

Первая причина – это влияние глубины океана, а соответственно гидростатического давления на состав и свойства выходящих на поверхность дна высокотемпературных гидротермальных растворов.

Действительно, при подъеме и уменьшении гидростатического давления высокотемпературные гидротермальные растворы на определенных глубинах достигают критических условий состояния однородного раствора и испытывают фазовую сепарацию. Для океанической воды на глубине менее 3 км сепарация может происходить путем кипения. При больших глубинах фазовая сепарация сопровождается не кипением, а отделением от раствора небольшого количества плотного высокоминерализованного флюида [Bischoff, Rosenbauer, 1985, 1987]. При этом происходит концентрирование металлов в высокосоленой фазе, а газов – в низкосоленой.

Очень показательны в этом отношении результаты термодинамического моделирования кипения в гидротермах океана, выполненные Д.В. Гричуком [1998]. Начальная температура гидротермального раствора, находящегося в контакте с породой, принята равной 350 °С, соотношение порода/вода – 0,1. С уменьшением давления в системе до 160–170 бар начиналось кипение раствора. При этом достаточно быстро происходило перераспределение растворенных газов между фазами. Концентрации водорода и сероводорода снижались в остаточной жидкой фазе на порядок, а метана – на 3 порядка. В ней также происходило резкое увеличение концентраций Fe, Mn, Cu, Zn и Pb. Для халькофильных элементов важным является пространственное разделение с главным осадителем – серой (механизм потери осадителя). При этом гетерогенизация раствора оказывалась более существенной для меди, обладающей наименьшей подвижностью среди рудных металлов [Гричук, 1998].

Если фазовая сепарация первичного гидротермального раствора проходит в океанической коре на сравнительно большом расстоянии от поверхности дна, то при подъеме и уменьшении давления раствор испытывает адиабатическое охлаждение, и в твердую фазу переходит целый ряд металлов, прежде всего наименее подвижные. Раствор испытывает относительное обогащение химическими элементами, которые на поверхности дна ассоциируются со средне- и низкотемпературными гидротермальными отложениями.

Совершенно иначе проявляется в рудоотложении фазовая сепарация в самых близкоповерхностных условиях. В устьях подводных гидротермальных источников наблюдаются высокочастотное чередование опресненных и осолоненных струй гидротермального раствора и сильная высокочастотная температурная изменчивость раствора. В пределах поверхностных массивных гидротермальных отложений имеет место накопление пространственно практически не разделенных высокотемпературных и среднетемпературных минеральных фаз.

Важно подчеркнуть, что в результате фазовой сепарации наиболее чувствительные газы, прежде всего водород и метан, на сравнительно мелководных участках дна (поля Менез-Гвен и Лаки-Страйк) резко обогащают опресненный гидротермальный раствор. В то же время он существенно обеднен металлами.

Второй причиной изменения поднимающегося к поверхности первичного гидротермального раствора является его смешение с придонными холодными водами, проникающими по трещинам в подповерхностные горизонты океанической коры. При исследовании активного гидротермального поля

ственно гидро-
 поверхность дна
 кого давления
 ленных глуби-
 раствора и ис-
 глубине менее
 шших глубинах
 м от раствора
 ного флюида
 центрирование

динамического
 Д.В. Гричуком
 аходящегося в
 ода/вода – 0,1.
 ь кипение рас-
 еление раство-
 дорода снижа-
 юрядка. В ней
 и, Zn и Pb. Для
 е разделение с
 и этом гетеро-
 и, обладающей
 998].

иствора прохо-
 и от поверхно-
 ытывает адиа-
 ряд металлов,
 ительное обо-
 на ассоцииру-
 тложениями.
 епарация в са-
 альных источ-
 и осолоненных
 температурная
 гидротермаль-
 тически не раз-
 еральных фаз.
 наиболее чув-
 гельно мелко-
 обогащают оп-
 ьственно обед-
 сти первично-
 нными холод-
 ые горизонты
 ального поля

