

УДК 553.9+553.21

РЕДКИЕ Th–Sc-МИНЕРАЛЫ В ПИКРИТАХ ЮЖНОГО УРАЛА  
И ИХ ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕС. Г. Ковалев\*, член-корреспондент РАН В. Н. Пучков,  
С. С. Ковалев, С. И. Высоцкий

Поступило 02.08.2018 г.

Приведены первые данные о находке Th–Sc-минерализации в пикритовых комплексах Южного Урала. Описаны собственные минералы Th: торит, Sc-содержащие ториевые минералы. Вывод: формирование Th–Sc-минерализации обусловлено кристаллизацией остаточного расплава в локальном объеме.

*Ключевые слова:* Южный Урал, пикриты, ториевая минерализация, Sc-содержащий ториевый минерал, кристаллизация, остаточный расплав.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846721-724>

Ишлинский пикритовый комплекс входит в состав южноуральской пикритовой ассоциации, тела которой — южное продолжение зоны распространения пикритов Западно-Уральского поднятия и прилегающей части Восточно-Европейской платформы (рис. 1). Комплекс представлен тремя разобщёнными выходами (“Курманайская дайка”, Ишлинские пикриты, пикриты руч. Интурат), протягивающимися в субмеридиональном направлении более чем на 8–10 км. Породы относятся к среднему рифею, что основано на определении возраста Sm–Nd-методом по трём валовым составам и трём монофракциям пироксенов из них:  $1270 \pm 56$  млн лет (СКВО = 1,11), а аппроксимация точек (валовая проба, клинопироксен, ортопироксен) одного образца дала изохрону с наклоном, отвечающим  $T = 1291 \pm 67$  млн лет (СКВО = 0,66) [7, 8].

Для пород характерны порфирированные, пойкилитовые близкие к кумулятивным структуры с идиоморфными и субидиоморфными кристаллами оливина (20–50 об.%) и пироксенов (40–50 об.%), сцементированные ксеноморфными кристаллами основного плагиоклаза (рис. 2а, б). В качестве второстепенных минералов присутствуют высокомагнезиальный биотит и коричневая роговая обманка. Акцессорные минералы: апатит, ильменит, магнетит, хромшпинелид и сульфиды, представленные пирротинном, халькопиритом, пентландитом, миллеритом [4].

При детальном изучении минералогии пород комплекса на растровом электронном микроскопе

*Институт геологии Уфимского  
федерального исследовательского центра  
Российской Академии наук, Уфа*

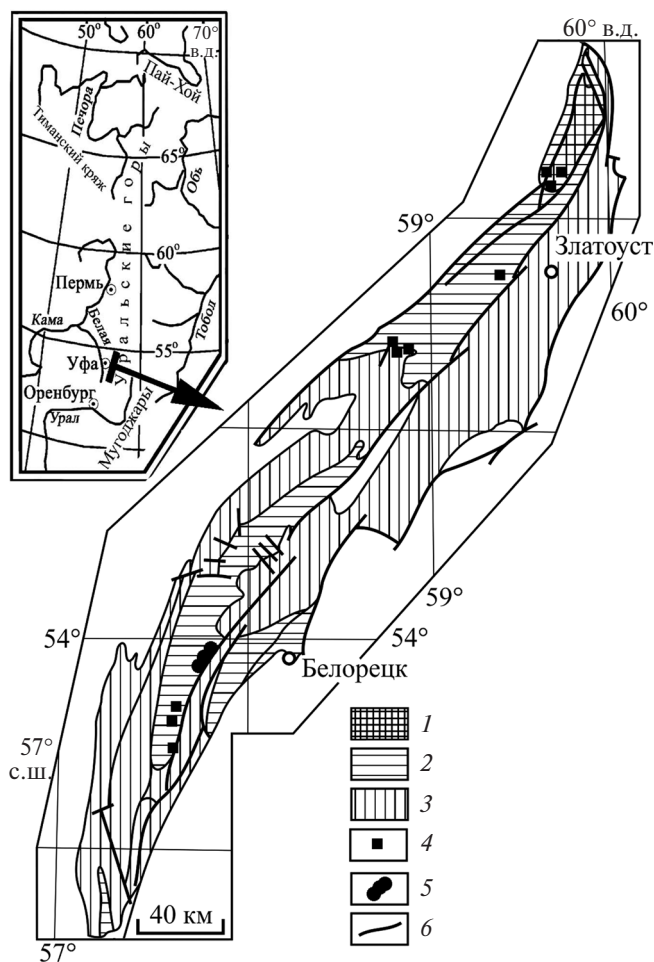
\*E-mail: [kovalev@ufaras.ru](mailto:kovalev@ufaras.ru)

