

УДК 551.242+550.42

**СУЛЬФИДНЫЕ ЗАЛЕЖИ НА МОРСКОМ ДНЕ**

© 2003 г. В. И. Старостин, Д. Р. Сакия, Г. А. Пельмский

Представлено академиком А.А. Маракушевым 14.03.2003 г.

Поступило 17.03. 2003 г.

В настоящее время на дне океанов, в основном Атлантического и Тихого, открыто более ста активных гидротермальных полей, в пределах которых формируются разномасштабные сульфидные залежи. Такие зоны обычно окружены зонами металлоносных осадков, формирующихся, как правило, у подножий гидротермальных построек в результате их разрушения и перемещения обломков массивных сульфидных руд и продуктов их изменения вниз по склону. Металлоносными считаются осадки с содержаниями Fe в абиогенной части в пределах 10–30%. Осадки с содержаниями свыше 30% уже относятся к рудоносным (или рудным) образованиям [1]. Гидротермальные рудные образования на морском дне включают в себя железо-марганцевые конкреции и корки, минерализованные (металлоносные и рудные) осадки и массивные сульфиды. Настоящая работа посвящена в первую очередь анализу материалов по сульфидным залежам на морском дне (табл. 1).

Анализ имеющихся материалов по около 140 объектам [2–6, 9, 11] показывает, что современные субмаринные сульфидные залежи формируются в четырех типах структур (в порядке убывания значимости): срединно-океанические хребты (72%), области задугового спрединга (20%), зоны островодужного вулканизма (7%) и зоны внутриплитного вулканизма (1%). Среди рудных объектов, приуроченных к рифтовым зонам, около 57% залежей встречаются в умеренно спрединговых зонах (скорость спрединга 4–6 см/год), около 33% залежей – в зонах с низкой скоростью (до 4 см/год), а остальные 10% залежей – в зонах с высокой скоростью (более 6 см/год). Подавляющее большинство субмаринных сульфидных залежей (93%) ассоциирует с вулканитами, и только небольшая часть (4%) заключена в осадочном разрезе.

В гидротермальных системах рифтовых зон в океаническую кору и гидросферу выносятся гигантские массы эндогенного вещества, в том чис-

ле халькофильных элементов и кремнезема, что способствует формированию полиметаллических сульфидных залежей на морском дне. В дальнейшем сульфидные залежи постепенно окисляются и разрушаются, а их рудное вещество переходит в осадки. Максимальные концентрации рудного материала приурочены к зонам тройственного сочленения срединно-океанических хребтов. Причем объем материала, поступающего на дно океана, в десятки раз превосходит объем продуктов вулканической деятельности на суше. Однако только 5% гидротермального материала аккумулируется вблизи подводных источников и формирует массивные залежи [7, 8]. Остальные 95% материала рассеивается в виде металлоносных осадков в придонных отложениях или водах и вовлекается в общий круговорот веществ в океане. Поэтому массивные сульфидные залежи имеют существенно меньшие размеры по сравнению с зонами металлоносных осадков.

Наибольшее количество гидротермальных полей с сульфидными залежами выявлено в пределах Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП), а наиболее крупные гидротермальные залежи находятся в Красном море (впадина Атлантис II) и Тихом океане (Галапагосский спрединговый центр, район 13° с.ш. ВТП и хр. Хуан-де-Фука).

Впадина Атлантис II представляет собой типичную депрессию рифтовой зоны, протягивающуюся вдоль простирания оси спрединга [9]. Размеры ее достигают 14 × 5 км, а глубина до 2170 м. На дне депрессии отмечаются три возвышенности, вытянутые по простиранию оси спрединга. Базальтовый фундамент покрыт миоценовыми и четвертичными отложениями. Мощность осадочного покрова не превышает 30–50 м. Выделяются два рудоносных слоя с локальными высокими концентрациями Zn (до 20%) и Cu (2–3%). Медно-цинковоколчеданная минерализация заключена в основном в нижнем слое стратифицированных по температуре и солёности рассолов взвешенных сульфидных частиц (сфалерита, марказита, халькопирита и пирита). Запасы сульфидных руд в этой впадине оцениваются в 32,5 млн. т, что сопоставимо с запасами руд в древних колче-

