

## СУЛЬФИДЫ МЕДИ И МЕДИ-ЖЕЛЕЗА КАК ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РУД

*Габлина И.Ф.*

Геологический институт РАН; Москва  
gablina@ilran.ru

Рассмотрены особенности состава, кристаллической структуры и парагенетических ассоциаций минералов системы медь-сера и медь-железо-сера, их распределение в современных океанских гидротермально-осадочных образованиях и в разновозрастных осадочных меденосных отложениях, в разной степени измененных (от диагенеза до начальных ступеней метаморфизма, а также подводного и поверхностного гипергенеза).

Основными объектами исследований служили первичные, метаморфизованные и гипергенно-измененные руды медистых песчаников и сланцев (из месторождений Мансфельд, Любин-Серошовице, Западного Приуралья, Джеккаган, Удокан, Гравийское и Сухарихинское), а также современные рудоносные осадки гидротермального поля Логачев-1и гидротермальные сульфидные руды полей Логачев-1, Логачев-2 и Рейнбоу Срединно-Атлантического хребта на поверхности дна океана.

Диагностика минералов осуществлялась с помощью рентгеновского анализа микропроб (метод Дебая, Гандольфи), который сочетался с минераграфическими исследованиями и рентгено-спектральным микроанализом.

Известно 10 природных соединений системы медь-сера: халькозин ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), метастабильная тетрагональная форма  $\text{Cu}_{2.0-1.96}\text{S}$ , джарлеит ( $\text{Cu}_{1.96}\text{S}$ ), роксбиит ( $\text{Cu}_{1.72-1.86}\text{S}$ ), дигенит ( $\text{Cu}_{1.75-1.78}\text{S}$ ), анилит ( $\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ ), джирит ( $\text{Cu}_{1.5-1.6}\text{S}$ ), спионкопит ( $\text{Cu}_{1.4}\text{S}$ ), яроуит ( $\text{Cu}_{1.1}\text{S}$ ), ковеллин ( $\text{CuS}$ ). Большая часть этих минералов имеет нестехиометрический состав (отношение медь-сера варьирует от 2 до 1), что связано с переходом части меди из одновалентного состояния в двухвалентное в присутствии кислорода, т.е. с окислением ее. Нестехиометрические минералы системы Cu-S отличаются от халькозина, дигенита и ковеллина низкой температурной устойчивостью (ниже 93°C для джарлеита, 50°C для роксбиита и 30°C для анилита). По составу, физическим свойствам и особенностям распространения выделяются два ряда: халькозин-дигенитовый ( $\text{Cu}_2\text{S}$  -  $\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ ) - высокомедистые сульфиды, и джирит-ковеллиновый ( $\text{Cu}_{1.6}\text{S}$ - $\text{CuS}$ ) - маломедистые сульфиды. Высокомедистые минералы не устойчивы в экзогенной обстановке, т.к. присутствие даже небольшого количества

кислорода в рудообразующей системе приводит к окислению и выносу меди.

Сульфиды меди и железа в изученных месторождениях представлены халькопиритом ( $\text{CuFeS}_2$ ), кубанитом ( $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ ), изокубанитом, борнитом ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) и идаитом ( $\text{Cu}_3\text{FeS}_4$ ). Кроме перечисленных стехиометрических минералов в системе медь-железо-сера известны также нестехиометрические соединения. В работе рассмотрен аномальный ("оранжевый") борнит с дефицитом меди в кристаллической решетке -  $\text{Cu}_{5-x}\text{FeS}_{4+x}$ . В литературе он получил название х-борнита и рассматривается как низкотемпературная кубическая модификация стехиометрического тетрагонального борнита. Х-борнит стабилен при температуре ниже  $75^\circ\text{C}$ . При повышении температуры в интервале  $75-140^\circ\text{C}$  (в зависимости от состава) он распадается на стехиометрический борнит и халькопирит [1,2,3 и др.].