РЭММ-202М с EDA в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс, аналитик В.А. Котляров) нами были обнаружены торит ( $\text{Th}_{0,68}\text{Mg}_{0,05}\text{Fe}_{0,03}\text{Ca}_{0,13}\text{K}_{0,02}\text{Ce}_{0,17}\text{Pb}_{0,02}\text{Nd}_{0,05}\text{La}_{0,09}$ )<sub>1,24</sub>( $\text{Si}_{0,66}\text{P}_{0,13}\text{Al}_{0,19}$ )<sub>0,98</sub>O<sub>4</sub> и Sc-содержащий ториевый минерал нестехиометричного состава ( $\text{Th}_{0,79}\text{Mg}_{0,85}\text{Fe}_{0,46}\text{Ca}_{0,17}\text{K}_{0,10}\text{Ce}_{0,09}\text{Sc}_{0,06}\text{Pr}_{0,07}\text{Pb}_{0,05}\text{Nd}_{0,03}\text{Al}_{0,33}$ )<sub>3,00</sub>( $\text{Si}_{0,72}\text{P}_{0,25}\text{Al}_{0,03}$ )<sub>1,0</sub>O<sub>6,00</sub>, ( $\text{Th}_{0,59}\text{Mg}_{0,93}\text{Fe}_{0,50}\text{Ca}_{0,28}\text{K}_{0,03}\text{Ce}_{0,06}\text{Sc}_{0,04}\text{Pr}_{0,05}\text{Pb}_{0,03}\text{Nd}_{0,02}\text{Al}_{0,47}$ )<sub>3,00</sub>( $\text{Si}_{0,75}\text{P}_{0,24}\text{Al}_{0,01}$ )<sub>1,00</sub>O<sub>6</sub> (рис. 2в, г, рис. 3; табл. 1).

Как видно из приведённых микрофотографий (рис. 2в, г) и табл. 1, ксеноморфное выделение торита расположено на границе двух зёрен плагиоклаза — ( $\text{Na}_{0,48}\text{Ca}_{0,50}\text{K}_{0,01}$ )<sub>0,99</sub>( $\text{Al}_{1,46}\text{Fe}_{0,02}\text{Si}_{2,53}$ )<sub>4,01</sub>O<sub>8,00</sub>, а его состав близок к минералам, описанным нами ранее в терригенных отложениях Шатакского вулканогенно-осадочного комплекса [5, 6]. Sc-содержащий ториевый минерал обнаружен в пространственной ассоциации с хлоритом, апатитом, алланитом ( $\text{Ca}_{1,12}\text{Ce}_{0,48}\text{La}_{0,18}\text{Pr}_{0,07}\text{Nd}_{0,15}$ )<sub>2,00</sub>( $\text{Al}_{1,41}\text{Fe}_{1,54}\text{Mg}_{0,05}$ )<sub>3,00</sub>( $\text{Si}_{2,94}\text{Al}_{0,06}$ )<sub>3,00</sub>O<sub>12,00</sub>ОН (рис. 2г). В его химическом составе установлено высокое содержание Mg, Fe и пониженные по сравнению со стехиометрическим составом торита количества Th (табл. 1).

С нашей точки зрения, данная находка представляет значительный интерес, так как селективное накопление РЗЭ в минералах, обусловленное различиями в радиусах их ионов, предполагает, что в ториевых минералах должны концентрироваться элементы цериевой группы, к которой Sc не относится.

Сведения о находках минералов Th, в составе которых обнаружен Sc, довольно скудны в опубликованной литературе. Встречается упоминание о то-



**Рис. 1.** Геологическая схема распространения пикритовых комплексов в пределах Башкирского мегантиклинория. 1 — архейско-протерозойские отложения, 2 — нижнерифейские отложения, 3 — среднерифейские отложения, 4 — тела разновозрастных пикритов, 5 — Ишлинский пикритовый комплекс, 6 — тектонические границы.

