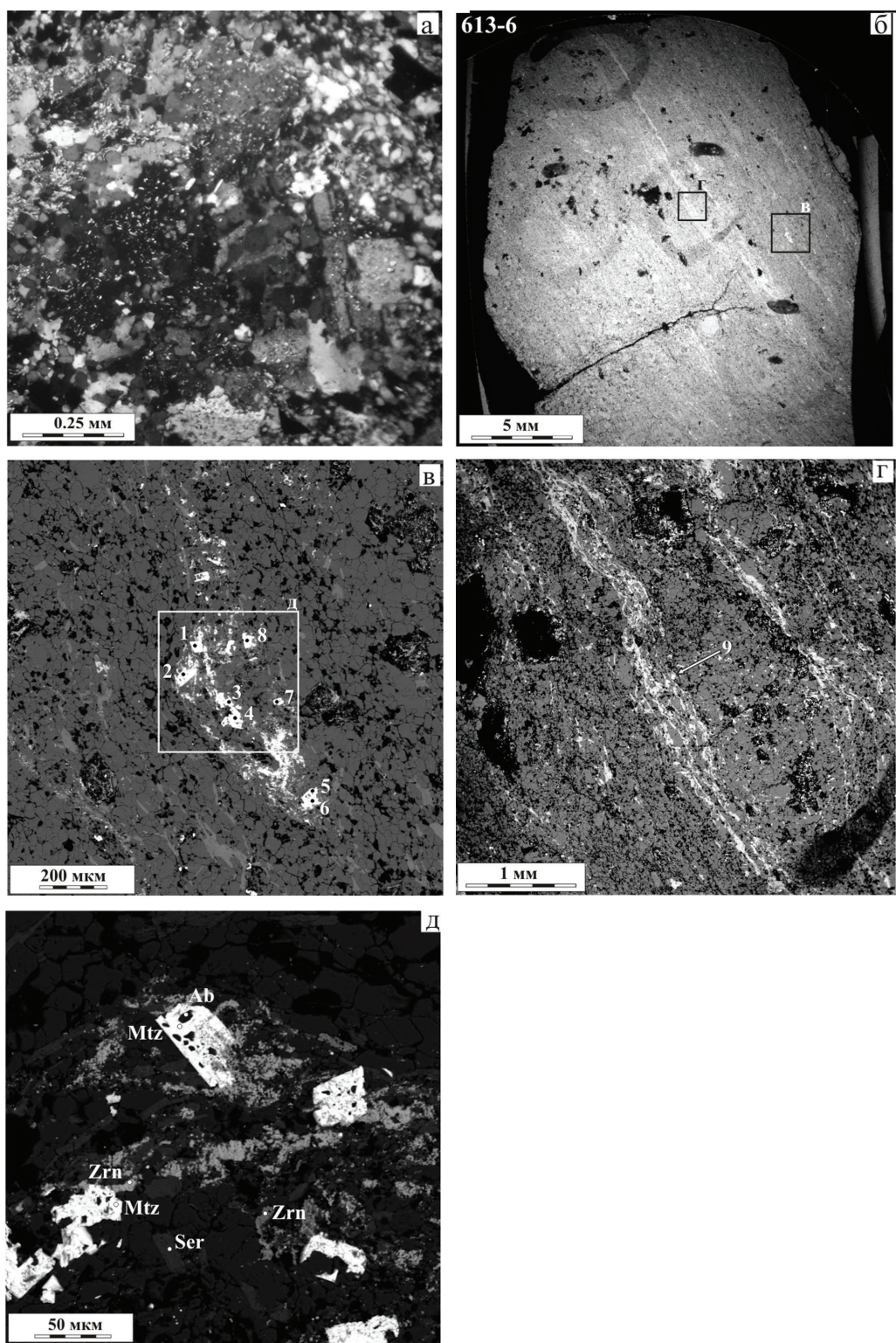


Рис. 1. Общий вид (а) микроструктуры альбитового сланца и рудных ассоциаций с монацитом (б–д), шлиф 613-6: а – фрагмент альбитового сланца с новообразованным альбитом (никили скрещены); б–д – изображения в обратно рассеянных электронах; д – более детальный фрагмент хорошо окристаллизованных кристаллов монацита. Номера точек соответствуют номерам в табл. 3.