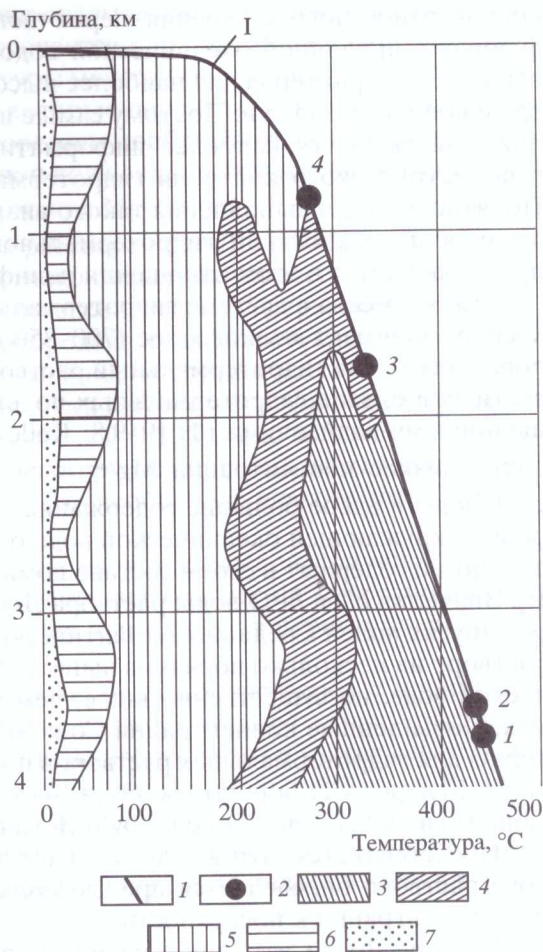
Рис. 1.1. Гипотетическая картина гипсо-
 метрического контроля формирования
 гидротермальных отложений на поверх-
 ности океанического дна

I – кривая кипения (гетерогенизации) для
 океанической воды; Гипсометрическое
 положение описанных гидротермальных
 полей: 1 – ТАГ, 2 – Снейк-Пит, 3 – Лаки-
 Страйк, 4 – Мenez-Гвен; 3–7 – специализа-
 ция гидротермальных отложений: 3 –
 медно-колчеданная и медно-цинково-
 колчеданная, 4 – серно-колчеданная, с
 увеличением температуры гидротер-
 мального раствора переходящая в цинко-
 во-колчеданную, 5 – сульфидсодержа-
 щая кремнисто-сульфатная, 6 – нонтро-
 нитовая, 7 – Fe- и Mn-оксидная

ТАГ мы предположили [Лиси-
 цын и др., 1989, 1990], что лате-
 ральная зональность минераль-
 ного и химического составов от-
 ложений активной гидротер-
 мальной постройки связана с тем,
 что в центральной ее части (зоне
 «черных курильщиков») поверх-
 ности дна достигает мало изме-
 ненный первичный гидротер-
 мальный флюид, а по периферии
 более холодный, в разной степе-
 ни смешанный с придонной водой
 раствор.

Дж. Эдмонд с сотрудниками
 [Edmond et al., 1995] выполнили серию определений состава и свойств гидро-
 термальных растворов в устьях черных и белых более низкотемпературных
 курильщиков активного гидротермального поля ТАГ и установили, что гид-
 ротермальный флюид белого курильщика формируется в результате подпо-
 верхностного (в пределах «корней» рудной залежи) смешения флюида чер-
 ного курильщика и океанической придонной воды, проникающей в тело за-
 лежи по многочисленным трещинам. По предложенной в работе [Tivey et al.,
 1995] модели для обеспечения измеренного состава гидротермальных флю-
 идов белого курильщика необходимо смешение 86% флюида черного ку-
 рильщика и 14% океанической воды. При этом происходит охлаждение рас-
 твора, осаждение части химических элементов (в частности, формирование
 халькопирита, пирита и ангидрита). Одновременно часть ранее осажденного
 сфалерита растворяется в гидротермальном растворе, что приводит к увели-
 чению концентрации Zn в растворе относительно флюида черного куриль-
 щика примерно на порядок.

Построена гипотетическая модель связи состава поверхностных отложе-
 ний с глубиной океана (рис. 1.1). В ней отражено также влияние процессов



подповерхностного смешения первичного рудоносного гидротермального флюида с придонной океанической водой. Наименьшая степень смешения чаще всего характерна для наиболее высокотемпературных отложений центральной части залежи. Поэтому самые высокотемпературные разности отложений являются наиболее информативными с точки зрения выяснения гипсометрического контроля гидротермального рудонакопления в океане. Понятно, что для выполнения такого анализа необходимы детальные исследования поверхностной гидротермальной залежи. Случайные одиночные пробы являются в этом отношении неинформативными.

