

УДК 553.44

А.Л. Дергачев<sup>1</sup>, Н.И. Еремин<sup>2</sup>, Н.Е. Сергеева<sup>3</sup>**ВУЛКАНОГЕННЫЕ КОЛЧЕДАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИПА БЕССИ**

Вулканогенные колчеданные месторождения типа бесси связаны с недифференцированными базальтоидными формациями. Они формировались в пределах срединно-океанических хребтов вблизи континентальных окраин, в областях задугового спрединга, реже в интраконтинентальных рифтогенных прогибах. Для них характерны широкое распространение турбидитов в составе рудовмещающих толщ, медно-цинковый состав руд, а также обогащение их Co, преобладание субвулканических тел базальтов, пластообразная морфология рудных тел, отсутствие четкого структурного контроля, относительно низкое среднее содержание Cu, Zn, Au и Ag, некоторое обогащение руд Pb и более крупные запасы руды и металлов.

*Ключевые слова:* вулканогенные колчеданные месторождения, тип бесси, рудные месторождения в базальтоидных формациях.

Besshi-type volcanogenic massive sulfide deposits (VMSD) associate with undifferentiated basaltic formations. They formed either within middle-ocean ridges close to continental margins, or in super-subduction spreading zones, or in intracontinental rifts. They are characterized by wide spread occurrence of turbidites, copper-zinc ores enriched in Co, predominance of subvolcanic sills, sheet-like morphology of ore shoots, absence of strict structural control, low Cu, Zn, Ag, Au grades, enrichment in Pb and relatively large average ore and metal reserves.

*Key words:* volcanic-associated massive sulfide deposits, Besshi-type deposits, mineral deposits in basaltic formations.

**Введение.** Практически все современные классификации колчеданных месторождений вулканической ассоциации, несмотря на различия между ними, в качестве важнейших признаков учитывают состав вулканогенных формаций, с которыми эти месторождения парагенетически связаны, а также состав их руд. В последней четверти прошлого столетия одним из авторов была отмечена прямая корреляция состава руд месторождений (от серно- и медноколчеданных к медно-цинково-колчеданным и колчеданно-полиметаллическим) с рядом вулканогенных формаций (от недифференцированной базальтовой к дифференцированным базальт-андезит-дацит-риолитовой и базальт-риолитовой) и увеличением доли кислых вулканитов в их разрезе, обосновано также подразделение колчеданных месторождений вулканической ассоциации на типы кипрский, уральский и куроко [Еремин, 1978, 1983].

К кипрскому типу первоначально были отнесены все месторождения в недифференцированных базальтоидных формациях независимо от характера их разрезов, в том числе и месторождения, издавна известные в Альпах (выделены австрийскими геологами в качестве типа кислагер) и поясе Самбагава в Японии (в том числе месторождение Бесси) и ассоциировавшие преимущественно с осадочными породами, среди которых встречались отдельные

потоки базальтовых лав, силлы и дайки базальтов. Однако за последние десятилетия накоплен обширный новый фактический материал о месторождениях в базальтоидных формациях, выявлены и изучены их многочисленные современные аналоги — проявления колчеданной минерализации в пределах срединно-океанических и задуговых спрединговых зон. На новой основе выявлена неоднородность выборки колчеданных месторождений в базальтоидах, поэтому стало возможно подразделить их на типы кипрский и бесси, различающиеся по разрезу рудоносных формаций, геотектоническим обстановкам рудообразования, типам рудоконтролирующих вулканогенных структур, особенностям минерального состава их руд, содержанию и соотношению цветных и благородных металлов в них и по другим признакам [Еремин и др., 2000]. Поскольку главные особенности месторождений кипрского типа рассмотрены в многочисленных работах, в том числе в недавних публикациях авторов [Еремин и др., 2009], статья посвящена преимущественно характеристике месторождений типа бесси и обоснованию выделения их в качестве самостоятельной группы колчеданных месторождений вулканической ассоциации.

**Геологические особенности месторождений типа бесси.** Месторождения типа бесси, как и вообще колчеданные месторождения в недифференциро-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, доцент, докт. геол.-минер. н., e-mail: alderg@geol.msu.ru

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

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

ванных базальтоидных формациях, на континентах встречаются относительно редко. В составленной авторами базе данных о 1105 колчеданных месторождениях мира к этому типу отнесены лишь 68 неопротерозойско-фанерозойских месторождений, расположенных в Колумбии, Японии, Бразилии, Австралии, на северо-западе Испании, в Кордильерах, Антиатласе, Южных Аппалачах, поясе Дамара, в каледонидах Швеции и Норвегии, а также на Аляске, Филиппинах, Урале и Северном Кавказе. Еще 7 месторождений можно рассматривать в качестве мезо- и палеопротерозойских аналогов типа бесси (таблица). Таким образом, к нему можно отнести не более 7% включенных в базу данных колчеданных месторождений вулканической ассоциации.

