

УДК 553.44

А.Л. Дергачев¹, Н.И. Еремин², Н.Е. Сергеева³

ВУЛКАНОГЕННЫЕ КОЛЧЕДАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОФИОЛИТОВОЙ АССОЦИАЦИИ

Вулканогенные колчеданные месторождения в офиолитовых комплексах обычно относятся к кипрскому типу. Они связаны с недифференцированными базальтоидными вулканогенными формациями, которые образовывались в срединно-океанических или задуговых спрединговых центрах и значительно реже во внутриплитной обстановке. Месторождения характеризуются медноколчеданным или медно-цинковым составом руд, содержат мало Pb, обогащены Ni, Co, а иногда Mn и As при низком (до умеренного) содержании Au и Ag. Такие месторождения обладают малыми запасами руды и металлов. Они неравномерно распределены в геологической истории. Наиболее древние из них образовались еще в неопротерозое, но пики рудообразования этого типа отвечают ордовикскому и меловому периодам. Возможные палеопротерозойские аналоги таких месторождений встречаются в Свекофенском поясе (рудный район Оутокумпу), а в качестве современных аналогов рассматриваются сульфидные образования в хребтах Эксплорер и Эндевор, а также в южной части хребта Хуан-де-Фука.

Ключевые слова: колчеданные месторождения, вулканическая ассоциация, кипрский тип месторождений, рудные месторождения в офиолитах.

Volcanogenic massive sulfide deposits in ophiolite complexes are usually attributed to the Cyprus type. They associate with basaltic volcanics formed in mid-ocean or back-arc spreading centers and much less frequently in intra-plate settings. The deposits are characterized by copper or copper-zinc ores enriched in Ni, Co and in places Mn and As but are very poor in Pb and demonstrate low to moderate content of Ag and Au. Typically the deposits are small to very small in ore and metal reserves. Cyprus-type deposits are irregularly distributed in geological time. The most ancient of them were formed in the Neoproterozoic while the bulk of deposits are Ordovician or Cretaceous in age. Their possible Paleoproterozoic analogues can be found in Svecofennian belt (Outokumpu ore district) while modern ones are confined to the Explorer and Endeavour Ridges and southern segment of the Juan de Fuca Ridge.

Key words: mineral deposit types, volcanic-associated massive sulfide deposits, Cyprus-type deposits, ophiolite-associated mineral deposits.

Геологические условия залегания месторождений.

Среди разнообразных типов месторождений полезных ископаемых, связанных с ультрабазит-базитовыми комплексами, особое место занимают вулканогенные колчеданные месторождения в офиолитовых комплексах, которые считаются фрагментами древней океанической коры. Авторы рассматривают лишь те месторождения, на которых установлены более или менее полные разрезы офиолитовых комплексов, включающие (снизу вверх) тектонизированные дуниты и пироксениты, сменяющиеся выше зоной массивных и расслоенных габбро, затем — зоной щитовых диабазовых даек, подушечными лавами и лавобрекчиями базальтов с прослоями яшм, охры, умбры, а также глубоководными тонкозернистыми осадочными породами. В некоторых колчеданосных офиолитовых комплексах отдельные члены разреза могут отсутствовать. Так, в Северных Апеннинах зона параллельных даек не установлена, расслоенные

габбро интродуцируют мантийные лерцолиты, а пиллоу-лавы и пелагические осадочные образования непосредственно перекрывают мантийный фундамент, на поверхности которого местами присутствуют офиолитовые брекчии — продукты подводного разрушения интрузивных и вулканических пород [Garuti et al., 2008]. Мощность обнаженной части колчеданосных офиолитовых комплексов может превышать 4 км [Strong, Saunders, 1988].

Колчеданные месторождения установлены по крайней мере в 25 из 200 известных офиолитовых комплексов [Galley, Koski, 1999]. Классическими для этой группы являются месторождения Центрального Ньюфаундленда (Тилт-Ков, Уэйлсбек и др.), Омана (Аарджа, Ласайль, Байда), Кипра (Мавровуни, Агротипия и др.) [Хадьиставриноу, Константиноу, 1984], которые являются закономерными членами разрезов офиолитовых комплексов. Положение рудных тел в их пределах может быть различным. Например, в

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых, доцент, канд. геол.-минер. н., *e-mail:* alderg@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых, член-корр. РАН, профессор, доктор геол.-минер. н., *e-mail:* eremin@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии полезных ископаемых, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н., *e-mail:* nat45326@yandex.ru

центральных районах Ньюфаундленда (зона Дуннаж) бедная прожилково-вкрапленная минерализация известна в зоне щитовых даек, часть месторождений залегает непосредственно над ней, вблизи контакта с вышележащими подушечными лавами базальтов (например, месторождения Беттс-Ков, Литл-Бей, Майлз-Ков), часть — в разрезе подушечных лав и лавобрекчий, хотя связанные с ними подрудные штокверковые зоны могут проследиваться в зону щитовых даек (месторождения Уэйлсбек, Рендел-Джекман и др.), а месторождение Тилт-Ков находится на контакте базальтов с захороняющими их тонкозернистыми осадочными образованиями [Swinden et al., 1988].

Наиболее крупные месторождения Кипра (кроме Скуриотиссы) [Хадьяставриноу, Константиноу, 1984] и Омана локализованы в основном на контакте верхних и нижних подушечных лав, несколько различающихся по составу, и их образование, вероятно, протекало во время перерыва между крупными извержениями подушечных лав. Кроме того, в некоторых офиолитовых комплексах, например в Северных Апеннинах, колчеданные руды слагают стратиформные рудные тела в серпентинитовых брекчиях с градиционной слоистостью, перекрыты подушечными лавами базальтов и, значит, формировались до начала вулканических извержений (месторождения Реппия I, Монте-Барденето, Монте-Бьянко I). Наконец, в отсутствие зоны параллельных даек штокверковая колчеданная минерализация может распространяться на интрузивы габбро (месторождение Кампельи) [Garuti et al., 2008].

