
ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕРЕБРА

А.В. Дружинин, Е.В. Карелина

Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115923

Проведен обзор мирового рынка серебра. Рассмотрены главные типы промышленных месторождений серебра, охарактеризованы геологическое строение, минеральный состав и генезис наиболее представительных из них.

Серебро (Ag, argentum) — химический элемент IV подгруппы периодической системы элементов, благородный металл, не подверженный коррозии в обычных условиях. В природе серебро встречается в самородном (металлическом) состоянии или в соединениях с другими элементами в минералах, но преимущественно как примесь в золото-серебряных, медных и свинцово-цинковых рудах, из которых добывается 70—80% всего серебра. Серебро используется в ювелирной отрасли и производстве посуды, высоким остается спрос на серебро в промышленности — в производстве плоскочелюстных телевизоров, электронных компонентов. Новой расширяющейся сферой потребления серебра является производство сверхпроводящих продуктов при изготовлении лабораторных принадлежностей (провода, тиглей и т.п.). Антисептические свойства серебра позволяют использовать его в системах очистки воды и антибактериальной обработке тканей и стелек. Этот благородный металл широко применяется в сплавах как заменитель олова (2% Ag заменяют 30% Sn) при изготовлении аккумуляторных батарей и катализаторов для химической промышленности, в фото- и кинопромышленности (на изготовление светочувствительных эмульсий).

Во многих странах статистика производства серебра закрыта, однако по некоторым оценкам общее мировое производство этого металла в 2006 г. составило 27,5 тыс. т, в том числе добыто из руд 18,9 тыс. т. В связи с повышающимся спросом на этот металл и вовлечением его в новые сферы производства в будущем ожидается рост мировой добычи серебра. Страны Латинской Америки по-прежнему лидируют в мировом производстве. Крупнейшими производителями, располагающими подтвержденными запасами серебра, превышающими 15 тыс. т, остаются Перу, Мексика, Австралия, США, Польша, Канада, Китай, Россия, Казахстан. В недрах этих стран сосредоточено около 80% подтвержденных запасов мира. Лишь четвертая часть этого металла добывается из собственно серебряных месторождений, разрабатываемых при содержании серебра не менее 100 г/т, а остальное серебро получают попутно при добыче меди, цинка, свинца, золота. В связи с этим объем поставок серебра на мировой рынок в значительной степени зависит от цен на золото, промышленные металлы и, следовательно, от объемов их добычи. Кроме того, мировой промышленный спрос

на серебро почти на 20% обеспечивается за счет вторичного металла, который производится из лома, серебряносодержащих сплавов, а также из отработанных фотоматериалов и катализаторов.

Среднее содержание серебра в земной коре, по А.П. Виноградову, $7 \times 10^{-6}\%$. Максимальные его концентрации устанавливаются в глинистых сланцах, где достигают $9 \times 10^{-5}\%$. Серебро характеризуется относительно низким энергетическим показателем ионов, что обуславливает незначительное проявление изоморфизма этого элемента и сравнительно трудное его вхождение в решетку других минералов. Наблюдается лишь постоянный изоморфизм ионов серебра и свинца. По мере снижения температуры образования галенитов гидротермального происхождения намечается тенденция к уменьшению содержания в них серебра. Ионы серебра входят в решетку самородного золота, достигая почти 50% в электруме (серебристом золоте). В небольшом количестве ион серебра входит в решетку сульфидов и сульфосолей меди, а также теллуридов и сульфосолей.

Главнейшие минералы серебра: самородное серебро Ag (обычно содержит механическую примесь Hg, Au, Cu, Bi, Sb); аргентит Ag_2S (81,1% Ag); прустит Ag_3AsS_3 (65,4% Ag); пираргирит Ag_3SbS_3 (65,3% Ag); стефанит Ag_5SbS_4 (68,5% Ag); полибазит $(Ag,Cu)_{16}Sb_2S_{11}$ (62,1—84,9% Ag); кераргирит $AgCl$ (75,3% Ag). При окислении серебряносодержащих эндогенных месторождений серебро накапливается в зоне вторичных сульфидов и частично в зоне окисления.

