

Химический состав и возраст монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман)

А.Б. Макеев^{1*}, С.Е. Борисовский¹, А.О. Красоткина²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

Проведено исследование типоморфных особенностей и возраста монацита двух гигантских титановых месторождений Тимана – Пижемского и Ярегского, которое позволило установить отличия в морфологии, в видовом составе включений, размерах зерен, распространении химических разновидностей минерала, связанное с условиями его кристаллизации и разными источниками вещества. Рассчитан изохронный Th-Pb возраст монацита по методу CHIME. Для ярегского монацита построены три изохроны с возрастом 1301, 1105 и 778 млн лет; для пижемского монацита-куларита одна изохрона с возрастом 782 млн лет. Источником высокотермического монацита Ярегского месторождения могли быть древние гранитные батолиты, а происхождение низкотермического ярегского монацита и Nd-Ce-монацит-куларита Пижемского месторождения с возрастом ~ 780 млн лет могло быть связано с гидротермальным преобразованием кор выветривания по лампрофирам, близким по возрасту с лампрофирами (спессартитами и керсантитами) Четласского Камня.

Ключевые слова: Пижемское и Ярегское титановые месторождения, Тиман, монацит, куларит, химический состав, возраст

Для цитирования: Макеев А.Б., Борисовский С.Е., Красоткина А.О. (2020). Химический состав и возраст монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман). *Георесурсы*, 22(1), с. 22-31. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.22-31>

Монацит – фосфат легких редкоземельных элементов цериевой группы. Он редкий, но очень информативный минерал переменного состава в титановых месторождениях и проявлениях Тимана. Типоморфные особенности этого минерала позволяют решать сложные вопросы генезиса, возраста и источников вещества титановых месторождений (Макеев, 2016; Макеев, Дудар, 2001; Макеев и др., 2008; Скублов и др., 2018). Объектом настоящих исследований является монацит двух гигантских титановых месторождений России – Пижемского и Ярегского, с близким геологическим строением и, возможно, генезисом, отличающихся от других титановых месторождений нестандартным фазово-минеральным составом титановых руд: ильменит-псевдуртил-лейкоксен-кварцевым и сидерит-лейкоксен-кварцевым. Нестандартный фазовый состав титановых руд (Игнатъев, Бурцев, 1997; Калужный, 1982; Макеев, 2016; Макеев, Дудар, 2001) этих месторождений потребует применения предварительной химической стадии обескремнивания лейкоксена и псевдуртила, что позволит решить вопрос получения товарных продуктов (искусственного пористого рутила и др.) и вовлечения этих крайне важных и для России месторождений в промышленную разработку. Монацит относится к принципиально извлекаемой полезной компоненте титаноносных песчаников (так как находится в рудах в виде свободных зерен), что, несомненно, повысит

экономические показатели окупаемости и себестоимости промышленной переработки этих месторождений.

Цель настоящего исследования – установление особенностей химического состава зерен монацита Ярегского и Пижемского месторождений и расчет времени их образования методом CHIME – chemical Th-U-total Pb isochron method (химический изохронный метод), предложенным К. Сузуки (Suzuki, Adachi, 1991; Suzuki, Kato, 2008).

Методика анализа зерен монацита. Анализ монацита проведен в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН) на волновом микроанализаторе JXA-8200. Выполнено 59 анализов состава зерен монацита из двух технологических проб на 15 компонентов: матрицы (P₂O₅, La₂O₃, Ce₂O₃, Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, Y₂O₃, ThO₂) и микрокомпонентов (CaO, SiO₂, UO₂, PbO, FeO, MnO, SO₃). Для ThO₂, UO₂, PbO подобраны особые условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 150 нА, кристалл-анализатор PET (табл. 1). Расчет возраста производился по результатам электронно-зондового рентгеноспектрального определения ThO₂, UO₂, PbO методом CHIME. Позитивный опыт работы по этой методике содержится в (Вотяков и др., 2011; Макеев, Вирус, 2013; Пилюгин, Муханова, 2008; Попова и др., 2010; Williams и др., 2007 и многих других).

Вычисления расчетного содержания ThO₂* для построения изохроны производились по формуле:

$$\omega(\text{ThO}_2^*) = \omega(\text{ThO}_2) + \omega(\text{UO}_2) \cdot M(\text{ThO}_2) / M(\text{UO}_2) \cdot \{[(e^{\lambda^{232\text{T}}t} + 137.88 \cdot e^{\lambda^{238\text{T}}t}) / 138.88] - 1\} / (e^{\lambda^{232\text{T}}t} - 1),$$

где $\omega(\text{ThO}_2)$ и $\omega(\text{UO}_2)$ – массовая доля оксида тория (IV) и оксида урана (IV) в монаците; $M(\text{ThO}_2)$ и

* Ответственный автор: Александр Борисович Макеев
E-mail: abmakeev@igem.ru

| Элемент состава | Аналитическая линия | Кристалл анализатор | Экспозиция Линия/фон, с | Стандарт | Предел обнаружения 3 σ (ppm) |
|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|
| Th | ThM α | PETJ | 50/25 | ThO ₂ | 210 |
| U | UM β | PETH | 100/50 | UO ₂ | 150 |
| Pb | PbM α | PETH | 150/75 | PbCrO ₄ | 120 |
| La | LaL α | PETJ | 10/5 | LaPO ₄ | 900 |
| Ce | CeL α | PETJ | 10/5 | CePO ₄ | 950 |
| Pr | PrL β | LiF | 60/30 | PrPO ₄ | 725 |
| Nd | NdL α | LiF | 50/25 | NdPO ₄ | 500 |
| Sm | SmL β | LiF | 60/30 | SmPO ₄ | 600 |
| Y | YL α | TAP | 30/15 | YPO ₄ | 200 |
| P | PK α | TAP | 10/5 | Апатит | 270 |
| Ca | CaK α | PETH | 10/5 | CaAl ₂ Si ₂ O ₈ | 120 |
| Si | SiK α | TAP | 10/5 | NaFeSi ₂ O ₆ | 200 |
| Fe | FeK α | LiF | 10/5 | NaFeSi ₂ O ₆ | 400 |
| Mn | MnK α | LiF | 10/5 | Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃ | 400 |
| S | SK α | PETH | 10/5 | BaSO ₄ | 180 |

Табл. 1. Условия анализа для определяемых элементов состава монацита. Анализ монацита проведен в ИГЕМ РАН на волновом микроанализаторе JXA-8200 с пятью рентгеновскими спектрометрами, напряжение 20 кВ, ток 150 мА, диаметр зонда 5 мкм.

$M(\text{UO}_2)$ – молярные массы оксида тория (IV) и оксида урана (IV); λ_{232} , λ_{238} – константы распада для изотопов тория и урана, соответственно; t – время, в течение которого протекал распад.

Расчет возраста:

$$T = \{ \ln(m \cdot [M(\text{ThO}_2)/M(\text{PbO})] + 1) \} / \lambda_{232}$$

где m – наклон изохроны.

Результаты анализов состава монацита и расчета возраста представлены в табл. 2, 3. Не во всех проанализированных зернах из-за низкого содержания были определены U и Pb, поэтому для расчета возраста и построения изохрон использовано меньшее число анализов монацита – 52 из 59.

Фактический материал

Ярегский монацит. Зерна и обломки кристаллов ярегского монацита извлечены из ультра тяжелой фракции крупно объёмной (несколько тонн) технологической пробы. Они имеют малые размеры 84×49 – 110×80, среднее – 93×63 мкм, изометричную или слабо-вытянутую неправильную форму с совершенной спайностью; внутри зёрен кроме редких включений кварца других фаз не обнаружено (рис. 1). Концентрируется ярегский монацит в мелкую (< 0.125 мкм) немагнитную лейкоксеновую фракцию вместе с цирконом и рутилом. Особенности химического состава монацита представлены в табл. 2. В ярегском монаците распространены три химические разновидности: неодим-цериевая, лантан-торий-цериевая, лантан-цериевая, последняя из них наиболее часто встречается (более 60 % случаев). Наблюдается высокая положительная корреляция между церием, лантаном, торием, иттрием и кальцием с одной стороны и неодимом, празеодимом, самарием, европием и гадолинием с другой стороны (Макеев, Магазина, 2019). В химическом составе ярегского высокоторийевого монацита нарушено правило тетрад как в первой (La-Ce-Pr-Nd), так во и второй (Sm-Eu-Gd-Tb) тетрадах из-за цериевой отрицательной аномалии, связанной с изоморфным замещением $\text{Th} + \text{Y} + \text{Ca} \rightarrow \text{Ce}$ и отрицательной Eu-аномалией во второй тетраде.

