THE ALMADEN MERCURY MINING DISTRICT, SPAIN

A. Hernandez¹, M. Jebrak², P. Higueras³, R. Oyarzun⁴, D. Morata⁵, J. Munha⁶

- ¹ Minas de Almaden y Arrayanes S.A., Almaden (Ciudad Real), Spain
- ² Universite du Quebec a Montreal, Departement des Sciences de la Terre, CP 8888, suc. Centre Ville, Montreal (QUE) H3C 3P8, Canada
- ³ Departamento de Ingenieria Geologica y Minera, Escuela Universitaria Politecnica de Almaden, Universidad de Castilla La Mancha, Plaza M. Meca 1, 13400 Almaden, Spain ⁴ Departamento de Cristalografia y Mineralogia, Facultad de Ciencias Geologicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain
- ⁵ Departamento de Geologia, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile
- ⁶ Departamento de Geociencias, Universidad de Lisboa, Campo Grande, Ed. C5, 5°. 1700 Lisboa, Portugal

РТУТНОРУДНЫЙ РАЙОН АЛЬМАДЕН, ИСПАНИЯ

Перевод с английского канд-та. геол.-мин. наук В.А. Говердовского

Предисловие переводчика

Настоящая статья является переводом статьи, опубликованной в Mineralium Deposita, 1999, № 34, с. 539-548. Публикация этой статьи в переводе на русский язык спустя более 10 лет объясняется тем, что до сих пор многие российские геологи не знакомы с геологией и металлогенией уникального горнорудного района, коим является ртутный район Альмаден, а детальные публикации на русском языке по этому району отсутствуют. В советской, российской литературе есть только общие упоминания о ртутном месторождении Альмаден (Металлогения ртути, 1976). Уникальность района определяется огромной концентрацией редкого металла - ртути - в одной точке Земного шара, и геологи до сих пор не могут дать этому обоснованного объяснения. Причины такой ситуации, вероятно, кроются в том, что зарубежные геологи были ограничены изучением только «своих» месторождений, а советские, российские геологи - «своих». Могу предположить, что зарубежные геологи плохо знакомы с ртутным районом Донецкого бассейна (Геология ртутных месторождений, 1975), иначе они бы обнаружили много общих черт с районом Альмаден не только в геолого-структурном строении, но и в магматизме и металлогении. С другой стороны, и советские геологи плохо знакомы с зарубежными аналогами ртутных районов, в противном случае геологическая наука уже давно бы подошла к разгадке столь удивительного явления как концентрация практически большего количества ртути на Земле в одном месте, и самое главное, что явилось первоначальным источником этого металла и каковы механизмы рудоотложения? Эти вопросы являются актуальными не только для ртути, но и для ряда других металлов, образующих уникальные скопления в 2-3 точках Земного шара, например, урановые месторождения района Блайнд-Ривер (Канада), Витватерсранд) (ЮАР), стратиформные месторождения меди, цинка и свинца Маунт Айза (Австралия), Любин (Польша), Удокан (Россия) и некоторые другие.

Второе обстоятельство, которое побудило опубликовать перевод этой статьи, это то, что Горный Алтай является крупной ртутной провинцией мира. Здесь сосредоточены известные ртутные месторождения Акташ, Чаган-Узун, Красногорское и многочисленные рудопроявления, промышленная значимость которых не была до конца изучена. Время максимального проявления ртутной минерализации совпадает с проявлением щелочно-базальтоидного магматизма, и в этом Горный Алтай сходен с районом Альмадена. Поэтому сведения, полученные при изучении ртутных месторождений

Альмадена во многом могут способствовать пониманию генезиса ртутных месторождений в целом (источники ртути, механизм транспортировки в область рудоотложения, процесс рудоотложения).

Мы старались осуществить перевод статьи, приближаясь к оригиналу на английском языке. Однако во многих местах текста это трудно сделать и донести смысл написанного до русскоязычного читателя, поскольку стиль изложения материала в зарубежной литературе отличается от российкого. В некоторых участках текста приходилось давать литературный перевод вместо дословного, приближающегося к оригиналу. Эти изъяны перевода читатель легко отметит. Тем не менее эта работа как никакая другая дает наиболее полное представление об уникальности ртутно-рудного района Альмаден.

Предисловие

Горнорудный район Альмаден является одним из крупнейших в Мире районов концентрации ртути, с общими запасами ртути около 250 000 тонн, что составляет примерно одну треть известных запасов ртути на Земле. Ртуть здесь добывалась во времена Селтиков и Римлян, максимального уровня добыч достигала в эпоху Ренессанса и в период 1939-1945 гг. Район располагается в пределах палеозойского синклинория, перекрывающего докембрийские породы. Палеозойский разрез представлен эпиконтинентальными кварцевыми аренитами, содержащими слои черных сланцев и кварцитов. Магматические образования представлены диатремами с щелочными лавами различного состава и более поздними толеитовыми диабазами ордовикского и девонского времени. Тектоническая позиция магматических образований соответствует внутриплитному типу. Ртутные месторождения Альмадена могут быть классифицированы на два основных типа: 1 - ранний стратиформный, характеризующийся циннобаритовыми месторождениями в кварцитах нижнего силура (так называемые кварциты Криадеро; месторождения Альмаден и Эль Энтрадичо); 2 - представлен поздними дискордантными рудными телами (месторождение Лас Куэвас), большей частью приуроченными к диатремам, сложенным базальтоидами щелочного состава, так называемыми породами «фраяляска». В первом типе циннабарит осаждался в процессе диагенеза, сопровождаемого циркуляцией гидротермальных растворов, продуцируемых магматической деятельностью. Второй тип включает различные месторождения, имеющие в целом дискордантный характер рудных тел (жилы, штокверки, массивные образования) и их широкую дисперсию вдоль стратиграфической колонны, от нижнего силура (месторождение Нью Концепцион) до верхнего девона (месторождение Корчуэло).

Введение

Рудный район Альмаден в Испании является одним из профилирующих и наиболее необычных районов концентрации металлов на Земле. На момент начала отработки рудного района его запасы составляли 250 000 т ртути или около одной трети известных глобальных запасов ртути. Первоначальные содержания ртути в рудах достигали 8-10 % (некоторые рудные тела содержали до 20-30 % Hg. - *Примеч. переводчика*), а в относительно недавнее время - 3-5%.

Район Альмадена классически известен своей стратиграфической минерализацией (месторождения Альмаден и Эль Энтрадичо), приуроченной к кварцитам Криадэро (лландовери), в тоже время, здесь представлены и другие структурные типы, некоторые из которых имеют важное экономическое значение. Например, месторождение Лас Куэвас, полностью дискордантное, стратиграфически локализованно в верхнем силуре.

Эта работа является кратким изложением истории добычи, геологического строения и описания отдельных ртутных месторождений района Альмаден. Она обобщает современные данные по геологии и вторичным процессам (околорудным изменениям. - *Примеч. переводчика*), а также в ней обсуждаются некоторые текущие проблемы.