Все месторождения серебра являются гидротермальными. Среди них выделяются следующие типы (формации): серебряносодержащие свинцово-цинковые и медные; золото-серебряные; собственно серебряные; оловянно-серебряные.

Серебряносодержащие свинцово-цинковые и медные месторождения являются основным источником серебра. К ним относятся скарновые и гидротермальные месторождения свинцово-цинковых, медных, колчеданно-полиметаллических и медно-колчеданных руд. Они залегают в разнообразных геологических обстановках и имеют различный возраст. Содержание серебра в свинцово-цинковых месторождениях изменяется от 10 до 1000 г/т и более, колчеданно-полиметаллических — от 100 до 350 г/т, медно-порфириновых — от 0,5 до 85 г/т, медистых песчаниках и сланцах — от 1 до 250 г/т. Повышенные содержания серебра связаны с блеклыми рудами (до 1800 г/т и более) и галенитами (от 500 до 7000 г/т).

Золото-серебряные и серебряные месторождения размещаются главным образом в пределах Тихоокеанского рудного пояса, а также в азиатской и карпатской ветвях Средиземноморского пояса. Пространственно они связаны с образованиями мезо-кайнозойского вулканизма подвижных зон. В Американском секторе Тихоокеанского пояса золото-серебряные месторождения известны в провинции Бассейнов и Хребтов, по периферии плато Колорадо, в Скалистых Горах и Мексике.

В восточном полушарии золото-серебряные месторождения сосредоточены на современных островных дугах, где руды характеризуются повышенной меденосностью.

Рудные тела представлены жилами выполнения и минерализованными зонами дробления. Изменения вмещающих пород выражаются в адуляризации и серицитизации. В составе рудных тел преобладает халцедоновидный кварц, в меньших количествах встречаются родонит и родохрозит. Характерны ритмичнополосчатые, фестончатые и колломорфные текстуры. Формирование руд происходило в две стадии: сульфидную и сульфосольную. Серебросодержащие минералы — блеклые руды, акантит, полибазит, пираргирит, стефанит и сложные сульфосоли серебра со свинцом и висмутом. Руды обогащены Se и Te.

Крупнейшие в мире собственно серебряные месторождения сосредоточены в Мексике. Добыча серебра осуществляется более чем на 30 рудниках. Важнейшие из них расположены в трех рудных районах Мексики — Пачука, Гуанахуато и Реаль-де-Анхелес (шт. Сакатекас).

Золотосеребряные месторождения рудного поля Гуанахуато, расположенного в 400 км к северо-западу от г. Мехико, являются типичными представителями близповерхностных вулканогенных гидротермальных образований. С момента открытия (1554 г.) до 2007 г. здесь было добыто 33,4 тыс. т серебра и 167 т золота.

Рудное поле Гуанахуато площадью около 500 км² входит в пределы третичного вулканогенного пояса Западной Сьерра-Мадре и приурочено к пологому северо-восточному крылу антиклинального сооружения.

Площадь рудного поля сложена породами мезо-кайнозойского возраста. Мезозойские отложения в основном представлены осадочными породами (филлиты, глинистые сланцы, известняки) и лавами от среднего до кислого состава. Вулканогенно-осадочные породы несогласно перекрываются горизонтально залегающими эоценовыми конгломератами, мощность которых местами достигает 1400 м. Конгломераты, в свою очередь, перекрываются почти 700-метровой толщей вулканогенных пород (риолиты, андезитовые туфы и лавы).

В пределах рудного поля обнажаются крупные интрузивы мелового-эоценового возраста и мелкие интрузивные тела, залегающие среди олигоценых вулканитов. Состав их меняется от диоритов до гранитов. Дайки андезит-риолитового состава, секущие лавы, вероятно, являются подводными каналами для перекрывающих потоков эффузивных пород.

