

МЕТАЛЛОГЕНИЯ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

НОВОЕ В МИНЕРАЛОГИИ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА*

И.В. Викентьев

Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Макля, 6, Москва, Россия, 117198

Изучены формы нахождения Au, Ag, Bi, Se и Te в крупных колчеданных месторождениях — слабо метаморфизованных Сафьяновском и Узельгинском, деформированных Гайском и Учалинском, а также небольших полиметаллических и Cu-Co месторождениях.

Особенно остро проблема комплексного использования руд стоит для колчеданных месторождений, которые являются важнейшим источником цветных и благородных металлов, ряда редких элементов. При их отработке весьма существенны потери благородных металлов (в основном на стадии обогащения) — в отвальные хвосты уральских горнообогатительных комбинатов (ГОК) попадает до 82% исходного количества золота, что превышает 12 т в год. Обусловлены эти потери в первую очередь подчиненной ролью легко извлекаемого относительно крупного золота и тем, что в рудах этих месторождений до 87% Au находится в невидимой форме. В результате по запасам накопленного металла хвостохранилища ГОКов (Гайского, Учалинского) сопоставимы с крупными месторождениями золота. Под термином «невидимое золото» рассматривается его внеструктурное ультрамикроскопическое (менее 0,1 мкм) и структурное изоморфное состояние [1].

На Урале преимущественным развитием пользуются Cu-Zn месторождения уральского типа, в рудах которых $Cu \geq Zn$: Гайское (Ю. Урал), Сафьяновское (Ср. Урал), реже $Zn > Cu$: Учалинское, Узельгинское, Молодежное (Ю. Урал); мелкими являются колчеданно-полиметаллические месторождения (Cu-Zn-Pb-Au-баритовые), приближающиеся к типу куроко: Барсучий Лог, Джусинское, Александринское (Ю. Урал) и Cu-Co месторождения (кипрский тип): Пышминско-Ключевское (Ср. Урал). Преобладают сплошные сульфидные руды. Они характеризуются мас-

* Исследования выполняются при финансовой поддержке РФФИ (проекты 06-05-64614, 07-05-00808), ОНЗ РАН (Программа «Наночастицы»).

сивной, гнездово-вкрапленной, полосчатой, сланцевато-полосчатой, брекчиевидной и прожилковой текстурой. Минеральный состав руд в основном представлен пиритом (до 90 об.%), сфалеритом и халькопиритом; обычным второстепенным минералом является блеклая руда, на некоторых месторождениях также борнит, галенит, пирротин и магнетит.

На неметаморфизованном *Сафьяновском* месторождении наиболее обогащены Au и Ag Cu-Zn руды с распределением золота примерно в равных концентрациях в халькопирите (среднее 2,5 г/т), пирите (1,9 г/т), сфалерите (1,5 г/т), а серебра с незначительным уменьшением в ряду сфалерит (150 г/т) — халькопирит (140 г/т) — пирит (80 г/т). Выделения самородного золота (пробность 685—800) размером 5—25 мкм расположены в халькопирите и сфалерите или на их контакте и в раннем пирите. В образцах Сафьяновского месторождения впервые для колчеданных руд Урала были установлены айкинит CuPbBiS_3 и виттихенит Cu_3BiS_3 [1].

В *Узельгинском* месторождении наиболее золотоносные участки (3—12 г/т) представлены рудами с повышенной ролью блеклой руды, галенита, барита. В пирите с максимальными концентрациями Au (16—20 г/т) нейтронно-активационным анализом выявлены высокие содержания Ag (130—150 г/т) и Se (0,01—0,02%). В пробах пирита с высокими содержаниями Au (6—11 г/т) присутствуют следующие ассоциации микроэлементов: Au-Hg-Se, Au-Ag-Sb, Au-Ag-Sb-Hg. В сфалерите рядовые содержания Au 1,5—4,5 (в целом 0,9—10,6) г/т, в наиболее золотоносном сфалерите ассоциация Au-Ag-Sb-Hg. В халькопирите обычно 1,5—3 г/т Au (1—18,6 г/т), при максимальной золотоносности характерные примеси — Au, Ag, As, Hg. Максимальная положительная корреляция Au с Ag в пирите при довольно большой дисперсии содержаний отражает присутствие в нем золота в виде мелких выделений электрума, а ассоциации элементов-примесей (Au-Sb-Se-Hg) указывают на наличие микровключений минералов золота, представленных его соединениями с этими элементами Au с Sb, Se и Hg. Рентгено-спектральным микроанализом (РСМА) установлено также в галените 0,05—0,2 мас.% Au, наряду с ним присутствуют Pd 0,03—0,14 мас.% и Hg (около 0,1 мас.%, до 0,25 мас.%). Основным концентратом серебра является блеклая руда (0,1—0,6 мас.%, среднее 0,3 мас.%). Среди относительно редких в рудах теллуридов (с размером зерен до 100 мкм) преобладает алтаит, распространены также петцит, колорадоит, гессит, самородный теллур [3]. Основные примеси в теллуридах, кроме Au и Ag-Ni и Sb. В обогащенных золотом и цинком рудах установлено самородное золото размером 10—20 мкм, иногда встречаются более крупное — до 150 мкм. Золотины преимущественно имеют состав 60—70 мас.% Au и 40—30 мас.% Ag. В некоторых зернах присутствуют 1—3 мкм эмульсиевидные включения алтаита, близкие к структурам распада твердого раствора; в золоте встречены вросстки галенита и пирита и выделение экзотической фазы — соли PbBr_2 .