рианите с 0,3–0,46 мас.%  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  и в одном случае о торите с 0,05 мас.%  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  [1, 2, 9].

Геохимия Th относительно хорошо изучена. Его средние содержания в магматических породах уменьшаются от кислых (~18) к основным (~1,8–3) и ультраосновным (~0,004 г/т) разновидностям [1]. Основная форма нахождения Th в породах — это составная часть U–Th-минералов либо изоморфная примесь в акцессорных минералах. Скандий — лито/сидерофильный элемент, среднее содержание которого в базитах ~30, в ультрабазитах ~12 г/т [2]. По свойствам он близок к  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , поэтому обычно рассеивается и изоморфно замещается в темноцветных минералах (пироксенах, амфиболах, биотитах)  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . При сходстве Sc с Y и TPЗЭ (Er, Yb, Lu) он обладает индивидуальными особенностями, которые определяют его поведение в ми-

нералообразующих процессах. В пикритах Ишлинского комплекса среднее содержание Th 1,68; Sc 23,03 при разбросе значений 1,51–1,93 Th и 17,09–28,98 г/т Sc, т.е. содержания этих элементов близки к значениям, характерным для пород основного ряда.

Генетическая природа ториевой минерализации в пикритах Ишлинского комплекса выявляется при сравнительном анализе описанной нами ранее Th–REE-минерализации Шатакского комплекса [5, 6]. Из диаграммы  $\Sigma\text{REE}-\text{Th}$  (рис. 4) видно, что монациты и ториты Шатакского комплекса образуют единый тренд с коэффициентом аппроксимации 0,99, что свидетельствует о формировании минерализации в едином процессе, названном нами флюидно-магматическим [5]. Ториты из пород Ишлинского комплекса по этим параметрам отличаются от аналогов из пород Шатакского комплекса. Более того, для Sc-содержащих разновидностей различия ещё более “масштабны” (высокие содержания  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , присутствие Sc, Pb и отсутствие U), что свидетельствует о различных механизмах формирования Th-минерализации в породах Шатакского и Ишлинского комплексов.

Исходя из этого обобщённая модель генезиса Th-минерализации в пикритах Ишлинского комплекса может быть представлена в следующем виде. На первом этапе (единый процесс кристаллизации подразделяется нами на условные этапы для удобства восприятия), когда кристаллизуются оливин и пироксены, Sc входит в их состав в виде изоморфной примеси (по данным Н.А. Григорьева [3], в базитах до 95% Sc сконцентрировано в железо-магнезиальных минералах и ильмените), а Th образует собственные минеральные фазы, так как высокий заряд  $\text{Th}^{4+}$  и сравнительно большой ионный радиус (0,95 Å) не позволяют ему изоморфно входить в решётки породообразующих минералов. В результате этого процесса формируется “типичный” торит, состав которого близок к составу аналогов из пород Шатакского комплекса. На следующем этапе начинается кристаллизация плагиоклаза, который не относится к эффективным концентраторам Sc, Th, в результате чего эти элементы обогащают остаточный расплав. Пространственная ассоциированность Sc-содержащего Th-минерала с хлоритом, апатитом, ортитом (рис. 2г) в первом приближении может дать представление о химическом и микроэлементном составе остаточного расплава. Высокие содержания  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  в составе Sc-содержащего торита также объяснимы с этих позиций. С точки зрения химической эволюции расплава при действии механизма