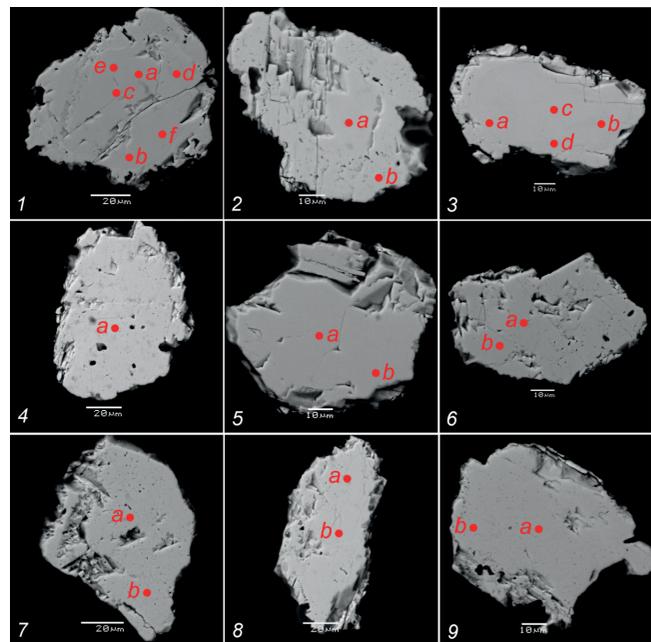


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения (режим обратно-рассеянных электронов BSE – backscattered electrons) девяти зерен ярегского монацита. Зерна Ce-La-Th-монацита (1-3) – зональные, в ядрах тория больше, чем по краям. Точками указаны места микрозондовых анализов, обозначение которых совпадает с номерами в табл. 2

Типохимические особенности ярегского высокоторийевого монацита с характерной Eu-аномалией типичны для монацита, генетически связанного с гранитоидами (Скублов и др., 2018; Schandl, Gorton, 2004; Williams и др., 2007).

Пижемский монацит-куларит. Зерна пижемского монацита извлечены из магнитного ильменит-псевдорутилового концентрата сероцветных песчаников технологической пробы (весом 250 кг). Они имеют значительно большие размеры (521×446 ÷ 228×130, среднее – 375×278 мкм), чем зерна и обломки кристаллов ярегского; часто они амебовидной, округлой или эллипсоидной формы, имеют серую и коричневую окраску. Индивиды переполнены включениями (рис. 2) кварца

| No | P ₂ O ₅ | La ₂ O ₃ | Ce ₂ O ₃ | Pr ₂ O ₃ | Nd ₂ O ₃ | Sm ₂ O ₃ | Y ₂ O ₃ | UO ₂ | ThO ₂ | PbO | CaO | SiO ₂ | FeO | MnO | SO ₃ | Сумма | ThO ₂ * | Возраст |
|-----|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------|------|------------------|------|------|-----------------|-------|--------------------|---------|
| 1 a | 30.84 | 12.11 | 25.84 | 2.99 | 11.75 | 2.05 | 2.68 | 0.305 | 6.496 | 0.353 | 1.52 | 0.16 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 97.13 | 7.553 | 1071.6 |
| 1 b | 30.88 | 12.53 | 26.65 | 3.09 | 12.09 | 2.10 | 2.29 | 0.367 | 5.593 | 0.333 | 1.33 | 0.13 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 97.39 | 6.870 | 1111.6 |
| 1 c | 31.25 | 12.12 | 25.68 | 2.97 | 11.63 | 2.11 | 2.80 | 0.425 | 6.422 | 0.384 | 1.60 | 0.15 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 97.61 | 7.901 | 1112.4 |
| 1 d | 31.51 | 13.02 | 26.40 | 3.05 | 11.42 | 1.98 | 2.79 | 0.430 | 4.760 | 0.282 | 1.27 | 0.10 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 97.05 | 6.247 | 1047.6 |
| 1 e | 31.20 | 12.06 | 25.74 | 3.00 | 11.74 | 2.06 | 2.82 | 0.357 | 6.299 | 0.369 | 1.47 | 0.17 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 97.31 | 7.544 | 1134.0 |
| 1 f | 31.44 | 12.28 | 25.53 | 2.98 | 11.68 | 2.08 | 2.47 | 0.360 | 6.792 | 0.406 | 1.56 | 0.21 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 97.83 | 8.051 | 1166.8 |
| 2 a | 31.27 | 13.01 | 26.67 | 3.23 | 12.36 | 2.23 | 2.57 | 0.305 | 4.078 | 0.266 | 0.98 | 0.14 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 97.15 | 5.147 | 1194.8 |
| 2 b | 31.52 | 22.17 | 31.84 | 2.58 | 7.87 | 0.69 | 0.31 | 0.059 | 1.375 | 0.053 | 0.24 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 98.80 | 1.575 | 783.6 |
| 3 a | 30.99 | 14.45 | 28.70 | 3.07 | 11.34 | 1.80 | 1.71 | 0.202 | 4.459 | 0.293 | 0.96 | 0.28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 98.27 | 5.174 | 1294.0 |
| 3 b | 31.10 | 13.82 | 28.20 | 3.09 | 11.57 | 1.95 | 1.82 | 0.216 | 4.937 | 0.325 | 0.96 | 0.34 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 98.34 | 5.701 | 1290.8 |
| 3 c | 31.18 | 13.61 | 28.06 | 3.13 | 11.72 | 1.96 | 1.82 | 0.209 | 5.096 | 0.340 | 0.99 | 0.33 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 98.45 | 5.839 | 1341.2 |
| 3 d | 31.16 | 13.79 | 28.09 | 3.02 | 11.68 | 1.91 | 1.80 | 0.217 | 5.028 | 0.324 | 1.00 | 0.35 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 98.39 | 5.796 | 1289.6 |
| 4 a | 31.07 | 8.11 | 28.79 | 4.43 | 19.33 | 3.61 | 0.69 | 0.168 | 0.369 | 0.029 | 0.19 | 0.11 | 0.00 | 0.06 | 0.02 | 96.98 | 0.934 | 721.4 |
| 5 a | 31.20 | 15.91 | 31.47 | 3.46 | 13.30 | 2.37 | 0.35 | 0.000 | 0.035 | 0.006 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 98.23 | | 3593 |
| 5 b | 31.44 | 15.70 | 31.01 | 3.43 | 13.36 | 2.37 | 0.38 | 0.012 | 0.126 | 0.000 | 0.08 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 98.02 | | нет |
| 6 a | 31.03 | 15.61 | 31.88 | 3.58 | 13.42 | 1.81 | 0.61 | 0.003 | 0.577 | 0.016 | 0.17 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 98.82 | 0.587 | 797.0 |
| 6 b | 31.25 | 16.25 | 32.16 | 3.47 | 12.86 | 1.63 | 0.51 | 0.013 | 0.418 | 0.008 | 0.17 | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 98.84 | 0.461 | 608.2 |
| 7 a | 31.33 | 10.09 | 32.40 | 4.39 | 16.91 | 2.38 | 0.54 | 0.055 | 0.227 | 0.001 | 0.19 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 98.59 | | нет |
| 7 b | 31.52 | 15.70 | 34.72 | 3.53 | 11.49 | 1.35 | 0.50 | 0.070 | 0.219 | 0.020 | 0.12 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 99.28 | 0.466 | 997.4 |
| 8 a | 31.23 | 13.46 | 34.97 | 3.74 | 12.73 | 1.54 | 0.50 | 0.066 | 0.000 | 0.004 | 0.16 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 98.52 | нет | нет |
| 8 b | 31.00 | 12.77 | 34.88 | 3.90 | 13.52 | 1.61 | 0.50 | 0.070 | 0.024 | 0.004 | 0.13 | 0.17 | 0.00 | 0.06 | 0.01 | 98.65 | нет | нет |
| 9 a | 31.37 | 10.52 | 32.90 | 4.26 | 16.33 | 2.24 | 0.49 | 0.072 | 0.218 | 0.018 | 0.16 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 98.67 | 0.460 | 997.4 |
| 9 b | 31.45 | 17.92 | 33.64 | 3.10 | 10.16 | 1.38 | 0.39 | 0.069 | 0.430 | 0.015 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 98.71 | 0.655 | 351.0 |

Табл. 2. Химический состав (мас. %) и возраст (млн лет) девяти зёрен ярегского монацита. Недостаток суммы в анализах монацита обусловлен отсутствием определенной содержания средних членов редкоземельного (REE – Rare-earth elements) ряда – Gd₂O₃ и Eu₂O₃, наличие которых установлено ранее в этих же зернах на электронном микроскопе JSM-7300 с энергодисперсионной приставкой Link (Макеев, Магазина, 2019).

