

## Литература

- Масленников В. В., Аюпова Н. Р., Масленникова С. П., Третьяков Г. А. и др.* Токсичные элементы в колчеданообразующих системах. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 340 с.
- Серавкин И. Б.* Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. Уфа: Гилем, 2010. 281 с.
- Целуйко А. С., Масленников В. В., Аюпова Н. Р.* Минеральные и текстурно-структурные особенности рудных фаций Юбилейного медно-колчеданного месторождения (Южный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 4. С. 50–56.
- Ayupova N. R., Maslennikov V. V., Tessalina S. G. et al.* Tube fossils from gossanites of the Urals VHMS deposits, Russia: authigenic mineral assemblages and trace element distributions // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 85. P. 107–130.
- Beltenev V., Nescheretov A., Shilov et al.* New discoveries at 12°58' N, 44°52' W, MAR: Professor Logatchev-22 cruise, initial results // InterRidge News. 2003. Vol. 12. P. 13–14.
- Dekov V. M., Petersen S., Garbe-Schönberg C.-D. et al.* Fe–Si-oxyhydroxide deposits at a slow-spreading centre with thickened oceanic crust: the Lilliput hydrothermal field (9°33'S, Mid-Atlantic Ridge) // Chemical Geology. 2010. Vol. 278. P. 186–200.
- Hegner E., Tatsumoto M.* Pb, Sr and Nd isotopes in basalts and sulfides from the Juan de Fuca ridge // Journal of Geophysical Research. 1987. Vol. 92. P. 11380–11386.
- Hein J. R., Clague D. A., Koski R. A., Embley R. W., Dunham R. E.* Metalliferous sediment and a silica-hematite deposit within the Blanco Fracture Zone, Northeast Pacific // Marine Georesources and Geotechnology. 2008. Vol. 26. P. 317–339.
- Herrington R., Zaykov V., Maslennikov V., Brown D., Puchkov V.* Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution // Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume. 2005. P. 1069–1095.
- Maslennikov V. V., Ayupova N. R., Herrington R. J., Danyushevsky 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.
- Mills R. A., Thomson J., Elderfield H., Hinton R. W., Hyslop E.* Uranium enrichment in metalliferous sediments from the Mid-Atlantic Ridge // Earth and Planetary Science Letters. 1994. Vol. 124(1). P. 35–47.
- Shaw T. J., Sholkovitz E. R., Klinkhammer G.* Redox dynamics in the Chesapeake Bay: the effect on sediment/water uranium exchange // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1994. Vol. 58(14). P. 2985–2995.

**А. В. Фирстова, Т. В. Степанова**  
ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург  
anetfirst@gmail.com

### **Минералогические и геохимические особенности сульфидных руд гидротермального поля Ашадзе-1, Срединно-Атлантический хребет**

Гидротермальное рудное поле Ашадзе-1 (12°58' с.ш., Срединно-Атлантический хребет) открыто российскими исследователями в 2003 г. [Бельтенева и др., 2004] и в дальнейшем изучалось в 2005 и 2007 гг. в рейсах НИС «Профессор Логачев» и в 2007 г. – в ходе российско-французской экспедиции «Серпентин» [Fouquet et al., 2008]. Рудное поле Ашадзе-1 располагается на глубине 4100 м в области развития пород

габбро-перидотитового комплекса на фланге рифтовой долины. Особенностью сульфидных руд поля Ашадзе-1 является преобладание труб, которые составляют более 80 % рудного материала, полученного при донном пробоотборе. Благодаря видеонаблюдениям, проведенным в 2007 г. с помощью необитаемого подводного аппарата «Виктор» в экспедиции «Сerpентин», было подтверждено наличие труб и трубных комплексов почти по всей территории рудного поля. Образцы труб являются наиболее информативными среди всех описываемых морфотипов сульфидных образований. Это связано с их зональностью и другими структурно-текстурными чертами, благодаря которым изучение минералого-геохимических особенностей трубного комплекса дает возможность проследить последовательность рудообразующего процесса и характер распределения основных и редких элементов.

Нами исследовано 55 образцов сульфидных руд, полученных на 12 станциях пробоотбора в ходе 24-го рейса НИС «Профессор Логачев» (2005 г.). В ходе работы выполнены оптические исследования, рентгенофазовый и микронзондовый анализы. Рентгенофазовый анализ выполнен на приборе Rigaku MiniFlex II с кобальтовым анодом в аналитическом ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». Микронзондовые исследования проводились там же на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с аналитической приставкой Oxford Instruments X-Max 20. Также использованы оригинальные результаты химического анализа.

