

## Th—U—Pb-датирование монацита из метаморфических пород иткульской свиты Сысертского комплекса (Средний Урал)\*

В. С. Пономарев, В. В. Хиллер, Ю. В. Ерохин

Институт геологии и геохимии УрО РАН,  
Российская Федерация, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

**Для цитирования:** Пономарев, В. С., Хиллер, В. В., Ерохин, Ю. В. (2019). Th—U—Pb-датирование монацита из метаморфических пород иткульской свиты Сысертского комплекса (Средний Урал). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64(2), 315–327. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.209>

Впервые методом химического Th—U—Pb-датирования получены данные о возрасте метаморфизма пород иткульской свиты Сысертского метаморфического комплекса — одного из крупнейших метаморфических образований Среднего Урала. Возраст субстрата и метаморфизма пород комплекса остается вопросом дискуссии, краткая суть которой сводится к тому, является ли метаморфизм древним докембрийским или палеозойским. Изучались ставролит-гранат-амфибол-хлоритовые породы из Глубочинского месторождения абразивного граната, которое частично отработано несколькими копиями. Исследуемые породы имеют порфиробластовую структуру и сложены хлоритом (клинохлор), амфиболом (натроферрожедрит, натрожедрит), гранатом ( $Alm_{78-65}$ ), ставролитом и плагиоклазом ( $An_{4-18}$ ). Акцессорные минералы — ильменит, фторапатит и монацит-(Ce). Выполнено микрозондовое исследование химического состава монацита, и методом химического Th—U—Pb-датирования определен его возраст, который варьирует от 273 млн до 314 млн лет при средне-взвешенном значении  $297 \pm 12$  млн лет и рассчитанной изохроне  $293 \pm 26$  млн лет (СКВО = 0,23). Возраст акцессорного монацита показывает, что образование метаморфических ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых пород иткульской свиты происходило в ранней перми. Эта датировка — одна из наиболее поздних среди опубликованных изотопных данных о возрасте метаморфических пород Сысертского комплекса, в которых, по всей видимости, зафиксирован либо возраст субстрата, либо наложенные тектонические события. Вероятно, метаморфические породы в северной части Сысертского метаморфического комплекса образовались в результате мощного термального события, происшедшего на границе пермского и каменноугольного времени.

*Ключевые слова:* химическое датирование, монацит, метаморфические породы, иткульская свита, Сысертский метаморфический комплекс, Глубочинское месторождение, Средний Урал.

---

\* Работа выполнена в рамках темы № 0393-2016-0019 государственного задания ИГГ УрО РАН.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

## 1. Введение

Сысертский комплекс — одно из крупнейших метаморфических образований Урала. Вопрос о возрасте субстрата и метаморфизма пород комплекса вызывает огромный интерес у исследователей и до сих пор остается предметом дискуссии, краткая суть которой сводится к тому, является ли метаморфизм древним докембрийским или палеозойским. Исследованию эволюции метаморфических образований Сысертского метаморфического комплекса различными геохронологическими методами посвящено множество публикаций. В одной из первых — работе (Кейльман, 1974) — приведены наиболее древние датировки, полученные  $\alpha$ -свинцовым и Rb—Sr-методами (1200–1400 млн лет) для пород шумихинской свиты. Датировки возраста пород, определенные K—Ar-методом, находятся в пределах 550–230 млн лет, что интерпретируется как более поздний этап метаморфизма пород. Геохронологические данные для пород черновской свиты соответствуют датировкам 480–320 млн лет (K—Ar-метод) и 600 млн лет и более ( $\alpha$ -свинцовый метод) (Кейльман, 1974). Другие исследователи (Краснобаев и др., 1978; 2009; Ронкин и др., 1993; Русин, 2004; и др.) не подтверждают докембрийский возраст пород в Сысертском метаморфическом комплексе. Для плагиогнейсов шумихинской свиты приводятся U—Pb-датировка  $576 \pm 65$  млн лет (Краснобаев и др., 2009) и Rb—Sr-датировка  $435 \pm 44$  млн лет, а для гранитизированных гнейсов — Rb—Sr-датировка  $260 \pm 6$  млн лет (Краснобаев и др., 1978). Исследователи связывают эти данные с этапами гранитизации региона. В работе (Русин, 2004) приводятся две полученные Sm—Nd-методом датировки:

- 1) 355–350 млн лет — соответствует, по мнению автора этой работы, возрасту зонального метаморфизма;
- 2) более поздняя пермь-триасовая — интерпретируется как время закрытия изотопных систем, фиксирующих более позднее термальное событие, связанное с формированием Мурзинско-Ильменогорской сдвиговой зоны.

В работе (Echtler et al., 1997) приведен возраст гнейсов шумихинской свиты, полученный Pb—Pb-методом по цирконам, варьирующий в широких пределах — от 482 до 210 млн лет. Датировки  $482 \pm 41$  и  $437 \pm 32$  млн лет авторы данной работы интерпретируют как возраст протолита, а более «молодые» отметки возраста, полученные Sm—Nd-методом,  $352 \pm 40$  млн лет (амфиболит (Ронкин и др., 1993)), объясняются временем орогенного метаморфизма. В этой же работе приведены данные возраста для плагиогранитов ( $435 \pm 33$  млн лет) и для гнейсов ( $254 \pm 4$  млн лет) шумихинской свиты, полученные Rb—Sr-методом, а также данные, полученные K—Ar-методом для пород черновской свиты: для амфиболитов — 278–232 млн лет, для плагиогнейсов — 200–245 млн лет и для гранитов — 262–257 млн лет. Эти пермь-триасовые датировки исследователи интерпретируют как продолжительность времени остывания системы при метаморфизме. Одни из них (см., например: (Русин, 2004)) полагают, что образование метаморфитов — это результат термального события, связанного с надсубдукционным тоналит-гранодиоритовым магматизмом, а по мнению других (см., например: (Echtler et al., 1997)), Сысертский комплекс представляет собой надсубдукционную аккреционную призму с деформированными гнейсами, гранитными интрузиями, метавулканическими породами и метамор-

физованной зоной меланжа, эволюция пород которой происходила по следующим этапам:

- предорогенный рифтогенез и магматизм в ордовике и силуре;
- образование острой дуги, связанной с субдукцией в девонское время;
- пластические деформации в условиях амфиболитовой фации в каменноугольное время;
- экзгумация и уменьшение внутриконтинентальной тектоники в пермское время;
- охлаждение пород и завершение орогенеза в триасовое время.