(до 10-15 %) и тем самым похожи по форме, цвету и внутренней морфологии на зерна лейкоксена. Такая морфологическая разность монацита получила название куларита. Кроме кварца в нем отмечены включения флоренсита, мусковита и псевдорутила, от включений последнего зерна монацит-куларита становятся магнитными и концентрируются в электромагнитную фракцию вместе с ильменитом, псевдорутилом и сидеритом (Лютоев, Макеев, 2019). Особенности химического состава монацита-куларита представлены в табл. 3. В пижемском монаците распространены три химические разновидности: лантан-цериевая, неодим-самарий-цериевая, неодим-цериевая, последняя из них наиболее часто встречается (более 80 % случаев). Отмечается высокая положительная корреляция между церием и лантаном с одной стороны и празеодимом, неодимом, самарием, гадолинием и европием с другой стороны (Макеев, Магазина, 2019). В пижемском монаците-куларите нарушено правило тетрад: между первой (La-Ce-Pr-Nd) и второй (Sm-Eu-Gd-Tb) тетрадами отсутствует прогиб, что связано с повышенным содержанием Nd и Sm, вероятно, это могло быть обусловлено гидротермальным преобразованием минерала в коре выветривания первоисточника и выносом части компонентов.

На диаграммах (рис. 3, 4) показаны соотношения компонентов, позволяющие отличать типохимические особенности монацита двух изучаемых месторождений. Пижемский монацит отличается более высоким содержанием неодима и самария, а ярегский – лантана, тория, иттрия, кальция, урана и свинца.

Результаты расчета возраста монацита методом CHIME

Результаты расчета возраста монацита по данным 18 и 35 анализов представлены в табл. 2 и 3. Средний возраст ярегского монацита по «точечным» определениям в трех совокупностях составил: 1 – 1304±22; 2 – 1107±39; 3 – 837±147 млн лет. Средний возраст пижемского монацита-куларита по 33 точкам (если убрать 2 крайние с обеих сторон, не входящие в 3 σ интервал) T = 777±110 млн лет. На рис. 5 и 6 показаны соотношения PbO и ThO₂* для выборок двух месторождений. По этим данным были рассчитаны и построены соответствующие изохроны. Для ярегского монацита построены три изохроны:

| No | P ₂ O ₅ | La ₂ O ₃ | Ce ₂ O ₃ | Pr ₂ O ₃ | Nd ₂ O ₃ | Sm ₂ O ₃ | Y ₂ O ₃ | UO ₂ | ThO ₂ | PbO | CaO | SiO ₂ | FeO | MnO | SO ₃ | Сумма | ThO ₂ * | Возраст |
|----|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------|------|------------------|------|------|-----------------|-------|--------------------|---------|
| 1 | 30.34 | 10.06 | 30.46 | 4.25 | 17.37 | 2.91 | 0.93 | 0.231 | 0.458 | 0.044 | 0.13 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 97.28 | 1.242 | 823.4 |
| | 30.43 | 14.32 | 32.57 | 3.73 | 13.67 | 1.86 | 0.68 | 0.143 | 0.153 | 0.019 | 0.12 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 97.71 | 0.633 | 695.0 |
| 2 | 30.19 | 8.84 | 30.28 | 4.44 | 18.09 | 2.74 | 0.71 | 0.034 | 0.291 | 0.015 | 0.24 | 0.23 | 0.43 | 0.06 | 0.01 | 96.59 | 0.407 | 848.2 |
| | 30.18 | 9.37 | 30.67 | 4.33 | 17.38 | 2.51 | 0.64 | 0.033 | 1.147 | 0.039 | 0.23 | 0.32 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 96.93 | 0.633 | 721.8 |
| 3 | 30.49 | 19.34 | 32.78 | 3.12 | 10.12 | 1.09 | 0.50 | 0.078 | 0.260 | 0.013 | 0.08 | 0.09 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 98.10 | 0.519 | 578.2 |
| | 30.43 | 14.93 | 32.78 | 3.71 | 13.20 | 1.67 | 0.52 | 0.095 | 0.247 | 0.019 | 0.11 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 97.81 | 0.568 | 777.0 |
| 4 | 30.18 | 5.68 | 23.62 | 4.50 | 23.40 | 6.92 | 0.57 | 0.114 | 0.266 | 0.023 | 0.14 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 95.51 | 0.653 | 815.4 |
| | 29.83 | 4.84 | 21.03 | 4.30 | 24.60 | 9.00 | 0.61 | 0.145 | 0.151 | 0.022 | 0.07 | 0.03 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 94.66 | 0.643 | 793.4 |
| 5 | 30.83 | 10.35 | 31.53 | 4.37 | 17.71 | 2.73 | 0.43 | 0.225 | 0.112 | 0.027 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | 0.06 | 0.00 | 98.49 | 0.868 | 721.8 |
| | 30.47 | 9.53 | 29.97 | 4.37 | 18.05 | 3.04 | 0.69 | 0.151 | 0.552 | 0.040 | 0.13 | 0.02 | 0.06 | 0.04 | 0.00 | 97.10 | 1.066 | 870.2 |
| 6 | 30.35 | 6.46 | 24.92 | 4.64 | 23.13 | 5.39 | 0.60 | 0.103 | 0.865 | 0.039 | 0.16 | 0.01 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 96.77 | 1.212 | 748.6 |
| | 30.22 | 6.80 | 25.46 | 4.65 | 22.76 | 5.07 | 0.41 | 0.066 | 0.700 | 0.032 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 96.36 | 0.924 | 804.2 |
| 7 | 30.70 | 15.18 | 33.88 | 3.53 | 12.12 | 1.67 | 0.45 | 0.067 | 0.508 | 0.018 | 0.11 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 98.29 | 0.731 | 571.8 |
| | 30.46 | 14.39 | 33.81 | 3.63 | 12.16 | 1.60 | 0.50 | 0.071 | 1.031 | 0.039 | 0.17 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 97.90 | 1.270 | 715.4 |
| 8 | 30.44 | 12.77 | 32.64 | 3.88 | 14.17 | 1.80 | 0.35 | 0.048 | 1.565 | 0.054 | 0.15 | 0.00 | 0.12 | 0.02 | 0.01 | 98.01 | 1.727 | 729.4 |
| 9 | 30.32 | 17.14 | 33.20 | 3.29 | 11.05 | 1.23 | 0.33 | 0.039 | 0.776 | 0.000 | 0.08 | 0.10 | 0.24 | 0.05 | 0.59 | 98.44 | | He отр. |
| | 30.65 | 19.93 | 33.02 | 2.99 | 9.82 | 0.94 | 0.27 | 0.065 | 0.670 | 0.031 | 0.08 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 98.49 | 0.890 | 807.8 |
| 10 | 30.40 | 12.59 | 32.26 | 3.94 | 14.83 | 2.09 | 0.61 | 0.108 | 0.631 | 0.033 | 0.14 | 0.10 | 0.06 | 0.04 | 0.00 | 97.82 | 0.996 | 769.0 |
| | 30.44 | 10.64 | 31.19 | 4.20 | 16.74 | 2.66 | 0.58 | 0.154 | 0.173 | 0.022 | 0.09 | 0.07 | 0.17 | 0.04 | 0.01 | 97.18 | 0.692 | 737.0 |
| 11 | 30.45 | 10.38 | 32.47 | 4.46 | 17.22 | 2.38 | 0.41 | 0.132 | 0.010 | 0.012 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | 98.11 | 0.450 | 614.2 |
| | 30.21 | 6.84 | 26.04 | 4.49 | 21.43 | 5.90 | 0.62 | 0.092 | 0.368 | 0.026 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 96.31 | 0.682 | 881.8 |
| 12 | 28.73 | 8.10 | 26.60 | 3.94 | 16.38 | 3.18 | 0.61 | 0.159 | 0.274 | 0.020 | 0.32 | 1.48 | 0.39 | 0.05 | 0.01 | 90.23 | 0.803 | 579.0 |
| 13 | 30.02 | 5.76 | 24.18 | 4.57 | 23.47 | 6.20 | 0.70 | 0.210 | 0.124 | 0.031 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 95.41 | 0.838 | 856.6 |
| | 30.41 | 5.69 | 23.70 | 4.67 | 24.42 | 6.36 | 0.48 | 0.027 | 0.246 | 0.017 | 0.18 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.00 | 96.32 | 0.340 | 1142.6 |
| 14 | 30.35 | 18.09 | 32.84 | 3.23 | 10.86 | 1.25 | 0.60 | 0.149 | 0.600 | 0.038 | 0.08 | 0.04 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 98.24 | 1.105 | 799.4 |
| | 30.42 | 17.83 | 33.61 | 3.36 | 11.22 | 1.24 | 0.47 | 0.085 | 0.169 | 0.005 | 0.08 | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 98.54 | 0.445 | 255.0 |
| 15 | 30.44 | 12.34 | 32.10 | 3.92 | 14.74 | 1.88 | 0.53 | 0.094 | 0.622 | 0.038 | 0.12 | 0.32 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 97.19 | 0.944 | 932.2 |
| | 30.40 | 8.94 | 30.76 | 4.62 | 18.97 | 2.81 | 0.40 | 0.118 | 0.382 | 0.035 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 97.52 | 0.789 | 1023.8 |
| 16 | 29.58 | 7.88 | 27.96 | 4.40 | 18.71 | 3.16 | 0.73 | 0.073 | 0.398 | 0.021 | 0.16 | 0.55 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 93.66 | 0.644 | 754.6 |
| | 29.92 | 8.55 | 29.74 | 4.59 | 19.43 | 3.27 | 0.49 | 0.068 | 0.408 | 0.023 | 0.13 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 96.76 | 0.639 | 832.6 |
| 17 | 30.08 | 10.42 | 30.60 | 4.35 | 17.66 | 2.48 | 0.54 | 0.235 | 0.650 | 0.058 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 97.26 | 1.454 | 925.4 |
| | 30.34 | 9.82 | 30.73 | 4.53 | 18.57 | 2.81 | 0.33 | 0.083 | 0.348 | 0.018 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 97.75 | 0.626 | 666.2 |
| 18 | 31.33 | 11.78 | 32.41 | 4.18 | 16.02 | 2.29 | 0.47 | 0.133 | 0.061 | 0.017 | 0.08 | 0.18 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 98.99 | 0.510 | 769.0 |
| | 30.27 | 12.23 | 33.29 | 4.28 | 15.80 | 1.96 | 0.28 | 0.072 | 0.044 | 0.008 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 98.29 | 0.285 | 641.0 |
| 19 | 30.27 | 7.73 | 29.05 | 4.68 | 20.67 | 3.80 | 0.42 | 0.024 | 0.393 | 0.019 | 0.15 | 0.09 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 97.37 | 0.475 | 920.6 |
| | 30.34 | 8.99 | 31.35 | 4.63 | 19.15 | 2.82 | 0.45 | 0.054 | 0.013 | 0.008 | 0.06 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 97.94 | 0.198 | 919.6 |

