

ИГЕМ РАН  
СМУиС ИГЕМ РАН



# НОВОЕ В ПОЗНАНИИ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ

Сборник материалов

IX Российской молодёжной научно-практической Школы  
с международным участием

Научное электронное издание

25 - 29 ноября 2019 г.  
ИГЕМ РАН, Москва

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии  
Российской академии наук  
(ИГЕМ РАН)

# **Новое в познании процессов рудобразования**

Девятая Российская молодёжная научно-практическая школа с  
международным участием

*25 – 29 ноября 2019 г.*

Москва-2019

УДК 553+552+548/549+550.4+550.3+502/504+550.93

ББК 26.3

Н 74

Новое в познании процессов рудообразования: Девятая Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием, Москва, 25-29 ноября 2019 г. Сборник материалов - Электрон. дан. (1 файл: 45 Мб) - М.: ИГЕМ РАН, 2019.

В сборнике представлены материалы Девятой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». Пленарные лекции и доклады посвящены изучению различных вопросов геологии, минералогии и геохимии рудных месторождений, а также вопросам геоэкологии. Задача Девятой Школы – знакомство студентов, аспирантов и молодых специалистов с новейшими достижениями в изучении процессов рудообразования.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), проект № 19-05-20149

Редакторы: В.А. Петров, Е.Е. Амплиева, С.А. Устинов, Е.В. Ковальчук, С.В. Ковригина

ISBN 978-5-88918-055-5

© Коллектив авторов, 2019  
© ИГЕМ РАН, 2019  
© СМУиС ИГЕМ РАН, 2019

## Организационный комитет

**Председатель:** Петров В.А., чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., ИГЕМ РАН

**Заместитель председателя программного комитета:** Амплиева Е.Е., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН

**Члены программного комитета:**

Аранович Л.Я., чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., ИГЕМ РАН

Белогуб Е.В., д.г.-м.н., ИМин УрО РАН, г. Миасс

Верчеба А.А., д.г.-м.н., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе

Викентьев И.В., д.г.-м.н., ИГЕМ РАН, г. Москва

Вымазалова А., Dr., Czech Geological Survey, Prague, Czech Republic

Каргин А.В., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, г. Москва

Крупская В.В., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, г. Москва

Леонтьев В.И., к.г.-м.н., Горный университет, г. Санкт-Петербург

Моржухина С.В., к.х.н., Университет «Дубна», г. Дубна Московской обл.

Наумов Е.А. к.г.-м.н., ФГБУ «ЦНИГРИ», г. Москва

Перцев А.Н., д.г.-м.н., ИГЕМ РАН, г. Москва

Плотинская О.Ю., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН, г. Москва

Рихванов Л.П., профессор, д.г.-м.н., ТПУ, г. Томск

Старостин В.И., профессор, д.г.-м.н., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Тарасова Н.П., чл.-корр. РАН, ИПУР РХТУ им. Д.И. Менделеева, РАН

Черкашѐв Г.А., д.г.-м.н., ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург

**Заместитель председателя организационного комитета** Устинов С.А., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН

**Члены организационного комитета:**

Андреев А.А., ИГЕМ РАН, председатель СМУиС ИГЕМ РАН

Гусева А.С., ИГЕМ РАН

Жиличева О.М., к.г.-м.н., ИГЕМ РАН

Ковальчук Е.В., ИГЕМ РАН

Ковригина С.В., ИГЕМ РАН

Комаров Вл.Б., ИГЕМ РАН

Комарова М.М., ИГЕМ РАН

Котов А.А., ИГЕМ РАН

Лексин А.Б., ИГЕМ РАН

Мурашов К.Ю., ИГЕМ РАН

Усачева А.А., ИГЕМ РАН

Языкова Ю. И., ИГЕМ РАН

## Развитие методики U-Th-He датирования пирита: измерение содержания урана и тория на ИСП МС Element XR

Подольская М.М.<sup>1</sup>, Якубович О.В.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ГЕОХИ РАН, г. Москва, [marypodolskaya@gmail.com](mailto:marypodolskaya@gmail.com)

<sup>2</sup>ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург, [olya.v.yakubovich@gmail.com](mailto:olya.v.yakubovich@gmail.com)

<sup>3</sup>Институт Наук о Земле, СПбГУ, г. Санкт-Петербург

Пирит – наиболее распространенный рудный минерал, который встречается во многих типах месторождений Au, Ag, Cu, Zn, Pb, Mo, Bi, Sb и др. Применение Re-Os, Rb-Sr, Sm-Nd и Ar-Ar для датирования пирита и других сульфидов ограничено рядом изотопно-геохимических причин, связанных с низкими концентрациями материнских изотопов, а также тем, что в подавляющем большинстве случаев изохронный возраст определяется по изотопным системам не самих сульфидов, а других минералов, генетические соотношения которых с рудным процессом часто бывает затруднительно установить (Christensen et al., 1995; Petke, Diamond, 1996; Stein et al., 1998; Ivanov et al., 2015 и др.).

