

Авторы благодарны сотрудникам ФГУП «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» (г. Санкт-Петербург–Ломоносов) за возможность участия в 34-м рейсе НИС «Профессор Лозачев» и отбор образцов для исследований, а также Р. Ларджу и Л. Даниушевскому (Университет Тасмании, г. Хобарт) – за возможность проведения ЛА ИСП МС анализов.

## Литература

Бельтнев В.Б., Иванов В.Н., Сергеев М.Б., Рождественская И.И., Самоваров М.Л. Результаты поисковых работ на полиметаллические сульфиды в Атлантике в 2011 г. в свете подачи российской заявки в МОМД // Разведка и охрана недр. 2012. № 8. С. 50–55.

Butler I.B., Nesbitt R.V. Trace element distribution in the chalcopyrite wall of a black smoker chimney: Insights from laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) // Earth Planetary and Science Letters. 1999. Vol. 167. P. 335–345.

Dai C., Lin M., Hu Y. Heterogeneous Ni- and Cd-bearing ferrihydrite precipitation and recrystallization on quartz under acidic pH condition // ACS Earth Space Chemistry. 2017. Vol. 110. P. 621–628.

He Z., Liu R., Liu H., Qu J. Adsorption of Sb(III) and Sb(V) on freshly prepared ferric hydroxide (FeOxHy) // Environmental Engineering Science. 2015. Vol. 32 (2). P. 95–102.

Hein J., Koschinsky A. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules // In: Treatise on Geochemistry, 2nd edition. Elsevier, 2014. P. 273–290.

Kreissl S., Bolanz R., Göttlicher J., Steininger R., Tarassov M., Markl G. Structural incorporation of W<sup>6+</sup> into hematite and goethite: A combined study of natural and synthetic iron oxides developed from precursor ferrihydrite and the preservation of ancient fluid compositions in hematite // American Mineralogist. 2016. Vol. 101. No. 12. P. 2701–2715.

Kumar R., Ray R.K., Biswas A.K. Physico-chemical nature and leaching behaviour of goethites containing Ni, Co and Cu in the sorption and coprecipitation mode // Hydrometallurgy. 1990. Vol. 25. P. 61–83.

Lalinská-Voleková B., Majzlan J., Klimko T., Chovan M., Kučerová G., Michňová J., Hovorič R., Göttlicher J., Steininger R. Mineralogy of weathering products of Fe–As–Sb mine wastes and soils at several Sb deposits in Slovakia // Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50 (2). P. 481–500.

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) // Economic Geology. 2009. Vol. 104. P. 1111–1141.

Musić S., Wolf R.H.H. Sorption of microamounts of gallium(III) on Fe(OH)<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> precipitates // Microchimica Acta. 1979. Vol. 71. Is. 1–2. P. 87–94.

Schlüter J., Klaska K.-H., Adiwidjaja G., Gebhard G. Tsumgallite, GaO(OH), a new mineral from the Tsumeb mine, Tsumeb, Namibia // Neues Jahrbuch für Mineralogie. 2003. Is. 11. P. 521–527.

**А.А. Суханова, А.В. Фирстова, Т.В. Степанова**  
ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург  
sukhanova.anna.ru@gmail.com

## Особенности распределения урана в гидротермальных сульфидных рудах Срединно-Атлантического хребта

Глубоководные сульфидные руды характеризуются высокими содержаниями Cu, Zn, Au и других элементов [Черкашев и др., 2018; Fouquet et al., 2010]. Наряду с

этими элементами в гидротермальных образованиях были установлены повышенные концентрации U и урановая минерализация [Togokhov et al., 2002; Fouquet et al., 2010; Ауурова et al., 2018]. Однако данные по содержаниям U и характере его распределения в них весьма ограничены. В данной работе рассмотрено распределение U в образцах сульфидных руд гидротермальных полей Российского разведочного района (PPP) в пределах Срединно-Атлантического хребта (САХ).

PPP расположен в приэкваториальной зоне САХ в пределах двух крупных сегментов рифтовой долины, ограниченных трансформными разломами Марафон, Зеленого Мыса и Кейн, и включает в себя 21 гидротермальное поле [Черкашев и др., 2018]. В ходе работы были выполнены оптические исследования образцов сульфидных руд (ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург) и микрозондовые исследования на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N (ресурсный центр СПбГУ «Геомодель», г. Санкт-Петербург).