В настоящей работе приведены первые возрастные данные по акцессорным монацитам из ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых пород иткульской свиты Сысертского метаморфического комплекса, а именно из Глубочинского месторождения абразивного граната, полученные методом химического Th—U—Pb-датирования.

## 2. Объект исследования

Сысертский метаморфический комплекс расположен на границе Среднего и Южного Урала и является частью более крупного Сысертско-Ильменогорского метаморфического комплекса (Кейльман, 1974; Калугина и др., 2017). Сысертский комплекс имеет сложное геологическое строение. В основании стратиграфического разреза комплекса лежат гнейсы, гранитогнейсы и амфиболиты шумихинской свиты, слагающие Шумихинский гнейсово-мигматитовый купол (рис. 1). Выше в разрезе выделена вишневогорская свита, представленная глубоко метаморфизованными биотитовыми гнейсами, амфиболитами и графитсодержащими кварцитами. Породы этой свиты представлены только в южной части Сысертского комплекса. Далее в разрезе выделена черновская свита. Ее породы представлены преимущественно амфиболитами с небольшим количеством биотитовых гнейсов и, редко, — графитсодержащих кварцитов. Метаморфиты черновской свиты конформно облегают шумихинский купол. Выше по разрезу залегают плагиосланцы, микроамфиболиты и графитсодержащие кварциты иткульской свиты. Она условно разделена на верхне- и нижнеиткульскую подсвиты. В составе последней преобладают микроамфиболиты и плагиосланцы биотитовые, а в верхнеиткульской — плагиосланцы. Завершают разрез Сысертского комплекса породы игишской свиты, которые представлены графитсодержащими кварцитами с прослоями слюдисто-кварцевых, гранат-слюдисто-кварцевых сланцев и плагиосланцев (Калугина и др., 2017). В обрамлении Шумихинского купола наблюдается множество тел метаультрабазитов, представленных антофиллитовыми, тремолитовыми и тремолит-антофиллитовыми породами, а также тальк-карбонатными породами (Кейльман, 1974; Калугина и др., 2017).

Глубочинское месторождение абразивного граната находится в 5 км к северо-западу от с. Космакова в Сысертском районе Свердловской области. Определенные по GPS-приемнику координаты месторождения — 56°23'84,2" с. ш., 60°48'74,7" в. д. Добытые здесь крупные, хорошо образованные кристаллы граната размером до 10–13 см украшают коллекции многих минералогических музеев России. Однако

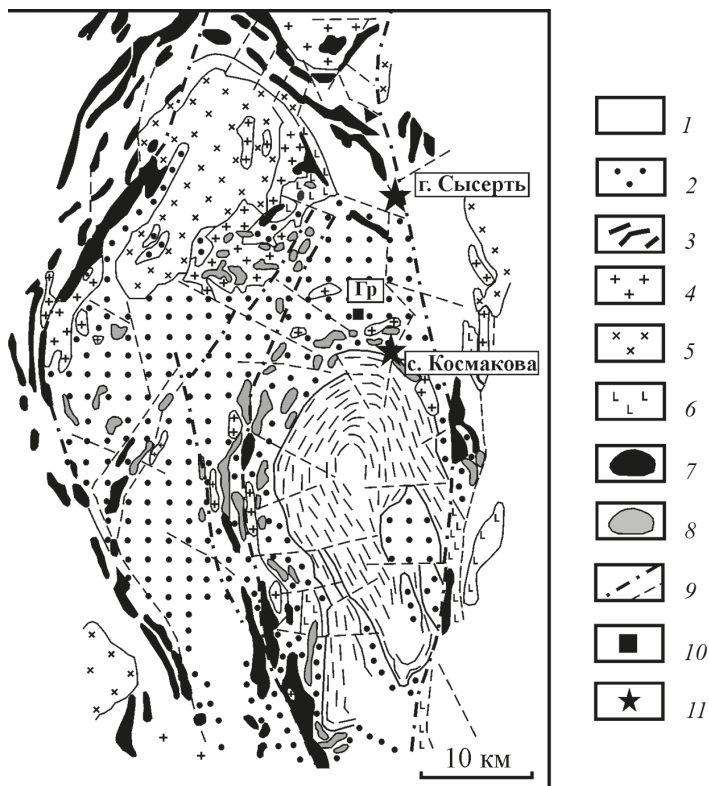


Рис. 1. Геологическая карта Сысертского метаморфического комплекса (Кудрявцев и др., 1976) (составлена Г. А. Кейльманом и Г. А. Глушковой):

1 — карбонатно-сланцевая толща; 2 — амфиболиты, амфиболовые и биотит-амфиболовые гнейсы (черновская, иткульская, игишская свиты); 3 — гнейсы биотитовые, гранито-гнейсы и мигматиты (шумихинская свита); 4 — граниты; 5 — плагиограниты, плагиогранодиориты, кварцевые диориты, гранодиориты; 6 — амфиболиты апогаббровые и габбро; 7 — серпентиниты, тальк-карбонатные породы; 8 — антофиллитовые породы; 9 — тектонические нарушения; 10 — Глубочинское месторождение (Гм); 11 — населенные пункты

в настоящий момент добыча на месторождении не ведется, и оно представляет собой две выработки размером  $5 \times 5$  м, глубиной 3 м, расположенные в 15 м друг от друга. Ими вскрыты коренные породы, представленные гранат-амфиболовыми, ставролит-гранат-амфибол-хлоритовыми, гранат-хлоритовыми сланцами и гнейсами. На дневной поверхности метаморфические породы подверглись значительному выветриванию.