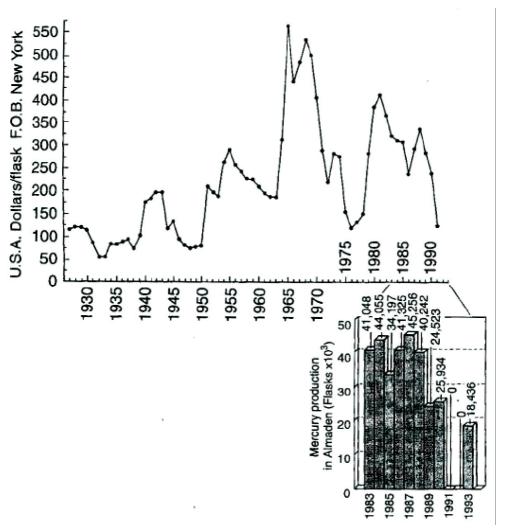


Рис. 1. Колебания цены на ртуть на Альмадене в период с 1927 по 1993 годы.

История рудного района

Горнорудная история района Альмаден началась около 2000 лет назад. До десятого века Альмаден был известен как *Сисапо*, что означало «копь, рудник» на языке племени Селтик. Римляне использовали циннабарит как ярко-красный пигмент, в основном для хозяйственных нужд. Арабы дали название месторождению Аль-маден (руда) и начали использовать ртуть в медицине и алхимии. В XIV-XV веках ртуть также применяли при лечении кожи. В 1555 году Бартоломео де Медина сделал открытие по использованию ртути в извлечении серебра на руднике Пачука (Мексика). Таким образом, со средины XVI века Альмаден имеет стратегически важное значение для колонизации Америки и становится одним из крупнейших горнодобывающих и металлургических центров в Европе. Суммарное производство ртути в течении XVI и XVII веков оценивается в 17 500 т, добыча и производство осложнялось значительными горнотехническими трудностями и многочисленными несчастными случаями (пожарами и затоплениями). В течении восемнадцатого века производство ртуги стало уменьшаться в связи с конкуренцией с месторождением Идрия (бывшая Югославия). В 1700 году была открыта высококачественная ртутная зона (Рудник дель Кастиллио). Горнорудная техника была модернизирована германскими инженерами из Фрайберга, которые также были инициаторами создания горнорудной школы в Альмадене в 1777 г., четвертой в Мире. В 1805 г. были установлены первые паровые двигатели, которые сменили ручную подачу воды. В девятнадцатом веке было отмечено первое увеличение

производства ртути. В дальнейшем колебания производства ртути были обусловлены проблемами менеджмента. Пик производства был достигнут в 1941 году и составлял 82 000 бутылей ртути (более 2830 т; 1 бутыль вмещает примерно 30 кг ртути. - *Примеч. переводчика*).

В недавнем прошлом ртуть была одним из главных экспортных продуктов Испании. Пик цены отмечался в 1965 году и достигал 571\$ США за один бутыль. После аварийного случая (выброс ртути в природу) в Минамата (Япония), оказавшего сильное влияние на окружающую среду, и подобных проблем в Ираке произошло резкое уменьшение мировой цены до 121\$ США за бутыль (рис.1). Вновь цены на ртуть стали расти в конце 70-х годов, что было обусловлено развитием производства щелочных батарей. В настоящее время ртуть также используется в хлор-каустическом производстве, амальгамировании, красках, немного в промышленности и в медицине. Тем не менее с 1990 года вновь произошёл обвал цен на ртуть, который был инициирован кризисом на Альмадене в 1991 г. В последующий год получение ртути не было зарегистрировано и только небольшая добыча (20 000 бутыль) была отмечена в 1993-94 гг.

История научного изучения района начата С. Прадо (1855). Ранние работы Ф. Ренсома (1921) и Ван дер Вина (1924) интерпретировали месторождение как эпигенетическое, связанное с герцинским гранитным интрузивом Лос-Педро, расположенным в 30 км к югу. Вулканическая природа пород «фраяляска» (название дано по сходству с пятнистой одеждой-мантией ранних францискианских монахов) была признана в конце 1950-х годов (Almela and Febrel, 1960). Изучение стратиграфии было начато в 1960 г. (Almela et al., 1962; Tamain, 1972). Петрографическое и литологическое изучение было привнесено Saupe (1973, 1990) под влиянием сингенетической школы, которая была популярна в то время в Европе (Laboratorie de Geologie аррlіqийе, 1973). В более современных работах рассматривалась изотопная геохимия (Arnold and Saupe, 1985; Rytuba et al., 1989; Saupe and Arnold, 1992) и геотермальное происхождение месторождения. Взаимоотношения между рудой и вулканическими породами было освещено Hernandez (1984) и привело к открытию рудного тела Эль Энтрадичо.

Геологический обзор

Площадь Альмаден располагается в центральной части Иберийского полуострова, в 300 км от Мадрида (рис. 2). Район лежит в центральной части Центрально-Иберийской зоны Иберийского массива (Julivert et al., 1972). В пределах зоны устанавливается три цикла осадконакопления: позднедокембрийский, палеозойский и кайнозойский. Все ртутные тела обнаружены в палеозойских породах. Докембрийские образования представлены очень мощной толщей (> 8 000 м) граувакк и сланцев рифея и различными шельфовыми фациями (мощностью до 1000 м) вендского возраста. Обширный палеозойский синклинорий перекрывает докембрийские породы.

Палеозойские серии начинаются осадочными породами нижнего ордовика, трансгрессивно перекрывающих с угловым несогласием докембрийские серии. Нижнеордовикские породы включают сланцы, песчаники и кварциты с некоторым количеством линз конгломератов в основании. Региональным маркером являются белые кварциты Арморикан аренигского возраста, которые перекрываются богатыми фоссилиями (трилобиты, граптолиты) темно-серыми до черных сланцами лланвирн-лландейловского возраста (сланцы Calymene) (рис. 3). Горизонт вторично осветленных кварцитов карадокского возраста (кварциты Canteras) представляет регрессивную стадию формирования пачки сланцев Calymene, слагая её верхнюю часть. В конце ордовикского времени в условиях стабильного осадконакопления накапливались преимущественно сланцы. Очень тонкие единичные слои известняков с широко распространенными кораллами и брахиоподами отражают теплый климат. Диатремы, сложенные щелочными породами (породы «фраяляска»), пронизывают ордовикские отложения.