Содержания U определены методом ИСП МС с помощью масс-спектрометров ELAN-6100 (Perkin-Elmer) (ВИМС, г. Москва) и ELAN-4300 (Perkin-Elmer) (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Содержания U в сульфидных рудах определены в 183 образцах 12 гидротермальных полей: Ашадзе-1, Ашадзе-2, Ириновское, Семенов-2, Семенов-4, Логачев-1, Победа-1, Краснов, Петербургское, Зенит-Виктория, Юбилейное, Пюи-де-Фолль. Детально был изучен минеральный и химический состав руд. Проведенные исследования позволяют рассмотреть характер распределения урана в сульфидных рудах PPP (табл. 1).

Изученные руды связаны с разными типами вмещающих пород: породами габбро-перидотитового комплекса, базальтами и, редко, плагиогранитами (поле Семенов-2). Среднее арифметическое содержание U в исследованных рудах PPP составляет 3.5 г/т, медиана – 1.49 г/т. Содержание U в базальтах типа N-MORB составляет 0.014 г/т, ультраосновных породах – 0.057 г/т [Anderson, 1989]. По данным [Turekian, Wedepohl, 1961], содержание U в ультраосновных породах –  $1 \times 10^{-7}$  %, основных –  $1 \times 10^{-4}$  %, кислых –  $3 \times 10^{-4}$  %.

По нашим данным, среднее содержание U в рудах гидротермальных полей, связанных с базальтами – 3.63 г/т (медиана – 1.74 г/т); с ультраосновными породами – 3.17 г/т (медиана – 2.02 г/т). На основе изучения 183 образцов сульфидных руд различных полей PPP зависимость между содержаниями U и типом вмещающих пород не выявлена. В сульфидных рудах установлены аномально высокие содержания U на поле Победа-1, связанном с ультраосновными породами (среднее арифметическое 27 г/т, мин. 0.51 г/т, макс. 130 г/т) и в сульфидных брекчиях поля Семенов-2, где были подняты образцы трех типов пород (среднее арифметическое 315 г/т; мин. 140 г/т; макс. 609 г/т).

В образцах с полей Победа-1 и Семенов-2 с высокими содержаниями U обнаружены минералы U. Чаще всего они представлены обособленными сферическими зернами или почковидными агрегатами, предположительно  $UO_2$ , с размером зерен 1–5 мкм. По результатам микрозондового анализа содержание U в минералах достигает >70 мас. % (табл. 2).

Оксиды U встречаются в порах и трещинах (рис. а). Чаще скопления зерен тяготеют к пиритовым агрегатам (рис. б). Отмечаются редкие находки оксидов U на границе сростаний пирит-халькопирит (рис. в). Широко развита урановая минерализация в опаловом цементе сульфидных брекчий поля Семенов-2 (рис. г).

Таблица 1

**Содержание U в рудах гидротермальных полей  
Российского разведочного района, САХ**

| Гидротермальное поле  | Глубина, м | Вмещающие породы | N   | Содержание U, г/т |         |
|---|------------|------------------|-----|-------------------|---------|
|   |            |                  |     | Среднее           | Медиана |
| Ашадзе-1  | 4100       | Г/П              | 36  | 0.83              | 0.32    |
| Ашадзе-2  | 3250       | Г/П              | 38  | 4.60              | 3.30    |
| Логачев-1   | 2930–3030  | Г/П              | 4   | 2.32              | 1.57    |
| Победа-1  | 2100–2450  | Г/П              | 17  | 27                | 10.7    |
| <i>Сульфидные руды, связанные с габбро-перидотитовым комплексом</i> |            |                  | 95  | 3.17              | 2.02    |
| Ириновское  | 2700–2850  | Г/П, Б           | 8   | 1.57              | 1.28    |
| Сульфидные руды поля Семенов-2                                      | 2570–2620  | Г/П, Б, ПГ       | 14  | 2.80              | 1.90    |
| Сульфидные брекчии поля Семенов-2                                   | 2570–2620  | Г/П, Б, ПГ       | 3   | 315               | 197     |
| Семенов-4   | 2580–2900  | Б                | 7   | 6.92              | 2.95    |
| Краснов   | 3630–3800  | Б                | 22  | 3.06              | 1.74    |
| Петербургское   | 2800–3100  | Б                | 4   | 2.62              | 1.45    |
| Зенит-Виктория  | 2370–2390  | Б                | 12  | 4.94              | 1.46    |
| Юбилейное   | 2300–2550  | Б                | 11  | 5.59              | 4.70    |
| Пюи-де-Фолль  | 1940–2000  | Б                | 7   | 0.69              | 0.61    |
| <i>Сульфидные руды, связанные с базальтами</i>                      |            |                  | 63  | 3.63              | 1.74    |
| <i>Сульфидные руды PPP</i>  |            |                  | 183 | 3.50              | 1.49    |