Табл. 3. Химический состав (мас. %) и возраст (млн лет) пижемского монацита-куларита. Первый результат анализа в строке дан для точки зонда в центре зерна, второй – с краю того же зерна.

изохрона I с параметрами – $T = 1301$ млн лет,
 $y = 0,0566x$, $R^2 = 0,906$;

изохрона II с параметрами – $T = 1105$ млн лет,
 $y = 0,0481x$, $R^2 = 0,901$;

изохрона III с параметрами – $T = 778$ млн лет,
 $y = 0,0335x$, $R^2 = 0,931$.

Две первые изохроны построены для зерен высоко-ториевого монацита, а последняя – для зерен с низким содержанием тория. Эти сведения наряду с данными по химическому составу монацита позволяют утверждать, что в Ярегском месторождении оказались совмещенными зерна монацита из трех коренных первоисточников,

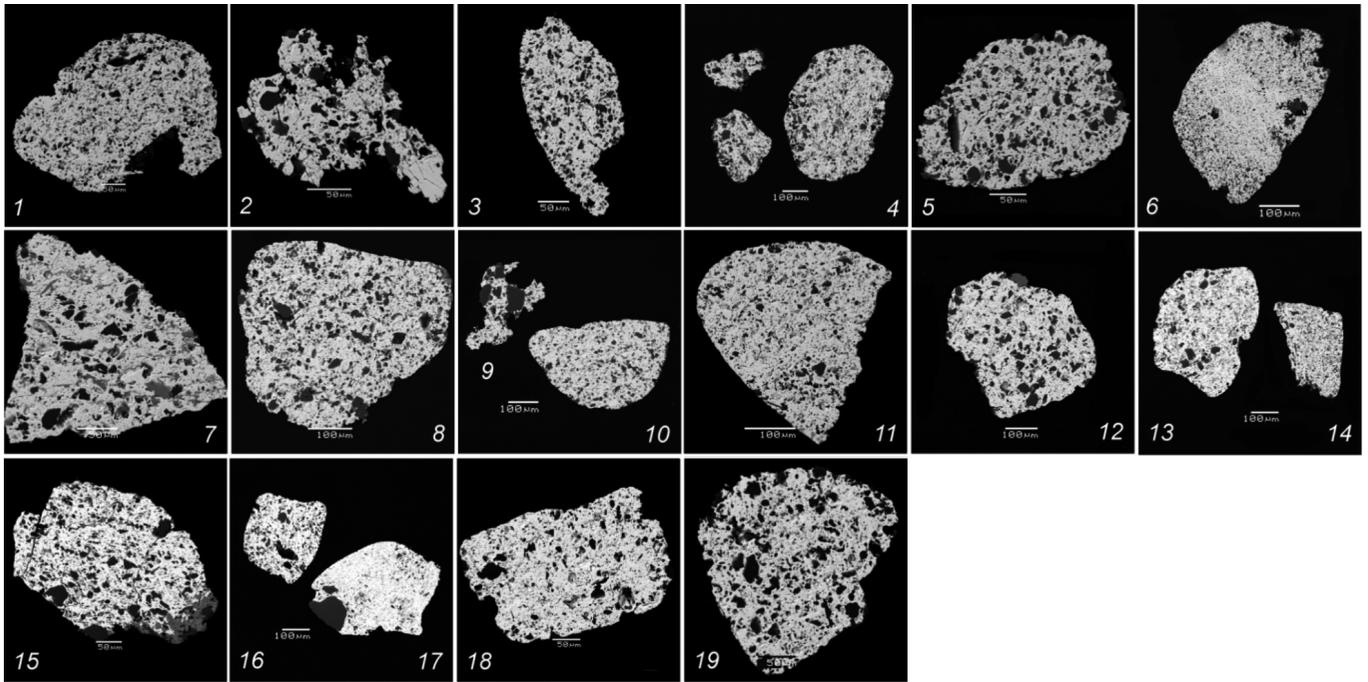


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения (режим BSE) девятнадцати зерен пижемского монацита-куларита с включениями кварца (черное) и флюорита (светло-серое в зернах 7, 15). Номера зерен совпадают с номерами анализов в табл. 3.

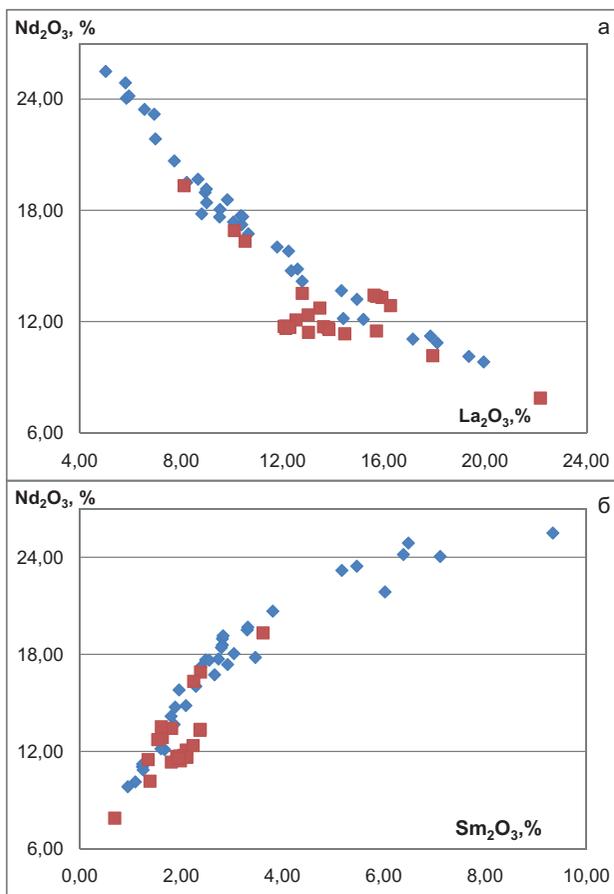


Рис. 3. Соотношение оксидов: а – $Nd_2O_3 - La_2O_3$; б – $Nd_2O_3 - Sm_2O_3$ в яреских (квадраты) и пижемских (ромбы) монацитах

значительно отличающиеся возрастaми друг от друга на ~200 и ~320 млн лет.