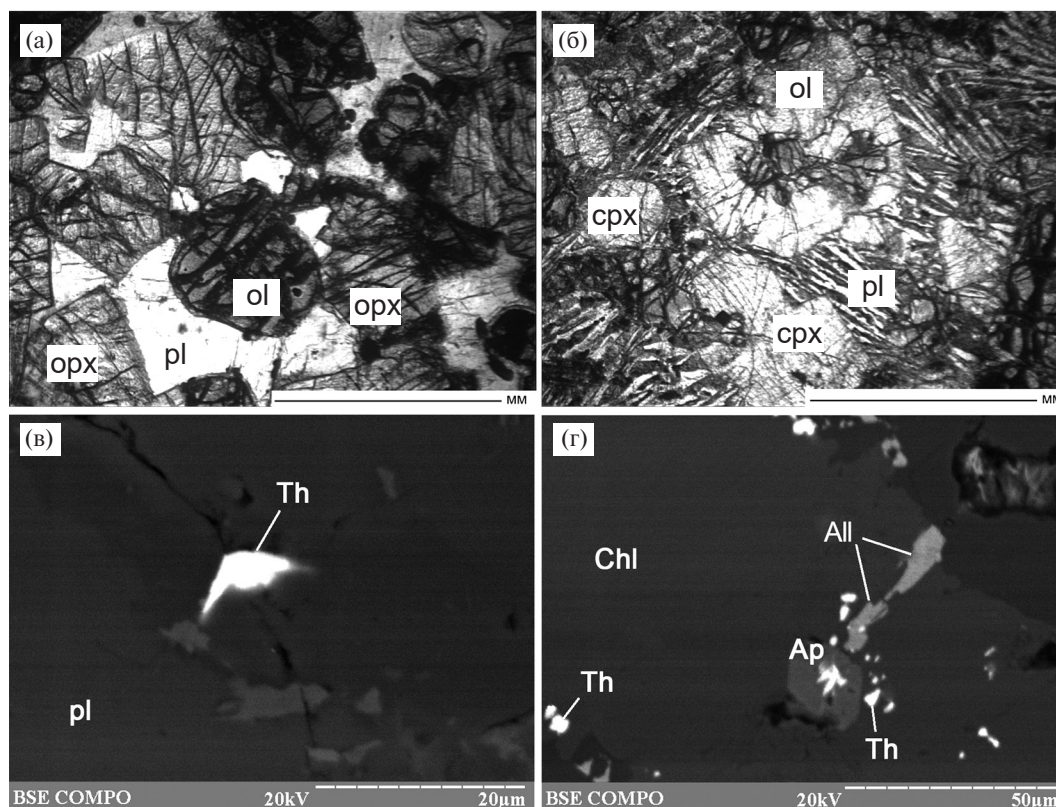


Рис. 2. Микрофотографии пород (а, б) и минералов пикритов (в, г) Ишлинского комплекса. ol — оливин, орх — ортопироксен, срх — клинопироксен, pl — плагиоклаз, Th — торит, Chl — хлорит, All — алланит, Ap — апатит.