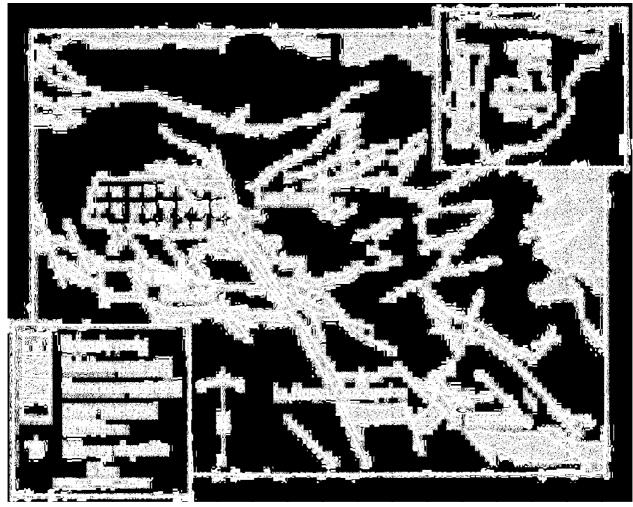


Рис. 2. Положение района Альмаден на Иберийском полуострове и размещение в его пределах основных ртутных месторождений.

Силурийско-девонские серии представлены толщей мощностью в 2200 м, сложенной кварц-аренитами, ритмически переслаивающимися песчаниками и сланцами, черными сланцами, щелочными базальтами и диатремами (рис.3). Осадочные породы были образованы в морских условиях, включая несколько регрессивных фаций (Saupe, 1973; Garcia Sansegundo et al., 1987). Детальное описание стратиграфических подразделений приводят Татаіп (1972), Saupe (1973) и Garcia Sansegundo et al. (1987).

Лландоверийские кварциты Криадеро являются основными вмещающими породами ртутной минерализации (стратиформные месторождения). Они состоят из двух горизонтов кварцитов с прослоем сланцев между ними. Нижний горизонт имеет линзообразную форму и хорошо развит на старом руднике Альмаден. Он состоит из двух линз белых кварцитов San Pedro и San Diego. Верхний горизонт имеет широкое латеральное простирание и состоит из двух линз черных кварцитов (San Nicolas и San Francisco). Кварциты в основном среднезернистые, хорошо сцементированные. В них широко развиты осадочные текстуры (следы ряби, косая слоистость), что предполагает осаждение их в области пересечения дельтой зоны приливов и отливов и начала уклона шельфа. Их общая мощность варьирует от 50 до 70 м на южном фланге синклинория и менее 10 м на северном фланге. Это отражает значительный палеогеографический градиент, частично усугубленный асимметричностью процессов деформации.

Разрез Альмадена характеризуется проявлением непрерывной магматической активности в диапазоне от ордовика до девона. Магматические породы включают в себя различ-

ные по составу щелочные порфировые лавы от базанитов и нефелинитов до риолитов (Higueras and Munha, 1993) и диатремы, представленные брекчиевыми породами – фраяляска (рис. 4). Диатремы под незначительным углом прорывают стратиграфические подразделения на большинстве ртутных рудников и имеют перевернутую коническую форму с диаметром в несколько сот метров на выходе. Они заполнены пирокластитами и эпикластитами, которые имеют местное происхождение. Saupe (1990) интерпретировал их как продукты, образовавшиеся в ходе подводного излияния лав на мелководье. Структурные признаки эпикластитов свидетельствуют о том, что породы были не полностью консолидированными, подобно лампроитовой трубке Argyle в Западной Австралии (Bower and Jaques, 1990). Другие типы пород включают в себя субвулканические мафические образования (диабазы) с толеитовым уклоном (Higueras and Munha, 1993), представляющие поздние эпизоды магматической активности. Более детально мы рассмотрим эти образования в следующих разделах.

В структуре синклинория Альмаден устанавливается три фазы складчатости (Hernandez, 1984; Saupe,1990). В первую фазу был сформирован узкий синклинорий с признаками кливажа течения протяженностью около 100 км, с простиранием 110°, падением на север. Эта главная фаза складчатости была продатирована в 335±15 млн. лет (Rb/Sr; Nagler et al., 1992). Этот возраст совпадает с наличием несогласно залегающего основания угольного пласта Stephanian B-C, относящегося к более поздней фазе герцинской складчатости.

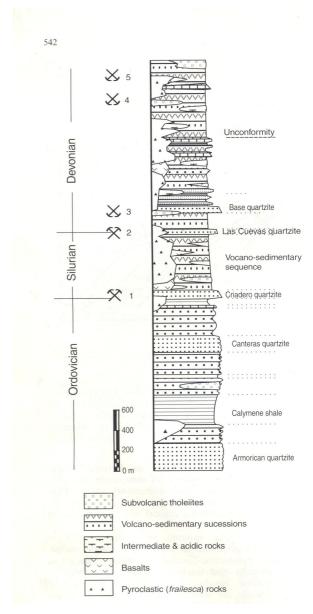


Рис. 3. Стратиграфический разрез палеозойских образований альмаденского синклинория и положение в разрезе ртутных месторождений (по Higueras, 1995).

Вторая фаза характеризуется простиранием складок в 30° внутри хрупко-эластичной зоны сдвига с простиранием 110° и простиранием некоторых разломов в 80°. Большинство разломов являются полистадийными: от ранних деформаций типа strike-slip и обратными перемещениями, связанными с вектором напряжений с В-3 до СВ-ЮЗ и более поздними эпизодами растяжения север-южного простирания. Стратиграфическая толща была подвержена гидротермальному изменению до пумпеллеитовой и ранней anchizone фаций (Higueras et al., 1995). Плейстоценовые отложения образуют маломощный, но очень распространенный чехол (30-50 м) и соответствуют эллювиальным конгломератам.

Магматизм

Магматическая деятельность в районе Альмадена заслуживает особого внимания, что обусловлено разнообразным взаимоотношением вулканических пород с разными типами ртутной минерализацией. Магматические породы, описанные в пределах синклинали Аль-



Рис.4. Породы фраяляска. Керн.

маден (Higueras,1995), включают следующие петрографические типы (табл.1):

- 1. Пирокластические породы, которые представлены телами диатрем (породы флаяляска) и состоят из полностью измененных оливин-базальтовых класт и класт осадочных пород. Выходы этих пород являются типичными диатремами; тела имеют форму перевернутого конуса и прорывают вмещающие породы.
- 2. Порфировые породы, по составу варьирующие от базанитов/ нефелинитов через оливиновые ба-

зальты, пироксеновые базальты (пироксеновые кумулаты), трахибазальты и трахиты до риолитов. Основными петрографическими типами являются базанит/нефелиниты и оливиновые базальты. Промежуточные разности менее распространены. Минеральный состав пород представлен фенокристаллами оливина; диопсидовым пироксеном как в фенокристаллах, так и в матриксе; анальцимом как в фенокристаллах так и в матриксе; плагиоклазом; фенокристаллами биотита в породах среднего состава; калиевым полевым шпатом и кварцем как в фенокристаллах, так и в матриксе фельзитовых пород. В заметных количествах в мафических разновидностях представлены поздние автомагматические минералы - амфибол и обогащенный Ті биотит.