На *Учалинском* месторождении золото в основном рассеяно в пирите и халькопирите в тонкодисперсном виде. В галените важными являются примеси селена (0,4 мас.%), серебра (до 0,52 мас.%) и висмута (1,3 мас.%); установлена необычная разновидность (новый минеральный вид?) — сульфоселенид свинца,

состав которого пересчитывается на формулу Pb_2SeS . Блеклая руда представлена в основном маложелезистым теннантитом. Также проявлены Zn- и Fe-теннантит, Zn-Fe-тетраэдрит, Zn-Fe-теннантит, Ag-теннантит-тетраэдрит и Ag-тетраэдрит (с 7—8 мас.% Ag). Зерна высокосурьмянистых разностей обычно негомогенны с правильной контрастной ростовой зональностью. Теллуриды в рудах Учалинского месторождения представлены алтаитом, гесситом, теллурувисмутитом, калаверитом, колорадоитом. Самородное золото (пробность 451—873), с преобладающим размером выделений 5—25 мкм вместе с другими минералами Au и Ag (теллуридами — гесситом, эмпресситом, креннеритом; сульфидом — петровскаитом $Ag_3Au_2S_2$ и сульфоарсенидом — пирсеитом $(Ag,Cu)_{16}(Sb,As)_3S_{11}$) входит в состав поздних теллуридно-сульфидно-сульфосольных парагенезисов. Эмпрессит установлен в рудах месторождения впервые, пирсеит и петровскаит обнаружены впервые для Урала.

В *Гайском* месторождении в отдельных участках (обычно в лежачем и в вишечем контактах крутопадающей колчеданоносной зоны, состоящей из серии залежей) встречаются сильно обогащенные золотом руды с преобладанием сфалерит-блекловорудной (\pm борнит) ассоциации с содержанием Au до 90 г/т, Ag до 270 г/т, Ва первые %, As до 0,6%, Hg до 0,2%, Te до 0,04%. Эти участки характеризуются преобладанием пирита кубического габитуса [2]. Он содержит, по сравнению с пентагондодекаэдрическим пиритом, больше Au 3,5 г/т (0,9), As 0,047% (0,03), Sb 0,0032% (0,0004), Zn 0,145% (0,08); пробность самородного золота (субмикроскопические выделения по трещинам в пирите) колеблется от 740 до 920. В богатых Cu и Cu-Zn рудах самородное золото встречается в виде достаточно крупных зерен до 0,1 мм, редко 0,5 мм в основном изометричной формы или ксеноморфных выделений среди сульфидов. Также как и тонкое золото микровключений в пирите, оно относительно высокопробное, но общие пределы колебаний пробности максимальны по сравнению с прочими уральскими месторождениями (421—974, в большинстве > 75 мас.% Au). Блеклая руда в ассоциации с самородным золотом представлена теннантитом и отличается пониженными концентрациями Ag (0,05—0,16 мас.%) и отсутствием примеси Au. Практически отсутствуют эти благородные металлы и в халькопирите. В борните установлены максимальные содержания Ag (0,16—0,55 мас.%, обычно $> 0,4$ мас.%) и заметные Au (до 0,17 мас.%, в половине $> 0,1$ мас.%). Максимальные содержания Au присутствуют в галените (до 0,4 мас.% Au и 0,14 мас.% Ag). В борнитовых рудах впервые установлены сульфиды Ge и Sn: станноидит $Cu_8Fe_2(Fe,Zn)Sn_2S_{12}$, моусонит $Cu_6Fe_2SnS_8$ и германит $Cu_{26}(Ge,V,As)_4Fe_4S_{32}$. Самородное золото входит в состав поздней минеральной ассоциации, наряду с галенитом, теннантитом, борнитом и более редкими колорадоитом (до 4,2 мас.% Au), тетраэдритом, алтаитом и теллуридами Au и Ag (калаверит, петцит, гессит, мутманит и монтбрейит). Содержание в рудах видимых выделений самородного золота и теллуридов повышается к контактам рудных блоков-будин, где отмечается рост степени метаморфического преобразования сульфидных руд.