Для Пижемского месторождения вся совокупность результатов позволяет построить только одну изохрону

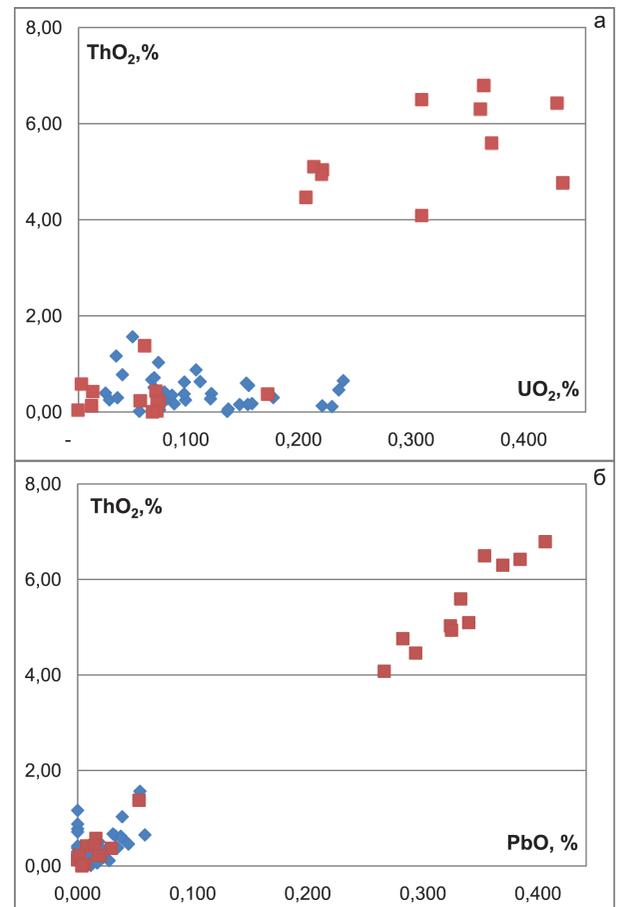


Рис. 4. Соотношение оксидов: а – $ThO_2 - UO_2$; б – $ThO_2 - PbO$ в яреских (квадраты) и пижемских (ромбы) монацитах

(рис. 6) с возрастом $T = 782$ млн лет. Статистический анализ позволяет рассчитать две близкие по возрастaм изохроны: первую со свободным членом – $PbO = -0,007 + 0,0345 \cdot ThO_2^*$, $R^2 = 0,908$; и вторую без свободного члена, стремящуюся

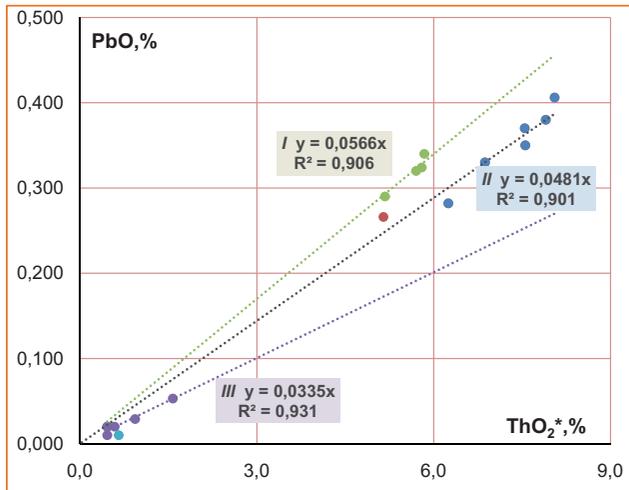


Рис. 5. Изохроны монацита Ярегского месторождения: I – $T = 1301$ млн лет, II – $T = 1105$ млн лет (высокотермического); III – $T = 778$ млн лет (низкотермического)

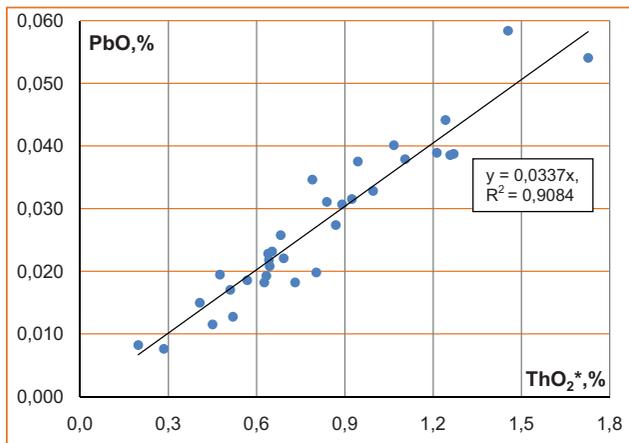


Рис. 6. Изохрона Пижемского монацита-куларита: $T = 782$ млн лет

к нулю, $- PbO = 0,0337 \cdot ThO_2^*$, $R^2 = 0,9084$. Выбираем вторую, как это принято в данном виде исследования. Следует отметить, что это идеальный случай, когда изохрона пижемского монацита близко совпадает со средним «точечным» возрастом всей совокупности. Другая особенность настоящего исследования проявилась в том, что совпадают значения возраста изохроны III для монацита Ярегского месторождения и единственная изохрона для монацита-куларита Пижемского месторождения. Это может указывать на близкую сущность геологического объекта одного из коренных первоисточников монацита двух тиманских месторождений.

Обсуждение результатов

Наиболее близким объектом сравнения для обсуждения полученных результатов может быть известное и уже относительно хорошо изученное полиминеральное золото-алмаз-редкоземельно-редкометалльно-титановое проявление Ичетью, представляющее собой (0.2-1.5 м мощности) конглобрекчиевый горизонт, непосредственно залегающий на породах малоручейской толщи Пижемского месторождения (Макеев, 2016; Макеев, Дудар, 2001). Для него известны изотопные (Pb-Th и Pb-U) и химические определения (метод CHIME) возраста La-Ce-монацита

и Nd-Ce-монацита-куларита (Красоткина, 2018; Макеев, Вирюс, 2013; Скублов и др., 2018). Локальное датирование монацита дало два пика значения ^{206}Pb - ^{238}U возраста – главный пик с возрастом 1000-1060 млн лет и подчиненный с максимумом около 570 млн лет. ^{208}Pb - ^{232}Th возраст, определенный в тех же точках, что и ^{206}Pb - ^{238}U возраст, дал только один пик с возрастом в широком интервале 500-700 млн лет (Скублов и др., 2018). Кроме монацита детально были изучены изотопно-геохимические особенности рутила и циркона (Красоткина, 2018). Выявлено, что все три изученных минерала-геохронометра (циркон, рутил, монацит) из рудопоявления Ичетью изотопными системами и составом по редким элементам фиксируют интенсивное гидротермальное событие с возрастом около 600 млн лет. Это событие не проявлено в подстилающих титановые месторождения породах и может рассматриваться как возраст, близкий к возрасту образования титановых месторождений Среднего Тимана.

Распределение данных индивидуальных расчетов возраста (CHIME) монацитов проявления Ичетью «в точке» (Макеев, Вирюс, 2013) показывает присутствие трех мод, что позволяет разделить общую выборку на три группы, и рассчитать их средний возраст: 1 – 955 ± 124 млн лет, 2 – 706 ± 76 млн лет, 3 – 401 ± 88 млн лет. Изохронный метод расчетов также дает три совокупности, соответствующие трем изохронам:

- **изохрона I** с параметрами – 967 млн лет ($y = 0.0414x$, $R^2 = 0.9669$);
- **изохрона II** с параметрами – 737 млн лет ($y = 0.0314x$, $R^2 = 0.9434$);
- **изохрона III** с параметрами – 522 млн лет ($y = 0.0221x$, $R^2 = 0.9840$).

Была предложена следующая интерпретация полученных результатов. Изохроне I отвечают в большинстве случаев эллипсоидные зёрна неодим-цериевой разновидности (с небольшим исключением – два зёрна ториевого и два зёрна лантан-цериевого монацита). Изохроне II соответствуют в основном только зёрна неодим-цериевой разновидности (монацит-куларит). Изохроне III отвечают все три разновидности монацита, но ториевая и лантан-цериевая разновидности преобладают над неодим-цериевой. Ранняя изохрона (I), возможно, указывает на время формирования редкометалльно-редкоземельной высокотемпературной гидротермально-метасоматической минерализации в позднепротерозойских сланцах, аналогами которой являются Бобровское и Октябрьское месторождения Четласского Камня (Средний Тиман).