- 3. Субвулканические мафические породы с долеритовой структурой, которая позволяет классифицировать эти породы как диабазы. Главные минералы пород авгитовый пироксен и кальциевый плагиоклаз. Второстепенные минералы оливин в малочисленных фенокристаллах в оливиновых диабазах и К-полевой шпат и кварц (в интерстициях или в прорастаниях) в кварцевых диабазах. Оливиновые диабазы вскрываются в виде силлов. Кварцевые диабазы распространены в виде штоков и силлов мощностью до 5 м.
- 4. Ультрамафические разности пород представлены как кластами в пирокластитах, так и ксенолитами в наименее дифференцированных базальтах. Они сильно изменены, хотя в них возможно идентифицировать оливин (50-80 %), пироксен и неизмененную шпинель, что позволяет классифицировать эти породы как шпинелевые лерцолиты.

Распределение различных типов вулканических пород в стратиграфическом разрезе имеет ряд особенностей. В ордовикском разрезе встречаются только пирокластические породы фраяляска. В кварцитах Криадэро обычно отмечаются диатремы с фраяляска и горизонты базанит/нефеленитов часто с ксенолитами ультрамафитов (рудники Эль Энтрадичо и Виа Концепцион). В силурийском и нижнедевонском разрезах широко представлены фраяляска и горизонты базальтов. В верхнем девоне обычными являются средние породы (трахиты) совместно с пирокластитами и базальтовыми горизонтами. В верхней части палеозойской синклинали (верхний фран) присутствует весь спектр вулканических пород (от пирокластитов и риолитов до оливиновых базальтов).

Высокие содержания Ni и Cr в базанитах, оливиновых базальтах, оливиновых диабазах и в пироксеновых базальтах, так же как и высокое отношение MgO/MgO+FeO, отражают мантийное происхождение этих магм и предполагает их формирование из примитивных расплавов.

Нормализованные к составу примитивной мантии содержания некоторых элементов (рис. 5) показывают основные различия между этими породами. Щелочные порфировые

породы (базаниты/нефелениты, оливиновые базальты и трахибазальты) имеют сходные свойства. Также эти породы имеют сходство с оливиновыми лиабазами. Основные различия между щелочными и промежуточными разностями к толеитовым породам фиксируются присутствием положительной Nb аномалии, высоким содержание ТіО и HFSE и высоким отношением легких лантаноидов к тяжелыми (LREE/ HREE; далее La/Yb отношение. – Примеч. переводчика). Примечательно также отсутствие отрицательной Nb аномалии для кварцевых диабазов. На Mescede диаграмме (1986) 2Nb-Zr/4-Y (рис. 6) показано, что все порфировые породы ложатся в поле внутриплитовых щелочных базальтов, тогда как кварцевые диабазы располагаются в поле внутриплитовых толеитов.

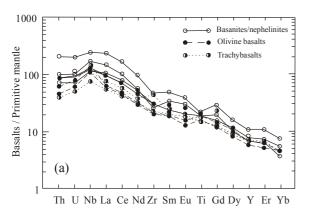
аниты/нефевиновые баихибазальты) Типы пород Б ОБ ПБ ТБ ОД КД

Типы пород	Б	ОБ	ПБ	ТБ	ОД	КД
Кол-во ан-зов	8	6	4	3	8	5
SiO_2	38.01	44.44	39.18	49.32	43.57	50.65
$Al_2 O_3$	9.84	14.22	12.12	14.69	13.70	14.29
$Fe_2 O_3$	1.78	1.39	1.85	1.47	1.66	1.50
FeO	10.67	9.96	11.11	7.80	10.13	8.00
MnO	0.19	0.16	0.25	0.14	0.17	0.19
MgO	12.70	9.07	11.86	5.21	9.38	5.99
CaO	11.11	6.83	10.16	6.84	7.52	8.22
K ₂ O	0.79	0.80	0.61	1.02	0.67	0.54
Na ₂ O	1.31	1.64	1.60	3.69	1.88	3.16
TiO ₂	2.86	2.58	2.98	2.29	2.35	1.80
P_2O_5	0.65	0.37	0.71	0.43	0.44	0.20
LOI	9.02	7.81	6.90	5.43	7.39	3.78
SUM	100.10	100.16	100.56	98.95	99.87	99.06
CO_2	6.01	3.24	3.48	3.24	3.39	0.93
H ₂ O+	3.04	4.09	3.29	2.18	3.92	2.93
Cr	340.00	443.67	н.а.	146.00	414.25	185.50
Ni	263.63	196.17	257.50	91.33	147.63	61.60
Co	63.00	51.00	53.50	33.00	44.57	39.50
Sc	18.42	25.40	20.50	н.а.	23.65	20.80
V	217.00	193.00	239.50	136.00	213.57	158.00
Cu	58.58	46.43	62.00	27.00	58.49	57.60
Pb	6.38	11.17	7.00	4.67	5.25	4.40
Zn	107.67	89.53	93.50	158.00	88.60	80.50
Rb	33.33	2.50	24.00	н.а.	23.00	14.00
Ba	1478.50	437.00	715.00	198.00	1144.43	305.00
Sr	939.83	469.50	738.00	н.а.	612.33	409.00
Nb	68.25	47.17	66.00	51.33	54.50	17.40
Zr	235.13	198.00	287.50	312.33	197.50	97.60
Y	23.63	23.67	27.00	27.67	19.63	17.00
Th	5.46	3.00	4.50	4.15	3.45	1.65
U	1.68	1.10	1.40	1.40	1.33	0.40
La	61.08	31.40	51.45	35.85	35.25	12.50
Lu	0.24	0.23	0.27	0.28	0.23	0.19
[mg]	0.68	0.62	0.66	0.54	0.62	0.57
(La/Lu)m	26.39	14.17	20.36	13.70	15.96	7.01
Nb/Y	2.89	1.99	2.44	1.86	2.78	1.02
La/Nb	0.89	0.67	0.78	0.70	0.65	0.72

Петрографическая эволюция от базанитов, преобладающих среди мафических разностей в силуре, до трахибазаль-

Примечание. Типы пород; Б - базаниты, ОБ - оливиновые базальты, ПБ - пироксеновые базальты, ТБ - трахибазальты, ОД - оливиновые диабазы, КД - кварцевые диабазы.

тов, трахитов и риолитовых пород в верхнем девоне также является ярким индикатором геохимической эволюции магм Альмадена. Отношения La/Yb отражают отчетливое уменьшение при магматической эволюции от силура через девон к интрузивным кварцевым диабазам. Согласно White и McKenzie (1995), эти особенности являются показателем уменьшения глубин генерации магм, которые для силурийских пород могли быть около 100 км и 60 км для толеитовых кварцевых диабазов верхнего девона. Эти оценки глубин согласуются с присутствием шпинелевых лерцолитов в виде ксенолитов в силурийских базальтовых лавах. Согласно Higueras (1995), магмы Альмадена генерировались из богатого летучими и несовместимыми элементами астеносферного источника типа EM-1 в процессе парциального плавления, возрастающего от 1,6-6 % в силуре до 4-9 % в девоне, и окончательно до 10-17,5 % при внедрении субвулканических промежуточных к толеитовым породам разностей.