Особое место в системе гидротермальных полей срединно-океанических хребтов занимает мелководное (700–850 м) поле Лост-Сити. Выходящий на поверхность дна гидротермальный раствор отличается от растворов всех известных в океане гидротермальных полей низкой (40–75 °С) температурой, щелочными значениями pH [9–9,8; Kelley et al., 2001b]. В нем обнаружены очень низкие концентрации Mg^{2+} - и SO_4^{2-} -ионов относительно океанической воды и вдвое большие содержания Са. Концентрация Na и Cl в растворе и в окружающей океанической воде одинакова. Растворы пахнут сероводородом и содержат в своем составе помимо H_2S заметное количество CH_4 и H_2 . Значения δD и $\delta^{18}O$ воды раствора Лост-Сити подобны δD и $\delta^{18}O$ растворов других полей Срединно-Атлантического хребта. Количество металлов в растворе на несколько порядков выше величины их концентрации в океанической воде, но существенно ниже, чем в высокотемпературных гидротермах. Повышенные концентрации Co и Ni, а также CH_4 и H_2 особенно характерны для гидротермальных растворов полей, ассоциирующих с серпентинитами. Углерод CH_4 в растворе поля Лост-Сити на 3–4‰ изотопно легче метана из гидротерм полей Рейнбоу и Логачева [Леин и др., 2004].

Представляется, что эта аномальность состава и свойств гидротермального раствора определяется прежде всего особенностями его трансформации при миграции к поверхности.

На поле Лост-Сити, как и на других описанных выше гидротермальных полях Логачева и Рейнбоу, тоже ассоциирующих с серпентинитами, первичный рудоносный гидротермальный раствор формируется при взаимодействии океанической воды с породами низов океанической коры – верхов мантии при температуре, превышающей 350 °С. Для таких растворов характерны низкие значения pH, равные 3,5, и концентрации CH_4 и H_2 , на порядок большие, чем на полях, где растворы образуются при реакциях океанической воды с базальтами.

Первый этап трансформации растворов, который характерен для всех типов гидротермальных полей мировой рифтовой системы, связан с тем, что на глубине порядка 2000–3000 м при уменьшении гидростатического давления они становятся неустойчивыми и испытывают фазовую сепарацию. При этом часть металлов переходит в твердую фазу, а газы концентрируются в опресненной части.

Однако на поле Лост-Сити трансформация гидротермального раствора этим не заканчивается. По всей видимости, преобразование остаточного кислого гидротермального раствора в щелочной, обедненный металлами среде происходит в подповерхностных условиях при самом активном участии микроорганизмов (так называемой подповерхностной биосферы).

В подповерхностных условиях гидротермальный раствор, обогащенный метаном и особенно водородом, встречается с проникающей сюда придонной водой и охлаждается до температуры менее 100 °С. При этом раствор теряет значительную часть металлов, которые переходят в твердую фазу. По их содержанию в остаточном растворе они приближаются к океанической воде. Однако почему при значительной доле воды в охлажденном гидротермальном растворе очень низки содержания Mg^{2+} и SO_4^{2-} ?

Низкая концентрация сульфата в растворе поля Лост-Сити свидетельствует о том, что в зоне подповерхностного смешения горячего раствора (содержащего много водорода) с океанической водой (содержащей сульфат-ион) происходит так называемая водородная сульфатредукция с участием термофильных микроорганизмов, возможно, из группы архей, восстанавливающих сульфат. Гидролиз образующегося при этом сульфида кальция объясняет подщелачивание раствора до $pH = 9-9,8$. Только подповерхностная биосфера, существование которой постулируется многими исследователями, может окончательно сформировать столь необычные низкотемпературные растворы.

Иными словами, фазовая сепарация является важной причиной гипсометрического контроля состава и свойств выходящих на поверхность дна гидротермальных растворов, содержания в них газов, в первую очередь водорода и метана, и металлов.