Среднюю изохрону (II) можно соотносить по возрасту с четласскими лампрофирами, время внедрения которых оценено Rb-Sr-методом в 815 млн лет (Макеев и др., 2009). К этому же временному интервалу относится формирование четласских карбонатитов (600 млн лет), в которых монацит один из наиболее распространенных аксессуарных минералов.

Наиболее поздняя изохрона (III) монацита соответствует возрасту внедрения девонских базальтов, и возможно, возрасту формирования собственно проявления Ичетью. В эту фазу монацит мог перекристаллизоваться и частично потерять радиогенный свинец. Это предположение не противоречит геологическим сведениям о строении продуктивного конглобрекчиевого горизонта (в

котором встречаются обломки базальтов) и позволяет считать происхождение конглобрекчий проявления Ичетью вулканогенно-флюидизатным, синхронным с внедрением силлов базальтов.

Эти факты необходимо сравнить с вновь полученными данными определения возраста монацита и циркона Пижемского и Ярегского месторождений, которые могут дать новые свидетельства и быть использованы для оценки возраста самих месторождений. Следует обратить внимание на то, что значения возраста, полученные для Nd-Ce-монацита-куларита проявления Ичетью и Пижемского месторождения, очень близки, что, вероятно, свидетельствует об их едином первоисточнике.

Среди магматических пород Тимана только четласские лампрофиры наиболее близки по изотопному возрасту (Макеев и др., 2008; 2009) к оценкам химического возраста низкотермического ярегского монацита и пижемского монацита-куларита. По Rb-Sr-данным наиболее многочисленная совокупность проб четласских лампрофиров образует изохрону с позднепротерозойским возрастом 819 ± 19 млн лет (Макеев и др., 2009). Таким образом, именно позднепротерозойские лампрофиры, более всего подходящие по возрасту и по минеральному составу акцессориев (Макеев, 2016; Макеев и др., 2008; 2009; 2016), могли служить источником рудного вещества двух титановых месторождений. Возможно, в процессе поисково-разведочных работ на севере Вольско-Вымской гряды под титаносносными толщами будут найдены лампрофиры, подобные четласским.

Видовой состав микронных минеральных включений в зернах ярегского циркона (Макеев, Жиличева, 2018), который тесно ассоциирует в титаносносных песчаниках с изучаемым монацитом, состоит из: кварца, мусковита, F-REE-апатита, ксенотима, хлорита, КПШ, биотита (слюда ряда ФАСИ (флогопит-аннит-сидерофиллит-истонит) – по новой номенклатуре Международной минералогической ассоциации), что однозначно указывает на принадлежность всей этой ассоциации к двуслюдяным гранитам. По известным критериям (Красоткина, 2018; Скублов и др., 2018; Schandl, Gorton, 2004; Williams и др., 2007) крайне низкому содержанию Th, U/Th отношению и отсутствию Eu-аномалии химический состав пижемского монацит-куларита и низкотермического монацита Ярегского месторождения указывает на их гидротермальный генезис. А коренным источником высокотермического ярегского монацита по этим же критериям могут быть тиманские древние гранитные батолиты, предположительно залегающие в кристаллическом фундаменте Тимана и не выходящие на дневную поверхность.

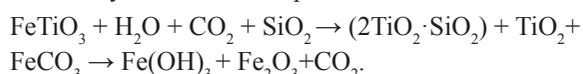
Ранее считалось, что возраст нефтенасыщенных лейкоксеновых песчаников Ярегского месторождения по данным споро-пыльцевого анализа соответствует среднему девону. Но в последнее время О.П. Тельновой (в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН – устное сообщение) были проведены более обширные и строгие исследования кернового материала разведочных скважин, которые показали, что в исследуемом материале встречаются и среднедевонские, и позднедевонские микрофоссилии. Эта неоднозначность позволяет предположить, что носителем и распространителем микрофоссилий в ярегские титаносносные песчаники была мигрирующая нефть, которая

выжималась из материнских девонских пород и мигрировала в древние пористые песчаники – как наиболее благоприятный коллектор – антиклинальную ловушку, которой и была Ярегская тектоническая структура. Минеральный состав лейкоксеновых песчаников нефтяного и водного сортов Ярегского месторождения одинаковый, а значит нефть – более позднее наполнение верхней части Ярегского месторождения, и она генетически не связана с образованием самой титаносносной толщи. Нефть также заполняет здесь и верхний безрудный слой кварцевых песчаников в антиклинальной ловушке. Предположение о мигрирующей нефти, которая несла с собой видовую смесь спор и пыльцы *средне- и позднедевонских* растений, вполне логично, а значит среднедевонский возраст Ярегского месторождения не доказан. Вопрос остается открытым. Для корректного решения вопроса потребуются дополнительные изотопно-геохимические исследования, подобные проведенным ранее (Чернышев, и др., 2010) в пределах Пижемского месторождения.

Генезис и возраст двух исследуемых месторождений являются дискуссионными. Ранее считалось, что это древние россыпи, но эта точка зрения никогда не была общепризнанной. По существующей классификации титановых месторождений России Ярегское месторождение как раз определенно относится к коренным метаморфогенным. Геологическое строение двух месторождений идентично, весьма близок их минеральный состав, и предположение о сходстве возраста и генезиса этих двух объектов весьма вероятно. Так как титаносносная толща Пижемского месторождения не содержит никаких органических руководящих остатков – она немая, то её возраст условно был ранее принят среднедевонским. Малоручейская толща перекрывается среднедевонскими терригенными отложениями пижемской свиты (D_2pz), которая содержит среднедевонскую пыльцу. Многие исследователи определяют возраст малоручейской титаносносной толщи Пижемского месторождения только по косвенным признакам в интервале от раннего девона до позднего протерозоя. С помощью изотопных методов удалось точно установить возраст титаносносной толщи Пижемского месторождения по Rb-Sr-изохроне как позднепротерозойский $T = 685 \pm 30$ млн лет (Чернышев и др., 2010). Материалом для определения возраста послужили вмещающие руду породы – алевролиты, аргиллитоподобные глины и собственно лейкоксеновый рудный концентрат. Таким образом, результаты, полученные по химическому возрасту монацита, только подтверждают ранее полученные нами данные по изотопному возрасту циркона, рутила, монацита и лейкоксена. А значит возраст Пижемского титанового месторождения значительно древнее, чем считалось ранее (наиболее вероятно в интервале 600-700 млн лет) – позднепротерозойский (PR_3mr).

В публикациях последних лет авторы неоднократно останавливались на обосновании признаков, которые свидетельствуют о *коренном*, не перемещенном (не россыпном) генезисе Пижемского месторождения (Макеев, 2016; Макеев и др., 2008; 2009; 2016 и др.). Одним из таких признаков является полное отсутствие окатанности кварца (в обоих объектах) – главного по объему руд минерала. Он остроугольный, кластогенный; этот признак – свидетельство ближнего сноса всего материала.

При этом некоторые минеральные фазы – лейкоксен и монацит-куларит – могут иметь *псевдоокатанную* форму зёрен, образовавшуюся в процессе гидротермальной переработки материала и при вертикальном перемещении материала во флюидизатном вертикальном потоке. Поэтому округлые формы зёрен – это *конвергентный* признак, который не может быть признан убедительным доказательством россыпной природы рудопоявлений и перемещения материала в субгоризонтальных водных потоках. Размерность кварца и других нерудных и рудных минералов (0.1–2.0 мм) значительно крупнее размерности минералов тонкозернистых (0.01–0.10 мм) рифейских глинистых сланцев – подстилающих пород. Кроме того сланцы не содержат достаточно рудных компонентов, а значит кора выветривания по сланцам не могла быть коренным источником вещества вышележащей рудной толщи. Расчеты показывают, чтобы создать имеющуюся концентрацию TiO_2 в месторождениях, объём кор выветривания по глинистым сланцам должен быть в десятки раз больше, чем объём и мощность титаноносных толщ. Мощные коры выветривания по рифейским сланцам на Тимане не образуются, их никто никогда не наблюдал. Возраст подстилающих глинистых сланцев лунвожской свиты (PR_3In) определен Rb-Sr-методом – $T = 816.3 \pm 5.2$ млн лет (Макеев и др., 2018). На дневной поверхности вблизи Пижемского месторождения не обнаружены другие рудные концентрации, которые могли бы служить источником рудного вещества, а, значит, вероятный источник находится на некоторой глубине под месторождениями (возможно, это коры выветривания по лампрофирам), и следует предположить вертикальное перемещение рудных масс. Другим убедительным признаком участия гидротермальных процессов в образовании обоих титановых месторождений следует считать присутствие (3–15 % по объёму) порового и жильного сидерита с эндогенным изотопным составом углерода (Макеев, Носик, 2009). Разложение первичного рудного минерала ильменита с образованием лейкоксена происходило в гидротермальном процессе в присутствии эндогенной углекислоты по реакции:



Геологические, геохимические и минералогические доказательства позволяют трактовать генезис Пижемского титанового месторождения как вулканогенный – фреатомагматический с участием водяного пара и углекислоты по типу грязевых вулканов. Месторождение образовано по субстрату кор выветривания лампрофиров с последующим длительным (сотни млн лет) метаморфическим преобразованием рудных толщ (Макеев, 2016).