Примечательно, что крупнейшие колчеданные месторождения Кипра, Омана, Ньюфаундленда и наиболее значительные месторождения Северных Апеннин расположены либо на контакте подушечных лав с зоной щитовых даек, либо между отдельными лавовыми потоками в толще базальтовых эффузивов, но в любом случае отлагались на эродированной поверхности базальтов или серпентинитов и перекрыты базальтами. Судя по всему, положение в разрезе существенно влияло на возможность сохранения субсогласных пласто- или холмообразных рудных тел от разрушения и окисления в подводных условиях. Рудные тела, залегавшие на серпентинитовых брекчиях или на поверхности базальтов под чехлом кремнистых осадочных пород, часто несут следы биогенной переработки, механического разрушения с образованием обломочных потоков и переотложения.

Месторождения в офиолитовых комплексах характеризуются медноколчеданным или медноцинково-колчеданным составом руд и неповторимым набором других признаков, что позволяет выделить их в самостоятельный кипрский тип [Еремин, 1983; Еремин и др., 2000]. Представители этого типа составляют менее 10% от общего числа колчеданных месторождений мира. Хотя из отечественных месторождений к ним часто относят месторождения Домбаровского рудного района на Урале [Серавкин,

2007], однако по ряду признаков — вслед за уральскими исследователями — к этому типу нами отнесены лишь месторождения Ишкининское, Ивановское, Дергамышское, Маукское (ордовикско-силурийские), а также Жарлы-Аша, Жангана, Актогайское (среднедевонские) [Прокин и др., 1992; Зайков, 1999; Коротеев, Сазонов, 2005].

Рудовмещающие базальты на месторождениях кипрского типа в ряде случаев относятся к низкокальциевым океаническим толеитам, аналогичным типу MORB (Присакмарско-Вознесенская зона Урала [Коротеев, Сазонов, 2005], офиолитовым комплексам Скиддер-Базальт и Бей-оф-Айленд на Ньюфаундленде, базальтам террейна Стайкан Берегового кристаллического комплекса в Британской Колумбии [Swinden et al., 1988]), образовались, возможно, в обстановке срединно-океанических спрединговых зон. С базальтами типа MORB связаны сравнительно редкие и, как правило, очень мелкие колчеданные объекты на Урале и Ньюфаундленде (Маукское, Скиддер, Йорк-Харбор, Грегори-Ривер и др.).

Большинство колчеданных месторождений кипрского типа (в том числе на Ньюфаундленде и в Квебекских Аппалачах) ассоциирует с базальтовыми формациями, в самых нижних частях разрезов которых встречаются высокомагнезиальные андезиты, аналогичные современным бонинитам, а также толеитовые базальты, которые отличаются от примитивных базальтов MORB аномально низким содержанием Ti, Zr, Hf, U, Th и других высокозарядных элементов с высокой валентностью, а также более высоким содержанием легких редкоземельных элементов. Подобные породы являются переходными к островодужным, интерпретируются как образования надсубдукционных спрединговых зон, они формировались на ранних стадиях рифтогенеза при раскрытии задуговых бассейнов. На Ньюфаундленде они участвуют в строении, например, офиолитового комплекса Беттс-Ков с месторождениями Тилт-Ков и Беттс-Ков, а также разреза группы Лашс-Байт с месторождениями Леди-Понд, Литл-Бей, Литл-Диар и др., а в Квебекских Аппалачах являются вмещающими для месторождения Хантингтон [Trottier et al., 1987]. Промежуточные между базальтами срединно-океанических хребтов и островодужными толеитами — породы, вмещающие месторождения Аляски и Омана, которые возникали в обстановке скорее задуговых, чем срединно-океанических спрединговых зон [Crowe et al., 1992; Naumon, 1989]. В исключительных случаях месторождения, во многих отношениях сходные с объектами кипрского типа (например, Чу-Чуа в Британской Колумбии), связаны с толеитовыми базальтами повышенной щелочности и щелочными базальтами, формирующимися во внутриплитной обстановке и свойственными океаническим островам и подводным горам [Aggarwal, Nessbit, 1984].

Таким образом, геодинамическая обстановка формирования месторождений кипрского типа ока-

зывается достаточно разнообразной, хотя большинство месторождений возникло в пределах срединно-океанических и особенно задуговых спрединговых зон. Однако большая часть коры зрелых океанов должна была уничтожаться в процессе субдукции, поэтому преимущественная связь месторождений кипрского типа с тем или иным петрохимическим типом вулканогенных пород может быть установлена лишь с учетом неодинаковой площади их распространения.

На месторождениях кипрского типа в составе базальтоидных формаций резко доминируют лавовые фации, осадочные породы представлены железомарганцевокремнистыми осадочными образованиями, аспидными сланцами, аргиллитами и граувакками. В локализации месторождений важную роль играют различные по масштабу конседиментационные трюги, ограниченные сериями параллельных наклонных ($45\text{--}60^\circ$) сбросов (например, на месторождении Вейс в Юго-Восточной Анатолии, Турция). На месторождении Байда в Омане, в частности, ширина такого грабена достигает 70 м. Конседиментационная природа этой и подобных структур подтверждается обычно наличием стратиграфически ниже рудных тел базальных брекчий, состоящих из обломков базальтов и сульфидных руд в кремнистом цементе (продукты разрушения стенок грабена, которые подверглись гидротермальнометасоматическим изменениям). Очень многие из этих месторождений расположены вблизи стенок полуграбенов, над синвулканическими разломными зонами и нередко непосредственно на серпентинитовом фундаменте. Тесная ассоциация с аподунитовыми или апогарцбургитовыми серпентинитами, слагающими серию пластин и блоков, характерна и для Северных Апеннин [Garuti et al., 2008], а также для Ишкининского, Ивановского, Дергамышского месторождений Урала [Мелекесцева, Зайков, 2003]. Примечательно, что колчеданные руды на поверхности серпентинитового фундамента встречаются только там, где за их накоплением последовало извержение базальтовых лав, но отсутствуют, если фундамент перекрывался пелагическими осадками.