Подповерхностное смешение гидротермальных растворов с проникающей в кору океанической водой также является важной характеристикой трансформации первичного гидротермального раствора и может существенно влиять и на распределение, и на состав гидротермальной биоты. В дальнейшем будет показано, что процессы проникновения в кору океанической воды в значительной степени подчиняются определенной зональности в пределах индивидуальных гидротермальных построек, а также изменяются во времени жизни активных полей.

1.3. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ СИСТЕМАТИЗАЦИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

Описанные выше закономерности развития гидротермальных циркуляционных систем несомненно должны быть использованы для систематизации гидротермальных биологических сообществ, развивающихся на основе хемосинтеза. Именно они определяют интенсивность поступления веществ, определяющих развитие хемосинтеза, и их состав.

Прежде всего необходимо разделить два типа гидротермальных циркуляционных систем, в которых уже первичные гидротермальные растворы существенно различаются по содержанию таких важных для хемосинтеза газов, как метан и водород (см. табл. 1.1). Следует выделить два типа полей: поля, ассоциирующие с вулканитами – «осевыми» магматическими камерами, и поля, ассоциирующими с серпентинитами.

Далее необходимо учитывать степень преобразования поднимающихся к поверхности первичных гидротермальных растворов (см. рис. 1.1). При фазовой сепарации на полях, ассоциирующих с «осевыми» гидротермальными

циркуляционными системами, часто выходящие на поверхность опресненные фазы настолько обогащаются газами, что по этим характеристикам приближаются к растворам, характеризующим поля, ассоциирующие с серпентинитами.

В особую группу следует отнести поля, в которых раствор кроме фазовой сепарации испытывает существенное влияние подповерхностной биосферы.

В нижней части рисунка выполнено разделение гидротермальных полей в соответствии со спецификой развития циркуляционных систем. Здесь следует отметить, что в первую группу наряду с полями ТАГ и Снейк-Пит включено поле Брокен-Спур, хотя в гидротермальных флюидах этого поля отмечены некоторые признаки начала фазовой сепарации. Однако они никак не проявились в составе и свойствах гидротермальных отложений. Среди полей, ассоциирующих с серпентинитами, пока не встречено таких, на которых поверхности дна достигает первичный гидротермальный раствор. Важно также подчеркнуть, что при фазовой сепарации на полях, ассоциирующих с вулканитами (Лаки-Страйк, Менез-Гвен), выходящие на поверхность гидротермальные растворы по содержанию газов (метан, водород и др.) приближаются к растворам, ассоциирующим с серпентинитами. Это, несомненно, может привести к некоторому сходству гидротермальных фаун на столь разных по природе гидротермальных полях.

1.4. СПЕЦИФИКА ФИКСАЦИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА НА ПОВЕРХНОСТИ ДНА – ФОРМИРОВАНИЯ СУБСТРАТА, НА КОТОРОМ ОБИТАЮТ ДОННЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Исследование залежей гидротермальных построек океанического дна показало, что в зоне выходов на поверхность высокотемпературных гидротермальных растворов формируются три основные группы гидротермальных залежей, существенно отличающиеся друг от друга по морфологии, строению и составу: (I) окружающие зону непосредственного выхода растворов гидротермальные трубы и конические постройки; (II) сравнительно мало мощные (первые десятки сантиметров) гидротермальные плиты, часто являющиеся цоколями образований первого типа; (III) массивные часто перекристаллизованные отложения, подстилающие плиты, местами выходящие на поверхность за пределами концентрированных потоков высокотемпературных гидротермальных растворов. Соотношение этих разностей гидротермальных образований в пределах гидротермального поля определяется целым рядом причин, но в значительной степени возрастными этапами развития гидротермального рудоотложения.

Встречаемость перечисленных выше основных разностей гидротермальных отложений, их пространственные и возрастные соотношения можно показать на основании изучения последовательности формирования гидротермальной залежи, выполненного для низкосрединного Срединно-Атлантического хребта.

Были выбраны три гидротермальных поля, различающиеся продолжительностью их функционирования: очень молодое поле Брокен-Спур с воз-

растом (продолжительностью формирования) менее 1000 лет [Bogdanov et al., 1995]; поле Снейк-Пит – около 4000 лет [Lalou et al., 1993] и активное поле ТАГ – около 50 000 лет [Lalou et al., 1990, 1995].