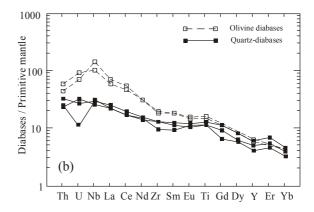


Рис. 5. Спайдер-диаграммы нормированных к примитивной мантии элементов дляпорфировых (а) и субвулканических (b) пород.

Состав примитивной мантии - по Taylor, McLennan (1985).

Типы рудных месторождений и вторичные процессы

В рудном районе Альмаден может быть выделено два типа ртутных месторождений (Hernandez,1984): стратиформный (тип 1) и несогласный (тип 2) (рис.7, табл.2). Месторождения первого типа являются наиболее крупными и представлены такими как Альмаден и Эль Энтрадичо. На этих месторождениях минерализация вмещается кварцитами Криадэро, т.е. стратиграфически она ограничивается одним горизонтом в основании силура. Месторождения второго типа полностью дискордантные и локализуются в диатремах, хотя могут встречаться и в других литологических разностях, включая осадочные и вулканические (лавы) породы. Например, месторождение Лас Куэвас контролируется сжатой складкой и разрывом пород позднего силура, включающих в себя породы фраяляска, лавы, сланцы и кварциты. Два основных рудных тела месторождения имеют мощность 25-30 м, неправильную

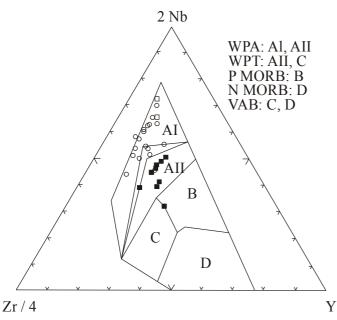


Рис. 6. Диаграмма Nb-Zr-Y (по Meschede, 1986) для мафических пород района Альмаден.

1 - базальты; 2 - долериты. WPA - внутриплитные щелочные базальты; WPT - внутриплитные толеиты; P MORB, N MORB - базальты срединно-океанических хребтов; VAB - базальты вулканических дуг.

форму, прослеживаются по вертикали на 100-150 м и вмещаются породами фраяляска и метаосадочными образованиями (метапелиты и кварциты) (Hegueras et al. 1999). Месторождения второго типа в целом имеют широкие распространение по всему стратиграфическому разрезу. Они могут быть обнаружены и в нижнем силуре (Нью Концепцион), и в верхнем силуре (Лас Куэвас), и в нижнем (Эль Энтрадичо) или верхнем (Гьюдалпераль и Корчуэло) девоне. Гидротермальные изменения в месторождениях первого типа характеризуются интенсивным развитием Ca-Mg-Fe карбонатов, хлорита и кварца, а также обогащенной Сг слюдой (фуксит) в ультрамафических ксенолитах (Morata et al., 1997).

Магматические породы в значительной степени изменены по всему разрезу - от силура до девона. Эти изменения носят региональный характер

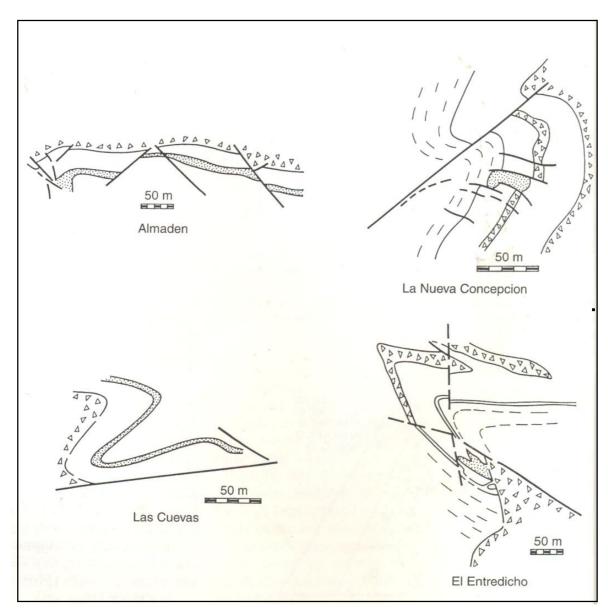


Рис. 7. Различные структурные особенности локализации ртутной минерализации в районе Альмадена.

(Hegueras et al. 1999) и представлены следующими минеральными ассоциациями: 1-я — кварцхлорит-альбит-карбонат (\pm анкерит, \pm сидерит, \pm магнезит, \pm кальцит) (устанавливаются преимущественно в щелочных базальтат); 2-я — хлорит \pm пренит \pm пумпеллеит \pm эпидот \pm актинолит, ограничивается развитием в изолированных телах толеитовых диабазов. На эти изменения локально накладывается более поздний мусковит/иллит-каолинит-пирофиллитовый парагенезис, который обычно ассоциируется с более поздними рудами второго типа (Лас Куэвас). Это хорошо отражается на карте распределения CO_2 (рис. 8), где изолинии содержаний CO_2 грубо пересекают контуры проникающей повсюду карбонатизации, относящейся к региональному изменению, и фиксируют небольшую глубину формирования месторождения Лас Куэвас.

Металлогения

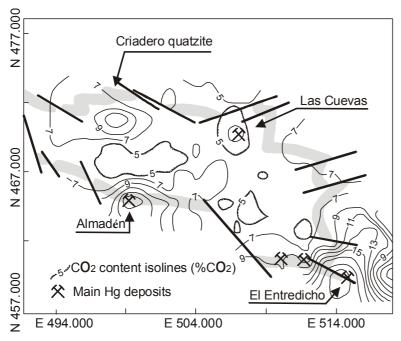
Локализация основных ртутных месторождений в альмаденском синклинории контролируется двумя основными факторами: 1 — минерализация контролируется одним и тем же силурийским горизонтом (кварциты Криадеро) (тип 1); 2 — минерализация распространена, главным образом, около или внутри щелочных вулканических пород и в диатремах,

Вмещающие породы Запасы, Месторождения Положение в Морфология рудных тел, синклинории тонн контроль оруденения Алмален Кварциты Криадэро 232 000 ЮГ стратиформный Эль Энтрадичо Кварциты Криадэро 10150 юго-восток стратиформный Виа Кварциты Криадэро стратиформный юго-восток Концепцион Лас Куэвас 4350 Вулканические породы и Массивные руды в породах север кварциты фраяляска + штокверки + согласные гидравлические брекчии в кварцитах Нью 5365 Стратиформный + сдвиг юго-восток Вулканические породы и Концепцион кварциты Криадэро Нью Энтрадичо Вулканические породы 435 Вкрапленный + сдвиг

2. Основные ртутные месторождения района Альмаден

формирование которых происходило одновременно с процессом осадконакопления морских фаций (типы 1 и 2). Во всяком случае, вероятность образования месторождений второго типа, пространственно ассоциирующих с диатремами, путем переотложения ртути из кварцитов Криадэро в процессе герцинскогой ремобилизации остается дискуссионной. Кроме того, они могут представлять минерализацию, образованную гидротермальной активностью под действием магматизма, проявлявшегося длительное время или эпизодически на протяжении всей геологической истории Альмадена. Разломы и сдвиги, сформированные в течении герцинского орогенеза, не объясняют этих важных противоречий.