Рудные залежи рассматриваемых месторождений характеризуются пластообразной, реже уплощенной линзовидной формой тел сплошных руд. В последнем случае они, видимо, были выражены в рельефе дна бассейна осадконакопления небольшими холмообразными постройками. На многих месторождениях Кипра рудные тела имеют удлиненные в плане очертания, что отражает сильное влияние синвулканических разломов на распределение гидротермальных источников. Верхние контакты рудных тел с перекрывающими осадочными породами или базальтами обычно ровные. В распределении мощности рудных тел нередко отмечается асимметрия, отражающая условия их образования в небольших впадинах дна вблизи синвулканических разломов или стенок

грабенов, по мере удаления от которых мощность постепенно уменьшается.

Большинство тел колчеданных руд относится к проксимальным образованиям, поскольку непосредственно стратиграфически ниже в подавляющем большинстве случаев выявлены обширные зоны гидротермально измененных пород и прожилково-вкрапленной минерализации, которые имеют воронкообразную форму и контролируются зонами синвулканических разломов. Типичные процессы окolorудных изменений пород (в порядке убывания их распространения) — окварцевание, хлоритизация, значительно реже карбонатизация, серицитизация, эпидотизация, оталькование (по ультрабазитам). Трубообразные зоны окolorудных изменений и прожилково-вкрапленной минерализации могут достигать нескольких сотен метров по латерали и вертикали, а при положении месторождений близко к основанию толщи базальтовых лав они уходят своими корнями в зону щитовых даек.

Жильно-штокверковые зоны имеют линейные очертания в плане и уплощены в разрезе. Их протяженность на поверхности дна палеобассейна была сопоставима с размерами согласных тел сплошных руд, на месторождении Леккен, например, она достигала 4000 м при ширине менее 100 м. На месторождениях Кипра вертикальный размах штокверковых зон в 2 раза превосходит размеры тел сплошных руд. Так, на месторождении Скуриотисса штокверковая зона прослежена в породе лежачего бока рудного тела на 700 м, а на месторождении Аарджа в Омане — на 3000 м по вертикали при ширине 500 м [Galley, Koski, 1999]. Масса сульфидов в составе зон жильно-штокверковой минерализации намного превышает массу сплошных руд (например, в 4 и 5 раз на месторождениях Леккен и Хейдал в Норвегии соответственно, в 40 раз на месторождении Лимни на Кипре). Хотя жильно-штокверковые зоны сложены относительно бедными рудами (0,4–0,5%, редко до 1% Cu), на тех месторождениях, где установлены и согласные тела более богатых сплошных руд, и секущие штокверковые зоны, последние вносят от 30–40% (например, рудные тела Агрокипия А и В) до 96% (месторождение Лимни) в запасы металлов. Подобные же зоны исключительно широко развиты за пределами месторождений, где, как правило, являются слепыми, т.е. согласные залежи сплошных руд над ними никогда не возникали или имели очень ограниченный масштаб.

На большинстве месторождений Кипра установлено одно крупное рудное тело, однако некоторые месторождения этого типа, например Аарджа в Омане, включают серию линзовидных залежей и (или) пластов, занимающих несколько различающуюся стратиграфическую позицию (максимум на 10–20 м по разрезу) или разобщенных по латерали. Часто рудные тела представляют собой шаровые лавы с богатыми сульфидными желваками, выполняющими межшаро-

вое пространство. Почти на всех месторождениях выявлены признаки дробления ранних руд и цементации их более поздними сульфидами. Однако рудные тела, сложенные ритмично-слоистыми сульфидными песчаниками и гравийными брекчиями или серпентинит-сульфидными гравелитами и гравелитопесчаниками, установлены лишь на месторождениях Ишкининском на Урале [Масленников, 1999; Мелекесцева, Зайков, 2003] и Хейдал в Норвегии [Green, Vokes, 1990]. В целом отмечено слабое распространение или даже практически полное отсутствие перемещенных руд на месторождениях этого типа. Случаи, когда залежи массивных руд полностью эродированы, а сохранившиеся корневые штокверковые зоны имеют самостоятельное промышленное значение, чрезвычайно редки (месторождения Биг-Рамблер-Понд и Ист-Майн на Ньюфаундленде). Это указывает на сравнительно слабонагруженный рельеф и наличие условий для захоронения сформировавшихся рудных залежей.

Вопреки широко распространенному мнению, умбры (темно-коричневые до черных марганцовистые осадки) встречаются практически лишь на наиболее молодых (позднемеловых) собственно кипрских месторождениях Скуриотисса, Мавровуни, Матиатис, Калавасос, Мусулос [Хадьиставриноу, Константиноу, 1984], тогда как наиболее распространенные типы связанных с месторождениями эксгальционно-осадочных образований — кремнистые породы, яшмы, сульфидные фации железистых кварцитов, присутствующие в надрудной толще большинства месторождений Ньюфаундленда (в частности Минг, Бетс-Ков, Литл-Диар, Биг-Рамблер-Понд, Тера-Нова, Рамблер-Майн), Британской Колумбии (Иден, Хайден-Крик, Дабл-Эд, Бонанца), Урала (Маукское, Жарлы-Аша), Норвежских Каледонид (Леккен, Хейдал) [Зайков, 1999; Green, Vokes, 1990].

Минералого-геохимические особенности руд. Наиболее распространенные рудные минералы месторождений кипрского типа — пирит, пирротин, халькопирит; несколько реже встречаются сфалерит, пентландит, магнетит, гематит, хромит. Из редких минералов присутствуют арсенопирит, кобальтин, валлериит, миллерит, бравоит, линнеит, борнит, марказит, самородное золото; блеклые руды, как правило, представлены теннантитом [Еремин и др., 2007].