Мы выполнили химическое микрозондовое датирование монацита, который содержится в ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых породах. Исследованные породы имеют следующий состав: хлорит (примерно 50%), амфибол (примерно 25%), гранат (примерно 15%), ставролит (примерно 5%) и плагиоклаз (примерно 4%). Акцессорные минералы (в сумме примерно 1%) — ильменит, фторапатит и мона-

цит. Породы имеют порфирибластовую и нематолепидобластовую структуру, массивную текстуру.

Порфирибласты в породе представлены гранатом и ставролитом.

Гранат образует кристаллы ромбо-додекаэдрического габитуса красно-коричневого цвета. Обычный их размер варьирует от 0,5 до 4,5 см (очень редко встречаются отдельные индивиды до 12 см в диаметре). В гранате наблюдаются минеральные включения, представленные ильменитом, хлоритом, плагиоклазом и амфиболом. По химическому составу гранат соответствует альмандину ( $Alm_{78-65}$ ), который характеризуется прогрессивной зональностью (Пономарев и Кувшинский, 2013).

Ставролит образует вытянутые порфирибласты до 2,7 см по удлинению. Цвет минерала темно-коричневый. В породе он наблюдается среди скоплений зерен плагиоклаза, амфибола и расщепленных агрегатов хлорита. Зерна минерала часто разбиты трещинами, иногда они выполнены ильменитом. Из включений в минерале наблюдаются ильменит, фторапатит и монацит.

Хлорит — один из главных породообразующих минералов породы, слагающий ее основную матрицу, в которую погружены гранат, ставролит, амфибол и плагиоклаз. Хлорит в виде включений встречается во всех породообразующих минералах. Цвет минерала темно-зеленый. По химическому составу он соответствует железистому клинохлору.

Плагиоклаз образует вытянутые и неправильной формы зерна до 1 см. По химическому составу часть зерен соответствует альбиту ( $An_4$ ), а часть — олигоклазу ( $An_{18}$ ).

Амфибол в породе представлен вытянутыми расщепленными и игольчатыми зернами размером до 7 см по удлинению. Цвет минерала коричневатозеленый (рис. 2). Минерал по химическому составу неоднороден — изменяется в пределах одного зерна от натроферрожедрита до натрожедрита (Пономарев и Хиллер, 2013).

Фторапатит встречается в виде включений в гранате и хлорите. Образует мелкие зерна размером не более 0,25 мм.

Ильменит образует вкрапленности в породообразующем хлорите, а также в акцессорном гранате и ставролите. В гранате нередко наблюдаются включения ильменита, ориентированные параллельно слоистости породы.

### 3. Метод исследования

Химический состав и возраст акцессорного монацита определены с помощью рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализатора САМЕСА

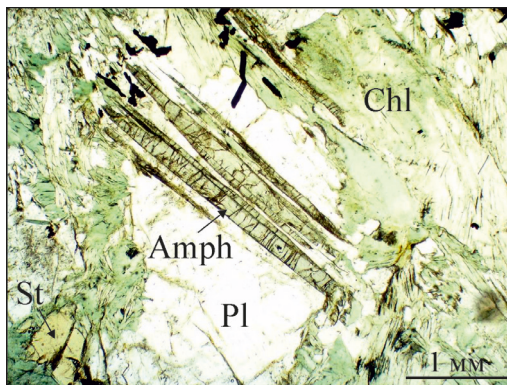


Рис. 2. Игольчатые зерна амфибола в ставролит-гранат-амфибол-хлоритовой породе (без анализатора, полированный шлиф):

Chl — хлорит, Pl — плагиоклаз, Amph — амфибол, Ilm — ильменит

SX 100 в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург), аналитик В. В. Хиллер. Интенсивность характеристического рентгеновского излучения измеряли при ускоряющем напряжении 15 кВ, силе тока 270 нА и диаметре пучка электронов 5 мкм. Учет интенсивности регистрировался по  $K\alpha$ -,  $L\alpha$ -,  $M\alpha$ - и  $M\beta$ -линиям на пяти наклонных волновых спектрометрах (угол отбора рентгеновского излучения  $40^\circ$ ). Время измерения интенсивности на пике в 2 раза превышало время измерения фона и составило для тория, урана и свинца 200 с, для иттрия и кремния — 20 с, для остальных элементов — 10 с (Попова и др., 2010; Королюк и Нигматулина, 2013; Королюк, 2014). В качестве стандартов для выполнения работы использовались торианит, уранинит,  $Pb_2P_2O_7$ , диопсид и весь ряд синтетических фосфатов редкоземельных элементов (Лаврентьев и др., 2011). Пределы обнаружения элементов в минерале: торий — 209 г/т, уран — 115 г/т и свинец — 88 г/т. Средневзвешенное значение содержания оксидов U—Th—Pb в 22 точках анализов монацита:  $UO_2$  — 0,55 мас. %;  $ThO_2$  — 3,48 мас. %;  $PbO$  — 0,07 мас. %. Метод датирования минералов по химическому составу, полученному с помощью микрозондового анализа, описан в литературе (Montel et al., 1996; Suzuki and Kato, 2008; Naemura et al., 2008; и многие другие). Главное условие метода химического датирования — в ходе эволюции в минерале должен сохраняться радиогенный свинец, который образовался только за счет радиоактивного распада тория и урана. Возраст для монацита рассчитан и путем единичного определения содержания урана, тория и свинца в точке по методу (Montel et al., 1996), и путем построения графика  $PbO—ThO_2^*$  по методу CHIME<sup>1</sup> (Suzuki and Adachi, 1991; Suzuki and Kato, 2008), где по углу наклона изохроны определяется возраст и его погрешность. Здесь  $ThO_2^* = (ThO_2 + UO_2^{экв})$ , где  $UO_2^{экв}$  — содержание урана, пересчитанное в эквивалентное содержание тория, способное произвести то же количество свинца за время жизни системы при равенстве U—Pb и Th—Pb значений возраста.