В пределах наиболее молодого поля Брокен-Спур выходящие на поверхность флюиды на начальном этапе строят конические и столбообразные постройки, представляющие собой гидротермальные трубы или очень специфичные образования с дынеобразными раздувами, получившие название диффузоров [Fouquet et al., 1993], которые возвышаются непосредственно над вулканическим фундаментом.

Часто гидротермальные трубы и диффузоры срastaются в единую более мощную постройку. Постройки усложнены многочисленными карнизами и субгоризонтальными площадками, из-под которых и по трещинам на их поверхности струятся прозрачные и «черные» теплые воды.

На поле Брокен-Спур таких построек несколько. Они разделены пространствами дна, на которых обнажаются вулканиты.

Большинство исследователей полагают, что рост труб начинается с формирования ангидритовой оболочки. Она ограничивает обмен между флюидом и океанической водой. Однако встречная миграция через пористую стенку океанической воды и флюида определяет концентрическую зональность распределения слагающих стенку минеральных фаз, отражающую степень смешения воды и флюида, зональное распределение минеральных фаз от наиболее высокотемпературных в центральной части к низкотемпературным на периферии. Процессы перекристаллизации, замещения ранее отложенных минералов, и в частности ангидрита, – очень характерное явление минералообразования в пределах трубы (разность I).

Некоторые гидротермальные постройки находятся на поверхности цоколя высотой около 10 м и диаметром 15–20 м. Цоколь сложен угловатыми обломками сульфидов размером 10–20 см в поперечнике. Большинство обломков покрыто поверхностью тонкой бурой пленкой оксигидроксидов железа. Обломки, как правило, очень плотные, испытавшие процессы перекристаллизации. В верхней части цоколя они сцементированы сульфидным веществом (разность III).

Вокруг некоторых гидротермальных построек встречены гидротермальные плиты толщиной до первых десятков сантиметров, перекрывающие вулканический фундамент (разность II).

Как же формируются описанные морфологические элементы гидротермальных построек молодого поля Брокен-Спур? Пропускная способность основных каналов гидротермальных труб и диффузоров, по которым к поверхности дна поднимаются гидротермальные рудоносные растворы, постепенно уменьшается, и раствор частично начинает мигрировать по трещинам в постройке, наращивая ее в результате отложения гидротермального материала в горизонтальном направлении, на стенках труб и построек формируются карнизы. На поверхности дна мигрирующие в сторону от основного канала растворы образуют гидротермальные плиты (разность II). Полная закупорка подводных каналов приводит к «гидротермальному взрыву». Образуется раздробленный цоколь, формируются новые каналы для перемещения гидротермальных растворов, вокруг выходов которых на поверхности над цоколем возникают новые гидротермальные трубы. Сам материал

цоколя под влиянием мигрирующего через него высокотемпературного раствора испытывает преобразования, перекристаллизацию (разность III).

В пределах более зрелого поля Снейк-Пит в результате неоднократных «гидротермальных взрывов» разрушаются не только гидротермальные постройки, но подстилающие их вулканиты. Индивидуальные постройки объединяются единым цоколем, сливаются в единую гидротермальную залежь.

В пределах активных гидротермальных построек, аналогичных встреченным на поле Брокен-Спур, первичные гидротермальные растворы неизменными достигают поверхности дна. Океаническая вода по периферии построек проникает в подповерхностные горизонты, где встречается с диффузными потоками флюидов. В зоне их встречи начинается осаждение гидротермального вещества. Это приводит к формированию подповерхностных «корней» гидротермальной постройки.

Состав и строение отложений этих «корней» достаточно подробно исследованы на зрелой гидротермальной постройке ТАГ по материалам глубоководного бурения и будут описаны далее. Здесь важно подчеркнуть, что на поле Снейк-Пит широко развиты гидротермальные плиты, во многих местах перекрывающие отложения раздробленного цоколя. Причем, в отличие от поля Брокен-Спур, где эти плиты формируются непосредственно у подножья гидротермальных построек, маркирующих выход на поверхность концентрированного потока гидротермальных рудоносных растворов, здесь они в большинстве случаев связаны с диффузными потоками высокотемпературных растворов.