На рудном поле Гуанахуато выделяются две группы разрывных нарушений сбросового типа: северо-западного и близширотного простирания. Разрывы первой группы являются главными рудоконтролирующими структурами. Они сгруппированы на трех участках, расположенных в 3—4 км друг от друга (с запада на восток): Ла-Лус, Вета-Мадре и Ла-Сьерра.

На участке Ла-Лус известно пять жил, главная из которых, мощностью до 5 м, протягивается на 8,5 км и имеет падение на юго-запад под углом 60—75°.

Участок Вета-Мадре представлен самой крупной на рудном поле жилой протяженностью 25 км и мощностью от 0,5 до 5 м. Она сопровождается с обеих сторон зоной штокверкового оруденения, шириной достигающей 100 м. Рудная зона Вета-Мадре состоит как бы из двух смещенных (на расстояние 1 км) и заходящих друг за друга зон, ограниченных по простиранию близширотными разломами.

Генеральное простирание жилы — 330° , падение юго-западное, меняется от 65° в северной части до 45° в центральной и южной частях. Жила Вета-Мадре, приуроченная к сбросу с амплитудой перемещения более 1300 м, прослеживается на глубину 600 м. Разрабатывается несколькими рудниками (Пирисима, Торрес, Райяс, Ката, Валенсиана, Сан-Игнасио и др.). Результаты бурения свидетельствуют о том, что серебряно-золотая минерализация продолжается на глубину под существующими выработками, а на некоторых площадях можно предположить улучшение качества руды с глубиной. Оценка достоверных запасов, основанная на этих работах и проведенная Cooperative в 2000 г., составила 369,535 тыс. т руды со средним содержанием золота 1,73 г/т, серебра — 165 г/т.

Участок Ла-Сьерра включает несколько жил, сопровождающихся апофизами. Мощность их достигает 20 м, падение на юго-запад под углом $45\text{--}80^\circ$. В районе шахты «Старая» рудные тела с промышленным оруденением обнажаются на поверхности, их протяженность по простиранию составляет 100 м на глубину 300 м. По наблюдениям Вассало Моралеса, рудовмещающие нарушения (на примере рудника Лас-Торрес, участок Вета-Мадре) характеризуются развитием изгибов, с которыми связано образование рудных столбов, являющихся основными объектами эксплуатации. Эти рудные столбы имеют мощность от нескольких десятков сантиметров до 90 м, протяженность — от нескольких метров до 300 м и более. Содержание благородных металлов в них в среднем составляет: Ag 450 г/т и Au 2,5 г/т, в то время как в кварц—карбонат-адуляровых жилах оно соответственно равно 10 и 0,1 г/т. На руднике «Себада» содержание серебра — 1460 г/т и золота 5 г/т.

Промышленные рудные тела слагают, вероятно, не более 20% общей протяженности минерализованных зон. Минеральный состав на всех трех участках примерно одинаковый. Жилы в основном сложены кварцем, карбонатом и адуляром. В этой жильной массе в виде вкрапленности и скоплений встречаются рудные минералы. Из них главными являются серебряносодержащие — акантит, агвиларит, аргиродит, науманит, пираргирит, прустит и минералы золота — золото самородное и электрум. Сульфиды — халькопирит, сфалерит, галенит — имеют подчиненное значение.

С глубиной, по данным В. Гросса, минеральный состав руд несколько изменяется. Серебряно-золотые руды на верхних и средних горизонтах на глубине ниже 1700 м сменяются полиметаллическими (преимущественно медными) рудами. Отмечается, что содержание Au, а также отношение Au/Ag увеличивается с северо-запада на юго-восток от одного рудного столба к другому при одновременном уменьшении их размеров.