**Таблица 1.** Содержания основных полезных компонентов в субмаринных сульфидных залежах (по данным [1–6, 12–14])

№ п.п.	Регион, гидротермальное поле	Cu	Zn	Pb	Ag	Au	As	Другие
1	Впадина Атлантис II	0.2–0.8	0.9–6.0	до 0.1	5–250	<1	4–600	Co, Ni, Cd
2	Гидротермальное поле ТАГ	0.1–68.3	0.01–21.6	0.01–1.3	3–225	до 16	до 272	Co, Ni, Cd, Hg, Pt, Pd, Se, Ir
3	Снейк-Пит	0.3–24.9	0.1–18.5	–	5–268	до 6	87–870	Co, Ni, Cd
4	Рейнбоу	0.01–35.0	0.13–63.7	0.02–0.27				Co, Ni
5	Срединная долина	0.65–3.05	0.43–13.2	0.01–0.15	до 18	<0.1		Co, Cd
6	Впадина Гуаймас	0.05–0.44	0.05–3.8	0.05–2.31	0.5–205	до 0.3	24–110	Cd
7	ВТП 21° с.ш.	0.6–0.8	32–41	0.05–0.32	до 156	0.17	до 489	Co, Ni, Cd
8	ВТП 13° с.ш.	0.3–31.6	0.3–41.7	до 0.24	186		до 1253	Co, Ni, Cd
9	Галапагосский спрединговый центр	0.05–2.7	0.05–1.8	до 0.13	до 290	до 0.13	до 411	Ni
10	Трог Окинава	0.1–5.4	4.4–33.6	1.6–12.0	0.01–1.1	2.3–8.6	0.02–2.4	Co, Ni, Cd

Примечание. Cu, Zn, Pb – %, Ag, Au, As – г/т.

данных месторождениях в офиолитах. Средние содержания основных металлов в осадках этой впадины следующие (здесь и далее Cu, Zn, Pb, Co и Ni даны в процентах, остальные – в г/т): Cu 0.28–0.8; Zn 0.9–6.0; Pb до 0.1; Ag (5–250). Кроме того, в них отмечаются As и незначительные концентрации Au, Cd, Co, Ni.

В рифтовой зоне САХ, характеризующейся низкой скоростью спрединга (до 4 см/год), обнаружено около 20 гидротермальных полей с сульфидными залежами Кипрского типа на отрезке между 11° и 40° с.ш. Среди них особо выделяются Лакки-Страйк, Рейнбоу, Брокен-Спур, ТАГ, Снейк-Пит и Логачев.

Наиболее детально изучено открытое в 1985 г. гидротермальное поле Трансатлантического геотраверса (ТАГ). Здесь отмечаются три центра гидротермальной деятельности с сульфидной минерализацией. Они приурочены к вулканическим структурам, локализованным на пересечении продольных и поперечных разломов к востоку от рифтовой долины САХ. Они находятся в глубинном интервале 3400–3650 м и занимают поле размером порядка 10 × 5 км. Современная (активная) сульфидная постройка ТАГ расположена в южном секторе на расстоянии около 5 км от оси ТАГ в глубинном интервале 3635–3650 м. Неактивные зоны Мир и Алвин с многочисленными мелкими сульфидными постройками находятся соответственно к востоку и северу от постройки ТАГ [2, 7].

Постройка ТАГ представляет собой зрелую вулканическую структуру, образовавшуюся в результате продолжительной гидротермальной деятельности в низкосрединной зоне (около 3 см/год). Постройка имеет крутые склоны и округлую в плане форму с диаметром порядка 200 м

и высотой до 35 м. Гидротермальная деятельность здесь сосредоточена в двух участках: Центральном участке черных курильщиков и Кремлевский участок белых курильщиков. В Центральном участке, состоящем из конусообразных построек высотой до 20 м и диаметром до 50 м, отмечается группа активных трубок высотой до 15 м. Склоны построек покрыты сульфидами меди и железа и ангидритом. Встречаются также фрагменты измененного базальта. В Кремлевском участке флюидные потоки имеют меньшую температуру (~285°C) и скорость поступления (менее 1 м/с). Высота отдельных трубок также существенно меньше (до 1–2 м). Здесь помимо сульфидов железа и цинка присутствует заметное количество кремнезема. Пологий участок между черными и белыми курильщиками покрыт сульфидным материалом, обломками трубок и корой оксида железа.