В пределах самого зрелого гидротермального поля ТАГ на месте многочисленных построек уже сформировалась единая крупная гидротермальная залежь с глубокими подповерхностными «корнями». Она представляет собой усеченный конус диаметром 200 м и высотой 30 м, который является цоколем для вершинной конической части 30–50 м диаметром у подножья и 10–15 м высотой.

В верхней части постройки в северо-западной части цоколя наблюдается область разгрузки высокотемпературных рудоносных флюидов («черные курильщики») с максимальной измеренной температурой 366 °С. Здесь развиты преимущественно сульфидные отложения медной специализации со значительной примесью ангидрита. В некоторых образцах ангидрит является основной минеральной фазой этих отложений.

На некотором удалении от верхней конической постройки на поверхности залегают сульфидные рудопроявления цинковой и медно-цинковой специализации, часто в виде гидротермальных плит. Поверхность этих плит очень неровная, бугристая, на которой часто присутствуют небольшие гидротермальные постройки. Во многих местах в зонах развития этих образований наблюдаются диффузные выходы гидротермальных растворов.

В юго-восточной части цоколя приблизительно в 70 м от зоны «черных курильщиков» находится зона «кремлей». В основном это активные белые курильщики высотой 1–2 м [Thompson et al., 1988] с температурой разгружающихся гидротермальных растворов 200–300 °С [Mills, 1995]. Сульфидные образования, слагающие постройки, представлены в основном сфалеритом с примесью пирита, марказита и халькопирита, а из нерудных минералов – аморфным кремнеземом.

температурного раз-
ность III).

неоднократных
гермальные по-
постройки объе-
альную залежь.
огичных встре-
растворы неиз-
по периферии
речается с диф-
осаждение гид-
поверхностных

подробно иссле-
иалам глубоко-
нуть, что на по-
многих местах
м, в отличие от
венно у подно-
верхность кон-
зоров, здесь они
высокотемпера-

на месте много-
гидротермальная
редставляет со-
ый является цо-
м у подножья и

для наблюдается
идов («черные
6 °С. Здесь раз-
специализации со-
ангидрит являет-

ки на поверхно-
о-цинковой спе-
юсть этих плит
небольшие гид-
я этих образова-
творов.

т зоны «черных
активные белые
гурой разгружа-
5]. Сульфидные
м сфалеритом с
ых минералов –

Внешний достаточно крутой (около 30°) склон цоколя постройки сложен отдельными блоками сильно измененных сульфидных отложений преимущественно пирит-марказитового состава с примесью халькопирита и сфалерита, цементированными оксигидроксидами железа, нонтронитом и аморфным кремнеземом. Последние часто образуют также слоистые залежи. Оксидные минералы железа представлены плохо окристаллизованными гидроксидами железа (протоферригидритом), ферригидритом и акагенеитом. Агрегаты этих минеральных фаз имеют бактериальноподобные формы.

Следует отметить, что местами эта пространственная зональность нарушается. В пределах развития среднетемпературных сульфидных отложений встречаются небольшие более высокотемпературные обособления, часто в виде жил. Это объясняется неоднородностью, изменчивостью в геологическом времени состава и свойств разгружающихся рудоносных гидротермальных растворов.

В 1994 г. с бурового судна «Джоидес Резолюшн» в пределах активной гидротермальной постройки ТАГ на 5 станциях было пробурено 17 скважин длиной до 125 м [Humphris et al., 1995]. Приповерхностная часть постройки (верхние 10–20 м) сложена отложениями пирита и халькопирита в районе «черных курильщиков» и сфалерита и пирита в районе «кремлей». Она подстилается обогащенной ангидритом зоной. Эта зона разделяется на две подзоны: верхняя, сложенная пиритово-ангидритовой брекчией, и нижняя, представленная пирит-кремнезем-ангидритовой брекчией. Ниже залегает зона окремнения. Верхняя ее часть сложена пирит-кремниевой брекчией, которая подстилается слоем окремненных брекчий вмещающих вулканитов с небольшой примесью пирита. Глубже 100 м эти брекчии постепенно переходят в хлорилизованную базальтовую брекчию, которая цементируется кварцем и пиритом. Общей чертой строения рудной залежи является преобладание в ее составе брекчий.