Месторождения типа бесси, включенные в базу данных\*

Страна	Рудная провинция	Месторождения
Япония	Пояс Самбагава	Бесси, Сазаре, Ширатаке, Иимори, Оуки, Хитаки, Куне
	Зона Хидака	Шимокава
	Японская дуга	Янахара
	Шиманто	Макимине-Хибира
Канада	Кордильеры	Грандук, Голдстрим, Уинди-Крагги, Файр-Лейк, Дабл-Эд, Хайден-Крик, Редуинг, Бонанца, Харт-Ривер, Иден
	Лабрадорский трог	Суси № 1, Прудом № 1, Фредериксон-Лейк
Испания	Иберийская Кордильера	Форнас, Аринтейро, Бама, Мария-Луиза, Сан-Энрике
США	Аляска	Битсон, Дучесс, Мидас, Эллармар, Порт-Фидальго, Линс-Крик, Ориндж-Пойнт, Шеллабаргер-Пасс
	Аппалачи	Стоун-Хилл, Дактаун, Госан-Лед, Ор-Ноб, Дир-Айл, Дуглас, Ориндж-Гов
	Медный пояс Айдахо	Блэкберд, Рам-Саншайн, Блэк-Пайн, Айрон-Крик
Россия	Урал	Осеннее, Весеннее, Летнее, Зимнее
	Северный Кавказ	Худесское, Бескесское
Намибия	Пояс Дамара	Отжигасе, Матчлесс
Марокко	Антиатлас	Блейда
Швеция	Каледониды	Ремдален, Силарна
Бразилия		Бом-Жардин
Колумбия	Южный, Кордильеры	Гвадалупе, Санта-Анита
Австралия	Тасманская геосинклиналь	Буджери, Бужеригар, Гриттон, Гириламбоне, Маунт-Арабат, Хартман, Ларсен-Ист, Нортист
Норвегия	Каледониды	Москогаисса, Ростванген, Сабетьюк, Скайде
Филиппины	Филиппинская дуга	Гиксбар, Рапу-Рапу

\* Курсивом выделены протерозойские месторождения — аналоги фанерозойских месторождений типа бесси.

Важнейшее основание для выделения этих месторождений в отдельный тип и обособления его от кипрского типа — характер разреза рудоносных формаций. На этих месторождениях, в отличие от месторождений кипрского типа, отсутствует полный разрез, свойственный офиолитовым комплексам. Рудные тела залегают среди терригенных образований и переслаивающихся с ними подчиненных вулканитов основного (реже основного—среднего) состава. Среди терригенных образований преобладающим распространением пользуются графитсодержащие черные сланцы и аркозы, доля которых в разрезе рудоносных формаций варьирует в диапазоне 25–50%. Присутствие среди турбидитов осадочных пород, содержащих до 50–60% SiO<sub>2</sub>, указывает на близкое расположение континентальных массивов, окраинно-континентальных дуг или зрелых островных дуг, сложенных известково-щелочными породами и представляющих собой источники сноса терригенного материала.

Основные породы на месторождениях типа бесси иногда представлены подушечными лавами и туфами, но чаще приповерхностными силлами базальтов, диабазов и реже габбро. Слагающие их породы в петрохимическом отношении отвечают иногда «внутриплитным» базальтам, но значительно чаще — толеитовым базальтам срединно-океанических хребтов и особенно известково-щелочным породам [Fox, 1984]. Это дает основание предположить, что формирование месторождений чаще всего протекало над зонами субдукции, в обстановках задуговых бассейнов на зрелых стадиях их развития (большинство месторождений, в том числе крупнейшее для этого типа Уинди-Крагги), реже в срединно-океанических хребтах вблизи континентальной окраины, а в исключительных случаях в пределах внутриконтинентальных или окраинно-континентальных рифтов на ранних стадиях разделения континентов. Сульфидные образования на океанском дне, формирующиеся в сходных обстановках в трог Эсканаба хр. Южный Горда, в бассейне Гуаймас в Калифорнийском заливе и Срединной долине на севере хр. Хуан-де-Фука, можно рассматривать как современные аналоги месторождений типа бесси. Следует отметить, что геотектонические обстановки рудообразования этого типа разнообразнее, чем в случае месторождений кипрского типа.

Месторождения рассматриваемого типа (в отличие от большинства относимых к кипрскому типу) не образуют крупных кластеров и встречаются по одному или по 2–3 сближенных объекта. Исключение — лишь сам район Бесси [Ватанабе, 1973], однако в этом случае общее число рудных тел (около 100 в поясе Самбагава), по крайней мере отчасти, — следствие тектонического разлинзования крупных и первоначально единых рудных пластов, как это, очевидно, имело место на месторождении Макимине-Хибира в Японии.