#### 4. Результаты химического датирования

Монацит встречен в виде мелких (20–80 мкм) включений в плагиоклазе, хлорите и ставролите. Форма зерен редкоземельного фосфата вытянутая, веретенообразная, часто в виде хорошо окристаллизованных короткопризматических индивидов (рис. 3). Монацит не содержит минеральных включений, никакой химической зональности в индивидах не обнаружено.

В результате исследования было сделано 22 микрозондовых анализа монацита и рассчитан их возраст (табл. 1). По химическому составу минерал является монацитом-(Ce) и характеризуется высокими содержаниями примесей (табл. 2). Сумма анализов минерала близка к 100 мас. % — это свидетельствует об отсутствии вторичных изменений. Возраст монацита при его химическом датировании характеризуется интервалом значений от 282 млн до 304 млн лет при средневзвешенном значении  $297 \pm 12$  млн лет (СКВО = 0,15) (рис. 4). Изохрона  $PbO—ThO_2^*$  показала возраст  $293 \pm 26$  млн лет (СКВО = 0,23) (рис. 5), что соответствует ранней перми.

<sup>1</sup> Chemical Th—U-total Pb isochron method.

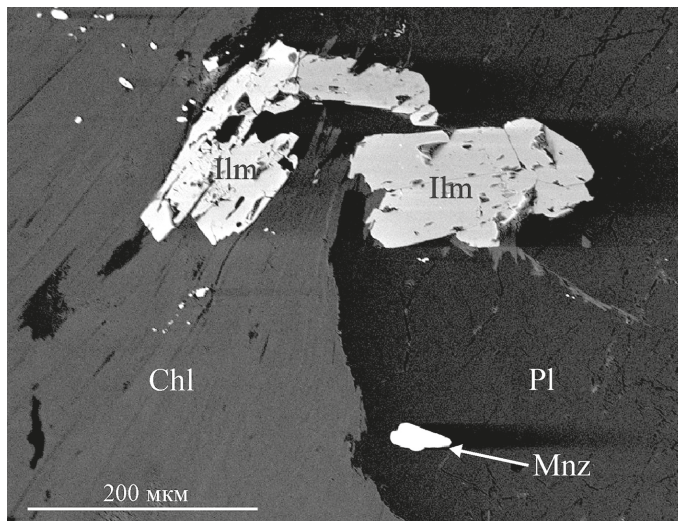


Рис. 3. Включение монацита в зерне плагиоклаза (микронализатор CAMECA SX 100, изображение в обратно отраженных электронах):

Mnz — монацит, Chl — хлорит, Pl — плагиоклаз, Ilm — ильменит

## 5. Обсуждение результатов

В объяснительной записке к государственной геологической карте (Калугина и др., 2017) отмечено, что Глубочинское месторождение абразивного граната сложено линзовидными телами небольшого размера, представленными гранат-хлоритовыми и гранат-амфибол-хлоритовыми породами, залегающими среди сланцев среднерифейской иткульской свиты (верхнеиткульской подсвиты). Там же отмечено, что породы иткульской свиты (относимой к среднему рифею) по характеру разреза, набору пород и степени их метаморфизма близки с ранее выделенными на этой территории породами сайтовской и аракульской свит, поэтому они были объединены. В работе (Краснобаев и др., 2009) приведены три U—Pb-датировки (цирконы, SHRIMP II) плагиогнейсов аракульской свиты:  $462,9 \pm 3,4$  млн лет,  $438 \pm 6,9$  млн лет и  $402 \pm 6,5$  млн лет. Более древний возраст авторы этой работы интерпретируют как время образования породы, остальные две датировки — как этапы структурных преобразований цирконов в породе.

Раннепермская датировка, полученная нами для монацита из ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых пород иткульской свиты, показывает время метаморфизма породы. Эта датировка — одна из наиболее поздних среди полученных в предыдущих исследованиях изотопных данных для метаморфических пород Сысертского комплекса. Эти данные, по всей видимости, фиксировали либо возраст субстрата (древние датировки цирконов, а также Rb—Sr- и Sm—Nd-датировки), либо наложенные тектонические события (молодой по K—Ar- и Rb—Sr-датировке возраст). Полученный нами возраст очень близок к датировкам монацита из ранее изученных монацитов из кианитовых гнейсов (изохрона  $292 \pm 11$  млн лет) шумихинской свиты (Пономарев и др., 2017), а также к датировкам уранинита ( $300 \pm 3$  млн лет)

Таблица 1. Химический состав (масс. %) и возраст монацитов (млн лет) в точках анализа