Таким образом, два близкие по геологическому строению гигантские титановые месторождения Тимана (Ярегское и Пижемское), залегающие непосредственно на позднепротерозойских глинистых сланцах и перекрывающиеся осадочными породами среднего и верхнего девона, ошибочно считавшиеся ранее среднедевонскими, на самом деле более древние – позднепротерозойские. Одним из наиболее вероятных источников рудного вещества могли быть лампрофиры подобные четласским, близкие по возрасту, по видовому составу и типоморфным особенностям индикаторных аксессуарных минералов.

Заключение

Проведено исследование типоморфных особенностей и возраста монацита двух гигантских титановых месторождений Тимана – Пижемского и Ярегского, которое позволило установить отличия в морфологии (ярегские – обломки кристаллов, а пижемские – эллипсоидные гидротермально-измененные зёрна), в видовом составе включений (пижемские кулариты на 10–15 % состоят из включений кварца), размерах зерен (пижемские в 4 раза крупнее), в распространении химических разновидностей минерала (большая доля ярегских монацитов представлена высокотермальной и лантановой разновидностями, пижемский монацит-куларит представлен неодимовой и самариевой разновидностями). Рассчитан изохронный Th-Pb возраст монацита по методу СНИМЕ. Для ярегского монацита построены три изохроны с возрастом 1301, 1105 и 778 млн лет; для пижемского монацита-куларита одна изохрона с возрастом 782 млн лет. Эти различия связаны с условиями кристаллизации монацита и разными источниками вещества. Источником высокотермальной монацита Ярегского месторождения могли быть древние гранитные батолиты, а происхождение низкотермальной ярегского монацита и Nd-Ce-монацит-куларита Пижемского месторождения с возрастом ~780 млн лет могло быть связано с гидротермальным преобразованием кор выветривания по лампрофирам, предположительно залегающим под месторождениями в сланцево-кварцевой позднепротерозойской терригенной толще кристаллического фундамента, близким по возрасту к лампрофирам (спессартитам и керсантитам) Четласского Камня. Свободная форма выделения монацита в обоих месторождениях позволяет разработать технологические способы извлечения минерала из концентратов, что, безусловно, повысит рентабельность их отработки.

Благодарности/Финансирование

Авторы искренне признательны А.Н. Конилову за помощь в расчете возраста зерен монацита и построении изохрон по собственной программе, а также А.В. Лаломову за полезное обсуждение статьи и замечания.

Исследование выполнено в рамках бюджетной темы № 0136-2018-0020 и частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-60001.

Литература

- Вотьяков С.Л., Шапова Ю.В., Хиллер В.Н. (2011). Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микрозондового датирования. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 336 с.
- Вотьяков С.Л., Хиллер В.В., Шапова Ю.В. (2012). Особенности состава и химическое микрозондовое датирование U-Th-содержащих минералов. Часть I. Монациты ряда геологических объектов Урала и Сибири. *Записки РМО*, 1, с. 45–60.
- Игнатъев В.Д., Бурцев И.Н. (1997). Лейкоксен Тимана: Минералогия и проблемы технологии. СПб.: Наука, 215 с.
- Лютюев В.П., Макеев А.Б. (2019). Оценка качества магнитных концентратов титановых руд Пижемского месторождения с позиции технологической минералогии. *Изв. ВУЗов. Геология и разведка*, 3, с. 31–41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2019-3-31-42>
- Каложный В.А. (1982). Геология новых россыпеобразующих метаморфических формаций. М.: Наука, 264 с.
- Красоткина А.О. (2018). Изотопно-геохимические особенности и возраст аксессуарных минералов рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения (Средний Тиман). Автореф. дисс. к.г.-м.н. СПб, 20 с.

Макеев А.Б. (2016). Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения. *Минералогия*, 1, с. 24-49.

Макеев А.Б., Андреев В.Л., Брянчанинова Н.И. (2009). Rb–Sr возраст лампрофиров Среднего Тимана. *Докл. РАН*, 426(1). с. 94-97. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040163>

Макеев А.Б., Вириус А.А. (2013). Монацит проявления Ичетью (состав, морфология, возраст). *Изв. ВУЗов. Геология и Разведка*, 3, с. 10-15.

Макеев А.Б., Дудар В.А. (2001). Минералогия алмазов Тимана. СПб: Наука, 336 с.

Макеев А.Б., Жиличева О.М. (2018). Католюминесценция циркона Ярегского нефте-титанового месторождения (Южный Тиман). *Мат. XIX Межд. конф.: Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле*. М.: ИГЕМ РАН, с. 220-223.

Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г. (2016). Геохимия и изотопный U-Pb возраст циркона Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*, 5, с. 38-52. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-5-38-52>

Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г. (2018). Глинистые сланцы лунвожской свиты Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман): состав, возраст, аксессуарный циркон. *Мат. Минералогического семинара: Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018)*. Сыктывкар, с. 40-41.

Макеев А.Б., Лебедев В.А., Брянчанинова Н.И. (2008). Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 348 с.

Макеев А.Б., Магазина Л.О. (2019). Типоморфные особенности монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман). *Тезисы докладов XIV Межд. науч.-практ. конф.: Новые идеи в науках о Земле*. Т. II. М.: МГРИ-ПГРУ, с. 314-316.

Макеев А.Б., Носик Л.П. (2009). Химический и изотопный состав сидерита Пижемского месторождения (Средний Тиман). *Мат. XV Геологического съезда Республики Коми: Геология и минеральные ресурсы европейского северо-востока России*. Т. II. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. с. 277-279.

Попова В.И., Хиллер В.В., Ерохин В.В., Попов В.А. (2010). Монациты поздних гранитных пегматитов Ильменских гор: химическое датирование возраста зонально-секториальных кристаллов. *Новые данные о минералах*, 45, с. 72-78.

Скублов С.Г., Красоткина А.О., Макеев А.Б., Томсен Т.Б., Серре С.Х., Абдрахманов И.А. (2018). Геохимия редких элементов (LA-ICP-MS) в монаците из рудопоявления Ичетью, Средний Тиман. *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*, 15, с. 338-341. <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.084>

Скублов С.Г., Макеев А.Б., Красоткина А.О., Ризванова Н.Г., Койман Э., Томсен Т.Б., Серре С.Х. (2018). Новые данные о возрасте циркона, рутила и монацита из рудопоявления Ичетью, Средний Тиман. *Мат. VII Росс. конф. по изотопной геохронологии: Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронологических систем минералов и пород*. М.: ИГЕМ РАН, с. 326-328.

Чернышев И.В., Макеев А.Б., Гольцман Ю.В., Брянчанинова Н.И. (2010). Возраст титановых месторождений Северо-Востока Восточно-Европейской платформы: Rb-Sr-данные. *Докл. РАН*, 435 (3), с. 378-383. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110255>

Schandl E.S., Gorton M.P. (2004). A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99, pp. 1027-1035. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>

Suzuki K., Adachi M. (1991). The chemical Th–U–total Pb isochron ages of zircon and monazite from the gray granite of the Hida Terrane, Japan. *The Journal of Earth and Planetary Sciences*, 38, Nagoya University, pp. 11-38.