Месторождения состоят из одного или немногих рудных тел пластовой, реже уплощенной линзовидной формы, имеющих большую площадь в плоскости напластования (до 4000×500÷800 м) при сравнительно небольшой мощности (до 3 м, а в исключительных случаях и при сравнительно небольших размерах в плане — до 10–30 м). Морфологически они резко отличаются от месторождений кипрского типа, состоящих из небольших и нередко многочисленных линзообразных или холмообразных рудных тел, и напоминают некоторые современные сульфидные образования впадины Гуаймас, по существу носящие характер маломощных сульфидных корок большой площади [Богданов, Сагалевиц, 2002]. Верхние контакты рудных залежей резкие, а зоны прожилково-вкрапленной минерализации в их лежащем боку, обычные для колчеданных месторождений всех прочих типов, как правило, имеют пластообразную морфологию и установлены лишь на самых крупных месторождениях (рис. 1).

Обширные зоны гидротермально-метасоматических изменений пород в виде воронкообразных зон окварцевания и хлоритизации стратиграфически ниже согласных рудных тел установлены лишь на крупнейших для этого типа месторождениях Уинди-Крагги и Худесском. На большинстве же месторождений развиты относительно маломощные стратифицированные зоны хлоритизации подрудных пород. Как и на месторождениях кипрского типа, с рудными телами связаны эксгалационнно-осадочные образования: яшмы, магнетит-гематит-кремнистые породы и пластовые залежи марганцевых руд, встречающиеся стратиграфически выше согласных рудных тел или замещающие их по латерали.

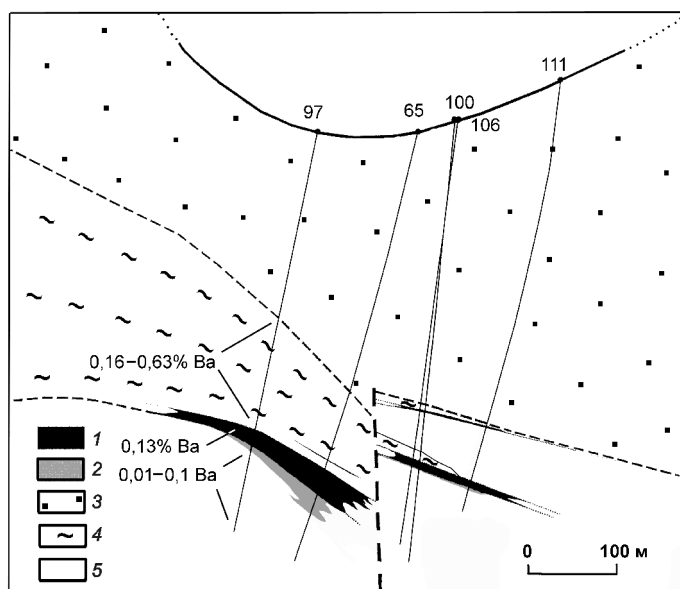


Рис. 1. Схематический геологический разрез месторождения Файр-Лейк, по [Sebert et al., 2004] с изменениями: 1 — сплошные руды; 2 — прожилково-вкрапленные руды; 3 — углистые алевролиты (~580 м); 4 — переслаивающиеся алевролиты, аргиллиты, туфы базальтов (6–200 м); 5 — лавы и туфы базальтов с прослоями вулканогенно-осадочных пород

На некоторых месторождениях типа бесси положение рудных тел контролируется конседиментационными впадинами, которые ограничивались разломами, влияли на распределение мощности осадочных пород, но практически не отразились на смене их фаций, и значит были слабо выражены в рельефе в момент рудообразования. В целом же структурный контроль рудных тел на месторождениях типа бесси, как правило, проявлен нечетко. Это отличает их от месторождений кипрского типа, рудные тела которых нередко расположены в виде цепочек в непосредственной близости от синвулканических разломов и стенок конседиментационных грабенных или полуграбенных, резко выраженных в палеовулканическом рельефе.

Многие из перечисленных геологических особенностей месторождений типа бесси обусловлены высокой долей, а нередко и преобладанием в рудовмещающем разрезе осадочных образований, а в конечном счете — близким положением крупных массивов суши (континенты, островные дуги) и специфическими геодинамическими обстановками рудообразования. Из-за высокой скорости накопления и большой мощности неуплотненных, насыщенных водой осадков (турбидиты) базальтовые расплавы при вулканических извержениях начинали тонуть раньше, чем достигали поверхности дна моря. Это определило преобладание субвулканической формы проявления базальтового вулканизма (субвулканические силлы, лакколиты и дайки сложной формы).

Ниже поверхности раздела базальт—осадок путями фильтрации гидротермальных растворов при формировании месторождений типа бесси, видимо, служили крутопадающие синвулканические разломные и трещинные структуры, как это имело место и на месторождениях кипрского типа. Однако наличие мощного покрова относительно проницаемых неуплотненных осадков при дальнейшей фильтрации флюидов к поверхности приводило к рассредоточению разгрузки рудоносных гидротермальных растворов на большой площади. При этом вместо свойственных месторождениям кипрского типа скоплений многочисленных, но локальных холмообразных или линзовидных сульфидных построек, характеризовавшихся высоким градиентом мощности в вертикальном разрезе, формировались рудные залежи, обширные в плоскости напластования и отличавшиеся выдержанной на большом расстоянии, но относительно малой мощностью.