Сульфидные трубы поля Ашадзе-1 подразделяются на три минеральных типа: халькопиритовый, пирротин-изокубанитовый и сфалеритовый.

*Халькопиритовые трубы.* В трубах этого типа основным минералом является халькопирит; второстепенными – изокубанит, борнит и нестехиометрические сульфиды меди (роксбиит, дигенит, джирит). Редко встречаются халькозин, ковеллин, спинокопит. В трубах этого типа выделяются две зоны – центральная халькопиритовая и наружная, сложенная борнитом и вторичными сульфидами меди. В зонах замещения халькопирита борнитом встречаются зерна кобальтпентландита. Только в этом типе труб в центральной зоне обнаружены единичные зерна теллуридов никеля с изоморфной примесью висмута. Самородное золото обнаружено в изокубанит-халькопиритовых агрегатах.

*Пирротин-изокубанитовые трубы.* Основными минералами этого типа труб являются пирротин и изокубанит, второстепенными – сфалерит, халькопирит. Встречаются пирит и марказит, замещающие пирротин. Редким типоморфным минералом является фаза Y ( $Cu_2 Fe_3 S_5$ ) [Mozgova et al., 2008]. Трубы представляют собой массивно-пористые агрегаты, пронизанные разновеликими, разноориентированными каналами, в наружной части которых спорадически встречается маломощная сфалеритовая зона. Типоморфной особенностью этого типа труб является присутствие минеральных фаз кобальта и мышьяка (кобальтин), наличие их изоморфных примесей в основных и второстепенных минералах и высокое содержание железа в сфалеритах (до 21 мас. %). Золото встречается в виде самородной фазы и электрума.

*Сфалеритовые трубы.* Основным рудообразующим минералом является сфалерит; второстепенными – пирротин, вюртцит, изокубанит, халькопирит и пирит. Для большинства сфалеритовых труб характерно четкое зональное строение. Обычно присутствуют две зоны: центральная сфалерит-пирротин-изокубанитовая и наружная сфалеритовая. Содержание железа в сфалеритах уменьшается от центральной зоны к наружной от 20 до 1 мас. %. Главной особенностью этих руд является присутствие олова (до 5.1 мас. %) в виде изоморфной примеси в сульфидах цинка с высоким

содержанием железа. В них также обнаружены электрум и кобальтин. Минералы свинца (галенит) и серебра (акантит, Ag-пирит, самородное серебро) встречаются в дендритах сфалерита с низким содержанием железа.

Акцессорная минерализация и примеси в главных рудообразующих минералах отражают условия формирования каждого типа руд и каждой зоны труб. К высокотемпературным образованиям относятся центральные части труб, сложенные халькопиритом и пирротин-изокубанитовыми агрегатами с минералами никеля и кобальта; среднетемпературные трубы характеризуются присутствием сульфидов цинка с высоким содержанием железа и минералами кобальта и мышьяка, электрума. Наружные части труб сложены низкотемпературным сфалеритом с низкими содержаниями железа и с присутствием минералов серебра, свинца.

Также следует обратить внимание на практически полное отсутствие в описываемых рудах пирита, преобладающего в рудах, связанных с базальтами [Hannington et al., 1995]. В трубах поля Ашадзе-1 пирит проявлен лишь в виде тонкого наружного слоя на некоторых сфалеритовых трубах и частично замещает пирротин в них. Из высокотемпературных восстановленных флюидов предпочтительнее отлагается пирротин, а не пирит. Однако образование либо моносульфида, либо дисульфида железа зависит не столько от температуры, сколько от концентрации ионов восстановленной серы в растворе. При высокой концентрации  $S^{2-}$  железо выделяется в виде пирита, при пониженной – в виде пирротина [Solomon et al., 2004]. Во флюидах «ультрабазитовых» полей содержание  $H_2S$  колеблется от 0.1 до 1.9 мМ, составляя, в среднем, 1.1 мМ, в то время как в «базальтовых» полях эти величины намного больше – 2.5–11 мМ (в среднем, 6.3 мМ) [Charlou et al., 2010]. Таким образом, есть основания предполагать, что отсутствие пирита в данном случае связано с дефицитом восстановленной серы, которая, возможно, расходуется в штокверке, сложенном пирротинном.