Номер точки	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	CaO	Сумма	Возраст
1	30,62	5,02	0,28	0,15	24,26	10,28	16,45	3,33	3,77	2,47	0,55	1,63	0,07	0,79	99,68	283
2	30,37	4,75	0,43	0,12	22,87	9,59	15,96	3,17	4,62	3,98	0,75	2,01	0,07	0,78	99,47	283
3	30,62	3,95	0,37	0,11	23,04	9,72	16,20	3,18	4,44	3,72	0,84	1,94	0,07	0,67	98,87	311
4	30,39	4,09	0,35	0,12	23,82	10,06	16,24	3,20	4,45	3,66	0,70	1,78	0,06	0,68	99,61	292
5	29,70	7,94	0,46	0,37	21,42	8,90	15,05	2,90	4,36	3,74	0,83	2,06	0,12	1,16	98,99	290
6	30,94	1,87	0,68	0,01	24,43	10,57	16,64	3,37	4,53	3,58	0,77	2,12	0,05	0,42	99,98	308
7	30,93	4,81	0,66	0,06	23,05	9,63	15,90	3,16	4,56	3,56	0,72	2,10	0,09	0,96	100,19	304
8	30,83	4,84	0,56	0,09	23,77	9,80	15,79	3,12	4,47	3,63	0,69	2,00	0,09	0,83	100,50	303
9	30,49	6,28	0,43	0,24	22,13	9,29	15,57	3,17	4,31	3,32	0,84	2,09	0,10	0,96	99,23	298
10	30,81	3,76	0,41	0,09	23,21	9,73	16,01	3,11	4,34	3,84	0,81	1,98	0,07	0,63	98,79	311
11	30,91	2,97	0,43	0,07	23,95	9,76	16,39	3,08	4,54	3,89	0,76	2,05	0,05	0,53	99,39	297
12	30,57	2,65	0,38	0,07	24,14	9,74	16,47	3,37	4,57	3,89	0,87	1,92	0,05	0,46	99,15	305
13	30,56	2,98	0,38	0,11	23,69	9,93	16,60	3,35	4,44	3,84	0,71	1,93	0,06	0,55	99,12	309
14	30,78	4,30	0,53	0,08	23,18	9,59	16,27	3,00	4,50	3,77	0,70	1,99	0,07	0,75	99,50	284
15	29,73	0,97	1,33	0,00	28,48	13,12	17,54	3,62	3,31	0,94	0,00	0,05	0,06	0,39	99,55	279
16	30,20	1,38	0,48	0,01	25,36	12,05	16,62	3,27	4,15	2,99	0,54	1,39	0,03	0,31	98,77	273
17	29,90	3,87	0,48	0,11	24,60	11,33	15,75	3,21	4,00	2,91	0,72	1,93	0,07	0,62	99,50	314
18	30,26	2,88	0,41	0,07	25,21	11,61	15,92	3,30	3,91	2,98	0,73	1,77	0,05	0,49	99,60	306
19	30,32	3,47	0,44	0,10	24,38	11,33	15,71	3,37	3,97	3,02	0,76	1,90	0,06	0,59	99,41	298
20	30,42	2,42	0,93	0,03	26,42	12,22	16,50	3,36	3,73	2,25	0,40	0,82	0,07	0,52	100,08	300
21	29,95	0,66	0,54	0,00	26,22	12,25	16,32	3,44	3,87	2,78	0,68	1,60	0,03	0,18	98,54	299
22	30,55	0,68	1,03	0,02	27,68	12,69	17,91	3,76	3,39	1,23	0,00	0,09	0,05	0,30	99,38	289



Таблица 2. Содержание примесей в монаците-(Ce)

Примесь	Содержание, масс. %	Примесь	Содержание, масс. %	Примесь	Содержание, масс. %
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	До 17,91	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	До 4,62	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	До 2,12
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	До 13,12	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	До 3,98	UO <sub>2</sub>	До 1,33
ThO <sub>2</sub>	До 7,94	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	До 3,76	CaO	До 1,16

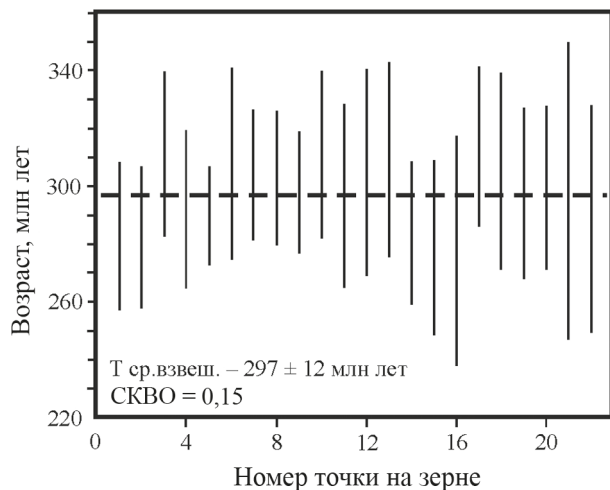


Рис. 4. Возраст монацита в единичных точках анализа: вертикальные линии — средневзвешенное значение возраста

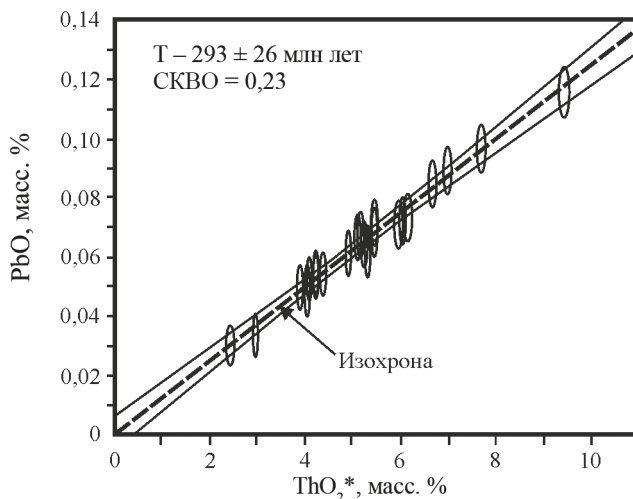


Рис. 5. ThO<sub>2</sub>\*—PbO-диаграмма с изохроной, построенная по результатам изучения монацитов из ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых пород Сысертского комплекса:

сплошные линии — границы погрешности, овалы — эллипсы погрешности

из оруденелых метагипербазитов Сысертского комплекса (Мурзин и др., 2015). Вероятно, метаморфизм в северной части Сысертского метаморфического комплекса, образование ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых пород иткульской свиты Сысертского метаморфического комплекса, а также образование кианитовых гнейсов шумихинской свиты и обрамляющих их метагипербазитов происходили под влиянием единого термального события на границе карбона и перми.