Та же причина в сочетании с наличием на некоторой глубине ниже поверхности дна пластов более крупнозернистых высокопроницаемых осадков вызывала распространение рудоносных флюидов в латеральном направлении вдоль таких пластов и как следствие — формирование субсогласных зон гидротермально-метасоматических изменений пород и прожилково-вкрапленной минерализации. Резко секущие жильно-штокверковые зоны, распростра-

нявшиеся на глубину до нескольких сотен метров в породы лежачего бока, и особенно слепые зоны, широко развитые в районах распространения месторождений кипрского типа, при этом не возникали, так как в неуплотненных осадках не мог формироваться устойчивый трещинный каркас, а рудоподводящие каналы быстро закрывались при снижении давления флюидов. Прожилки сантиметровой мощности, встречающиеся на некоторых месторождениях стратиграфически ниже согласных рудных тел, как правило, имеют неправильную извилистую форму, что свидетельствует о формировании их в неконсолидированных осадках.

#### Минералого-геохимические особенности руд.

К рудным минералам, наиболее распространенным на месторождениях типа бесси, относятся пирит, пирротин, халькопирит и сфалерит; кроме них в различном количестве могут встречаться магнетит, валлериит, галенит, борнит, As-блеклая руда, кобальтин, кубанит, станнин, молибденит, халькозин, марказит, мушкетовит, гессит, самородное золото, электрум, германит, энаргит, арсенопирит, теллуриды висмута. Нерудные минералы представлены кварцем, карбонатом (сидерит, кальцит, анкерит), хлоритом, альбитом, мусковитом, турмалином, эпидотом, амфиболом, графитом.

По составу руды месторождений типа бесси медно-цинковые с довольно низким средним содержанием металлов при значительном преобладании Cu над Zn, крайне низким содержанием Pb, повышенными значениями концентрации Co, Ni, As, Mn, Sn, Cd, сравнительно низким содержанием Au и Ag и значениями отношения Au/Ag. На месторождениях этого типа рудная зональность, как правило, проявлена весьма слабо.

Тип бесси отличается самым низким среди всех типов колчеданных месторождений содержанием металлов, составляющим в среднем 1,4% Cu и 0,5% Zn. Содержание Cu и Zn превышает 2,0% соответственно на 41% и 16% месторождений этого типа. Из 68 месторождений, в рудах которых присутствуют в промышленных количествах Cu и Zn, последний преобладает лишь на 12 (18%). В целом же этот тип характеризуется очень высоким отношением Cu/(Cu+Zn) и, следовательно, резким преобладанием Cu над Zn. Почти для 52% месторождений этого типа, вносящих около 54% в запасы руд месторождений этого типа, величина этого отношения колеблется от 0,9 до 1,0. В суммарных запасах на всех месторождениях этой группы содержание Cu к Zn относится как 2,8:1.

Значительное содержание Au (0,1–10,6 г/т) установлено лишь на 44 месторождениях (62%), однако лишь на 14 из них (32%) оно превышает 1 г/т, а в среднем составляет 0,48 г/т. На 44 месторождениях (62%) руды содержат также значительное количество Ag, содержание которого в подавляющем большинстве случаев очень низкое и колеблется от 1 до 105 г/т, а в среднем в запасах месторождений этого

типа составляет 11,8 г/т. Из-за этого низкие значения принимает отношение Au/Ag, которое для 44 месторождений изменяется от 0 до 0,417, а в среднем в запасах месторождений типа бесси составляет 0,04.

В рудах некоторых месторождений фиксируется высокое содержание Co, однако подсчитанные средние значения есть лишь для 5 из них (от 0,016; 0,05 и 0,069% до 0,7 и 0,8% на месторождениях Отжигасе, Суси № 1, Уинди-Крагги, Блэкберд и Файр-Лейк соответственно) [Barret et al., 1988; Peter, 1989; Peter et al., 2007; Bending, Scales, 2001; Sebert et al., 2004]. Главные минералы-носители Co — пирротин, пирит, арсенопирит, халькопирит, но встречаются и его собственные минералы (кобальтин). Содержание Co в пирите, например, на месторождении Бесси изменяется от 0,0015 до 0,015% при отношении Co/Ni от 1:1 до 1:30. Обычно также обогащение руд Mn (например, 0,25% на месторождении Суси № 1).