В настоящее время в рудах района определены относительно небольшие количества флюидных включений. Имеющиеся малочисленные данные по первичным включениям в кварце и доломите из жил месторождения Альмадена (тип 1) показывают, что поздние флюиды имеют слабый водносолевой состав (5 % вес. NaCl экв). Температуры гомогенезации варьирует между 240°C (кварц) и 85°C (поздний доломит). Низкотемпературные первичные расплавные включения содержат ионы Ca⁺⁺или Mg⁺⁺ (Garcia Iglesias and Loredo Perez, 1989).



юго-восток

Рис. 8. Карта распределения СО, в рудном районе Альмаден (по Higueras, 1995)

Отсутствие метациннабарита показывает температуру ниже 315-345°C (Potter and Barnes, 1978). Данные по первичным флюидным включениям месторождения Лас Куэвас (тип 2) (Higueras et al., 1999) отражают низкую до средней соленость растворов (1-13% вес. NaCl экв.) и температуру гомогенезации между 150 и 375°C (обычно 220°С). Изученные включения в кристаллах кварца имели размер свыше 100 мкр в диаметре и содержали включения циннабарита, что предполагает их образование одновременно с процессами осаждения ртути. Calvo и Guillemany (1974), Arnold и Saupe (1985), Rytuba et al. (1989) и Saupe и Arnold (1992) провели изотопные исследования сульфидов. На рудники Альмаден δ^{34} S варьирует между — 0.1 и 9.3% для циннабарита и 4.34 до 20% для пирита. Большие вариации значений для пирита, вероятно, обуславливаются его многостадийным происхождением - существованием небольшого количества раннего диагенетического пирита и явно эпигенетического пирита. Величина δ^{34} S для циннабарита увеличивается ближе к кратеру диатремы с породами фраяляска на Альмадене и Ель Энтрадичо (Rytuba et al.,1989). На месторождении Лас Куэвас δ^{34} S изотопное отношение в циннабарите аномально высокое - около 13-14%. Хотя Rytuba et al. (1989) предположили связь этих тяжелых значений с ранней диатремой, в то же время они могли быть связаны с процессами ремобилизации и более поздним извлечением тяжелой серы из черных сланцев. Могеоver и Saupe (1990) обсудили возможность кинетической изотопной неустойчивости.

Еісhmann et al. (1977) и Arnold and Saupe (1985) проанализировали изотопы δ^{13} С и δ^{18} О в карбонате и δ^{13} О в кварце. Измеренные значения изотопа δ^{13} С в кальците, позволили предположить глубинный источник для CO_2 . Тем не менее значение этих данных остается пока неопределенным для объяснения скудности вторичных изменений.

Происхождение ртутных руд первого типа (1) может быть предметом длительной дискуссии: что являлось причиной концентрации большого количества такого редкого металла? До сих пор нет ясности в понимании происхождения рудного района Альмаден. Месторождения 1-го типа принадлежат к большому классу вулканогенно-осадочной минерализации, связь которой с ранними эманации и более поздней структурой концентрации широко обсуждались. Saupe (1973) аргументировал чисто синседементационную модель осаждения с источником ртути в черных сланцах или в связи с вулканизмом. Hernandez (1984), Saupe (1990), Borrero and Hegueras (1990) и Ortega and Hernandez (1992) отмечали явный контроль ртутного оруденения щелочными диатремами и предположили мантийное происхождение ртути.

Последним, но менее важным фактором является регулярное проявление эксплозивного магматизма (породы фраяляска) по всему силурийско-девонскому разрезу. Инициировал ли этот магматизм гидротермальную активность и образование ртутной минерализации в различное время геологической эволюции Альмадена? Вдоль всей стратиграфической колоны магматические породы повсюду изменены до парагенетических минеральных ассоциаций низкотемпературных фаций (Hernandez, 1995) (т.е. фаций регионального метаморфизма. - Примеч. переводчика). Эти фации, вероятно, в значительной степени проявлялись внутри геологической среды под влиянием геотермального воздействия в масштабе района в подводной обстановке. Высокий геотермальный градиент обеспечивался магматической активностью, в целом процесс этих изменений, вероятно, проходил от конца раннего силура до позднего девона. Сравнение региональных изменений (фаций) с современными геотермальными аналогиями (такими как Исландские геотермальные поля; Liou et al., 1987; Yardley, 1989) предполагает чрезмерно высокий геотермальный градиент и минералообразование при температуре ~200-300°C. Несмотря на то, что, как мы определили, гидротермальная активность продолжалась длительное время в разрезе Альмадена, мы не можем сказать то же самое о ртутном оруденении. Мы знаем, что независимо от возраста месторождения типа 2 постоянно ассоциируют с породами фраяляска, но являются ли эти взаимоотношения «генетическими» или «случайными», трудно сказать. Следующая проблема относится к ордовикским породам фраяляска. Если причиной минерализации являются исключительно щелочные диатремы, то почему ртутные месторождения не обнаруживаются внутри или около таких же других ордовикских диатрем?

Наконец, современные данные являются явно недостаточными для понимания того, почему в районе Альмадена произошла такая большая концентрация ртути. Несколько клю-

чевых элементов, недостающих для лучшего металлогенического понимания этой гигантской минерализации, требуют дополнительного обсуждения.

Рудоотложение

Имеется большое количество очевидных признаков проявления ранних фаз ртутного оруденения в районе Альмадена. Saupe (1973) отмечал наличие кристаллов циннабарита между разрушенными зернами кварца и вторично выросшими зернами в кварцитах Криадэро. Тем не менее сетчатая руда, вероятно, ассоциировала с гидравлическим брекчированием, которое подразумевает значительное флюидное сверхдавление и непроницаемую «шапку» над кварцитами. Реологический контраст между кварцитами и сланцами способен сфокусировать флюиды внутри кварцитового горизонта (Ridley, 1993). Таким образом, осаждение ртуги не связано непосредственно с ассоциирующим осадками морского дна, но может быть результатом ранней диагенетической или эпигенетической циркуляции. К тому же, некоторые концентрации циннабарита ясно отражают эпигенетические признаки, особенно в рудных телах, расположенных в вулканических породах. Распространение ртутных ореолов вокруг рудных тел свидетельствует об ограничении степени рассеивания флюида и способа его транспортировки (природа проницаемости) во времени, тем самым обеспечивая новые объекты высоких ртутных концентраций. Вокруг и внутри ртутных месторождений Альмадена задокументированы многочисленные процессы вторичных изменений. Возникает несколько вопросов об их точном времени проявления и геологическом значении. На месторождении Лас Куэвас сильные метасоматические изменения (серицитизация и аргиллизация), ассоциирующие с циннабаритовой минерализацией, проявлены в постминерализованных дайках Альмадена (Saupe, 1973).