Установлено, что нестехиометрические сульфиды меди и х-борнит являются типоморфными минералами экзогенных руд – современных рудоносных океанских осадков, неметаморфизованных медистых песчаников и сланцев, зон вторичного сульфидного обогащения и окисления. Выявляется приуроченность высокомедистых нестехиометрических сульфидов (с отношением  $\text{Cu/S}$  более 1.75) к первичным рудам, а нестехиометрических маломедистых (с отношением  $\text{Cu/S}$  менее 1.75) - к гипергенно измененным (табл.).

Стадии образования и преобразования рудовмещающих пород	Месторождения	Рудообразующие минералы	Типоморфные минералы систем Cu-S и Cu-Fe-S (химическая формула)	Верхний T-предел устойчивости типоморфных минералов, $^\circ\text{C}$	Продукты фазовых переходов типоморфных минералов
Диагенез	Рудоносные осадки Логачева-1 (САХ)	джарлеит <b>роксбиит</b> анилит спионкопит яроуит	<b><math>\text{Cu}_{1.72-1.86}\text{S}</math></b>	50-90	
Катагенез	Западное Предуралье, Мансфельд, Гравийское, Джекказган (рядовые вкрапленные руды)	джарлеит дигенит борнит <b>Х-борнит</b> халькопирит пирит марказит	<b><math>\text{Cu}_{1.96}\text{S}</math></b>  <b><math>\text{Cu}_{5-x}\text{FeS}_4</math></b>	93  75-140	Халькозин + дигенит  Халькопирит + борнит
Поздний катагенез-метагенез	Джекказган (богатые вкрапленные и жильные руды)	<b>халькозин</b> дигенит борнит халькопирит пирит	<b><math>\text{Cu}_2\text{S}</math></b>	435	дигенит

Зелено-сланцевая фация метаморфизма	Удокан	<b>халькозин</b> дигенит борнит халькопирит пирит (±пирротин)	<b>Cu<sub>2</sub>S</b> (смесь моноклинного и тетрагонального)	>450	дигенит
Амфиболитовая фация метаморфизма	Красное, Правый Ингамакит	халькопирит пирит <b>пирротин</b>	<b>Fe<sub>1-x</sub>S<sub>4</sub></b>		
Гипергенез	Логачев-1, Логачев-2 Рейнбоу (сульфидные постройки) Джезказган, Удокан, Красное, Правый Ингамакит, Сухарихинское	<b>джарлеит</b>  <b>анилит</b> <b>джирит</b> <b>спионкопит</b> <b>яроуит</b> <b>ковеллин</b> <b>X-борнит</b> борнит халькопирит	<b>Cu<sub>1.96</sub>S</b>  <b>Cu<sub>1.75</sub>S</b> <b>Cu<sub>1.5-1.6</sub>S</b> <b>Cu<sub>1.4</sub>S</b> <b>Cu<sub>1.1</sub>S</b> <b>CuS</b> <b>Cu<sub>5-x</sub>FeS<sub>4</sub></b>	93  30-75 ? 157 157 507 75-140	Халькозин +дигенит дигенит ? ковеллин ковеллин дигенит халькопирит +борнит

Метастабильная тетрагональная форма  $Cu_2S$ , стехиометрические халькозин и борнит более типичны для высокотемпературных руд эндогенного происхождения. Они установлены в современных гидротермальных образованиях на дне океана, в экзоконтакте магматогенного месторождения Талнах [4], в метаморфизованных рудах Удокана и альпийских жилах Джезказгана.

Выявленные закономерности распространения сульфидов меди и железа в различных генетических типах руд обусловлены их различной температурной и химической устойчивостью и позволяют использовать их в качестве минералов-индикаторов для восстановления термической и физико-химической истории формирования месторождений меди в древних осадочных бассейнах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 05-05-64952, 08-05-00799).

1. Yund R., Kullerud G. Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S system. // J. Petrol. 1966. V. 7. Pt. 3. P. 454 - 488.

2. Лурье А.М., Габлина И.Ф. Зональный ряд сульфидов на месторождениях меди красноцветных формаций. Геохимия. 1976. №1. С.109-115.

3. Сатпаева М.К. Руды Джезказгана и условия их формирования. А.-А.:Наука. Каз.ССР. 1985.

4. Габлина И.Ф. Тетрагональный сульфид меди (1) в природных рудах // Докл. РАН. 1992. Т.323. № 6. С.1170-1173.