Руды характеризуются довольно низким средним содержанием металлов, значительным преобладанием Cu над Zn, почти полным отсутствием Pb, повышенной концентрацией Ni и Co, а в ряде случаев и As, а также сравнительно низким содержанием Ag и довольно высоким отношением Au/Ag.

Месторождения кипрского типа имеют медноколчеданный или медно-цинковый состав руд. Среднее (по 71 месторождению, включенному в базу данных) содержание металлов в рудах этих месторождений составляет 1,9% Cu и 0,6% Zn. При этом около 63% месторождений характеризуются содержанием меди 2% и менее, а содержание Zn превышает 2% лишь на 12% месторождений.

Для месторождений кипрского типа характерны очень высокие значения отношения $100\text{Cu} / (\text{Cu} + \text{Zn})$, и следовательно, резкое преобладание меди над цинком. Для 66% месторождений этого типа, объединяющих 58% соответствующих запасов руды, величина этого отношения колеблется от 0,9 до 1,0. Лишь на 11 месторождениях (15%) цинк в составе руд преобладает над медью, но, как правило, такие месторождения весьма незначительны по запасам (на половине из них запасы составляют менее 0,7 млн т). Если же говорить о суммарных запасах меди и цинка на всех месторождениях этой группы, то они относятся как 3,1:1. Свинец отмечен лишь на 9 месторождениях, но ни в одном случае его концентрация не превышает 0,09%.

Для колчеданных руд часто характерно повышенное содержание Co (от 0,002 до 0,52% на 20 месторождениях), Ni (0,001–0,3% на 14 месторождениях), Mn (0,004–0,11% на 4 месторождениях). Поскольку распределение этих компонентов изучено далеко не на всех объектах кипрского типа, можно ожидать, что доля месторождений этого типа с рудами, обогащенными Ni и Co, в действительности намного выше. В подавляющем большинстве случаев величина отношения Co/Ni превышает 1. Она колеблется от 0,03–0,7 для разных типов руд Ишкининского и Ивановского месторождений до 7–8 (Хейдал, Анна-Ятаг, Вейс, Либиола) и до 15–19 (Канусса — Анкл-Чарлз, Хайаль-ас-Сафиль [Hannington et al., 1998]). Кобальт имеет положительную корреляцию с медью. При переходе от штокверковой зоны к сплошным рудам снижается содержание никеля и возрастает — кобальта, и следовательно, увеличивается кобальт-никелевое

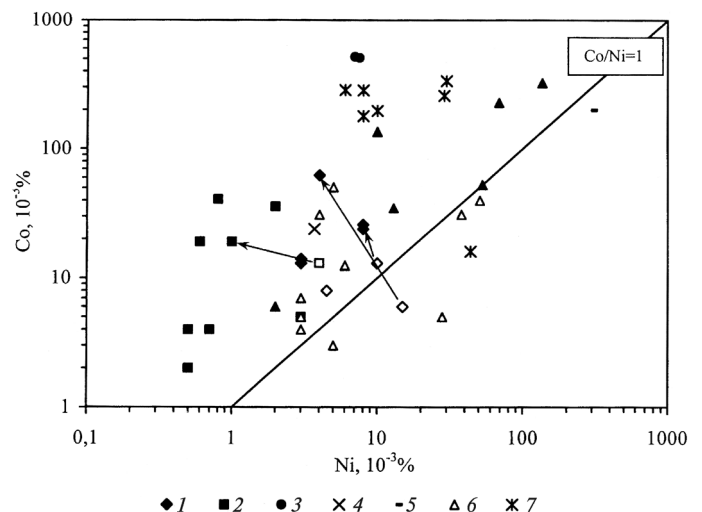


Рис. 1. Соотношение содержания кобальта и никеля в рудах месторождений кипрского типа (для сравнения приведены данные для сульфидных образований гидротермального поля ТАГ, по [Hannington et al., 1998]). Значки с заливкой соответствуют сплошным рудам, без заливки — штокверковым. Стрелками связаны точки, отвечающие сплошным рудам и штокверковым телам соответствующих месторождений.

Месторождения в офиолитовых комплексах: 1 — Омана, 2 — Кипра, 3 — Юго-Восточной Анатолии, 4 — Норвегии, 5 — Урала, 6 — Северных Апеннин, 7 — гидротермальное поле ТАГ в Срединно-Атлантическом хребте

Характеристики выборок колчеданных месторождений различных типов

Тип месторождений	Число месторождений	Запасы руды, тыс. т.				Характеристики выборки			
		суммарные	средние	медианные	максимальные	макс./мин.	макс./сред.	макс./медиан.	сред./медиан.
Колчеданные*	618	7 812 094	12 641	2358	500 000	10 000	39,6	212	5,36
Куроко	185	3 127 247	16 904	3000	500 000	8929	29,6	166,7	5,63
Уральский	106	1 679 861	15 848	3420	378 200	9455	23,9	110,6	4,63
Бесси	42	793 587	18 895	2500	297 000	12 913	15,7	118,8	7,56
Кипрский	73	261 262	3579	1230	25 000	6250	7,0	20,3	2,91

* Месторождения всех возрастов и типов, кроме кипрского.

отношение (рис. 1). Существенное обогащение кобальтом установлено в сплошных рудах месторождений кипрского типа в районе Тронхейм (Леккен, Хейдал), в Присакмарско-Вознесенской зоне Урала и Северных Апеннинах. Примечательно, что это же выявлено и для некоторых современных сульфидных образований, например на гидротермальном поле ТАГ в Срединно-Атлантическом хребте [Hannington et al., 1998].