Процесс минерализации происходил в три стадии: 1) кварцевую с небольшим количеством минералов золота и серебра; 2) кварцевую (халцедоновидный кварц) с кальцитом и адуляром и основной массой рудных минералов, главными из которых являются члены акантит-агвиларит-науманитового ряда, полибазит, электрум, самородные золото и серебро и сульфиды Cu, Zn и Pb; 3) пострудную кварц-карбонатную. Характерно повышенное содержание в рудах селена: макси-

мальные его концентрации установлены в самородном серебре (2,48%) и полибазите (5,53%). Изменения вмещающих пород выражаются в пропилитизации, адуляризации, аргиллизации, серицитизации и окварцевании.

По данным гомогенизации газовой-жидкой включений кварца и кальцита установлено, что минералообразование происходило при температуре от 340 °С до 150 °С. Отложение минералов серебра и золота происходило при температуре от 200 °С до 270 °С. Существует несколько точек зрения на генезис месторождения. Одни ученые пытаются связать оруденение с гранитоидами, но последние являются более древними, чем оруденение. П. Тейлор предлагает латеральсекреционную модель и наконец В. Моралес придерживается мнения, что основным источником минерального вещества является магматический очаг, обусловивший третичный вулканизм. Предполагается, что источником рудного вещества являются осадочные породы мезозоя, из которых это вещество извлекалось грунтовыми водами, нагретыми в результате вулканической деятельности.

В Чили к *собственно серебряным месторождениям* относятся Уантахайя, Трес-Пунтас, Чимберос, Чаньярсильо, Амарга и Аркерос. Их разработка интенсивно производилась в XIX в. Большая часть месторождений сконцентрирована между 26°30' и 30°20' ю.ш. в узкой полосе развития морских серий, главным образом известняков, лютитов и известковистых кварцитов и кремнистых пород частично с прослоями вулканических андезитовых пород нижнего мела. Примером может служить месторождение Чаньярсильо, расположенное в основании купола, сложенного чередующимися пластами известняков и туффов неокомского возраста. Жилы крутопадающие, меридионального, северо-восточного, реже северо-западного простирания. Наиболее крупные из них прослеживаются на 1500—2000 м при средней мощности около 1 м. Мощность жил увеличивается при пересечении пластов известняка и уменьшается (до 10 см) в туффитах. Содержание серебра в обогащенных участках достигало 2,5%. В составе первичных руд — пирит, арсенопирит, сфалерит, халькопирит, борнит, галенит, глаукоdot, герсдорфит, прустит, пирсеит, тетраэдрит, фрейбергит, полибазит, пираргирит, миаргирит. До глубины 300 м развита зона окисления и вторичного обогащения.

Значительное количество небольших по масштабу жильных серебряных месторождений, ассоциирующих с кайнозойским вулканизмом, известно в Перу (Западная Кордильера Перуанских Анд). Рудные жилы кварц-кальцит-родохрозитового состава залегают в андезитовых вулканитах нижнего-среднего миоцена (20—14 млн лет). Протяженность их от 500 до 3000 м с развитием брекчиевых, полосчатых и кокардовых текстур. В составе жил присутствуют пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, А-тетраэдрит, фрейбергит, серебрянодержащий полибазит, пираргирит, аргентит. Возраст оруденения — 11—6 млн лет. Установлено, что обогащенные участки развиты в андезитах с содержанием SiO₂ 57—63% и приурочены к местам сочленения жил разного простирания. Замечено также, что с повышением содержания родохрозита и кальцита в жилах возрастает и концентрация серебра.

Оловянно-серебряные месторождения. Месторождения этой формации получили развитие во внешней зоне Тихоокеанского пояса, реже они встречаются

в активизированных участках (наложенных впадинах) его внутренней зоны. Они залегают среди вулканических пород субвулканических массивов или метаморфических терригенных отложений. Рудные тела представлены минерализованными зонами дробления, штокверками и жилами. Месторождения многостадийные. Образование руд начиналось с выделения касситерита и пирита. Позднее происходило отложение различных сульфосолей, в том числе серебра. Минералами-концентраторами серебра являются серебряносодержащий станнин, канфильдит, реже андорит, пираргирит, миаргирит, акантит. Отложение минералов происходило из слабо кислых или слабо щелочных растворов при сравнительно низкой температуре (200—100 °С).