Гидротермальная постройка ТАГ сопоставима по размерам и минералогии с сульфидными залежами в Кипре, Омани и других офиолитовых районах. Общая масса гидротермального рудного материала здесь оценивается в 3.9 млн. т. Из них 2.7 млн. т находится в сульфидной постройке, а 1.2 млн. т – в подстилающей штокверковой зоне. Сульфидные руды сложены пиритом, марказитом, халькопиритом и сфалеритом. Содержания основных и благородных металлов сильно варьируют. В связи с этим данные по этому вопросу довольно противоречивы в разных публикациях. В общем эти руды содержат следующие элементы: Cu 0.1–68.3, Zn 0.1–21.6, Pb 0.1–1.3, Ag 3–225, Au до 16, As до 272. Присутствуют также Pt, Pd, Hg, Se, Co, Ni и Cd. Заметная концентрация благородных металлов (Ag, Au, Pt, Pd) и некоторых сопутствующих элементов (Hg, Ir, Co, Se) является

характерной чертой постройки ТАГ. Пирит здесь может содержать до 0.68% Со и примеси Ir, халькопирит – до 0.28% Se и примеси Ir, сфалерит – до 3500 г/т Ag и до 1 г/т Pd. Основными носителями благородных и ассоциирующих металлов являются пирит (Au, Ag, Co, Hg), марказит (Ag, Co), халькопирит (Pt, Pd, Se) и сфалерит (Pt, Pd).

Открытое в 1994 г. российскими исследователями гидротермальное поле Логачева находится на восточном краевом уступе рифтовой долины САХ в зоне развития серпентинизированных ультраосновных пород, погрбенных под карбонатными осадками [2]. Главная неактивная сульфидная постройка, залегающая на глубине 2910–3010 м, имеет уплощенную линзовидную форму длиной 200 м и мощностью до 20 м. Возраст ее около 60 тыс. лет. Здесь содержится почти 0.8 млн. т сульфидного материала. Более молодая и активная постройка (Ирина-2) состоит из трубообразных курильщиков. Возраст этих образований оценивается в 3–17 тыс. лет. В рудах присутствуют халькопирит, сфалерит, пирит, марказит, изокубанит, борнит, пирротин, Со-пентландит и дигенит.

Находящееся в северном краю гидротермальное поле Рейнбоу было открыто в 1997 г. на глубине 2270–2320 м. Оно расположено на ультрабазитах на гребне САХ и представляет собой поле черных курильщиков, развитых на площади около 250 × 75 м [9]. Выявлено 10 активных и множество реликтовых гидротермальных построек. Активные постройки высотой до 20–30 см имеют существенно халькопиритовый состав и отчетливое зональное строение. Внешняя зона сложена сфалеритом в слабо развитых трубах и борнитом, ковеллином, сфалеритом, халькозином, халькопиритом и пиритом в хорошо развитых трубах с центральным каналом. Внутренняя же зона состоит из изокубанита и халькопирита с переменными содержаниями сфалерита, пирита и троилита. Содержания основных металлов в рудах следующие: Cu 0.01–35.0, Zn 0.13–63.7, Pb 0.02–0.07. Характерной чертой руд сульфидного поля Рейнбоу является аномальная концентрация Со и Ni, а также присутствие мелких обособлений магнетита и гётита.

Гидротермальное поле Снейк-Пит расположено в районе МАРК (пересечение Средне-Атлантического хребта и Канского разлома). Оно было открыто почти одновременно с полем ТАГ при бурении глубоководной скважины 649 и находится на вершине субмеридионального неовулканического хребта. Здесь выделяются три субширотные вулканические постройки, характеризующиеся зональным строением. Активная вершинная зона с трубками сложена сфалеритом, пирротином и изокубанитом. Внешняя зона состоит из пирита и марказита [12]. Ядро

залежи сложено халькопиритом и пиритом. Таким образом, в центральной и вершинной зонах руды имеют в основном медно-цинковоколчеданный состав (Cu 0.03–24.9, Zn 0.1–18.5), а по периферии – существенно серноколчеданный состав. Характерной чертой руд этого поля является повсеместное присутствие Ag (5–268) и Au (до 6), хотя их содержания сильно варьируют в разных зонах. Здесь исследователями отмечается самородное золото в ассоциации с вторичным дигенитом в измененных трубках.