Необычно для месторождений в базальтоидных формациях обогащение руд некоторых месторождений типа бесси свинцом, более сильное, чем на любых месторождениях кипрского типа (рис. 2). Сведения о подсчитанных значениях содержания Pb имеются лишь для 14 месторождений, они не превышают 1,2%, но в исключительных случаях (месторождение Харт-Ривер) Pb может вносить до 15% в суммарное содержание металлов (Cu+Zn+Pb). Систематические данные о содержании Ba в рудах всех месторождений в базальтоидных формациях собрать не представляется возможным. Однако имеющаяся информация позволяет судить о том, что в отличие от месторождений типов уральского и особенно куроко оно, как правило, очень низкое. Так, на классическом месторождении кипрского типа Агрокипия его содержание не превышает  $367 \text{ млн}^{-1}$ , на относящемся к типу бесси месторождении Файр-Лейк —  $130 \text{ млн}^{-1}$  [Sebert et al., 2004], в то время как современный аналог месторождений этого типа — сульфидная минерализация

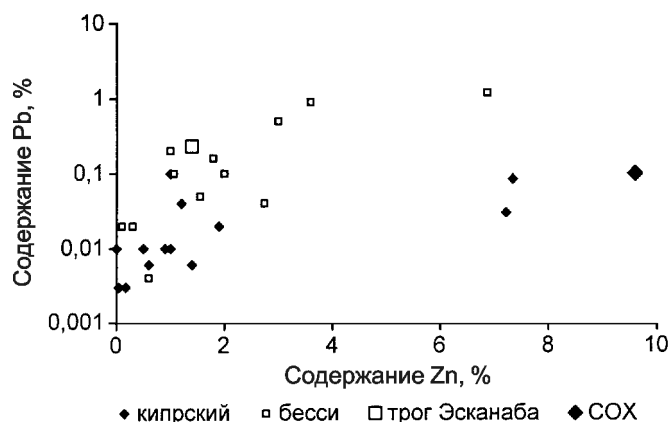


Рис. 2. Соотношение месторождений типов кипрского и бесси и их современных аналогов по содержанию Pb и Zn. Данные о срединно-океанических хребтах (COX) без значительного осадочного покрова и трог Эсканаба по [Hannington et al., 1991; Goodfellow, Zierenberg, 1999; Koski et al., 1988; Koski et al., 1994; Zierenberg et al., 1993; Goodfellow, Zierenberg, 1999]

во впадине Гуаймас содержит до  $14\ 334\ \text{млн}^{-1}$  Ва. Причина подобных различий, возможно, заключается в пространственном разобщении сульфидных руд и баритовой минерализации, более значительном на многих месторождениях типа бесси, чем на месторождениях других типов. Если на колчеданных месторождениях типов куроко и уральского барием обогащены руды в стратиграфически верхних частях согласных рудных тел, то на некоторых месторождениях типа бесси аномально высокое содержание этого элемента установлено в составе осадочных образований непосредственно над рудными залежами (до  $6335\ \text{млн}^{-1}$  на месторождении Файр-Лейк).

Таким образом, по многим минералогическим и геохимическим особенностям руды месторождений типов бесси и кипрского весьма близки. Наиболее существенно они отличаются по значительно более низкому среднему содержанию Cu (в 1,4 раза) и Zn (в 1,5 раза), а также Ag (в 2,4 раза) и Au (в 2,8 раза) в рудах месторождений типа бесси (рис. 3), а также по некоторому обогащению Ag относительно Au, Cu и Pb относительно Zn, а в ряде случаев по наличию интенсивных ореолов Ва в составе надрудных осадков.

Примечательно, что и сульфидные образования трога Эсканаба и впадины Гуаймас также отличаются от большинства современных сульфидных скоплений в срединно-океанических хребтах пониженными значениями содержания Cu, Zn, Au, Ag и более высокими — Pb и Ва [Богданов, Сагалевич, 2002]. Таким образом, между древними месторождениями типов бесси и кипрского существуют такие же соотношения по геохимическим признакам, как и между их современными аналогами — сульфидными образованиями трога Эсканаба, впадины Гуаймас и сульфидными постройками в большинстве отрезков мирового срединно-океанического хребта, лишенных мощного осадочного покрова.

Нет оснований считать, что при образовании месторождений типа бесси рудообразующие гидротермальные растворы уже на их выходе к границе базальт—осадок по составу отличались от растворов,

ответственных за формирование месторождений кипрского типа. Различия между месторождениями этих двух типов по геохимическим особенностям руд, видимо, связаны с модификацией состава рудоносных флюидов при их фильтрации через мощные осадочные толщи. При этом они, несомненно, взаимодействовали с биогенными и терригенными компонентами осадков — продуктами размыва коры континентального типа или известково-щелочных вулканитов островных дуг, обогащенных K, Rb, U, Th, Ba, Pb, Sr и другими элементами. При миграции флюидов через осадочный чехол, вероятно, имело место частичное осаждение металлов на границе базальт—осадок, т.е. обеднение растворов Cu, Zn, Ag, Au, а также обогащение их рядом элементов, практически отсутствующих в рудах месторождений кипрского типа (Ba, Pb). Следует отметить, что на древних месторождениях обогащение руд металлами, возможно, заимствованными из осадочных пород, не выходило за пределы уровня содержания, отвечающего элементам-примесям. Это позволяет предположить, что не они, а магматический очаг (непосредственно или через выщелачивание металлов из базальтов океанической коры) служил основным источником рудного вещества.