По сравнению с сульфидами САХ руды поля Ашадзе-1 значительно обогащены Zn ( $x_{cp} = 21.51\%$ ), Cu ( $x_{cp} = 12.3\%$ ), Co ( $x_{cp} = 2373$  г/т), Ni ( $x_{cp} = 250$  г/т), Sn ( $x_{cp} = 419$  г/т), Cd ( $x_{cp} = 329$  г/т), Pb ( $x_{cp} = 319$  г/т) и Ag ( $x_{cp} = 99.7$  г/т).

*Халькопиритовые трубы* по сравнению с другими разновидностями обогащены Cu ( $x_{cp} = 31\%$ ) и Co ( $x_{cp} = 3200$  г/т). Высокие концентрации Ni ( $x_{cp} = 1262$  г/т) и Se ( $x_{cp} = 1257$  г/т) являются типоморфным признаком этого типа руд. Характерно сравнительное обеднение Zn и его элементами-спутниками, особенно Ag ( $x_{cp} = 0.5$  г/т). Содержание Au ( $x_{cp} = 1.9$  г/т) ниже среднего значения по полю в 1.5 раза.

*Пирротин-изокубанитовые трубы* имеют цинково-медную специализацию. Содержание Cu в них вдвое больше, чем содержания Zn (15.0 и 7.6 %, соответственно). По сравнению с другими минеральными типами, эти руды максимально обогащены Co ( $x_{cp} = 5362$  г/т), Bi ( $x_{cp} = 5.7$  г/т) и Au ( $x_{cp} = 6.4$  г/т). Они резко отличаются от халькопиритовых труб незначительными содержаниями Ni ( $x_{cp} = 16.5$  г/т) и Se ( $x_{cp} = 33$  г/т).

*Сфалеритовые трубы* обогащены Zn ( $x_{cp} = 33.41\%$ ) и его элементами-спутниками: Cd, Ag, Pb, Sb, Ge, Sn. Средние содержания Au составляют 1.95 г/т, Cu – 5.1 %. В рудах отмечаются повышенные концентрации Mn ( $x_{cp} = 271$  г/т) и Ba (1171 г/т) относительно руд поля Ашадзе-1.

Геохимические и минералогические результаты указывают на значительные отличия руд поля Ашадзе-1, связанных с ультраосновными породами, и сульфидными рудами САХ, залегающими на базальтах [Fouquet et al., 2010]. Самой яркой особенностью является высокая (более 30 %) сумма содержаний Cu и Zn. Такое обога-

шение не может быть объяснено повышенными содержаниями Cu и Zn в ультрамафитах по сравнению с базальтами, так как в базальтах содержания этих элементов выше [Fouquet et al., 2010]. Возможно, это объясняется специфическим составом пород конкретного региона. Например, высокие содержания Cu и Zn в серпентинитах поля Рейнбоу предполагаются в качестве источника металлов в сульфидах [Fouquet et al., 2010].

Предполагается, что повышенные содержания Cu и Zn в рудах также могут быть связаны с особенностями состава и температуры разгружающегося флюида, сформированного в результате взаимодействия пород габбро-перидотитового комплекса с циркулирующими гидротермальными растворами и обедненной восстановленной серой. Кроме Cu и Zn, существуют и другие элементы, имеющие относительно высокие содержания в описываемых рудах, в первую очередь, Co и Ni [Fouquet et al., 2010]. Высокие концентрации Co стабильно присутствуют во всех типах труб, повышаясь в медных разновидностях. Обогащение Ni (и Se) проявлено только в высокотемпературных разновидностях, являющихся, возможно, продолжением штокверка. Наши данные подтверждают особенности состава руд, связанных с породами габбро-перидотитового комплекса. Однако золото, которое декларируется рядом авторов в качестве типоморфного элемента «ультрабазитовых» сульфидов [Fouquet et al., 2010], на начальных высокотемпературных стадиях развития гидротермальной системы, которая представлена в рудном поле Ашадзе-1, не дает значительных концентраций. Его среднее содержание (2.9 г/т) практически равно концентрации золота в рудах, приуроченных к базальтам (3 г/т). В работе [Hannington et al., 1986] отмечается, что обогащение золотом наиболее часто встречается в рудах «зрелых» гидротермальных полей и концентрируется в зоне вторичного обогащения, которая, по нашим данным, отсутствует в трубах гидротермального поля Ашадзе-1. Возраст сульфидных руд поля Ашадзе-1 оценивается примерно в 7.2 тыс. л., в то время как большинство сульфидов САХ гораздо древнее – в среднем, около 100 тыс. л. [Черкашев и др., 2013]. На основании данных по возрасту и составу руд можно предположить, что поле Ашадзе-1 является примером начальной стадии сульфидного рудообразования [Firstova et al., 2016].

