

## Литература

- Аюпова Н. Р., Масленников В. В.* Биоморфные структуры в железисто-кремнистых отложениях колчеданосных палеогидротермальных полей Урала // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 3. С. 486–504.
- Дороднова И. В.* Тентакулиты девона Закавказья. М.: Наука, 1993. 108 с.
- Масленников В. В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
- Шиловский О. П., Стаценко Е. О.* Предварительные данные исследования наутилоидей казанского яруса методом рентгеновской компьютерной томографии // Современные проблемы изучения головоногих моллюсков. Морфология, систематика, эволюция, экология и био-стратиграфия. М.: ПИН РАН, 2015. С. 133–135.
- Шиманский В. Н., Журавлева Ф. А.* Основные вопросы систематики наутилоидей и родственных им групп // Тр. Палеонтологического ин-та АН СССР. 1961. Т. 90. С. 1–175.
- Juniper S. K., Jonnasson I. R., Tunnicliffe V., Southward A. J.* Influence of tube building polychaete on hydrothermal chimney mineralization // *Geology*. 1992. Vol. 20. P. 895–898.
- Maslennikov V. V., Ayupova N. R., Herrington R. J., Danyushevskiy L. V., Large R. R.* Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals // *Ore Geology Reviews*. 2012. Vol. 47. P. 5–41.

***А. М. Гедз***

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург  
arandelix@gmail.com*

### **Перспективы использования сульфидных минералов в U-Th-He геохронологии колчеданных месторождений (научный руководитель О. В. Якубович)**

Исторически считалось, что изотопные системы с использованием радиогенного гелия по причине его быстрой миграции в кристаллических структурах неприменимы в геохронологии. Однако исследования последних лет под руководством Ю. А. Шуколюкова показали возможность удержания гелия в течение геологического времени в самородных металлах – свойство высокой сохранности обнаружено для золота и минералов платиновой группы [Шуколюков и др., 2010; 2012]. Особый интерес вызвало обнаружение этого свойства в несамородных минералах, например, в сперрилите [Якубович и др., 2015]. Так появилось предположение о том, что схожие химически и кристаллографически сульфиды могут сохранять радиогенный гелий в течение геологического времени.

Цель работы – проверка гипотезы о высокой сохранности гелия в сульфидных минералах. Параметры миграции гелия определены методом ступенчатого отжига на масс-спектрометрическом комплексе МСУ-Г-01-М по методике [Шуколюков и др., 2012]. Объектом исследования стали пирит ( $\text{FeS}_2$ ), халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ), пирротин ( $\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$ ), теннантит ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) и борнит ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) из Гайского ( $\text{D}_{1\text{ems}}$ ), Узельгинского и Молодежного ( $\text{D}_{2\text{eif}}$ ) колчеданных месторождений на Южном Урале. Образцы для исследований были предоставлены д.г.-м.н. И. В. Викентьевым (ИГЕМ РАН, г. Москва).

Основным источником гелия в исследуемых минералах являются примеси урана и тория. В составе минералов, слагающих современные гидротермальные сульфидные залежи (которые считаются современным аналогом древних колчеданных месторождений), были обнаружены концентрации U до 11 г/т [Melekestseva et al., 2014]. Существует также возможность захвата гелия в ходе минералообразования. Концентрации гелия, обычно фиксируемые для халькопирита современных «черных курильщиков», составляют  $1.1 \times 10^{-10}$  –  $1.3 \times 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г [Luders, Niedermann, 2010]. В наших образцах содержания гелия достигали на порядки больших величин: до  $1.22 \times 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/г в пирите,  $3.65 \times 10^{-5}$  см<sup>3</sup>/г – халькопирите и  $2.93 \times 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/г – пирротине. Это позволяет говорить о том, что подавляющая часть гелия является радиогенной и захваченным во включениях гелием можно пренебречь. Содержания гелия значительно (до 10 раз) колеблются от образца к образцу даже в пределах одного минерального агрегата. Это, скорее всего, говорит о сильной неравномерности в распределении урана и тория в зернах исследуемых минералов. По всей видимости, форма нахождения радиоактивных элементов в сульфидах – субмикронные включения, невидимые в оптическом микроскопе, а не изоморфная примесь в кристаллических решетках.

Значения энергии активации миграции гелия из кристаллической структуры пирита составили 109–127 ккал/моль, халькопирита – 35–85 ккал/моль, борнита – 54 ккал/моль. Выделение гелия из пирротина оказалось более сложным: процесс характеризуется двумя ступенями с пиками десорбции, соответствующими 29–30 и 63–74 ккал/моль. Миграция гелия из теннантита происходит при значительно меньшей величине  $E_a$  – 37 ккал/моль (табл.).