Основные минералы — носители Co и Ni — пирит и пирротин, собственные минералы этих элементов встречаются сравнительно редко [Еремин и др., 2004б, 2005, 2007в]. На месторождениях Присакмарско-Вознесенской зоны Южного Урала (Дергамышское, Ивановское, Ишкининское), например, присутствуют их сульфиды (Со-пентландит, виоларит, линнеит, зигенит), арсениды (никелин, кобальтин) и сульфоарсениды (глаукоdot) [Зайков, 1999; Мелекесцева, 2007].

Значительное содержание золота (0,06–7,2 г/т) обнаружено на 20 месторождениях кипрского типа (28% от их числа в базе данных). Среднее содержание Au в запасах руд этих месторождений составляет 0,31 г/т, и лишь примерно на 1/3 месторождений оно превышает 1 г/т. Содержание золота значительно возрастает в охрах, залегающих непосредственно над сульфидными рудами. Так, на месторождении Раках оно достигает 19 г/т. Хотя определенную роль при таком обогащении могли играть и современные гипергенные процессы, по крайней мере отчасти оно является результатом подводного выветривания сульфидных руд на дне мелового океана [Hannington et al., 1988].

Содержание Ag колеблется от 9 до 69 г/т, а в среднем в запасах руды 23 месторождений этого типа составляет 23,2 г/т. Вследствие этого сравнительно высокие значения приобретает отношение Au / Ag, которое изменяется от 0,004 до 0,283, в 50% случаев превышает 0,050, а в среднем в запасах руды месторождений этого типа составляет 0,042.

Запасы руды и металлов. Колчеданные месторождения в офиолитовых комплексах отличаются сравнительно малыми запасами руды, которые изменяются от 10 тыс. т до 25 млн т, а в среднем составляют 3,58 млн т (рис. 2). Крупнейшими среди них являются месторождения Леккен (каледониды Норвегии, 25 млн т) и Меденкой (Юго-Восточная

Анатолия, 23,5 млн т), которые вносят около 20% в суммарные запасы руды месторождений этого типа. Крупными запасами очень бедных руд обладает также Ивановское месторождение на Урале (24 млн т руды, 0,9% Cu, 0,1% Ni, 0,04% Co). Около 50% месторождений имеют запасы менее 1,23 млн т, а на 40% месторождений они не превышают 0,7 млн т. Лишь на одном месторождении кипрского типа (Леккен) сумма запасов меди и цинка достигает 1 млн т.

Выборка месторождений кипрского типа резко контрастирует как с остальными колчеданными месторождениями вообще, так и с их отдельными типами по соотношениям максимальных и минимальных, максимальных и средних, максимальных и медианных, средних и медианных запасов (таблица). Поскольку речь идет о генетически единой группе колчеданных месторождений, резкие отличия характеристик выборки месторождений кипрского типа связаны, скорее всего, с неполнотой базы данных. Расчеты показывают, что эти различия можно было бы минимизировать, например, добавлением в базу данных немногих месторождений с крупными запасами (60–100 млн т руды). Однако месторож-

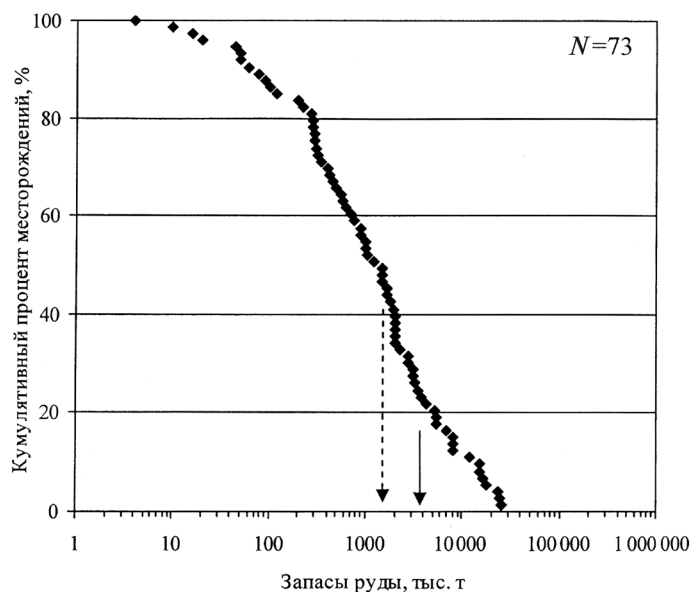


Рис. 2. Кумулятивная диаграмма запасов руды на месторождениях кипрского типа. Стрелками отмечены среднее и медианное (пунктирная линия) значения запасов для месторождений этого типа

дения кипрского типа с такими запасами в мире не встречаются. Тот же эффект мог бы быть достигнут добавлением в выборку большого числа очень мелких месторождений (например, 20–30 рудных объектов с запасами 10–100 тыс. т руды). Такие проявления колчеданной минерализации, действительно, чрезвычайно широко распространены и могут быть найдены практически в пределах любого офиолитового комплекса.

Месторождениям кипрского типа свойственна отчетливая кластеризация. Так, на Кипре в пределах офиолитового комплекса Троодос известны 24 месторождения, которые группируются в 5 рудных районах (Лимни, Калавасос—Мусулос, Скуриотисса—Мавровуни, Агрокипия, Матиатис—Ша). Они имеют размеры в плане примерно 10×10 км и отвечают различным отрезкам осевого грабена [Varga, Moores, 1985]. На севере Омана аналогичные месторождения и рудопроявления в пределах офиолитового комплекса Семаиль также контролируются отчетливыми грабенообразными структурами, образуют несколько кластеров (Аарджа—Байда—Ласаиль, Раках—Хьялас-Сафиль и др.), расположенных параллельно простиранию роев параллельных даек, т.е. вдоль оси спрединга, и отстоят одно от другого на 25–50 км. В пределах кластеров в запасах руды обычно резко доминирует одно месторождение (от 35 до 90% запасов руды), а второе по масштабу месторождение вносит только от 5 до 25% запасов.