## 6. Заключение

Нами изучен химический состав акцессорного монацита, который был найден в ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых породах, залегающих среди сланцев иткульской свиты Сысертского метаморфического комплекса. Путем Th—U—Pb-датирования установлен возраст этого редкоземельного фосфата, соответствующий ранней перми (средневзвешенное значение  $297 \pm 12$  млн лет и изохрона  $293 \pm 26$  млн лет, СКВО = 0,23). Полученная датировка соответствует раннепермскому возрасту образования ставролит-гранат-амфибол-хлоритовых пород иткульской свиты и, вероятно, отражает позднекарбонный — раннепермский возраст метаморфизма пород в северной части Сысертского метаморфического комплекса.

## Литература

- Кейльман, Г. А., 1974. Мигматитовые комплексы подвижных поясов. Недра, Москва.
- Калугина, Р. Д., Копанев, В. Ф., Стороженко, Е. В., Лукин, В. Г., Степанов, А. Е., Михалева, Е. Н., Рапопорт, М. С., Ильясова, Г. А., Суслов, Д. Л., Шуб, И. З., Михайлов, А. П., Глазырина, Н. С., Герасименко, Б. Н., 2017. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. 2-е изд. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXXI. Объяснительная записка, Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», Москва.
- Королюк, В. Н., 2014. Метрологические характеристики определения свинца в фосфатах редких земель методом электронно-зондового микроанализа, Журнал аналитической химии 66(11), 1166–1172.
- Королюк, В. Н., Нигматулина, Е. Н., 2013. Регистрация Ма-линии свинца в фосфатах редких земель на микроанализаторе JEOL JXA-8100. Журнал аналитической химии 68(9), 865–872.
- Краснобаев, А. А., Ронкин, Ю. Л., Степанов, А. И., Лепихина, О. П., 1978. О возрасте гранитизации и природе субстрата гнейсов Сысертско-Ильменогорского комплекса. Ежегодник-1977, 3–6.
- Краснобаев, А. А., Пужаков, Б. А., Петров, В. И., Бушарина, С. В., 2009. Цирконология метаморфитов Кыштымской-Аракульской толщ Сысертско-Ильменогорского комплекса. Ежегодник-2008, 156, 264–268.
- Кудрявцев, В. Н., Хмара, А. Я., Костырев, И. М., Романович, И. Ф., Кейльман, Г. А., 1976. Сысертский антофиллит-асбестоносный район, в: Месторождения антофиллит-асбеста СССР / Романович, И. Ф. (под ред.). Недра, Москва, 10–86.
- Лаврентьев, Ю. Г., Романенко, И. М., Новиков, М. П., Усова, Л. В., Королюк, В. Н., 2011. Синтетические кристаллы  $\text{TRPO}_4$  — образцы сравнения при количественном рентгеноспектральном микроанализе редкоземельных минералов. Журнал аналитической химии 66(9), 947–953.
- Мурзин, В. В., Хиллер, В. В., Варламов, Д. А., 2015. Возрастное положение золото-сульфидного оруденения в метагипербазитах Сысертского метаморфического комплекса на Среднем Урале. Литосфера 4, 87–92.
- Пономарев, В. С., Хиллер, В. В., 2013. Минералы ряда натрожедрит-натроферрожедрит из ставролит-гранат-плаггиоклаз-амфибол-хлоритовых пород Сысертского метаморфического комплекса (Средний Урал). Четырнадцатые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова, 34–38.

- Пономарев, В. С., Кувшинский, А. С., 2013. Гранат и ставролит из метаморфических пород Гранатовой копи Сысертского района (Природный парк «Бажовские места», Средний Урал). Вестник Уральского отделения Минералогического общества 10, 83–88.
- Пономарев, В. С., Хиллер, В. В., Ерохин, Ю. В., 2017. Th—U—Pb-датирование монацита из кианитовых гнейсов Сысертского метаморфического комплекса (Средний Урал). Вестник ВГУ. Серия: Геология 3, 61–65.
- Попова, В. И., Хиллер, В. В., Ерохин, Ю. В., Попов, В. А., 2010. Монациты поздних гранитных пегматитов Ильменских гор: химическое датирование возраста зонально-секториальных кристаллов. Новые данные о минералах 45, 72–78.
- Ронкин, Ю. Л., Носков, А. Г., Журавлев, Д. З., 1993. Sm—Nd-изотопная система Сысертского гнейсово-мигматитового комплекса. Ежегодник-1992, 135–139.
- Русин, А. И., 2004. Метаморфические комплексы Урала и проблема эволюция метаморфизма в полном цикле развития литосферы подвижных поясов. URL: <http://earthpapers.net/metamorficheskie-kompleksy-urala-i-problema-evolyutsii-metamorfizma-v-polnom-tsikle-razvitiya-litosfery-podvizhnyh-poyaso> (дата обращения: 05.05.2019).
- Echtler, H. P., Ivanov, K. S., Ronkin, Yu. L., Karsten, L. A., Hetzel, R., Noskov, A. G., 1997. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal. Tectonophysics 276, 229–251.
- Montel, J.-M., Foret, S., Veschambre, M., Nicollet, C., Provost, A., 1996. Electron microprobe dating of monazite. Chemical Geology 131, 37–53.
- Naemura, K., Yokoyama, K., Hirajima, T., Svojtka, M., 2008. Age determination of thorianite in phlogopite-bearing spinel-garnet peridotite in the Gfohl Unit, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. Journal Mineralogy Petrology 103, 285–290.
- Suzuki, K., Adachi, M., 1991. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. Geochemistry Journal 25, 357–376.
- 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, 569–586.