Т а б л и ц а

**Значения энергии активации миграции гелия, температуры максимально интенсивной миграции и измеренное количество <sup>4</sup>He**

| Месторождение | Минерал     | $E_a$ , ккал/моль | Т пика, °С            | <sup>4</sup> He, см <sup>3</sup> |
|---------------|-------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Узельгинское  | Пирит       | 109               | 720                   | $4.90 \times 10^{-8}$            |
|               |             | 127               | 710                   | $6.34 \times 10^{-8}$            |
|               | Пирротин    | 29                | 780                   | $7.88 \times 10^{-8}$            |
|               |             | 74                | 1040                  |                                  |
|               |             | 30                | 720                   | $8.27 \times 10^{-8}$            |
|               |             | 63                | 1080                  |                                  |
|               | Теннантит   | 37                | 700                   | $1.97 \times 10^{-9}$            |
|               | Халькопирит | 35                | 710                   | $1.69 \times 10^{-8}$            |
| 52            |             | 710               | $2.96 \times 10^{-8}$ |                                  |
| 85            |             | 700               | $5.81 \times 10^{-9}$ |                                  |
| 80            |             | 710               | $2.79 \times 10^{-8}$ |                                  |
| Молодежное    | Борнит      | 54                | 720                   | $2.07 \times 10^{-9}$            |
|               |             | 54                | 670                   | $1.52 \times 10^{-8}$            |

Примечание. Для пирротина температуры максимально интенсивной миграции показаны для двух пиков десорбции.

Для сравнения, энергия активации миграции гелия из решетки циркона составляет 39–41 ккал/моль, что соответствует температуре закрытия U-Th/He изотопной системы 175–193 °C [Reiners, 2005], в то время как энергия активации для пирита, равная 127 ккал/моль, в первом приближении отвечает температурам порядка 400–500 °C, что выше температуры гидротермальных процессов. Этот факт открывает потенциальную возможность использования пирита для установления абсолютного возраста минералообразования; а халькопирита, пирротина, теннантита и борнита – в исследовании термальной эволюции массивов сульфидсодержащих пород.

Ограниченная воспроизводимость результатов, однако, указывает на неясные причины сохранности гелия в минералах. Различия в энергии активации для различных образцов могут быть объяснены с позиций кристаллографии (наличие или отсутствие в каждом конкретном образце тех или иных дефектов решетки, влияющих на скорость выделения газа) или же исходя из предположения о корреляции величины энергии активации с электропроводностью кристаллов и агрегатов [Гедз, Якубович, 2014].

Нами запланирована серия дальнейших исследований, включающая изучение состава и структуры минералов, измерение их электропроводности и связи электрических свойств минералов со способностью удерживать гелий в структуре. Ожидается, что измерение концентрации  $\alpha$ -радиоактивных изотопов должно показать состоятельность нового метода, а остальные исследования – найти теоретическое объяснение эффекта высокой сохранности гелия в сульфидах.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-01010.*

## Литература

- Гедз А. М., Якубович О. В. Возможности использования изотопных систем на основе гелия в геохронологии рудообразующих процессов // Мат. IV Рос. молодеж. научно-практ. школы «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2014. С. 82–84.
- Шуколюков Ю. А., Якубович О. В., Мочалов А. Г. и др. Новый изотопный геохронометр для прямого датирования самородных минералов платины ( $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  метод) // Петрология. 2012. Т. 20. № 6. С. 545–559.
- Шуколюков Ю. А., Якубович О. В., Рыцк Е. Ю. О возможности изотопного датирования самородного золота U-Th-He методом // Доклады академии наук. 2010. Т. 430. № 2. С. 1–5.
- Шуколюков Ю. А., Якубович О. В., Яковлева С. З., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Рыцк Е. Ю. Геотермохронология по благородным газам: III. Миграция радиогенного гелия в кристаллической структуре самородных металлов и возможности их изотопного датирования // Петрология. 2012. Т. 20. № 1. С. 1–21.
- Якубович О. В., Мочалов А. Г., Служеникин С. Ф. Сперрилит ( $\text{PtAs}_2$ ) как  $^{190}\text{Pt}$ - $^4\text{He}$  геохронометр // Доклады академии наук. 2015. Т. 462. № 1. С. 1–4.
- Luders V., Niedermann S. Helium isotope composition of fluid inclusions hosted in massive sulfides from modern submarine hydrothermal systems // Economic Geology. 2010. Vol. 105. P. 443–449.
- Melekestseva I. Yu., Tret'yakov G. A., Nimis P., Yuminov A. M., Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Kotlyarov V. A., Beltenev V. E., Danyushevsky L. V., 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 Geology. 2014. Vol. 349. P. 37–54.
- Reiners P. W. Zircon (U-Th)/He thermochronometry // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2005. Vol. 58. P. 151–179.