Однако в хорошо обнаженном массиве Троодос в пределах каждого кластера установлено еще и множество проявлений колчеданных руд, запасы которых не достигают 100 тыс. т. Всего таких проявлений известно более 90. На севере Омана в пределах узкой 500-километровой полосы выхода на поверхность офиолитового комплекса Семаиль также выявлено около 150 проявлений колчеданных руд, из которых лишь 5 имеют сравнительно крупные запасы руды (>1 млн т), а остальные относятся к категории мелких непромышленных объектов.

подавляющее большинство таких мелких проявлений представлено слепыми жильно-штокверковыми зонами, не представляющими промышленного интереса в силу ограниченности запасов и низкого содержания металлов. К числу редких исключений на Кипре, например, относятся лишь крупнейшие по запасам руды жильно-штокверковые зоны Лимни (16 млн т, 1% Cu, 0,4% Zn), Питарохома (2,3 млн т, 0,5% Cu), Агрокипия В (4,5 млн т, 0,4% Cu, 0,06% Zn).

В Омани, на Кипре, в районе Тронхейм в Норвегии, на Ньюфаундленде и, вероятно, в других офиолитовых комплексах, повсюду, где такие проявления чрезвычайно широко распространены, они плохо изучены, никогда не разрабатывались и не разведывались, сведения о них не публикуются и поэтому не могут быть учтены. Именно экономическими причинами, а не редкой встречаемостью

в природе объясняется относительная малочисленность месторождений кипрского типа в базе данных, а также искажение параметров их выборки. Есть все основания полагать, что в геологическом прошлом разномасштабные проявления колчеданной минерализации были также широко распространены в срединно-океанических и задуговых спрединговых зонах, как и в настоящее время.

Ограничения на запасы руды колчеданных месторождений кипрского типа накладываются рядом взаимосвязанных причин, одна из важнейших — формационная, т.е. связь этих месторождений с недифференцированными базальтоидными формациями и относительно низкое содержание металлов в очагах базальтовой магмы. Рядовые месторождения типа бесси (еще один тип месторождений, связанный с теми же формациями) также отличаются малыми запасами руды и металлов по сравнению с другими типами.

Еще одним важным фактором, видимо, являлась высокая степень нарушенности базальтовой коры крупными глубокопроникающими разломами сбросового типа и густой сетью трещин, которые в сочетании с приповерхностным положением очагов базальтовой магмы и малой мощностью коры обусловили ее высокую проницаемость для магматических расплавов и гидротермальных растворов. В результате канализация флюидов в пределах узких локальных зон не происходила, и поэтому поток гидротерм распределялся между многими источниками на поверхности дна.

Небольшие масштабы месторождений кипрского типа, возможно, отчасти обусловлены высокой скоростью спрединга. Формирование относительно крупных месторождений, вероятно, требует особого режима вулканических извержений и изменения скорости спрединга. При частых извержениях базальтовой магмы могли образовываться лишь серии относительно небольших рудных тел, чередующихся в разрезе с базальтовыми потоками. При залечивании активных рудоподводящих разломов дайками базальтов могло происходить смещение центров гидротермальной активности в латеральном направлении. В результате происходило рассредоточение запасов: вместо крупных скоплений колчеданных руд могли образовываться лишь относительно мелкие, хотя и довольно многочисленные рудные тела.

Кроме того, если скорость спрединга оставалась высокой в течение длительного времени, участки, где происходило накопление колчеданных руд, слишком быстро смещались бы относительно магматического очага, являющегося источником энергии и рудного вещества. Только если после мощных извержений базальтов имело место снижение скорости спрединга, фиксируемое появлением горизонтов осадочных пород в разрезе офиолитовых комплексов, было возможно накопление относительно крупных рудных

тел. Подобные изменения скорости спрединга имели место при образовании офиолитовых комплексов Семаиль в Омане, Жозефин в Орегоне, Троодос на Кипре, с которыми связаны крупные для этого типа колчеданные месторождения.

Образованию крупных скоплений колчеданных руд препятствовало и положение месторождений вблизи оси рифтовой долины, где породы (и рудные тела) подвергались наиболее интенсивному растрескиванию. Фрагментация холмообразных сульфидных построек в результате тектонических процессов, вероятно, играла не менее значительную роль при их разрушении, чем окисление сульфидных минералов руд, вулканические взрывы или другие причины. Напротив, вероятность образования относительно крупных запасов возрастала на некотором удалении от оси спрединга, где длительно развивавшиеся разломы, контролировавшие внедрение внеосевых даек базальтов и излияния пиллоу-лав, еще могли обеспечивать циркуляцию гидротермальных растворов.

Месторождения кипрского типа в геологической истории Земли. Распределение месторождений кипрского типа по времени образования исключительно неравномерное. В ходе суперконтинентальных циклов они появлялись сначала при распаде суперконтинентов, когда рифтинг переходил в спрединг и появлялись офиолиты. Такие месторождения из-за сложной дальнейшей истории их тектонического развития, по-видимому, могли сохраняться лишь в исключительных случаях. Фактически они представлены лишь некоторыми раннеордовикскими месторождениями Ньюфаундленда. Позднее месторождения кипрского типа формировались при рифтогенезе в задуговой области и раскрытии задуговых бассейнов. Древнейшими, видимо, являются сравнительно мелкие и редкие месторождения зоны Блю-Ридж в Южных Аппалачах (Белл-Стар, Рич, Мариетта, Вилья-Рика). Однако важнейшие эпохи колчеданообразования для этого типа приходится на ранний ордовик и особенно на мел—палеоцен (рис. 3). Первая эпоха проявилась на Урале, а также в связи с развитием океана Япетус в Центральном Ньюфаундленде, Квебекских Аппалачах и в каледонидах Норвегии. С ней связано свыше 27% месторождений и около 21% запасов руды. Во вторую эпоху сформировалось более 53% месторождений этого типа, включенных в базу данных. К этому времени относятся многочисленные месторождения Кипра, Юго-Восточной Анатолии, Сербии, Албании, Греции, Северных Апеннин, Омана, Аляски, Ирана. Они вносят более 61% в общие запасы руды месторождений этого типа. Значительно меньше был масштаб колчеданонакопления кипрского

типа в юрское время (Кордильеры, Западные Понтиды, Северные Апеннины, примерно 8% месторождений и около 7% запасов).