По аналогии с современными сульфидными образованиями можно было бы ожидать, что и руды месторождений типов бесси и кипрского будут различаться по изотопному составу Sr и Pb в сульфидах. Однако необходимые для такого заключения геохимические данные практически отсутствуют в литературе о древних месторождениях типа бесси.

**Масштабы запасов руды и металлов.** Тип бесси отличается от кипрского сравнительно большими запасами руды на месторождениях, которые изменяются от 5 тыс. т до 297 млн т и составляют в среднем 13,8 млн т. Крупнейшие месторождения этого типа (млн т) Уинди-Крагги (Британская Колумбия, 297), Дактаун (Аппалачи, 180), Хайден-Крик (45,9), Бесси (Япония, 33) и Худесское (Северный Кавказ, 31). Эти 5 месторождений вносят почти 61% в суммарные запасы руды, что означает намного более высокую степень концентрации запасов по сравнению с кипрским типом.

Из-за свойственного месторождениям типа бесси сравнительно низкого среднего содержания металлов в рудах лишь месторождения Уинди-Крагги и Дактаун по запасам меди можно отнести к крупным (свыше 1 млн т). Вместе с тем медианные запасы руды составляют примерно 2,5 млн т (50% месторождений имеют меньшие запасы), а на 69% месторождений они превышают 1 млн т. Средние и медианные запасы руды и металлов на месторождениях типа бесси в 2,7–3,5 раза превышают соответствующие показатели для месторождений кипрского типа. Таким образом, при поисках колчеданных месторождений, связанных с базальтоидными формациями, в качестве приоритетных объектов следует рассматривать месторожде-

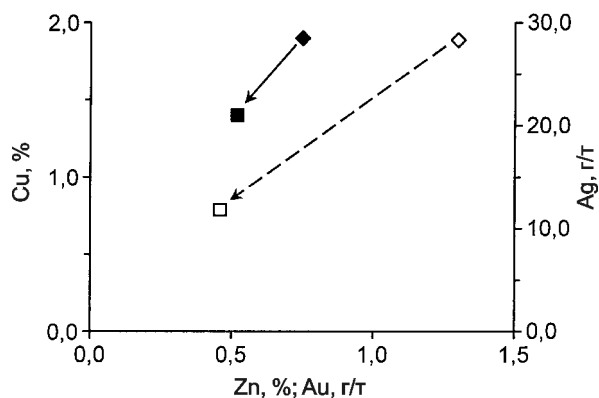


Рис. 3. Соотношение типов кипрского (ромбики) и бесси (квадратики) по средним значениям содержания Zn и Cu (сплошная стрелка), Ag и Au (штриховая стрелка)

ния типа бесси в пределах территорий, где в составе формации доля осадочных образований достигает 25–50% и более.

Наиболее вероятная причина, обусловившая образование крупных запасов, а значит, увеличение эффективности гидротермальных систем, — наличие рыхлых отложений, перекрывавших базальтовый фундамент. Осадочный чехол препятствовал проникновению холодных морских вод на глубину и смешению их с гидротермальными растворами уже на путях переноса рудного вещества, т.е. способствовал его концентрации. Благодаря этому большая часть гидротермально-осадочного материала задерживалась вблизи источника, а горизонты относительно проницаемых более крупнозернистых осадков могли служить субстратом, в котором на некоторой глубине ниже поверхности отлагались сульфиды. Кроме того, присутствие большого количества органического вещества в составе осадочных пород обеспечивало восстановительную обстановку и предотвращало быстрое окисление сульфидов.

**Месторождения типа бесси в геологической истории.** По времени образования месторождения типа бесси распределяются весьма неравномерно (рис. 4). Древнейшие из них — небольшие палеопротерозойские месторождения Суси № 1, Прудом № 1, Фредериксон-Лейк с возрастом 2000–1870 млн лет в Лабрадорском тропе. Они формировались в пределах узкого рифтогенного прогиба, который заложился на испытывавшей сильное растяжение и утоненной континентальной коре кратона Сьюперииор около 2,1 млрд лет назад [Dimroth, 1972, 1981; Wardle, Ryan, 1990]. Прогиб был выполнен мощными толщами турбидитов, железистых отложений различных фаций и лавами толеитовых базальтов, прорванными многочисленными субвулканическими силлами. Проявления толеитового вулканизма некоторые исследователи рассматривают как признак начинающегося спрединга морского дна [Varret et al., 1988]. Таким образом, формирование древнейших аналогов палеозойских месторождений типа бесси отвечает рифтогенезу и началу распада Пангеи-0.