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

Williams M.L., Jercinovic M.J., Hetherington C.J. (2007). Microprobe monazite geochronology: understanding geologic processes by integrating composition and chronology. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, pp. 137-175. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140228>

Сведения об авторах

Александр Борисович Макеев – докт. геол.-мин. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Лаборатории геологии рудных месторождений

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35
E-mail: abmakeev@igem.ru

Сергей Евгеньевич Борисовский – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник Лаборатории анализа минерального вещества

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35

Анна Олеговна Красоткина – канд. геол.-мин. наук, руководитель проекта РФФИ, научный сотрудник
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН
Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2

Статья поступила в редакцию 25.09.2019;
Принята к публикации 15.11.2019;
Опубликована 30.03.2020

IN ENGLISH

The chemical composition and age of monazite and kularite from titanium ore of Pizhemskeye and Yarega deposits (Middle and Southern Timan)

A.B. Makeyev^{1}, S.E. Borisovsky¹, A.O. Krasotkina²*

¹*Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation*

^{*}*Corresponding author: Alexander B. Makeyev, e-mail: abmakeev@igem.ru*

Abstract. A study on the typomorphic characteristics and age of the monazite the two giant titanium deposits of the Timan – Pizhemskeye and Yarega, which revealed differences in morphology in the species composition of the inclusions, the grain size, distribution of chemical types of a mineral associated with conditions of crystallization and different sources of the substance. The isochronous Th-Pb monazite age was calculated using the «CHIME» method. For Yarega monazite built three isochrone with age 1301, 1105 and 778 Ma; for Pizhemskeye monazite-kularite one

isochrone with age 782 Ma. Source of hith-Th monazite Yarega oil-titanium deposit could be ancient granite batholith and the origin Yarega less-Th monazite and Nd-Ce-monazite-kularite Pizhemskeye deposit with an age of ~ 780 Ma could be related to the hydrothermal conversion of the weathering crusts on lamprophyres close in age with lamprophyre (spessartite and kersantite) of Chetlasky Kamen.

Keywords: Pizhemskeye titanium, Yarega oil-titanium deposits, Timan, monazite, kularite, chemical composition, age

Recommended citation: Makeyev A.B., Borisovsky S.E., Krasotkina A.O. (2020). The chemical composition and age of monazite and kularite from titanium ore of Pizhenskoye and Yarega deposits (Middle and Southern Timan). *Georesursy = Georesources*, 22(1), pp. 22-31. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.22-31>

Acknowledgements

The authors are sincerely grateful to A.N. Konilov for help in calculating the age of monazite grains and constructing isochrones according to his own program and A.V. Lalomov for the useful discussion of the article and comments.

The study was carried out in the framework of budget theme No. 0136-2018-0020 and partially was funded by Russian Foundation for Basic Research, project number 19-35-60001.

References

- Chernyshev I.V., Makeyev A.B., Goltzman Yu.V., and Bryanchaninova N.I. (2010). Age of Titanium Deposits of the Northeastern Part of the Eastern European Platform: Rb–Sr Data. *Doklady Earth Sciences*, 435(1), pp. 1524-1528. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110255>
- Ignatiev D.V., Burtsev I.N. (1997). The leucoxene of Timan: Mineralogy and problems of technology. St.Petersburg: Nauka, 215 p. (In Russ.)
- Kalyuzhny V.A. (1982). Geology of new placeforming metamorphic formations. Moscow: Nauka, 264 p. (In Russ.)
- Krasotkina A.O. (2018). Isotopic-geochemical features and age of accessory minerals of the Ichetju occurrence and Pizhensky deposit (Middle Timan). Abstract Cand. geol. and min. sci. diss. St. Petersburg, 20 p. (In Russ.)
- Lyutov V.P., Makeyev A.B. (2019). Assessment of the quality of the magnetic concentrates of the titanium ores at Pizhensky deposit from the point of view of the technological mineralogy. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, (3), pp. 31-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2019-3-31-42>
- Makeyev A.B. (2016). Typomorphic features of minerals of Ti ores from the Pizhenskoe deposit. *Mineralogiya = Mineralogy*, 1, pp. 24-49. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Andreichev V.L. and Bryanchaninova N.I. (2009). Age of Lamprophyres of the Middle Timan: First Rb-Sr Date. *Doklady Earth Sciences*, 426(4), pp. 584-587. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040163>
- Makeyev A.B., Bryanchaninova N.I. (2009). Lamprophyres of Chetlasky Kamen (Middle Timan). *Regional Geol. Metallogeny*, 37, pp. 51-73. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Dudar V.A. (2001). Diamond Mineralogy of the Timan. St. Petersburg: Nauka, 336 p. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Krasotkina A.O., Skublov S.G. (2016). Geochemistry and U-Pb-age of zircon from Pizhenskoe titanium deposit (Middle Timan). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 5, pp. 38-52. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-5-38-52> (In Russ.)
- Makeyev A.B., Krasotkina A.O., Skublov S.G. (2018). Clay shales of the Lunvzhskojj suite of the Volsk-Vym ridge (Middle Timan): composition, age, accessory zircon. *Proc. Mineralogical seminar: Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkinsky readings - 2018)*. Syktyvkar, pp. 40-41. (In Russ.)
- Makeev A.B., Lebedev V.A., Bryanchaninova N.I. (2008). Magmatites of Middle Timan. Ekaterinburg: UrO RAN, 348 p. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Magazina L.O. (2019). Typomorphic peculiarities of monazite and kularite from titanium ore of the Pizhensky and Yaregsky deposits (Middle and South Timan). *XIV Int. sci.-pract. conf.: New ideas in Earth Sciences. Abstracts*. Vol. II. Moscow: MGRI-RSGPU, pp. 314-316. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Nosik L.P. (2009). Chemical and isotopic composition of siderite of the Pizhensky deposit (Middle Timan)]. *Proc. XV Geological Congress of the Komi Republic: Geology and mineral resources of the European North-East of Russia*. Vol. II. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS. pp. 277-279. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Viryus A.A. (2013). Monazite of the Ichetju occurrence (composition, morphology, age). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 3, pp. 10-15. (In Russ.)
- Makeyev A.B., Zhilicheva O.M. (2018). Color cathodoluminescence of zircon from Yarega oil-titanium deposit (South Timan). *Proc. XIX Int. Conf.:*

Physico-chemical and petrophysical studies in Earth Sciences. Moscow: IGEM RAS, pp. 220-223. (In Russ.)

Popova V.I., Hiller V.V., Erohin V.V., Popov V.A. (2010). Monozites of late granite pegmatites of Ilmen mountains: chemical dating age of zonal-sectorial crystals. *Novye dannye o mineralakh = New Data on Minerals*, 45, pp. 72-78. (In Russ.)

Schandl E.S., Gorton M.P. (2004). A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99, pp. 1027-1035. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>

Skublov S.G., Krasotkina A.O., Makeyev A.B., Tomsen T.B., Serre S.X., Abdrakhmanov I.A. (2018). Geochemistry of rare elements (LA-ICP-MS) in the monazite from Ichetju occurrence, Middle Timan. *Proc. Fersman Scientific session*, 15, pp. 338-341. <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.084> (In Russ.)

Skublov S.G., Makeyev A.B., Krasotkina A.O., Rizvanova N.G., Koiman E., Tomsen T.B., Serre S.X. (2018). New data on the age of the zircon, rutile and monazite from Ichetju occurrence, Middle Timan. *Proc. VII Russ. Conf. on isotope geochronology: Methods and geological results of the study of isotopic geochronological systems of minerals and rocks*. Moscow: IGEM RAS, pp. 326-328. (In Russ.)

Suzuki K., Adachi M. (1991). The chemical Th–U–total Pb isochron ages of zircon and monazite from the gray granite of the Hida Terrane, Japan. *The Journal of Earth and Planetary Sciences*, 38, pp. 11-38.

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

Votyakov S.L., Shchapova U.V., Hiller V.V. (2011). Crystal chemistry and physics of radiation-thermal effects in a number of U-Th-containing minerals as a basis for their chemical microprobe Dating. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry Urals Branch RAS, 336 p. (In Russ.)

Votyakov S.L., Hiller V.V., Shchapova U.V. (2012). Peculiarities of composition and chemical microprobe Dating of U-Th-bearing minerals. Part I. Monozites of a number of geological objects of the Urals and Siberia. *Zapiski RMO (Proceedings of the Russian Mineralogical Society)*, 1, pp. 45-60. (In Russ.)

Williams M.L., Jercinovic M.J., Hetherington C.J. (2007). Microprobe monazite geochronology: understanding geologic processes by integrating composition and chronology. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, pp. 137-175. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140228>

About the Authors

Alexander B. Makeyev – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Leading Researcher, Laboratory of Ore Deposits Geology, Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation
E-mail: abmakeev@igem.ru

Sergey E. Borisovsky – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Laboratory of the Analysis of Minerals, Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation

Anna O. Krasotkina – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Head of the Project of Russian Foundation for Basic Research, Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences
2, Makarov emb., Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation

Manuscript received 25 September 2019;

Accepted 15 November 2019;

Published 30 March 2020