Концентрация урана в пирите может достигать десятков мкг/г (Melekestseva et al., 2014, Якубович и др., 2019а, и др.). Уран распределен сильно неоднородно и в ряде случаев связан с субмикронными включениями урансодержащих минералов, которые в основном представлены уранинитом (UO<sub>2</sub>) (Мурзин и др., 2011; Garuti, Zaccarini, 2005), реже – браннеритом (UTi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) (Молошаг, 2015). Из-за явления «α-рекойл» образованный в таких включениях радиогенный гелий имплантируется в кристаллическую решетку сульфида (длина пробега α-частицы ~ 15 мкм) (Farley, 1996).

Проведенные ранее эксперименты по кинетике выделения прогнозируют высокую сохранность <sup>4</sup>He в кристаллической решетке пирита в ходе геологической истории (Якубович и др., 2019а). Таким образом, появляется принципиальная возможность U-Th-He датирования пирита, так как количество накопленного минералом гелия будет отражать момент его кристаллизации. Перспективность такого подхода обосновывается первыми результатами U-Th-He датирования пирита из колчеданного месторождения Узельга, Южный Урал (377±8 млн лет; СКВО 1.2) (Якубович и др., 2019б).

Целью этой работы является развитие U-Th-He метода датирования пирита, а именно отработка методики измерения урана и тория методом изотопного разбавления (смешанный трассер <sup>235</sup>U -<sup>230</sup>Th) на одноколлекторном ИСП масс-спектрометре Element XR производства Thermo Scientific.

В одноколлекторных магнитных масс-спектрометрах, в отличие от многоколлекторных, регистрация ионных токов на различных массах происходит не одновременно, а последовательно, что приводит к искажению результатов. Таким образом, основной задачей при отработке методики определения урана и тория было достижение максимально возможной правильности значений. Проверка проводилась на стандартах с различными известными изотопными и элементными отношениями урана и тория.

Несмотря на относительно небольшую разницу масс определяемых изотопов, одним из искажающих факторов является дискриминация ионов по массам. На стандартных образцах с известным уран-ториевым отношением были подобраны настройки прибора, которые позволили добиться максимально одинаковой степени ионизации от обоих элементов. Основными настраиваемыми параметрами стали мощность плазмы, поток газа-носителя, а также расстояние горелки по оси Z (расстояние от горелки до пробоотборного конуса). Программное обеспечение прибора позволяет онлайн следить за изменением отношения сумм соответствующих изотопов.

Element XR имеет заявленный линейный динамический диапазон 12 порядков, что обеспечивают три типа детектирования: счетный и аналоговый при помощи вторично-электронного умножителя, а также регистрация полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц на цилиндре Фарадея. Несмотря на процедуры определения корректирующих факторов, которые предусмотрены в приборе для работы с разными типами детекторов в одном

измерении, изотопные исследования необходимо проводить так, чтобы детектирование всех измеряемых изотопов производилось одним и тем же детектором. В подавляющем большинстве случаев для определения урана и тория в растворе используется счетный режим. Поэтому если один из измеряемых изотопов имеет, слишком высокую концентрацию в растворе, пробу необходимо дополнительно разводить.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при подобных измерениях, является так называемое мертвое время детектора, настройка которого при помощи специального алгоритма позволяет корректировать выходной сигнал детектора при повышенных ионных токах.

Изотопные измерения на одноколлекторных масс-спектрометрах также требуют максимально возможного сокращения времени между измерениями разных изотопов, “симуляции” мультиколлектора. Чтобы достичь этого, используется несколько способов: минимальное количество точек и время набора сигнала на каждый пик (от 1 до 3 samples per peak), выбор режима, при котором магнит не возвращается каждый раз в начало шкалы масс, а движется только по заданным массам, увеличенное время набора статистических данных в пределах одного измерения (оптимизируется подбором значений runs и passes).

В качестве тестового образца для отработки методики U-Th-He датирования с использованием газового масс-спектрометрического комплекса МСУ-Г-01-М (ИГГД РАН) и одноколлекторного ИСП масс-спектрометра Element XR (ГЕОХИ РАН) на данном этапе был использован международный U-Th-He стандарт – апатит Дуранго, имеющий возраст  $31.0 \pm 1.0$  млн лет (McDowell et al., 2005).

Фрагменты (навеска ~ 1 мг) крупного кристалла апатита Дуранго (DUR-4) были завернуты в танталовую фольгу. Определение гелия в этих образцах проводилось путем их нагрева до температуры в  $1050^\circ\text{C}$  на масс-спектрометрическом комплексе МСУ-Г-01-М по стандартной методике. После отжига образец извлекался из масс-спектрометра, танталовый конверт приоткрывался, добавлялась капля смешанного  $^{235}\text{U}$  -  $^{230}\text{Th}$  трассера и концентрированная азотная кислота. Разложение происходило при температуре  $130^\circ\text{C}$  в закрытых тефлоновых бюксах на плитке в течении 24 часов. После раствор переводился в форму 5%  $\text{HNO}_3$  (1.5 мл) для дальнейшего измерений урана и тория на ИСП МС Element XR в ГЕОХИ РАН.