К возможным докембрийским аналогам месторождений кипрского типа можно отнести месторождения Вискария в Швеции и палеопротерозойские месторождения рудного района Оутокумпу (Финляндия) в пределах Свекофеннского пояса на Балтийском щите: Оутокумпу, Вуонос и Луйконлахти [Дергачев и др., 2009]. Значительная часть свекофеннид образовывалась на коре океанического типа, а элементами офиолитовой ассоциации здесь являются выходы ультрабазитов, габброидов, базальтовых пиллоу-лав и кремнистых пород.

Рудовмещающая ассоциация Оутокумпу с возрастом около 1970 млн лет включает подрудные серпентиниты по дунитам, которые не являются жильными, имеют согласные контакты с вышележащими породами и не несут никаких признаков дифференциации или псевдостратификации. Рудные тела, как и на многих более молодых месторождениях кипрского типа, залегают в пределах небольших депрессионных структур (в депрессиях Оутокумпу и Вуонос), среди черных сланцев, скарнов, карбонатных пород метасоматического происхождения и кварцитов с убогой вкрапленностью пирита, пирротина и пентландита, рассматриваемых как эксталяционно-осадочные образования. Месторождения района Оутокумпу близки месторождениям кипрского типа и по некоторым геохимическим характеристикам. Их руды, по существу, не содержат Pb (около 0,005% на месторождении Оутокумпу), бедны Ag и Au (около 9 и 0,8 г/т соответственно на месторождении Оутокумпу), а значения отношения Au:Ag находятся в пределах диапазона изменения этого показателя для месторождений кипрского типа (0,089). На всех трех месторождениях района руды содержат довольно высокую концентрацию Se, а также Ni (0,12–0,2%) и Co (0,10–0,24%), которые входят в состав пирита, Со-пентландита, зигенита, кобальтина-герсдорфита,

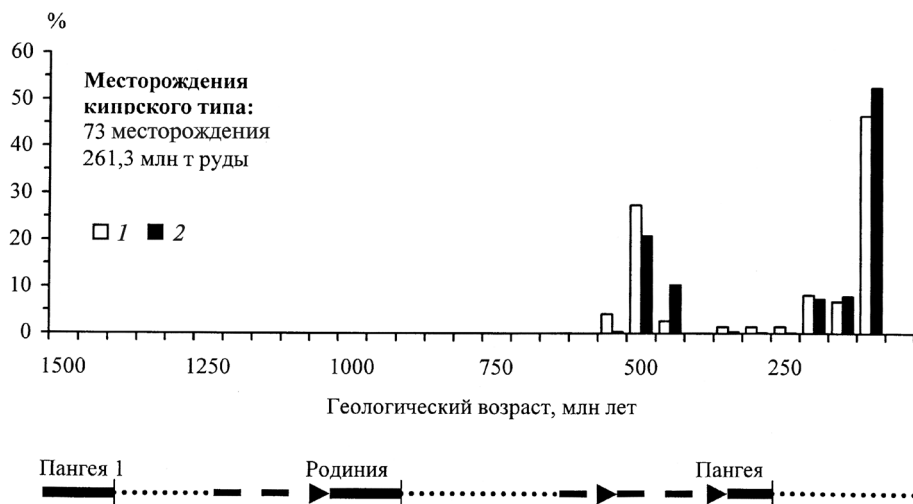


Рис. 3. Распределение месторождений кипрского типа (1) и запасов руды в них (2) в геологическом времени

виоларита, пирротина, сфалерита и халькопирита. В суммарных запасах руды на трех месторождениях рудного района соотношение $Cu:Zn$ составляет 3,2:1, т.е. практически совпадает с установленным для месторождений кипрского типа.

В то же время по некоторым особенностям месторождения района Оутокумпу отличаются от типичных представителей кипрского типа, облик которого окончательно сформировался лишь в начале палеозоя. Эти месторождения непосредственно ассоциируют с массивными дунитами, что нетипично для месторождений кипрского типа, обычно залегающих в средней и верхней частях разреза офиолитовых комплексов. Величины отношения $Co:Ni$ для месторождений рудного района колеблются от 1,2 (Вунос) до 2,0 (Оутокумпу), что существенно ниже, чем на большинстве фанерозойских месторождений кипрского типа. Существует ряд отличий, вероятно связанных со специфическим для палеопротерозоя низким уровнем оксигенизации атмосферы и гидросферы (в частности отсутствие в составе руд гематита, а в рудовмещающем разрезе — яшм, кремнистых эксгальционно-осадочных пород, содержащих оксиды Fe и Mn). Некоторые другие отличия, в том числе структурно-текстурные особенности, вероятно, можно объяснить намного более высоким уровнем метаморфизма руд палеопротерозойских месторождений по сравнению с фанерозойскими, известными на Кипре, Ньюфаундленде или в Норвегии. В то же время в силу упомянутых причин мы считаем правильнее рассматривать месторождения района Оутокумпу лишь в качестве возможных древнейших аналогов месторождений кипрского типа.

Поскольку настоящие офиолиты появились лишь около 2 млрд лет назад [Хаин, Божко, 1988], обнаружение более древних месторождений—аналогов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дергачев А.Л., Еремин Н.И., Сергеева Н.Е. Докембрийские колчеданные месторождения вулканической ассоциации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 3. С. 3–12.