В массивных пирротин-халькопиритовых рудах *Пышминско-Ключевского* метаморфизованного месторождения обнаружены ранее не известные на месторождении виоларит, Ni-троилит, кобальтин, кубанит, молибденит, колорадоит, теллуровисмутин, а из собственных минералов благородных металлов — самородное золото, петцит, аргентопентландит. В самородном золоте содержатся 1—45 ат.% Ag и незначительные примеси Cu, Fe и Hg. Существенная примесь Au иногда фиксируется в гессите (0,3 мас.%) и кобальтпентландите (1,4 мас.%).

В слабо преобразованных рудах *Молодежного* месторождения были диагностированы самородное золото, петцит, гессит. Состав самородного золота (мас.%): Au 78,4—84,6, Ag 14,0—19,3, Cu 0—1,14, Hg 0—0,24. Установлены теллуриды: редкий для колчеданных руд петцит, а также гессит, содержащий до 0,18 мас.% Au, до 0,3 мас.% Hg, до 0,21 мас.% Pb, до 0,2 мас.% Bi, и алтаит, в котором выявлены до — до 0,18 мас.% Au, до 0,3 мас.% Hg, до 0,21 мас.% Pb, до 0,2 мас.% Bi, в алтаите до 0,22 мас.% Au, до 1,4 мас.% Ag, до 0,4 мас.% Hg, до 0,86 мас.% Se, до 0,33 мас.% Bi, в теллуровисмутите до 0,19 мас.% Au, до 0,8 мас.% Ag, до 1,1 мас.% Cu, 2,8—5,4 мас.% Pb, до 0,85 мас.% Se, до 0,35 мас.% Sb, в тетрадимите до 0,54 мас.% Ag, до 1,06 мас.% Cu, до 2,8 мас.% Se. В некоторых анализах тетрадимита атомное количество селена превышает количество серы, что свидетельствует о присутствии минералов тетрадимит-кавацулитовой серии $Bi_2Te_2(S_xSe_{1-x})$, более близких кавацилиту. Блеклая руда представлена теннантитом и теннантитом-тетраэдритом с Au (до 0,15 мас.%), Ag (до 0,7 мас.%), Hg (до 0,32 мас.%), Bi (до 0,62 мас.%). В борнитовых рудах месторождения в виде мельчайших (< 1—20 мкм) выделений установлены сульфиды серебра и меди: штрмейерит $Ag_{0,93}Cu_{1,07}S$, ялпаит $Ag_{1,55}Cu_{0,45}S$ и маккинстрит $Ag_{1,2-x}Cu_{0,8+x}S$, а также моусонит $Cu_6Fe_2SnS_8$.

В слабо метаморфизованных рудах *Александринского* месторождения наибольшее значение для золота имеют пирит (уходящий в хвосты — с содержанием Au до 0,022 мас.%), сфалерит (до 0,12 мас.%) и затем халькопирит (до 0,09 мас.%), а для серебра — сфалерит (до 0,24 мас.%) и борнит (до 0,27 мас.%). Пробность золота невысокая, в пределах 668—816. В его составе присутствует 19—33 мас.% Ag, отмечается также примесь до 0,5 мас.% Hg и до 0,1 мас.% Cu, Fe и Sb. Из редких минералов в борнитовых рудах встречен реньерит $Cu_{20}(Zn_{2-x},Cu_x)(Ge_{4-x},As_x)Fe_8S_{32}$. Блеклая руда представлена теннантитом с повышенными концентрациями Bi (до 7 мас.%) и Te (до 5 мас.%), содержащим Ag (< 0,02—0,09 мас.%) и Hg (до 0,11 мас.%).