Датировки вторичных изменений для месторождений 1-го типа (40 Ar/ 39 Ar; Hall et al., 1997) показывают широкий спектр возрастов от 426.9±2.8 до 364.3±3.0 млн лет. Согласно Hall et al. (1997), этот спектр может быть результатом частичной потери общего аргона в течении герцинского орогенеза. В то же время, разброс в датировках может отражать длительную гидротермальную активность в течение силурийско-девонского промежутка времени.

Транспортировка

Существующая геохимическая информация по месторождениям 1-го типа в Альмадене предполагает, что осаждение ртути, вероятно, происходило при низких температурах, ниже 240°С. В настоящий момент есть немного данных по составу флюидов, обеспечивающих транспортировку и осаждение ртути в Альмадене. Современное изучение месторождения Лас Куэвас (тип 2) (Hegueras et al.,1999) показывает следующее. Высокие содержания кварца непосредственно в околорудных изменениях вместе с присутствующим пирофиллит-каолинитовым парагенезисом предполагает, что эти изменения развивались выше линии кварцевого насыщения в системе Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O (Hemley et al., 1980), которая ограничивает температуру процесса до $< 300^{\circ}$ С. К тому же, границы минимальных температур для системы ограничиваются условиями осаждения парагенезиса циннабарит \pm пирит, который мог формироваться только выше 200° С, в относительно окислительной среде, при низком рН и высоком содержании серы.

Источники

Главная проблема в связи с источником ртути в Альмадене является не только проблема исключительной концентрации ртути в районе, но и понимание процессов, которые привели к отделению ртути от других металлов. Saupe (1973) предположил предварительную обогащенность ртутью силурийских черных сланцев. Сильная абсорбция ртути органическим веществом хорошо известна и во многих случаях является причиной повышенных концентраций ртути в окружающей среде. Его основным аргументом были высокие фоновые содержания ртути (в среднем $4x10^{-6}$ Hg), наблюдаемые в силурийских черных сланцах некоторых рудников, в сравнении с кларком для черных сланцев, равным $0.37x10^{-6}$. В то же время,

такие оценки фона могли быть обусловлены «заражением» фона другими источниками, такими как рудные тела, а также, как признает Saupe (1973, 1990), вулканические породы.

Некоторые ртутные месторождения в мире выявляют необъяснимую связь с мантийным метаморфизмом (Fedorchuk, 1974). Только альмаденский синклинорий и его восточное продолжение являются тем местом, где устанавливаются ультраосновные породы (ксенолиты). Это вместе с геологическими и геохимическими данными по вулканическим породам Альмадена указывает на процессы рифтогенеза и проявления мантийного плюма в раннем палеозое (Higueras and Munha, 1993). Состав Ст-шпинели (пикотит) в ультрамафических ксенолитах рудника Эль Энтрадичо подобен составу шпинели в ультрамафических породах ртутных месторождений Калифорнии (Ortega and Hernandez, 1992). Российские авторы также отмечали связь ртути с некоторыми типами ультрамафических пород (Fedorchuk, 1974). Тем не менее содержание ртути в мантии и в подобных магматических породах, как известно, скудное. Геохимическое поведение ртути подобно Sb и Ag и она могла быть привнесена на поверхность в результате магматической дегазации (Verekamp and Buseck, 1984; Rytuba and Heropoulos, 1992). С другой стороны, пространственное совмещение еще не является определяющим признаком происхождения ртути, но может отражать благоприятные геохимические пути для транспортировки Нg, которые трассируются повышенным распространением СО, и /или СН, продуцируемых вулканическими процессами или ретроградным метаморфизмом (Morency et al., 1986).

Обогащенный ртутью гранат-лерцолитовый мантийный источник обогащен несовместимыми элементами и его эволюция в течение магматической дифференциации должна быть исследована вместе с изучением вопроса о присутствии ртути в мафических минералах. В дальнейшем развитие в понимании процессов транспортировки и осаждения могло бы принести пользу и в исследованиях источника ртути.

Литература

Almela A., Febrel T. (1960). La roca frailesca de Almaden: un episodio tobacco en formacion basaltica del Siluriano superior. Not Com Inst geol Min Esp 59; 4 41-72.

Almela A., Alvarado M., Coma E., Felgueroso C., Quitero I. (1962). Estudio geologica de la region de Almaden. Bol Inst Geol Min Esp 73: 193-327.

Arnold M., Saupe F. (1985). Sulphur isotope data from the Almaden mercury mining district (Ciudad Real, Spain). Abstr Fortsch Mineral Dtsch 63: p 11.

Borrero J., Higueras P. (1990). Nuevos conocimientos sobre la geologia y genesis de los yacimientos de mercurio de Almaden (Ciudad Real). Bol Geol Min 101: 48-65.

Bower G.L., Jaques A.L. (1990). Argyle (AK1) diamond deposit. In: Huпhes E (eds) Geology Australasian Institute of mining Metallurgy, Monogr 14, Melboune, vol 1: 697-706.

Calvo F.A., Guillemany J.M. (1974). Mineralogenesis del mineral de mercurio de Almaden. In: Congr Int Mercurio, Barcelona, vol 1: 189-200.

Crespo J.l. (1987). Investigacion mediante sondeos del area de «La Nueva Concepsion». Intern Rep, Minas de Almaden.

Eichmann R., Saupe F., Schidlowsky M. (1997). Carbon and oxygen isotope studies of rock in the vicinity of the Almaden mercury deposits (Province of Ciudad Real, Spain). In: Klemm D, Scheider HJ (eds) Time-and stratabound ore deposits, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, pp 396-405.

Fedorchuk V.P. (1974). Genetic and commercial types of mercury deposits. In: Congr Int Mercurio, Barselona. Vol 1: 117-143.

Garsia Iglesias J., Loredo Perez J. (1989). Sorbe las condiciones de removilizcion y precipitacion de mercurio en el yacimiento de Almaden. III Congr Geoquimica de Espaca I: 131-138.

Garsia Sansegundo J., Lorenzo Alvarez S., Ortega E. (1987). Mapa Geologico Nascional a escala 1:50 000, sheet 808 (Almaden). Institute Geologia y Minero Espana. Madrid.