Статья поступила в редакцию 29 августа 2018 г.

Статья рекомендована в печать 18 марта 2019 г.

#### Контактная информация:

Пономарев Владимир Сергеевич — p123v@yandex.ru

Хиллер Вера Витальевна — hilvervit@mail.ru

Ерохин Юрий Викторович — erokhin-yu@yandex.ru

### Th—U—Pb-dating of monazite from the metamorphic rocks of the Itkul formation of the Sysert Complex (Middle Urals)

V. S. Ponomarev, V. V. Khiller, Y. V. Erokhin

Institute of Geology and Geochemistry RAS, Ural Branch,  
15, ul. Academica Vonsovskogo, Ekaterinburg, 620016, Russian Federation

**For citation:** Ponomarev, V. S., Khiller, V. V., Erokhin, Y. V. (2019). Th—U—Pb-dating of monazite from the metamorphic rocks of the Itkul formation of the Sysert Complex (Middle Urals). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (2), 315–327. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.209> (In Russian)

New data were obtained on the age of metamorphism of the rocks of the Itkul formation of the Sysert Metamorphic Complex (Middle Urals). Amphibole-chlorite rocks from the Glubochinskoye deposit of the garnet were studied, which was partially worked by several

mines. The investigated rocks are composed of chlorite (clinocllore), amphibole (sodic-ferrozhedrite, sodic-zhedrit), garnet (Alm<sub>78-65</sub>), staurolite, plagioclase (An<sub>4-18</sub>), ilmenite, fluorapatite and monazite-(Ce). We performed a microprobe study of the chemical composition of monazite and determined the age of the mineral using the Th—U—Pb dating method. The age of the monazite is from 273 to 314 Ma, a weighted average of 297 ± 12 Ma and isochrone of 293 ± 26 Ma (MSWD = 0.23). The age of accessory monazite shows that the formation of amphibole-chlorite rocks occurred in the early Permian times. Probably, the transformation of metamorphic rocks in the northern part of the Sysert metamorphic complex occurred at the Permian and Carboniferous boundary under the influence of a powerful thermal event. At present, this is the subject of discussions. Some researchers believe that metamorphic rocks were formed as a result of a thermal event associated with suprasubduction tonalite-granodiorite magmatism, while others posit that the Sysert complex was formed as a suprasubduction accretion prism.

*Keywords:* chemical dating, monazite, metamorphic rocks, Itkul formation, Sysert Metamorphic Complex, Glubochinskoye deposit, Middle Urals.

## References

- Echtler, H. P., Ivanov, K. S., RonkinYu. L., Karsten, L. A., Hetzel, R., Noskov, A. G., 1997. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal. *Tectonophysics* 276, 229–251.
- Hammarstrom, J. M., Zen, E.-An., 1986. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist* 71 (11/12), 1297–1313.
- Keil'man, G. A., 1974. Migmatitovye komplekсы podvizhnykh poiasov [Migmatitic complexes of mobile belts]. Nedra Publ., Moscow. (In Russian)
- Kalugina, R. D., Kopanev, V. F., Storozhenko, E. V., Lukin, V. G., Stepanov, A. E., Mikhaleva, E. N., Rapoport, M. S., Il'iasova, G. A., Suslov, D. L., Shub, I. Z., Mikhailov, A. P., Glazyrina, N. S., Gerasimenko, B. N., 2017. Gosudarstvennaia geologicheskaiia karta Rossiiskoi Federatsii. Mashtab 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriiia Sredneural'skaia. List O-41-XXXI. Ob"iasnitel'naia zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200000. Second edition. Series Sredneural'skaya. Sheet O-41-XXXI. Explanatory note]. VSEGEI Publ., Moscow. (In Russian)
- Koroliuk, V. N., Nigmatulina, E. N., 2013. Registratsiia Ma-linii svintsa v fosfatakh redkikh zemel' na mikroanalizatore JEOL JXA-8100 [Registration of the Ma-line of lead in rare earth phosphates on the JEOL JXA-8100 microanalyzer]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry] 68 (9), 865–872. (In Russian)
- Koroliuk, V. N., 2014. Metrologicheskie kharakteristiki opredeleniia svintsa v fosfatakh redkikh zemel' metodom elektronno-zondovogo mikroanaliza [Metrological characteristics of the determination of lead in phosphates of rare earths by the method of electron-probe microanalysis]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry] 66 (11), 1166–1172. (In Russian)
- Krasnobaev, A. A., Ronkin, Iu. L., Stepanov, A. I., Lepikhina, O. P., 1978. O vozraste granitizatsii i prirode substrata gneisov Sysertsko-Il'menogorskogo kompleksa [On the age of granitization and the nature of the gneiss substrate of the Sysert-Ilmenogorsky complex]. *Ezhegodnik-1977* [Yearbook-1977], 3–6. (In Russian)
- Krasnobaev, A. A., Puzhakov, B. A., Petrov, V. I., Busharina, S. V., 2009. Tsirkonologiiia metamorfитov Kyshtym-skoi-Arakul'skoi tolshch Sysertsko-Il'menogorskogo kompleksa [Zirconology of metamorphites of the Kyshtym-Arakul thickness of the Sysert-Ilmenogorsky complex]. *Ezhegodnik-2008* [Yearbook-2008] 156, 264–268. (In Russian)
- Kudriavtsev, V. N., Khmara, A. Ia., Kostyrev, I. M., Romanovich, I. F., Keil'man, G. A., 1976. Sysertskaia antofillit-asbestonosnyi raion [Sysert anthophyllite-asbestos region], in: Mestorozhdeniia antofillit-asbesta SSSR [Deposits of anthophyllite-asbestos of the USSR] / Romanovich, I. F. (ed.). Nedra Publ., Moscow, 10–86. (In Russian)
- Lavrent'ev, Iu. G., Romanenko, I. M., Novikov, M. P., Usova, L. V., Koroliuk, V. N., 2011. Sinteticheskie kristally TRPO<sub>4</sub> — obratzы sravneniia pri kolichestvennom rentgenospektral'nom mikroanalize redkozemel'nykh mineralov [Synthetic TRPO<sub>4</sub> crystals-comparison samples for quantitative X-ray microanal-