На месторождении *Барсучий Лог* самородное золото размером до 0,02 мм пробностью 550—780 встречено в ассоциации галенит + халькопирит + блеклая руда. По составу блеклой руды преобладает теннантит, встречается Ag-теннантит-тетраэдрит (до 2,14 мас.% Ag), местами заметна примесь Bi — до 2,43 мас.% в теннантите и до 3,52 мас.% в тетраэдрите. На *Джусинском* месторождении линзы колчеданно-полиметаллических руд рассечены многочисленными дайками габбро-диоритов и микродиоритов. Обычно в рудах присутствует высокомышьяковистая блеклая руда с содержанием 0,5—1,1 мас.% Ag, по составу отвечающая

Zn-теннантиту и Zn-теннантит-тетраэдриту. В крупных зернах сурьмянистой блеклой руды встречаются структуры распада: матрица их сложена Fe-теннантит-тетраэдритом, с ним тонко срastaются Ag-Fe-теннантит-тетраэдрит, аргентотетраэдрит (до 13,6 мас.% Ag) и мелкоигльчатые ромбовидные в сечении кристаллы арсенипирита, а на периферии появляется кайма аргентотетраэдрита; в таких распавшихся зернах блеклой руды встречены мелкие выделения гессита, галенита, электрума и низкопробного (430—610) ртутистого золота (8—13 мас.% Hg). В рудах месторождения на контакте в дайками обнаружены зерна пирротина и арсенипирита, а в серии зерен халькопирита установлены примеси 1—1,7 мас.% Bi и до 0,24 мас.% Ag. Среди составов Au-Ag сплавов преобладает электрум (пробность 619—676). Встречен участок, сложенный ассоциацией барит + пирит + As-кобальтпентландит + самородные серебро и олово.

Выявлена связь содержания золота в колчеданных рудах Урала с физико-химическими параметрами их образования. Большая часть парагенезисов колчеданных руд, обогащенных Au, образовалась при относительно высокой летучести серы и умеренной температуре. Ассоциации с самородным золотом формировались в условиях близких халькопирит-борнитовому равновесию (фугитивность серы $lg f_{S_2} = 10^{-5} \dots 10^{-12}$ и $T = 250—350$ °C).

В целом в колчеданных месторождениях Урала от кипрского типа к уральскому и куроко усложняется минеральный состав и растет доля редких и второстепенных минералов (галенит, блеклая руда, самородное золото, минералы Ag, Te, Bi, Sn). Это отражает возрастающую роль континентальной коры, как источника металлов. Установлено много собственных минералов Au и Ag: самородные золото и серебро, теллуриды (гессит, штютцит, сильванит, калаверит, креннерит, петцит, вольтскит, мутманит, монтбрейит), сульфиды (штроейерит, ялпаит, маккинстрит, петровскаит, аргентит, аргентопентландит) и сульфогаленит (пирсеит). Из других мало распространенных минералов, содержащих Au и Ag, встречены алтаит, колорадоит, тетрадимит, кавацулит и самородный теллур. Часть из них представляет собой новые для месторождений минералы, некоторые (петровскаит, пирсеит, кавацулит, айкинит, виттихенит, станноидит, моусонит, германит и реньерит, анилит, спионкопит и ярроуит) установлены на Урале впервые. Происхождение рудных ассоциаций с видимым самородным золотом и редкими минералами Au, Ag, Ge и Sn в основном связано с процессами метаморфизма колчеданных залежей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. — М.: Научный мир, 2004.
- [2] Чантурия Е.Л., Кринов Д.И., Бортников Н.С. О некоторых особенностях внутреннего строения и состава пирита золотосодержащих месторождений // Горный информационный бюллетень. — 2004. — № 7. — С. 309—315.
- [3] Викентьев И.В., Молошаг В.П., Юдовская М.А. Формы нахождения и условия концентрирования благородных металлов в колчеданных рудах Урала // Геология рудных месторождений. — 2006. — № 2. — С. 91—125.

**NEW DATA ON MINERALOGY
OF VOLCANIC-HOSTED MASSIVE SULFIDE
DEPOSITS IN THE URALS**

I.V. Vikentyev

Engineering faculty
People's Friendship Russian University
Miklucho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The study of mode of occurrence of Au, Ag, Bi, Se and Te covers a row of giant VMS deposits of the Urals (Uralian or Cu-Zn-pyritic type): nondeformed Safyanovsk, altered by late hydrothermal processes Uzelginsk, intensively deformed Gay and Uchaly and a few small polymetallic and Cu-Co deposits.