В Тихоокеанском регионе выявлено около 70 гидротермальных полей с сульфидной минерализацией кипрского и других типов [1, 2, 6, 7, 10, 11, 13]. На северном участке Тихоокеанского региона, примыкающем к континентальному блоку, в зарождающихся или зрелых рифтовых зонах широко развита сульфидная минерализация на морском дне. Выявлена целая группа гидротермальных полей в районе хр. Хуан-де-Фука, который является типичной рифтовой зоной со скоростью спрединга порядка 6 см/год. Эта группа занимает промежуточное положение между низкосрединговыми (поля в САХ) и высокосрединговыми (поля в ВТП) объектами.

Наиболее детально изучено гидротермальное поле Срединной долины. Здесь массивные сульфидные залежи типа бесши встречаются в подводных постройках высотой до 60 м и шириной до 400 м в прогибе, расположенном в 25 км к востоку от активной спрединговой оси на глубине 2400–2500 м и заполненном турбидитами и гемипелагическими осадками [13]. Руды содержат пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, вюртцит, галенит, марказит, ковеллин, изокубанит и барит. Запасы колчеданных руд здесь оцениваются в 1 млн. т со следующими содержаниями полезных компонентов: Cu 0.65–3.05, Zn 0.43–13.2, Pb 0.01–0.15, Ag до 18.

В Калифорнийском заливе известно около десятка гидротермальных полей с сульфидными залежами в структурах, характеризующихся относительно высокой скоростью спрединга (около 6 см/год). Среди них наиболее хорошо известна залежь во впадине Гуаймас. Здесь отмечаются сульфидные холмы и трубки высотой до 30 м с колчеданно-полиметаллической минерализацией (халькопирит, пирротин, марказит и изокубанит). Содержания основных металлов следующие: Cu 0.05–0.44, Zn 0.05–3.8, Pb 0.05–2.31, Ag 0.05–2.05, Au до 0.3, As 24–110.

В пределах ВТП на протяжении более 2000 км по обе стороны от хребта, приуроченного к тройственному сочленению, выявлено несколько гидротермальных полей, из которых следует особо отметить поля в районах 21° и 13° с.ш.

Гидротермальное поле 21° с.ш. служило полигоном для самых ранних исследований ги-

дротермального рудообразования на морском дне. Здесь выявлено большое количество активных и неактивных сульфидных построек [4]. Оруденение приурочено к блоково-разломной краевой зоне активной рифтовой структуры (скорость спрединга около 6 см/год). По имеющимся данным здесь в отдельных сульфидных постройках накоплено порядка 1000 т руды. Этот район характеризуется высокой скоростью накопления сульфидов. Поэтому вероятность обнаружения здесь новых залежей, погребенных под голоценовыми отложениями, очень высока. В сульфидных рудах этого района присутствуют халькопирит, сфалерит, пирит, марказит, вюрцит, кубанит, дигенит, барит, самородное серебро и ангидрит. Содержания основных металлов следующие: Cu 0.6–0.8, Zn 32–42, Pb 0.05–0.32, Ag до 156, Au до 0.17.

Гидротермальное поле 13° с.ш. В этом районе на глубине порядка 2600 м обнаружены свыше 80 активных и неактивных сульфидных построек и трубок. Выделяются центральная и юго-восточная зоны. Центральная зона представляет собой грабен, шириной 200–600 м, расположенный в осевой зоне базальтовой экструзии, характеризующейся интенсивной трещиноватостью [14]. Цинковоколчеданная минерализация (пирит, вюрцит, марказит, халькопирит) отмечается в основном только к северу от 13° с.ш. и практически отсутствует в южной части. Наиболее крупная Юго-Восточная залежь (около 800 м в длину и 200 м в ширину), находящаяся на расстоянии порядка 6 км от центрального грабена, приурочена к дифференцированной толще базальтов. Оруденение имеет серно- и медноколчеданный состав, а сфалерит почти отсутствует. Содержания основных элементов следующие: Cu 0.3–31.6, Zn до 0.3, Pb до 0.24. Характерна довольно заметная концентрация Ag (до 186), As (до 1253), Cd (до 815), Co (до 0.4) и Ni (до 0.57).