Более молодые (мезопротерозойские) месторождения — аналоги этого типа известны в про-

гибе Белт-Пурсел на северо-западе США. Прогиб заложился при деструкции Пангеи-1 и относится к числу древнейших в системе взаимосвязанных мезопротерозойских рифтов, образовавшихся при раскрытии Гренвилльского океана [Gower, Tucker, 1994]. Рифт был выполнен преимущественно турбидитовыми отложениями, на фоне накопления которых в период 1485–1320 млн л.н. происходили спорадические вспышки толеитового и щелочного базальтового вулканизма. В осадочном выполнении этого интраконтинентального рифта в связи с инициальным базальтовым магматизмом, представленным многочисленными силлами, встречаются небольшие по запасам колчеданные месторождения медно-кобальтового пояса Айдахо (Блэкберд, Блэк-Пайн, Айрон-Крик, Рам-Саншайн, Сальмон-Каньон и ряд более мелких с возрастом 1440 млн лет) [Nold, 1990]. К числу древнейших относится также месторождение Харт-Ривер (Юкон) с возрастом около 1200 млн лет, сформировавшееся, по-видимому, в обстановке задугового прогиба при сборе Родинии.

Активность процессов рудообразования типа бесси возросла в неопротерозое около 900–750 млн л.н., когда в период распада Родинии в окраинно-континентальных, интраконтинентальных рифтах, неудавшихся рифтах образовалось 23% запасов руды и 11% месторождений типа бесси, в том числе Бом-Жардин в Бразилии (862 млн лет), а также Блейда в Антиатласе, месторождения Отжигасе и Матчлесс в поясе Дамара и наиболее древние из месторождений Аппалач, в том числе и крупнейшие из них (Дактаун, Госсан-Лед), сформировавшиеся около 760 млн л.н.

Однако по-настоящему широкое распространение месторождения типа бесси получили в фанерозое (после 550 млн л.н.), когда возникло около 76% таких месторождений и 75% соответствующих запасов руды. В кембрии—ордовике формировались лишь относительно мелкие месторождения этого типа, которые приурочены к задуговым спрединговым зонам, связанным с развитием спрединговым океана Япетус. Колчеданообразование типа бесси продолжилось при сборе Пангеи, когда в силуре и девоне на Северном Кавказе, Урале, в Аппалачах, на северо-западе Испании и Юконе сформировалось 13 месторождений (почти 17% от их общего числа), объединяющих около 13% запасов руды. Однако крупнейшая эпоха рудообразования этого типа пришлась на пермский, триасовый и начало юрского периода (270–170 млн л.н.) и отвечала началу раскола палеозойского суперконтинента и развитию задуговых спрединговых зон (месторождения рудных районов Аляски, Японии и Британской Колумбии с общими запасами более 45% от суммарных для этого типа). Столь большой удельный вес в запасах

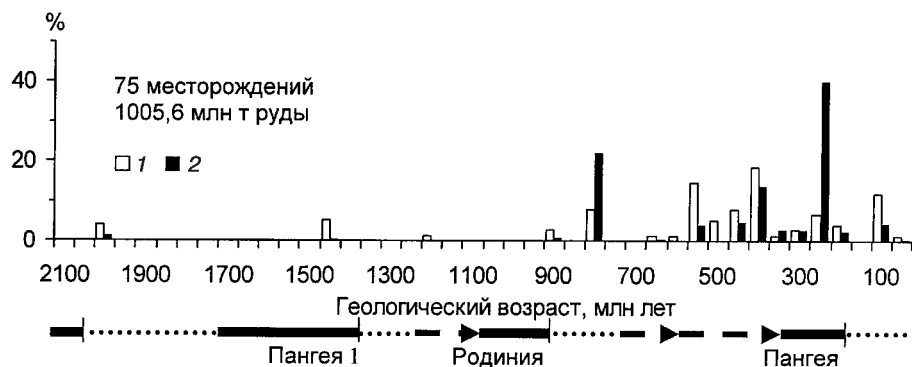


Рис. 4. Распределение месторождений типа бесси (1) и запасов руды в них (2) в геологическом времени

лишь отчасти объясняется формированием именно в этот период крупнейшего для этого типа месторождения Уинди-Краги. Довольно многочисленные (свыше 13% месторождений), хотя и небольшие по запасам месторождения типа бесси сформировались в мелу и первой половине палеогена в Колумбии и на Аляске.

Распределение месторождений типа бесси в геологическом времени сильно отличает их от месторождений кипрского типа. Месторождения обоих типов формировались в пределах задуговых и в меньшей степени срединно-океанических спрединговых зон на конструктивной стадии суперконтинентального цикла палеозойской Пангеи, однако и начало колчеданообразования типа бесси в палео- и затем в мезопротерозое, и его главные максимумы в неопротерозое и раннем мезозое связаны с рифтогенезом в их пределах суперконтинентальных массивов и предвзвешивали их окончательный распад.

Хотя месторождения — аналоги типа бесси, образовавшиеся в течение 1 млрд лет в палео- и мезопротерозое, исчисляются единицами, важно отметить их очевидное сходство с типичными палеозойскими и более молодыми месторождениями, классическими для этого типа по геодинамической обстановке рудообразования (энсиалические рифтогенные прогибы), морфологии рудных тел (пласты, уплощенные линзы), некоторым геохимическим и минералогическим особенностям руд (обогащение  $\text{Co}$ , величины медно-цинкового и золото-серебряного соотношений), характеру околорудных гидротермально-метасоматических изменений и другим важнейшим признакам.