Mtz – монацит, Zrn – циркон, Ab – альбит, Ser – серицит

Fig. 1. General view (a) of the microstructure of albite schist and ore associations with monazite (b–d), section 613-6: a – fragment of albite schist with newly formed albite (nickols crossed); б–д – images in backscattered electrons; д – a more detailed fragment of well-crystallized monazite crystals. The point numbers correspond to the numbers in tabl. 3. Mtz – monazite, Zrn – zircon, Ab – albite, Ser – sericite

## Методы исследования

Монациты, развитые в кварц-полевошпатовой породе с видимыми рудными прожилками, исследовались в шлифах на эпоксидной основе. Определение химического состава монацита и содержаний в нем Th, U, Pb выполняли методом электронно-зондового рентгеноспектрального анализа (ЭЗРСА) на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega II XMU с энергодисперсионным (ЭДС) (INCAx-sight) и волновым (ВДС) (INCA wave 700) рентгеновскими спектрометрами (ИЭМ РАН, г. Черноголовка) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 200 нА. Угол отбора рентгеновского излучения составлял 35°, размер зонда 3 мкм, время записи энергодисперсионного рентгеновского спектра – 70 с. Основные элементы, входящие в состав монацитов, определяли с помощью ЭДС. В качестве эталонов для количественного определения следующих элементов использовали: Si – SiO<sub>2</sub>, Ca – волластонит, La – LaPO<sub>4</sub>, Ce и P – CePO<sub>4</sub>, Pr – PrPO<sub>4</sub>, Nd – NdPO<sub>4</sub>, Sm – SmPO<sub>4</sub>.

Содержания Th, U и Pb определяли с помощью ВДС, используя кристалл-анализатор PET. В качестве аналитических линий были выбраны для Th – ThMα<sub>1,2</sub>, для U – UMα<sub>1,2</sub>, для Pb – PbMβ<sub>1,2</sub>. Фон измеряли симметрично с двух сторон от аналитических линий. Положение аналитических линий и фона представлено в табл. 2. Время набора интенсивности на аналитической линии ThMα<sub>1,2</sub> составляло 50 с, фон – по 25 с, на линии UMα<sub>1,2</sub> – 200 с, фон – по 100 с, на линии PbMβ<sub>1,2</sub> – 100 с, фон – по 50 с. В качестве стандартов для определения содержания Th использовали ThO<sub>2</sub>, для определения содержания U – UO<sub>2</sub>, для определения содержания Pb – PbTe. Пределы обнаружения по 2σ-критерию составляли для Th – 0.020 мас. %, для U – 0.009 мас. %, для Pb – 0.010 мас. %.

Таблица 2. Положение аналитических линий Th, U и Pb и фона  
 Table 2. Position of analytical lines of Th, U and Pb and background

| Определяемый элемент | Аналитическая линия | Длина волны, А | Фон слева, А | Фон справа, А |
|----------------------|---------------------|----------------|--------------|---------------|
| Th                   | ThMα                | 4.136          | 3.640        | 4.650         |
| U                    | UMα                 | 3.717          | 3.634        | 3.846         |
| Pb                   | PbMβ                | 5.076          | 4.837        | 5.430         |

Для определения возраста было выбрано несколько монацитов размером 50–100 мкм (рис. 1). В табл. 3 и рис. 2 представлены составы исследованных монацитов, возраста, рассчитанные методом СИМЕ в каждой точке, и возраст, рассчитанный по изохроне. На рис. 3, представлена изохрона, построенная на основе корреляции содержаний Pb (PbO, мас. %) и Th совместно с U (ThO<sub>2</sub>\*, мас. %), полученных в каждой точке анализа.

## Результаты исследований

Монацит, как правило, распределен в породе совместно с другими рудными минералами. При этом наблюдаемые скопления образуют протяженные насыщенные прожилки параллельно расщеплению пород, реже наблюдаются секущие сланцеватость прожилки. Мощность (и насыщенность прожилок рудными минералами) может различаться. Мощность варьирует от первых мкм до 200–300 мкм, насыщенность, плотность до 80 об. % (рис. 1 б). Монацит образует кристаллы, насыщенные пойкилитовыми включениями альбита (рис. 1 в–д), что указывает на его совместный или более поздний рост. Размеры кристаллов 20–50–60 мкм. Наблюдаются также зерна неправильной формы, насыщающие рудные прожилки.

По своему химическому составу (табл. 3, рис. 2) монацит (мас. %) является цериевым (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 35, отмечают содержания La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 13 и Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 13, содержания ThO<sub>2</sub> находятся на уровне 1.7. Содержания РЗЭ(Ce+La+Nd+Pr+Sm) в монаците составляют 45–69 мас. %.