Примечание. Г/П – породы габбро-перидотитового комплекса, Б – базальты, ПГ – плагиограниты. N – количество анализов.

Таблица 2

**Средний химический состав минералов U сульфидных руд  
полей Победа-1 и Семенов-2**

| Рудное поле<br>(количество анализов)   | Элемент (мас. %)            |                             |                           |
|--|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|  | O                           | U                           | Si                        |
|  | <b>Среднее</b>              |                             |                           |
|  | <b>минимум-максимум</b>     |                             |                           |
| Сульфидные руды поля Победа-1 (5)      | <u>26.03</u><br>16.77–42.41 | <u>73.89</u><br>57.59–83.23 | <u>0.23</u><br>0.20–1.31  |
| Сульфидные брекчии поля Семенов-2 (32) | <u>22.36</u><br>18.0–33.66  | <u>74.48</u><br>59.66–75.84 | <u>6.46</u><br>0.38–10.28 |

Основываясь на проведенных исследованиях, связь обогащения U с типом вмещающих пород явно не прослеживается (см. табл. 1). Содержания U в рудах изученной коллекции, в целом, равномерное и не превышает 7 г/т (см. табл. 1). Однако руды полей Победа-1 и Семенов-2, характеризующиеся аномальными значениями содержания U, возможно, локально подвергались влиянию дополнительных факторов или их совокупности, что способствовало накоплению U.

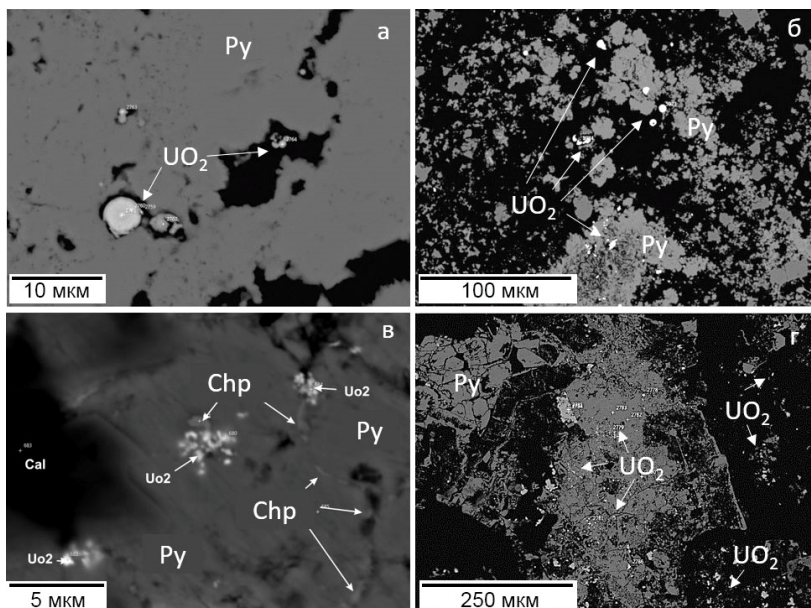


Рис. Оксиды U в рудах полей Семенов-2 (а, б, г) и Победа-1 (в): а) сферические зерна в порах пирита; б) почковидные агрегаты в брекчиях; в) скопления зерен на границе пирита и халькопирита; г) зерна в сульфидных агрегатах и опаловом цементе в брекчиях.