В то же время облик месторождений эволюционировал во времени. Так, на палеопротерозойских месторождениях (в частности, Суши № 1) среди ру-

довмещающих образований не встречаются углистые породы, которые получили широкое распространение уже в мезопротерозое (месторождение Харт-Ривер с возрастом около 1200 млн лет). Отсутствуют также такие хемогенные образования, как яшмы, охры и умбры, которые рассматриваются как результат взаимодействия гидротермальных растворов с кислородсодержащими морскими водами и часто встречаются на фанерозойских месторождениях. В то же время древнейшим месторождениям свойственна проявленная в региональном масштабе ассоциация с железистыми кварцитами силикатных и сульфидных фаций. Стратиграфически выше и на флангах рудных тел, бедных цветными металлами, широко распространены тонкослоистые пирит-пирротиновые руды, облик которых напоминает кварц-гетитовые отложения (охры), широко распространенные стратиграфически выше рудных тел на фанерозойских месторождениях в базальтоидных формациях [Barret et al., 1988]. Перечисленные особенности месторождений с возрастом около 2000 млн лет, вероятно, в значительной степени являются следствием низкого уровня оксигенизации гидросферы, свойственного середине палеопротерозоя.

**Заключение.** Таким образом, анализ выборки вулканогенных колчеданных месторождений в недифференцированных базальтоидных формациях позволил выявить ее неоднородность и обосновать отнесение части месторождений к самостоятельному типу бесси на основе комплекса геологических, формационных, геодинамических, минералогических, геохимических и историко-геологических признаков. Облик месторождений этого типа постепенно эволюционировал, отражая состояние геосфер Земли на момент рудообразования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». М.: Научный мир, 2002.

Ватанабе Т. Вулканизм и рудообразование // Вулканизм и рудообразование. М.: Мир, 1973. С. 9–16.

Еремин Н.И. Типизация фанерозойских колчеданных месторождений // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240, № 5. С. 1176–1179.

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

Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Нат.Е., Позднякова Н.В. Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42, № 2. С. 177–190.

Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е. Вулканогенные колчеданные месторождения в офиолитовых комплексах // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Екатеринбург: УО РАН, 2009. С. 169–173.

Barret T.J., Wares R.P., Fox J.S. Two-stage hydrothermal formation of a Lower Proterozoic sediment-hosted massive sulfide deposit, Northern Labrador Trough, Quebec // Canad. Mineral. 1988. Vol. 26. P. 871–888.

Bending J.S., Scales W.G. New production in the Idaho Cobalt Belt: a unique metallogenic province // Appl. Earth Sci. 2001. Vol. 110. P. 81–87.

Fox J.S. Besshi-type volcanogenic sulfide deposits — a review // CIMM Bull. 1984. Vol. 77, N 864. P. 57–68.

Goodfellow W.D., Zierenberg R.A. Genesis of massive sulfide deposits of sediment-covered spreading centers // Rev. in Economic Geol. 1999. Vol. 8. P. 297–324.

Hannington M.D., Herzig P.M., Thompson G., Rona P.A. Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on mid-ocean ridges // Mar. Geol. 1991. Vol. 101. P. 217–248.

Koski R.A., Benniger L.M., Zierenberg R.A., Jonasson I.R. Composition and growth history of hydrothermal deposits in Escanaba Trough, southern Gorda Ridge // Geologic, hydrothermal, and biologic studies at Escanaba Trough, Gorda Ridge, offshore Northern California // US Geol. Surv. Bull. 1994. Vol. 2022. P. 293–324.

Koski R.A., Shanks W.C., Bahrson W.A., Oscarson R.L. The composition of massive sulfide deposits from the sediment-covered floor of Escanaba Trough, Gorda Ridge: Implications for depositional processes // Canad. Mineral. 1988. Vol. 26. P. 655–674.

*Peter J.M.* The Windy Craggy copper-cobalt-sulfide deposit, northwestern British Columbia // British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. Geological Fieldwork, 1989. Pap. 1989-1. P. 455–466.

*Peter J.M., Layton-Matthews D., Piercey S.* et al. Volcanic-hosted massive sulfide deposits of the Finlayson Lake district, Yukon // Mineral Deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. 2007. Spec. Publ. N 5. P. 471–508.

*Sebert C., Hunt J.A., Foreman I.J.* Geology and lithochemistry of the Fyre Lake copper-cobalt-gold sulfide-magnetite deposit, southeastern Yukon // Yukon Geol. Surv. 2004. Open File 2004-17.

*Wardle R.J., Ryan B.* The eastern Churchill province, Torn-gat and New Quebec orogens: An overview // Geosci. Canada. 1990. Vol. 17. P. 217–222.

*Zierenberg R.A., Koski R.A., Morton J.L., Bouse R.M.* Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge // Econ. Geol. 1993. Vol. 88. P. 2069–2098.

Поступила в редакцию  
28.12.2010