В общей сложности нами было сделано 5 измерений U-Th-He возраста международного стандарта Дуранго (табл. 1).

Таблица 1. Содержание He, U, Th в апатите Дуранго

№	$^4\text{He}$ , нсм <sup>3</sup>	U, нг	Th, нг	Th/U	Возраст, млн лет	$1\sigma$	$\pm$
DUR-4 1	163.82	6.65	150.49	22.6	30.1	0.24	1.5
DUR-4 2	85.02	7.55	159.15	21.1	29.9	0.46	1.5
DUR-4 3	150.67	4.04	79.56	19.7	30.7	0.33	1.5
DUR-4 4	72.42	6.52	149.70	23.0	29.6	0.72	1.5
DUR-4 5	10.30	3.11	67.17	21.6	31.4	1.09	1.6
Среднее					30.4	0.98	1.5
Танталовая фольга 1*	0.11	н.п.о.	0.19	–			
Танталовая фольга 2	0.27	н.п.о.	0.16	–			
McDowell et al, 2005					31.0	0.22	1.0
Foeken et al., 2006					32.3		0.9
Siqueira-Ribeiro et al., 2019					31.9		1.2

\*Холостой опыт по танталовой фольге, включающий отжиг в камере масс-спектрометра и полную химическую процедуру пробоподготовки.

Определенный возраст:  $30.4 \pm 1.5$  млн лет в пределах ошибки измерения хорошо согласуется с имеющимися данными. Вариации Th/U отношения также находятся в пределах опубликованных значений (16-35, со средним в районе 22; Siqueira-Ribeiro et al., 2019). Это позволяет заключить, что предложенная методика измерения урана и тория на одноколлекторном

ИСП масс-спектрометре Element XR в дальнейшем может быть использована для U-Th-He датирования пирита.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 19-77-00097*

Молошаг В.П. Радиоактивная минерализация гипогенных руд колчеданных месторождений Урала (на примере Тарньерского месторождения) // Ежегодник- 2014. Тр. ИГТ УрО РАН. 2015. Вып. 162. С. 169–171.

Молошаг В.П., Мурзин В.В., Варламов Д.А., Викентьев И.В. Медно-кобальтовое оруденение Пышминско-Ключевского месторождения на Среднем Урале: минеральный состав руд и метасоматитов, стадийность и P-T условия образования // Литосфера. 2011. № 6. 103–122.

Якубович О.В., Викентьев И.В., Зарубина О.В., Брянский Н.В., Гороховский Б.М., Котов А.Б., Дриль С.И., Бортников Н.С. U-Th- He датирование пирита из Cu – Zn-колчеданного месторождения Узельга (Урал, Россия): первый опыт использования нового геохронометра // Доклады Академии Наук. 2019б. Т. 485. № 6. С. 57–60.

Якубович О.В., Гедз А.М., Викентьев И.В., Котов А.Б., Гороховский Б.М. Миграция радиогенного гелия в кристаллической решетке сульфидов и возможности их изотопного датирования // Петрология. 2019а. Т. 27. № 1. С. 1–22.

Christensen J.N., Halliday A.N., Leigh K.E., Randell R.N., Kesler S.E. Direct dating of sulfides by Rb-Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley-type Zn-Pb deposit // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59(24). P. 5191-5197.

Farley K.A., Wolf R.A., Silver L.T. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. T. 60. № 21. С. 4223–4229.

Foeken J.P.T., Stuart F., Dobson K., Persano C., Vilbert D. A diode laser system for heating minerals for (U-Th)/He chronometry // Geochemistry, Geophys. Geosystems. 2006. V. 7(4). P. 1–9.

Garuti G., Zaccarini F. Minerals of Au, Ag and U in volcanic-rock-associated massive sulfide deposits of the Northern Apennine ophiolite, Italy // Can. Mineral. 2005. V. 43. P. 935–950.

Ivanov A.V., Vanin V.A., Demonterova E.I., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Gorovoy V.A. Application of the 'no fool's clock' to dating the Mukodek gold field, Siberia, Russia // Ore Geology Reviews. 2015. V. 69. P. 352–359.

McDowell F.W., McIntosh W.C., Farley K.A. A precise  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  reference age for the Durango apatite (U-Th)/He and fission-track dating standard // Chem. Geol. 2005. V. 214. № 3–4. P. 249–263.

Melekestseva I.Y., Tret'yakov G.A., Nimis P., Yuminov A.M., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R. Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13 30.87' N): evidence for phase separation and magmatic input // Marine Geol. 2014. V. 349. P. 37-54.

Petke T., Diamond L.W. Rb–Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrons: a clarification of why it works // Econ. Geol. 1996. V. 91. P. 951-956.

Siqueira-Ribeiro M.C., Marin D., Hackspacher P., Stuart F. The performance of the (U+Th)/he thermochronology laboratory at UNESP Rio Claro, Brazil // An. Acad. Bras. Cienc. 2019. T. 91. № 1. P. 1–11.

Stein, H. J., Sundblad, K., Markey, R. J., Morgan, J. W., Motuza, G. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting // Miner. Dep. 1998. V. 33(4). P. 329-345