Предполагается, что основным источником U в сульфидных рудах является морская вода [Torokhov et al., 2002; Fouquet et al., 2010; Аюрова et al., 2018]. Можно предположить, что обнаруженные плагиограниты могли быть дополнительным источником U, т. к. содержание U в кислых породах составляет 3 г/т [Turekian, Wedepohl, 1961], что в 1000 раз выше, чем в базальтах (0.014 г/т) или ультраосновных породах (0.057 г/т) [Anderson, 1989]. Изученная U минерализация, в основном, связана с пиритовыми и, реже, пирит-халькопиритовыми агрегатами, широко развита в опаловом цементе сульфидных брекчий и практически не встречается с минералами Cu и Zn. Преимущественное нахождение минералов урана в порах, трещинах, границах зерен, в цементе указывает на их более позднее образование, чем первичные руды.

## Литература

Черкашев Г.А., Степанова Т.В., Андреев С.И. и др. Рудные объекты в пределах Российского Разведочного Района в северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта // Мировой Океан. Т. III. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в Океане. М.: Научный мир, 2018. С. 90–121.

Anderson D.L. Composition of the Earth // Science. 1989. Vol. 243 (4889). P. 367–370.

Аюрова N.R., Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tshuyko A.S., Blinov I.A., Beltenev V.E. Uranium accumulation in modern and ancient Fe-oxides sediments: Examples from the Ashadze-2 hydrothermal sulfide field (Mid-Atlantic Ridge) and Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals, Russia) // Sedimentary Geology. 2018. Vol. 367. P. 164–174.

Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J., Charlou J.-L., Ondréas H., Barriga F.J.A.S., Cherkashev G., Semkova T., Poroshina I., Bohn M., Donvall J.P., Henry K., Murphy P., Rouxel O. Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization:

A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit // Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges. AGU Geophysical Monograph. 2010. P. 321–368.

*Torokhov M.P., Cherkashev G.A., Stepanova T.V., Zhirnov E.A.* Uranium, its minerals and parageneses in massive sulfides of the Logatchev-2 MAR ore field // InterRidge News. 2002. Vol. 11 (2). P. 32–33.

*Turekian K.R., Wedepohl K.H.* Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust // Geological Society of America Bulletin. 1961. Vol. 72. P. 175–192.

**Н.Р. Аюпова<sup>1</sup>, А.С. Целуйко<sup>1</sup>, А.Ф. Собиров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии, г. Миасс  
*ayupova@mineralogy.ru*

<sup>2</sup> – Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе

### **Обломочные руды**

#### **Узельгинского медно-цинково-колчеданного месторождения (рудное тело № 5), Южный Урал**

На многих колчеданных месторождениях Урала, Понтида, Рудного Алтая, Кипра и других регионов мира основной объем руд состоит из обломочных рудных фаций, образованных в результате субмаринного разрушения, оползания и переотложения гидротермальных руд [Жабин, 1978; Авдонин и др., 1991; Масленников, 2006; Сафина, Масленников, 2009]. Большие мощности, плохая сортировка, высокое соотношение крупно- и мелкообломочной фракций, присутствие фрагментов труб палеокурильщиков в сульфидных брекчиях, а также локализация их в кровле и на склонах рудных тел непосредственно над массивными рудами указывает на перенос рудного материала на небольшие расстояния. По мере удаления от центра рудной залежи в брекчиях наблюдаются изменения текстурного рисунка, обусловленные уменьшением размера обломков, увеличением степени их окатанности, возрастанием количественной роли цементирующей мелкообломочной массы, появлением микротекстур с признаками заполнения более поздними сульфидами свободного пространства в рудокластах. На флангах сульфидные брекчии постепенно сменяются гравийно-псаммитовыми сульфидными турбидитами с характерной градацией обломочного материала и механоглифами в подошве слоев [Масленников, 2006; Сафина, Масленников, 2009]. Особое положение в разрезах колчеданных месторождений Урала занимают рудные диагениты, которые характеризуются интенсивными преобразованиями переотложенного сульфидного материала [Maslennikov et al., 2019].

Нами изучены коллювиальные сульфидные брекчии рудного тела № 5 Узельгинского медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал) с целью реконструкции условий формирования рудных залежей верхнего уровня месторождения.

Узельгинское месторождение расположено в центральной части одноименного рудного поля на территории Челябинской области. Оно приурочено к межкупольной депрессии между Александровским, Узельгинским и Баксановским риодацитовыми куполами, выполненной лавами и вулканокластическими отложениями кварц-плагиоклазовых риодацитов [Медноколчеданные..., 1988]. Рудные тела располагаются на