Значения измеренных точечных Th-U-Pb возрастов монацитов лежат в интервале 711.6–249.6 млн лет с усредненной погрешностью определения по 2σ-критерию ± 135 млн лет. Высокие погрешности определения точечного возраста монацитов методом СИМЕ связаны с очень низкими содержания PbO (0.01–0.03 мас. %) и UO<sub>2</sub> (часто менее 0.01 мас. %). То есть содержания этих элементов находятся на уровне пределов обнаружения, поэтому погрешность их количествен-

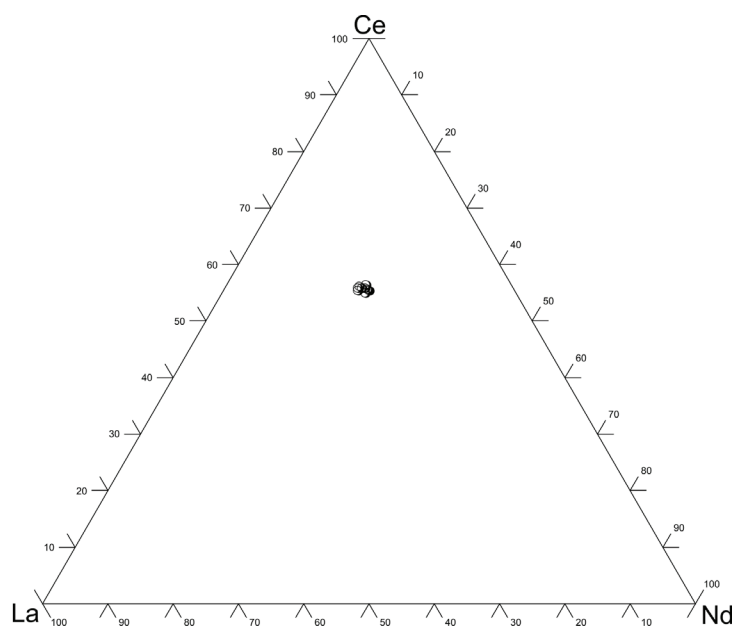


Рис. 2. Состав исследуемых монацитов на диаграмме La-Ce-Nd  
Fig. 2. The composition of monazites on the La-Ce-Nd

ного определения высокая, что соответственно увеличивает погрешность определения возраста.

Широкий интервал точечных возрастов, скорее всего, связан с неоднородностью состава монацитов по содержаниям  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  и  $\text{PbO}$ . Средневзвешенная величина точечного Th-U-Pb возраста монацитов, рассчитанная в программе Isoplot по 8 точкам, составила  $399 \pm 100$  млн лет. Возраст монацитов, полученный по изохроне  $\text{ThO}_2^*-\text{PbO}$ , равен  $384 \pm 95$  млн лет.

Возраст вулканогенно-осадочных образований, картируемых в составе саблгорской свиты на водоразделе Бол. Турупы и Мал Туяхланья, принимается как позднерифейский–ранневендский на основании датировки, полученной U-Pb SIMS методом по цирконам из риолитов, в 635.9 млн лет (Государственная..., 2018).

Таблица 3. Результаты исследований монацитов  
Table 3. The results of studies monazite

| № | $\text{ThO}_2^*$ | $\text{PbO}$ | Возраст, млн лет | Формулы монацитов                                                                                                                                                                                                        |
|---|------------------|--------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 1.56             | 0.03         | 451.0            | $(\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.20}\text{Nd}_{0.17}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.03}\text{Th}_{0.01}\text{Pb}_{0.0002}\text{U}_{0.0002})_{0.96} \times (\text{P}_{0.92}\text{Si}_{0.12})_{1.04}\text{O}_4$ |
| 2 | 2.13             | 0.04         | 441.0            | $(\text{Ce}_{0.42}\text{La}_{0.17}\text{Nd}_{0.15}\text{Pr}_{0.04}\text{Ca}_{0.03}\text{Sm}_{0.02}\text{Th}_{0.02}\text{U}_{0.01}\text{Pb}_{0.001})_{0.86} \times (\text{P}_{0.82}\text{Si}_{0.31})_{1.13}\text{O}_4$    |
| 3 | 0.59             | 0.01         | 391.6            | $(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.22}\text{Nd}_{0.18}\text{Th}_{0.01}\text{Pr}_{0.04}\text{Sm}_{0.02}\text{Ca}_{0.01})_{1.04} \times (\text{P}_{0.99}\text{Si}_{0.02})_{1.01}\text{O}_4$                                    |
| 5 | 0.40             | 0.01         | 574.4            | $(\text{Ce}_{0.50}\text{La}_{0.21}\text{Nd}_{0.19}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.004})_{1.00} \times (\text{P}_{0.97}\text{Si}_{0.02})_{0.99}\text{O}_4$                                   |
| 6 | 1.28             | 0.03         | 546.0            | $(\text{Ce}_{0.46}\text{La}_{0.19}\text{Nd}_{0.17}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.01}\text{U}_{0.001}\text{Pb}_{0.0003})_{0.93} \times (\text{P}_{0.89}\text{Si}_{0.18})_{1.07}\text{O}_4$  |
| 8 | 1.20             | 0.03         | 583.2            | $(\text{Ce}_{0.47}\text{La}_{0.19}\text{Nd}_{0.18}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.01}\text{Pb}_{0.0002})_{0.95} \times (\text{P}_{0.98}\text{Si}_{0.06})_{1.04}\text{O}_4$                  |
| 4 | 1.65             | 0.02         | 284.0            | $(\text{Ce}_{0.45}\text{La}_{0.18}\text{Nd}_{0.16}\text{Pr}_{0.04}\text{Ca}_{0.03}\text{Sm}_{0.03}\text{Th}_{0.01})_{0.90} \times (\text{P}_{0.91}\text{Si}_{0.17})_{1.08}\text{O}_4$                                    |
| 7 | 0.93             | 0.01         | 249.6            | $(\text{Ce}_{0.48}\text{La}_{0.20}\text{Nd}_{0.18}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.01})_{0.97} \times (\text{P}_{0.93}\text{Si}_{0.09})_{1.02}\text{O}_4$                                    |
| 9 | 0.98             | 0.03         | 711.6            | $(\text{Ce}_{0.48}\text{La}_{0.20}\text{Nd}_{0.18}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.02}\text{Th}_{0.01}\text{Pb}_{0.0002})_{0.97} \times (\text{P}_{0.98}\text{Si}_{0.05})_{1.03}\text{O}_4$                  |
|   |                  |              |                  | <b><math>384 \pm 95</math> млн лет</b>                                                                                                                                                                                   |