В Галапагосском спрединговом центре, находящемся к юго-востоку от указанных выше сульфидных построек ВТП и характеризующемся относительно высокой скоростью спрединга (6 см/год), массивные сульфидные руды встречаются на глубине 2600–2850 м в виде гряд высотой 3–4 м и протяженностью около 2 км вдоль сбросового разлома в заполненной базальтами рифтовой долине. Сульфидная минерализация приурочена к активным трубкам и постройкам в осевой зоне вулканической экструзии и представлена пиритом, халькопиритом и сфалеритом. Запасы массивных колчеданных руд оцениваются примерно в 10 млн. т при следующих содержаниях основных компонентов: Cu 0.05–2.7, Zn 0.05–1.8, Pb до 0.13. Отмечены также заметные концентрации Ag (до 290) и Au (до 0.13).

В западном и юго-западном секторах Тихого океана в островодужных и задуговых бассейнах

встречаются гидротермальные поля, характеризующиеся высокими содержаниями Pb, Ag, Au и рядом редких элементов [5]. Они приурочены, как правило, к зарождающимся структурам с относительно высокой скоростью спрединга и выполненным бимодальными вулканиками, формирующимся в условиях континентальной коры или субдуцирующей океанической плиты. В качестве примера отметим гидротермальные поля в районе трого Окинава.

Гидротермальное поле Окинава было обнаружено в 1988 г. в кальдерообразной впадине Исона, диаметром около 5 км, расположенной в Центральном трого Окинава, который представляет собой тектонически активную внутриконтинентальную задуговую структуру. Здесь в бимодальных вулканиках отмечаются свинцово-цинковые с баритом и медно-цинковые руды, сходные с типом куроко. Они содержат сфалерит, галенит, пирит, халькопирит, марказит, блеклые руды, барит и пирротин. Содержания основных элементов следующие: Cu 0.1–5.4, Zn 4.4–33.6, Pb 1.6–12.0. Кроме того, присутствуют As (0.02–2.4) и примеси Co, Ni и Cd. Характерной чертой этих руд являются довольно заметные концентрации Ag (до 1.1) и в особенности Au (2.3–8.6).

Приведенные выше материалы показывают, что подавляющее большинство известных сульфидных залежей на морском дне относятся к кипрскому типу (Атлантис II, гидротермальные поля СОХ, ТАГ и др.). Они залегают в офиолитовых вулканиках в пределах низкоспрединовой рифтовой зоны и сложены преимущественно серно- и медноколчеданными рудами. Анализ минерального состава сульфидных залежей на морском дне показывает их сходство с типичными вулканогенными колчеданно-полиметаллическими месторождениями. В них исследователями отмечаются следующие рудные минералы (в скобках частота встречаемости в процентах): пирит (98), халькопирит (85), сфалерит (63), марказит (48), галенит и барит (по 29), пирротин (27), борнит (23), изокубанит (19), блеклые руды (17), вюрцит (15), ковеллин (15), самородное серебро (8), пентландит, кубанит и дигенит (по 6), мельникит и халькозин (по 4), арсенопирит, англезит, аргентит, леллингит, стибнит, штроейерит, самородный висмут и ангидрит (до 2). Таким образом, так же, как и на континентальных колчеданных месторождениях, главными рудными минералами здесь являются пирит (с марказитом), халькопирит, сфалерит (с вюрцитом). Второстепенными являются галенит, барит, пирротин, борнит, изокубанит, блеклые руды и ковеллин. Остальные минералы встречаются редко.