## Литература

Бельтнев В. Е., Нецеретов А. В., Иванов В. Н. и др. Новое гидротермальное рудное поле в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта // Доклады Академии наук. 2004. Т. 397. № 1. С. 1–5.

Черкашев Г. А., Иванов В. Н., Бельтнев В. И. и др. Сульфидные руды северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 1–14.

Charlou J., Donval J., Konn C. et al. High production and fluxes of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> and evidence of abiotic hydrocarbon synthesis by serpentinization in ultramafic-hosted hydrothermal systems on the Mid-Atlantic Ridge // Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges, Geophysical Monograph Series. Eds. Rona P., Devey C., Dymont J., Murton B. Amer. Geophys Un., Washington, D. C. 2010. Vol. 188. P. 265–296.

Firstova A., Stepanova T., Cherkashov G. et al. Composition and formation of gabbro-peridotite hosted seafloor massive sulfide deposits from the Ashadze-1 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2016. Vol. 6. № 1. P. 19.

*Fouquet Y. et al.* Serpentine cruise-ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid Atlantic Ridge: First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields // *InterRidge News*. 2008. Vol. 18. P. 15–19.

*Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J. et al.* 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 // In: *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*, Geophysical Monograph Series. Eds. Rona P., Devey C., Dymont J., Murton B. Amer. Geophys. Un., Washington, D. C. 2010. Vol. 188. P. 321–367.

*Hannington M. D., Jonasson I. R., Herzig P. M., Petersen S.* Physical and chemical processes of seafloor mineralization at Mid-Ocean Ridges // In: *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interaction*; Monograph Series. Eds. Humphris S. E., Zierenberg R. A., Mullineaux L. S., Thomson R. E. Amer. Geophys. AGU., Washington, D. C. 1995. Vol. 91. P. 115–157.

*Hannington M. D., Peter J. M., Scott S. D.* Gold in sea-floor polymetallic sulfide deposits // *Economic Geology*. 1986. Vol. 81. P. 1867–1883.

*Mozgova N. N., Trubkin N. V., Borodaev Yu. S. et al.* Mineralogy of massive sulfides from the Ashadze hydrothermal field, 13° N, Mid-Atlantic Ridge // *Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46. P. 545–567.

*Solomon M., Tornos F., Large R. R. et al.* Zn-Pb-Cu volcanic-hosted massive sulfide deposits criteria for distinguishing brine pooltype from black smoker-type sulfide deposition // *Ore Geology Reviews*. 2004. Vol. 25. P. 259–283.

**А. С. Бич<sup>1</sup>, А. Ю. Петров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург  
As\_bich@mail.ru

<sup>2</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург

**Изучение металлоносных осадков для реконструкции  
процессов гидротермального рудообразования  
(на примере рудного узла Победа, Срединно-Атлантический хребет)  
(научный руководитель д.г.-м.н. Г. А. Черкашев)**

Металлоносными осадками (МО) называются неконсолидированные глубоко-водные отложения, формирующиеся в вулканически активных районах океанов и морей, содержащие в составе абиогенной части более 10 % железа [Гурвич, 1998]. Металлоносные осадки представляют собой ореолы рассеяния рудоносных гидротермальных источников, формирующих сульфидные рудные тела, поэтому используются в качестве поискового критерия на глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС). Кроме того, изучение МО может дать информацию о геохимической специализации сульфидных руд и процессе гидротермального рудообразования в целом. Цель исследований – оценка вклада различных факторов осадконакопления в состав МО рудного узла Победа на разных этапах эволюции гидротермальной системы.

Фактический материал работы представлен тремя колонками донных осадков длиной 65, 55 и 53 см, полученных в ходе 37-го рейса НИС «Профессор Логачев»,