Примечание.  $\text{ThO}_2^*$  – пересчитанный  $\text{ThO}_2$  с учетом содержания урана ( $\text{UO}_2$ ).

Возраст щелочно-карбонатных образований (альбитовых метасоматитов), с которым связан рудный комплекс минералов, соответствует раннекаменноугольному, согласно K-Ar изохроне по мусковиту в 330–320 млн лет (Государственная..., 2018).

Проведенные нами ранее определения возраста рудовмещающей слюды (фенгит, обр. 613-6) Ar-Ar методом показали  $332 \pm 2$  млн лет и также указывают на раннекаменноугольный возраст формирования (Удортатина и др., 2013). Полученные данные по U-Th-Pb датированию монацита из этой же пробы близки к этой цифре.



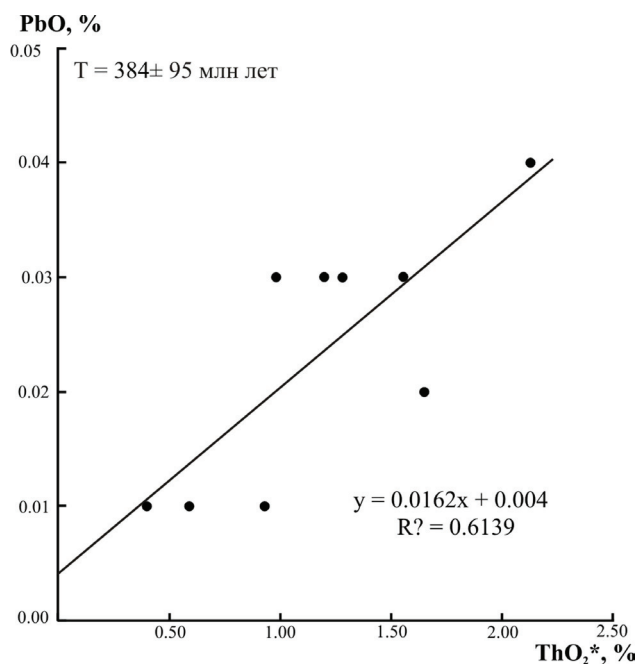


Рис. 3. Геохронологические данные по монацитам, ThO<sub>2</sub>\*-PbO изохрона

Fig. 3. Geochronological data on monazites, ThO<sub>2</sub>\*-PbO isochronous

### Благодарности

Исследования проводятся по теме НИР «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» 122040600012-2

### Литература

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000 (издание второе). Серия Северо-Уральская. Лист Р-40-VI (г. Тельпос-Из). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2018. 216 с.
2. Калиновский А. В., Суханов Н. В. Щелочно-карбонатные редкометалльные метасоматиты на севере Урала // Рудоносные, рудные и нерудные формации Урала: Информ. мат.-лы. Свердловск. 1985. С. 90–91.
3. Никулова Н. Ю., Удоратина О. В. Альбитовые метасоматиты в ордовикской толще севера Урала // Доклады АН. 2008. Т. 420, № 2. С. 203–207.
4. Удоратина О. В., Травин А. В., Вирюс А. А. Редкоземельно-редкометалльные руды (Б. Турупья, Северный Урал): время формирования // Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений: Матер. Всерос. конф. (с межд. уч-ем), посвящ. 100-летию со дня рождения академика Н. А. Шило (1913–2008). М. Изд-во: ФГБУН ИГЕМ РАН. 2013. С. 171.
5. 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. V. 14. P. 569–586.