Еремин Н.И. Дифференциация вулканогенного сульфидного оруденения (на примере колчеданных месторождений фанерозоя). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 256 с.

Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В. Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология рудн. месторождений. 2000. № 2. С. 177–190.

Еремин Н.И., Сергеева Н.Е., Дергачев А.Л. Типоморфизм редких минералов колчеданных руд и их геохимический тренд // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2007. № 2. С. 40–48.

Зайков В.В. Медноколчеданные месторождения среди офиолитов Южного Урала — аналоги сульфидных залежей в океанических рифтах // Вопросы петрологии, минералогии, геохимии и геологии офиолитов. Новосибирск: СО РАН, 1999. С. 180–194.

Коротеев В.А., Сазонов В.Н. Геодинамика, рудогенез, прогноз (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 259 с.

кипрского типа представляется маловероятным. Применительно к неархейским зеленокаменным поясам можно говорить лишь о протоофиолитах, которые отличаются отсутствием комплексов параллельных даек и закономерной смены полосчатых габбро массивными, а главное, широким развитием коматиитовых лав. Среди них встречаются месторождения сульфидных Fe—Ni руд (в том числе месторождение Редстоун в поясе Абитиби), которые ряд авторов относят к вулканогенно-эксгальционному образованию [Robinson, Hutchinson, 1982]. Однако их генезис остается спорным (обычно его считают собственно магматическим), а практическое отсутствие в рудах Cu и Zn, специфический характер рудовмещающего разреза (коматиитовые лавы) и особенности структурной позиции не дают оснований полагать, что это древнейшие аналоги месторождений рассматриваемого типа.

По особенностям состава вулканогенных пород, геодинамическим обстановкам рудообразования, палеовулканической позиции, минералого-геохимическим признакам древние колчеданные месторождения кипрского типа весьма близки к современным проявлениям сульфидной минерализации, формирующимся в обстановках срединно-океанических спрединговых зон в районах Южный Эксплорер, Эндевор и в южной части хр. Хуан-де-Фука, на широте 11° и 21° с.ш. в Восточно-Тихоокеанском поднятии, а также в Срединно-Атлантическом хребте (в частности в гидротермальном поле ТАГ [Hannington et al., 1998]) и других районах. Для них установлено определенное сходство со скоплениями сульфидов в районах Палинуро в Тирренском море и в районе к востоку от Восточно-Тихоокеанского поднятия на широте 13° с.ш., встреченными в обстановках подводных поднятий [Scott, Yang, 1997].

Масленников В.В. Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей. Миасс: Геотур, 1999. 348 с.

Мелекесцева И.Ю., Зайков В.В. Руды Ишкининского кобальт-медноколчеданного месторождения (Южный Урал). Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. 122 с.

Прокин В.А., Серавкин И.Б., Буслаев Ф.П. и др. Медноколчеданные месторождения Урала: Условия формирования. Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 307 с.

Серавкин И.Б. Вулканогенные колчеданные месторождения Южного Урала // Геодинамика, метаморфизм и рудообразование. Екатеринбург: ИГГИ УрО РАН, 2007. С. 638–669.

Хадбиставриноу Ю., Константиноу Г. Кипр // Минеральные месторождения Европы. Т. 2. М.: Мир, 1984. С. 345–374.

Хаин В.Е., Божко Н.А. Историческая геотектоника, докембрий. М.: Недра, 1988. 382 с.

Aggarwal P.K., Nessbit B.E. Geology and geochemistry of the Chu Chua massive sulfide deposit, British Columbia // Econ. Geol. 1984. Vol. 79. P. 815–825.

Growe D.E., Nelson S.W., Brown P.E. et al. Geology and geochemistry of volcanogenic massive sulfide deposits and related

igneous rocks, Prince William Sound, South-Central Alaska // *Econ. Geology*. 1992. Vol. 87. P. 1722–1746.

Garuti G., Bartoli O., Scacchetti M., Zaccarini F. Geological setting and structural styles of volcanic massive sulfide deposits in the northern Apennines (Italy): evidence for seafloor and sub-seafloor hydrothermal activity in unconventional ophiolites of the Mesozoic Tethys // *Boletin de la Sociedad Geologica Mexicana*. 2008. Vol. 60, N 1. P. 121–145.

Green T., Vokes F.M. Sea-floor sulfides at the Hoydal volcanogenic deposit, Central Norwegian Caledonides // *Econ. Geol.* 1990. Vol. 85. P. 344–359.

Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S. Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits // *Proceed. of the ocean drilling program. Scientific results*. 1998. Vol. 158. P. 389–415.

Haymon R.M., Koski R.A., Abrams M.J. Hydrothermal discharge zones beneath massive sulfide deposits mapped in the Oman ophiolites // *Geology*. 1989. Vol. 17. P. 531–535.

Neathery T.L., Hollister V.F. Volcanogenic sulfide deposits in the Southernmost Appalachians // *Econ. Geol.* 1984. Vol. 79. P. 1540–1560.

Scott S.D., Yang K. Massive sulfide-forming systems on the present ocean floor // *Mineral Deposits*, Balcema. Rotterdam, 1997. P. 19–25.

Strong D.F., Saunders C.M. Geological setting of sulfide mineralization at Tilt Cove, Betts Cove ophiolite, Newfoundland // *Volcanogenic sulfide districts of Central Newfoundland*. 1988. P. 54–61.

Swinden H.S., Kean B.F., Dunning G.R. Geological and paleotectonic settings of volcanogenic sulfide mineralization in Central Newfoundland // *Ibid.* P. 5–27.

Trottier J., Gauthier M., Brown A. Geology and lithogeochemistry of the Huntingdon deposit, Cyprus-type mineralization in the ophiolite belt of the Southeastern Quebec Appalachians // *Econ. Geol.* 1987. Vol. 82. P. 1483–1504.

Поступила в редакцию
08.12.2009