Hall C.M., Higueras P., Kesler S.E., Lunar R., Dong H., Haillidy A.N. (1996). Dating of alteration episodes related to mercury mineralization in the Almaden district, Spain. Earth Planet Sci Lett 148: 287-298.

Hemley J.J., Montoya J.W., Marinenko J.W., Luce R.W. (1980). Equilibria in the system Al₂O₃-SiO₃-H₂O and some general implications for alteration/mineralization processes. Econ Geol 75: 210-228.

Hernandez A.M. (1984). Estructura y genesis de los yacimientos de mercurio de la zona de Almaden. PhD diss., University of Salamanca, Spain, 120p.

Higueras P., Munha J. (1993). Geochemical constraints on the petrogenesis of mafic magmas in the Almadén mercury mining district. Terra Abstract 5: 12-13.

Higueras P. (1995). Procesos petrogeneticos y de alteración de las rocas magmaticas asociadas a las mineralizaciones de mercurio del distrito de Almaden. PhD Thesis, University of Granada. Servicio de Publicaciones, Univ. de castilla-La Mancha, 270 p.

Higueras P., Morata D., Munha J. (1995). Metamorfismo de bajodrado en facies prenita-pympellyita en las metabasitas del synclinal de Almaden. Bol Soc Esp Mineral 18: 111-125.

Higueras P., Oyarzun R., Lunar R., Sierra J., Parras J. (1999). The Las Cuevas deposit, Almaden district (Spain): unusual case of deepseated advanced argillic alteration related to mercury mineralization. MD 34: 211-214.

Jebrak M., Hernandez A. (1995). Tectonic deposition of mercury in the Almaden district (Las Cuevas, deposit, Ciudad Real, Spain). Mineralium Deposita 30: 413-432.

Julivert M., Fontaote J.M., Ribeiro A., Conde L.E.N. (1972). Mapa tectonico de la Peninsula Iberica y Baleares a escala 1:1 000 000. Instituto Geologico y Minero Espana, Madrid.

Laboratoire de Geologie Appliquee, Universite de Paris, France (1973) Some major concepts of Metallogeny (Consanguinity, Heritage, Provice) Mineralium Deposita 8: 237-258.

Liou J.C., Maruyama S., Cho M. (1987). Very-low grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rock-mineral assemblages and mineral facies. In: Frey M. (ed) Low temperature metamorphism Blackie, USA: pp. 59-113.

Maucher A., Saupe F. (1967). Sedimentarar Pirit aus der Zinnorberlagerstatte Almaden (provinz Ciudad Real, Spanien). Mineralium Deposita 2: 312-317.

Meschede M. (1986). A method for discriminating between different type of mid-ocean ridge basalts and continental tholeites with the Nb-Zr-Y diagram. Chem Geol 56: 207-218.

Morata D., Higueras P., Dominguez-Bella S., Velasco F. (1997). Presencia y significado de fuchsita en enclaves ultrabasicos de la roca frailesca de Almaden. Bol Soc Esp Mineral 20A: 85-86.

Металлогения ртути. Под редакцией В.И. Смирнова, В.А. Кузнецова, В.П. Федорчука. Авт.: П.В. Бабкин, Ю.Е. Баранов, В.И Васильев и др. М., «Недра», 1976. 255 с.

Morency M., Mineau R., Zeller E., Dreschhoff G. (1986). Are all fossil fuels really fossils? Oil and Gas J, June 2:92-95.

Nagler T.F., Schafer H.J., Gebaue D. (1992). Sm-Nd isochron on pelites 1 Ga in excess of their depositional age and its possible significance. Geochim Cosmochim Acta 56: 789-795.

Ortega E., Hernandez A. (1992). The mercury deposits of the Almaden syncline, Spain. Chron Rech Min 506: 3-24.

Prado del C. (1885). Sur la geologie Almaden una partie de la Sierra Morena, et des montagnes de Toledo. Bull Soc Geol Ff (2eme serie) 12: 182-204.

Puigdefabregas C. (1974). Estudio de las relaciones entre paleocorrientes y direcciones de mineralizacion en la Mima de Almaden. Internal Rep CGS.

Potter R.W. II., Barnes H.L. (1978). Phase relations in the binary Hg-S. Am Mineral 63: 1143-1152. *Ransome F.* (1921). The ore of the Almaden mine. Econ Geol 16: 313-321.

Ridley J. (1993). The relations between mean rock stress and fluid flow in the crust: reference to vein-and lode-style gold deposits. Ore Geol Rew 8: 23-37.

Rytuba J.J., Heropoulos C. (1992). Mercury – an important byproduct in epithermal gold systems. Contributions to mineral commodities. US Geol Sury Bull 1897, D1-D8.

Rytuba J.J., Rye R.O., Hernandez A., Dean J.A., Arribas A. Sr. (1989). Genesis of Almaden type mercury deposits, Almaden, Spain. Int Geol Congr., Washington, vol. 2, p. 2741.

Saupe F. (1967). Note preliminaire concernant la genese du gisement de mercure d'Almaden. Mineralium Deposita 2: 26-33.

Saupe F. (1973). La geologie du gisement de mercure d'Almaden (Province de Ciudad Real, Espagne), Science de la Terre, Mem 29, 342p.

Saupe F. (1990). Geology of Almaden mercury deposit, Province of Ciudad Real, Spain. Econ Geol 85: 482-510.

Saupe F., Arnold M. (1992). Sulphur isotope geochemistry of the ores and country rocks at the Almaden mercury deposit, Ciudad Real, Spain. Geochim Cosmochim Acta 56: 3765-3780.

Sirot P., Ventre J. (1973). Etude de la «roche frailesca» et d'un groupe de sondages de la mine d'Almaden. Rap Univ Nancy, 46p.

Soldevila J. (1983). Estudio geologico structural de la terminacion occidental del synclinal de Almaden. Bol Geol Min 44-2: 93-105.

Tamain G. (1972). Recherches geologiquies et minieres en Sierra Morena Oriental (Espagne). These de Doctorat, Universite Paris-Sud, Orsay, 648p.

Taylor S.R., McLennan S.M. (1985). The continental crust. Its composition and evolution. Blackwell, Oxford. 312 p.

Van der Veen R.W. (1924). The Almaden mercury ores and their connection with igneous rocks. Econ Geol 29: 146-156.

Varekamp J.C., Buseck P.R. (1984). The speciation of mercury in hydrothermal systems, with applications to ore deposition. Geochim Cosmochim Acta 48: 177-185

White R.S., McKenzie D. (1995). Mantle plumes and flood basalts. J Geohy Res 100: 17 543-17 585.

Yardley B.W. (1989). An introduction to metamorphic geology Longman Scientific and Technical, Singapore, 248p.

Геология ртутных месторождений и проявлений Украины. Отв. ред. В.И. Скоржинский. Авт.: И.Р. Белоус, А.П. Большаков, С.И. Кирикилица и др. Киев, Изд-во «Наукова думка», 1975. 286 с.