По мнению многих исследователей [2, 6, 7, 10–14], образование гидротермальных залежей на поверхности базальтов в рифтовых зонах связано

с взаимодействием высокотемпературного рудоносного флюида, поступающего из подземных гидротермальных источников, с холодной придонной водой, характеризующейся сильными окислительными свойствами. Большой практический интерес представляют гидротермальные сульфидные залежи в задуговых умеренно и высокоспрединговых центрах (трог Окинава, впадина Лау и др.). Минеральный состав руд здесь весьма интересный. Галенит в них является наравне со сфалеритом главным минералом. Кроме того, барит, блеклые руды и другие сульфосоли встречаются достаточно часто. Количество пирита относительно невысокое. Имеющиеся данные показывают, что эти залежи отличаются довольно высокими содержаниями Ag и Au и удивительно похожи на некоторые залотоносные колчеданные месторождения на суше. Устанавливается прямая, хотя и не очень четкая корреляция Au с As, Sb и Pb. Источником золота в рассеянных или массивных сульфидах на морском дне, вероятно, являются субмаринные выходы гидротермальных растворов [5].

Таким образом, анализ приведенных материалов позволяет сделать следующие выводы.

Колчеданно-полиметаллические залежи на морском дне формируются в четырех типах геотектонических структур: срединно-океанических хребтах, областях задугового спрединга, зонах островодужного вулканизма и в зонах внутриплитного вулканизма. Наиболее крупные субмаринные сульфидные залежи локализованы в спрединговых зонах Красного моря (впадина Атлантис II) и Тихого океана (Галапагосский спрединговый центр, район 13° с.ш. ВТП и хр. Хуан-де-Фука).

Кроме основных сульфидов железа, меди и цинка, в этих залежах встречаются марказит, галенит, пирротин, борнит, вюртцит, кубанит, изокубанит, блеклые руды, ковеллин, пентландит, дигенит, арсенопирит, аргентит, леллингит, стибнит, штроемейерит и самородные серебро и висмут.

Отличительной чертой многих рассмотренных залежей, в особенности сульфидных залежей типа куроко, приуроченных к задуговым бассейнам, является высокое содержание Au. Источником этого металла были залотоносные флюиды,

поступающие из субмаринных горячих источников.

Сульфидные залежи на современном морском дне являются аналогами древних колчеданно-полиметаллических месторождений. Основная масса этих залежей соответствует месторождениям кипрского типа.

Работа выполнена при поддержке научной программы Министерства образования Российской Федерации "Университеты России" (проект УР. 09.03.012).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич Е.Г. Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Науч. мир, 1998. С. 340.
2. Богданов Ю.А. // Изв. Секции наук о Земле РАЕН. 2002. В. 9. С. 134–159.
3. Богданов Ю.А., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г. и др. // ДАН. 1999. Т. 365. № 5. С. 657–662.
4. Francheateau J., Needham H.D., Chourkroune P. et al. // Nature. 1979. V. 277. P. 523–528.
5. Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D. In: Gold Metallogeny and Exploration. L: Chapman and Hall, 1993. P. 249–278.
6. Rona P.A., Scott S.D. // Econ. Geol. 1993. V. 88. № 8. P. 1935–1975.
7. Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г. Гидротермы и руды на дне океана. Металлогения современных и древних океанов. М.: Геоэксперт, 1992. С. 14–39.
8. Сорохтин О.Г., Старостин В.И., Сорохтин Н.О. // Изв. Секции наук о Земле РАЕН. 2001. В. 6. С. 5–26.
9. Богданов Ю.А., Гурвич Е.Г., Бутузова Г.Ю. и др. Металлоносные осадки Красного моря. М.: Наука, 1986. С. 288.
10. Батулин Г.Н. Руды океана. М.: Наука, 1993. С. 303.
11. Маракушев А.А., Моисеенко В.Г., Сахно В.Г., Тарарин И.А. // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19. № 6. С. 5–136.
12. Fouquet Y., Wafik A., Cambon P. et al. // Econ. Geol. 1993. V. 88. № 8. P. 2018–2036.
13. Goodfellow W.D., Franklin G.M. // Econ. Geol. 1993. V. 88. № 8. P. 2037–2068.
14. Hekinian R., Fouquet Y. // Econ. Geol. 1985. V. 80. P. 523–528.