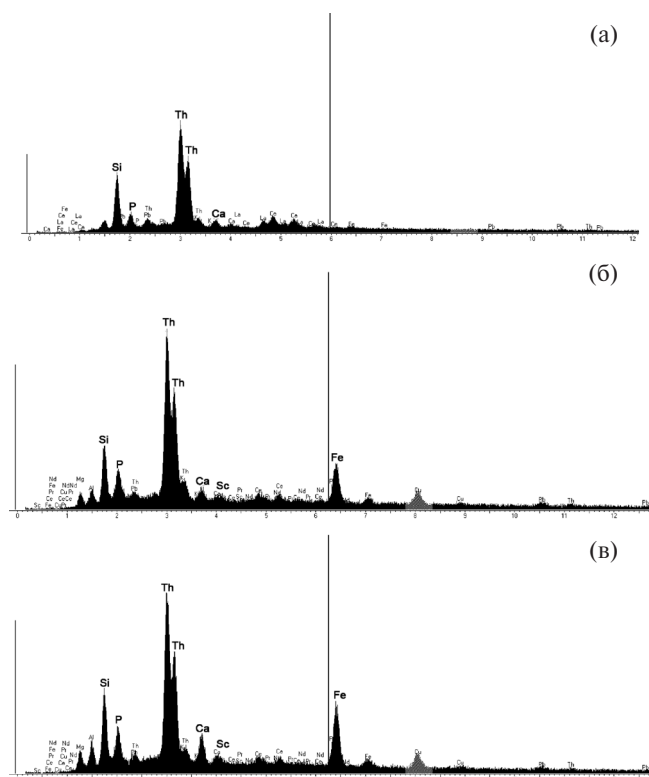


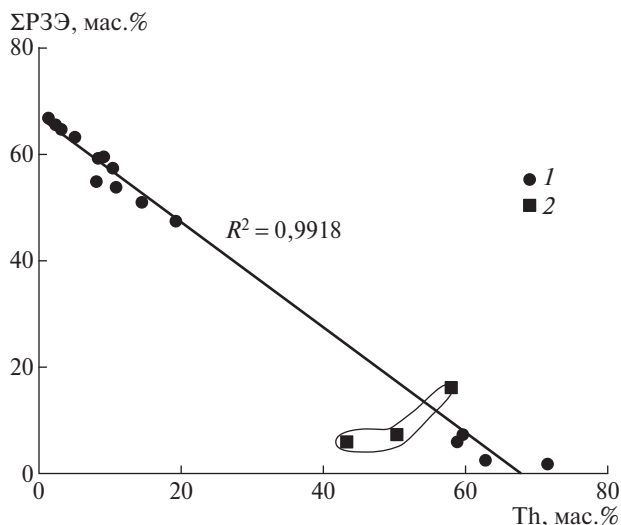
Рис. 3. Энергодисперсионные спектры торита (а) и Sc-содержащего Th-минерала (б, в).

Таблица 1. Химический состав (мас.%) ториевых минералов и алланита из пикритов Ишлинского комплекса

Оксид	1	2	3	4
MgO	0,62	8,29	10,35	0,32
FeO	0,66	7,92	9,96	18,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,14	4,35	6,74	12,46
SiO <sub>2</sub>	12,75	10,38	12,44	29,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,87	4,22	4,6	—
K <sub>2</sub> O	0,23	1,14	0,42	—
CaO	2,41	2,32	4,27	10,36
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,95	0,79	—
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,61	—	—	4,97
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,15	3,39	2,67	13,09
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	2,74	2,43	2,03
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,67	1,14	0,79	4,18
PbO <sub>2</sub>	1,27	2,93	1,67	—
ThO <sub>2</sub>	57,89	50,24	42,87	—
Сумма	98,27	100,01	100	94,95

Примечание. 1 — торит; 2, 3 — Sc-содержащий ториевый минерал; 4 — алланит.

кристаллизационной дифференциации процесс имеет “колебательный” характер: кристаллизация темноцветных (оливина, пироксенов) минералов обогащает остаточный расплав Ca, щелочами и от-



**Рис. 4.** Диаграмма  $\Sigma PЗЭ$ –Th для монацитов и торитов из пород Шатакского комплекса (1) и торитов из пикритов Ишлинского комплекса (2).

части Si, что приводит к кристаллизации плагиоклаза, связывающего эти элементы в своём составе. При этом в зависимости от физико-химических параметров процесса кристаллизации остаточный расплав может обогащаться Fe, Mg (“феннеровский” тренд).

Таким образом, концентрация в локальном объёме остаточного расплава ряда элементов (PЗЭ, Sc, Th, P в нашем случае), не вошедших в кристаллизующиеся породообразующие минералы, приводит к формированию нетипичных минеральных ассо-

циаций и/или минералов с нехарактерными примесями.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № 0252–2017–0012) и при финансовой поддержке РФФ, соглашение № 16–17–10192.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Е., Борисенко Л.Ф., Овчинников Л.Н. Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам. М.: Недра, 1989. 462 с.
2. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.
3. Григорьев Н.А. // Литосфера. 2011. № 1. С. 115–125.
4. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Пиндюрина Е.О., Котляров В.А. // Зап. РМО. 2014. № 5. С. 74–84.
5. Ковалев С.Г., Ковалев С.С., Высоцкий С.И. // Зап. РМО. 2017. № 5. С. 59–79.
6. Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Пучков В.Н. // ДАН. 2017. Т. 476. № 5. С. 547–552.
7. Носова А.А., Сазонова Л.В., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Горожанин В.М., Ковалев С.Г. // Петрология. 2012. Т. 20. № 4. С. 392–428.
8. Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Каргин А.В., Ковалев С.Г. // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.
9. Экологическая геохимия элементов. Экология. Кн. 5. Редкие d-элементы / Под ред. Э.К. Буренкова. М., 1997. 576 с.

## RARE Th–Sc MINERALS IN PICRITES OF THE SOUTHERN URALS AND THEIR GENETIC VALUE

S. G. Kovalev, Corresponding Member of the RAS V. N. Puchkov,  
S. S. Kovalev, S. I. Vysotsky

Received August 2, 2018

The first data on the discovery of Th–Sc mineralization in the pyritic complexes of the Southern Urals are presented. The minerals of Th (thorite) and Sc-containing thorium minerals are described. The conclusion is made that the Th–Sc mineralization formed due to crystallization of a residual melt in the local volume.

**Keywords:** Southern Urals, picrites, thorium mineralization, Sc-containing thorium mineral, crystallization, residual melt.