Наибольшее распространение получили оловянно-серебряные месторождения, расположенные на западе Боливии. Месторождения образуют рудный пояс, вытянутый вдоль Восточных Анд на 800 км. Наиболее продуктивное звено его длиной около 250 км находится в центральной части пояса и ограничено на севере рудником Оруро, на юге — Потоси.

Месторождение Оруро разрабатывается с 1595 г. с некоторыми перерывами. Процесс минерализации протекал в несколько стадий. В первую стадию происходило образование существенно оловянных руд — касситерита и пирита с небольшим количеством кварца, арсенопирита, реже турмалина. Вторая стадия характеризуется отложением сфалерита, халькопирита и станнина (он интенсивно замещается цинкенимом). В третью стадию выделялись тетраэдрит и андорит — основные носители серебра. В четвертую отлагались сульфосоли свинца — цинкеним, буланжерит и джемсонит, которые образуют тесные сростки, тонкие пленки и волосовидные кристаллы, замещающие ранние сульфиды, особенно сфалерит и станнин. Галенит и франкеит развиваются метасоматически по станнину и цинкениму, а также образуют самостоятельные прожилки. В завершающую стадию происходило образование каолинита, диккита и алунита с небольшим количеством кварца.

На участке Колорадо в жиле Гранде содержание Pb составляет 15%, Sn — 17%, Ag — 0,8%. С глубиной содержание касситерита уменьшается. Ниже горизонта 350 м развиты главным образом серебряные руды.

Гидротермально-осадочные месторождения. Серебро предполагается добывать из металлоносных илов на дне Красного моря. За последние десятилетия были выявлены новые площади распространения металлоносных осадков в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах, а также металлоносные осадки Красного моря. В 1964 г. в его центральной впадине на глубине 2190 м обнаружили горячие рассолы с температурой 44 °С и соленостью 261‰, обогащенные растворенными металлами. Мощность илов 10—30 м, состоят они из чередующихся полужидких слоев оксидов и сульфидов металлов, превращающихся при высыхании в рудное вещество с примесью соли. Позже было установлено еще 14 впадин с осадками, обогащенными металлами гидротермального происхождения. Предусматривается выкачивание илов и получение концентратов с содержанием Zn 32%, Cu 5%, Ag 0,074%. Запасы на участке Атлантик оцениваются по разным данным — Zn от 2,5 до 3,2 млн т, Cu от 0,5 до 0,8 млн т, Ag от 9 до 45 тыс. т, Au 45 т.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Бутузова Г.Ю.* Гидротермально-осадочное рудообразование в рифтовой зоне Красного моря. — М., 1998.
- [2] *Некрасова А.Н., Демин Г.П.* О соотношении золото-серебряной и олово-серебряной минерализации на вулканогенном месторождении // Геология рудных месторождений. — 1977. — Т. 19. — № 2. — С. 105—108.
- [3] *Пальянова Г.А., Колонин Г.Р.* Физико-химические особенности поведения золота и серебра в процессах гидротермального рудообразования // Докл. РАН. — 2004. — Т. 394. — № 3. — С. 389—392.
- [4] *Сугаки А., Уено Х., Шимада Н.* Оловоносная полиметаллическая минерализация района Оруро в Боливии // Тезисы докладов. Международная ассоциация по генезису рудных месторождений. Симпозиум 6-й. — Тбилиси, 1982. — С. 91—92.

THE BASIC TYPES OF INDUSTRIAL DEPOSITS OF SILVER

A.V. Druzhinin, E.V. Karelina

Peoples' Friendship Russian University, engineering faculty
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115923

The review of the global market of silver is carried out. The main types of industrial deposits of silver are considered, are characterized a geological structure, mineral composition and genesis of most representative of them.