- ysis of rare-earth minerals]. *Zhurnal analiticheskoi khimii* [Journal of Analytical Chemistry] 66(9), 947–953. (In Russian)
- Murzin, V. V., Khiller, V. V., Varlamov, D. A.*, 2015. Vozrastnoe polozhenie zoloto-sul'fidnogo orudneniia v metagiperbazitakh Sysertskego metamorficheskogo kompleksa na Srednem Urале [Age position of gold-sulfide mineralization in metaultrabasites of the Sysert metamorphic complex in the Middle Urals]. *Litosfera* [Lithosphere] 4, 87–92. (In Russian)
- Montel, J.-M., Foret, S., Veschambre, M., Nicollet, C., Provost, A.*, 1996. Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology* 131, 37–53.
- Naemura, K., Yokoyama, K., Hirajima, T., Svojtka, M.*, 2008. Age determination of thorianite in phlogopite-bearing spinel-garnet peridotite in the Gfohl Unit, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Journal Mineralogy Petrology* 103, 285–290.
- Ponomarev, V. S., Khiller, V. V.*, 2013. Mineraly riada natrozhdrit-natroferrozhdrit iz stavrolit-granat-plagioklaz-amfibol-khloritovykh porod Sysertskego metamorficheskogo kompleksa (Srednii Ural) [Minerals of a number of sodic-gedrite-sodic-ferrogedrite from staurolite-garnet-plagioclase-amphibole-chlorite rocks of the Sysert metamorphic complex (Middle Urals)]. *Chetyrnadsatye Vserossiiskie nauchnye chteniia pamiati il'menskogo mineraloga V. O. Poliakova* [Fourteenth All-Russian scientific readings in memory of the Ilmen mineralogist V. O. Polyakov], 34–38. (In Russian)
- Ponomarev, V. S., Kuvshinskii, A. S.*, 2013. Granat I stavrolit iz metamorficheskikh porod Granatovoi kopi Sysertskego raiona (Prirodnyi park «Bazhovskie mesta», Srednii Ural) [Garnet and staurolite from metamorphic rocks of the Garnet mine of the Sysert District (Natural Park “Bazhov Places”, Middle Urals)]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniia Mineralogicheskogo obshchestva* [Bulletin of the Ural Branch of the Mineralogical Society] 10, 83–88. (In Russian)
- Ponomarev, V. S., Khiller, V. V., Erokhin, Iu. V.*, 2017. Th—U—Pb-datirovaniie monazita iz kyanitovogo gneissovogo kompleksa (Srednii Ural) [Th—U—Pb-dating of monazite from the kyanite gneisses of the Sysert Metamorphic Complex (Middle Urals)]. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya* [Bulletin of the VSU. Series: Geology] 3, 61–65. (In Russian)
- Popova, V. I., Khiller, V. V., Erokhin, Iu. V., Popov, V. A.*, 2010. Monazity pozdnykh granitnykh pegmatitov Il'menskikh gor: khimicheskoe datirovaniie vozrasta zonal'no-sektorial'nykh kristallov [Mozites of the late granitic pegmatites of the Ilmen mountains: chemical dating of the age of zonal sectorial crystals]. *Novye dannye o mineralakh* [New data on minerals] 45, 72–78. (In Russian)
- Ronkin, Iu. L., Noskov, A. G., Zhuravlev, D. Z.*, 1993. Sm—Nd izotopnaia sistema Sysertskego gneissovo-migmatitovogo kompleksa [Sm—Nd isotope system of the Sysert gneiss-migmatite complex]. *Ezhegodnik-1992* [Yearbook-1992], 135–139. (In Russian)
- Rusin, A. I.*, 2004. Metamorficheskie kompleksy Urala I problema evoliutsii metamorfizma v polnom tsikle razvitiia litosfery podvizhnykh poiasov [Metamorphic complexes of the Urals and the problem of the evolution of metamorphism in the full cycle of development of the lithosphere of mobile belts]. URL: <http://earthpapers.net/metamorficheskie-kompleksy-urala-i-problema-evolyutsii-metamorfizma-v-polnom-tsikle-razvitiya-litosfery-podvizhnyh-poyaso> (access date: 05.05.2019). (In Russian)
- Suzuki, K., Adachi, M.*, 1991. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrain, Northeast Japan, revealed by the chemical Th—U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochemistry Journal* 25, 357–376.
- 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, 569–586.

Received: August 29, 2018

Accepted: March 18, 2019

#### Author's information:

Vladimir S. Ponomarev — p123v@yandex.ru

Vera V. Khiller — hilvervit@mail.ru

Yuriy V. Erokhin — erokhin-yu@yandex.ru