Важно отметить, что в толще залежи наблюдается существенное разделение в пространстве двух основных сульфид-формирующих металлов (меди и цинка): максимальные концентрации меди – в подповерхностной и, частично, в поверхностной частях залежи, а цинка – на поверхности [Hannington et al., 1998].

Таким образом, гидротермальная залежь в рифте низкосрединного хребта формируется в результате нескольких основных процессов:

1) в пределах гидротермального поля на начальном этапе по индивидуальным каналам через ненарушенный вулканический фундамент поднимаются высокотемпературные рудоносные гидротермальные растворы, которые на поверхности в зоне их встречи с холодными океаническими водами, характеризующимися сильными окислительными свойствами, осаждают гидротермальное вещество, формируют трубообразные и конические постройки;

2) в результате постепенной закупорки подводящих каналов, происходящей в основном в пределах поверхностных построек и в самых приповерхностных горизонтах, гидротермальные рудоносные растворы по трещинам начинают перемещаться в стороны от этих каналов. На постройке формируются крылообразные карнизы, а на поверхности дна – отходящие от основных построек плиты;

3) после полной закупорки подводных каналов в результате «гидротермальных взрывов» происходит раздробление гидротермальных построек и формирование брекчированных цоколей. Рудоносные растворы поднимаются через цоколи по новым каналам и формируют на их поверхности новые гидротермальные постройки;

4) при дальнейшем развитии гидротермальной активности неоднократно повторяющиеся «гидротермальные взрывы» разрушают не только гидротермальные постройки, но и подстилающий их вулканический фундамент, который становится проницаемым для многочисленных диффузных потоков высокотемпературных рудоносных потоков, а также проникающих в кору придонных океанических вод. В областях сохраняющихся мощных концентрированных потоков рудоносных растворов формируются новые гидротермальные постройки. Однако за их пределами в области развития диффузных потоков при встрече растворов и проникающих в кору океанических вод осаждение гидротермального вещества начинается в подповерхностных условиях. У поверхности дна растворы диффузных потоков постепенно охлаждаются, что приводит к дифференциации химических элементов при рудоотложении, изменению более высокотемпературных разностей гидротермальных отложений на более низкотемпературные. Эту вертикальную зональность нарушает отложение ангидрита, характеризующего, с одной стороны, достаточно широкий температурный диапазон минералообразования, а с другой, – область проникновения больших масс океанических вод (сульфат-ион в ангидрите заимствуется из океанической воды). Иными словами, в пределах сравнительно зрелых гидротермальных полей формируются подповерхностные «корни» гидротермальной залежи, обусловленные функционированием диффузных потоков высокотемпературных рудоносных растворов. Важно подчеркнуть, что в пределах зрелых гидротермальных полей резко преобладающая часть гидротермальной залежи формируется в результате рудоотложения из диффузных потоков высокотемпературных рудоносных растворов, а не концентрированных, с которыми генетически связаны поверхностные отложения.

Пересекающиеся ранее сформировавшиеся подповерхностные части залежи потоками более поздних высокотемпературных растворов существенно изменяются. Происходит извлечение части химических элементов, ассоциирующих с более низкотемпературными разностями отложений, и соответственно обогащение элементами, тяготеющими к более высокотемпературным разностям. Наблюдается перекристаллизация этих отложений. Извлекаемые химические элементы перемещаются растворами и переотлагаются в поверхностных частях залежи. На поверхности раздробленного вулканического цоколя, содержащего массивные перекристаллизованные отложения, во многих частях зрелых гидротермальных залежей формируются гидротермальные плиты.

Таким образом, в гидротермальных залежах океанического дна присутствуют отложения концентрированных потоков гидротермальных растворов, массивные отложения подповерхностных «корней», ассоциирующих в основном с диффузными потоками, и гидротермальные плиты. Причем в рифтах низкосрединного хребта встречены плиты двух генераций. Первые формируются у подножья молодых гидротермальных построек и явля-

гате «гидротер-
ных построек и
ры поднимают-
рхности новые

и неоднократно
только гидро-
кий фундамент,
рузных потоков
кающих в кору
ицных концент-
овые гидротер-
тия диффузных
ических вод оса-
остных услови-
енно охлажда-
в при рудоотло-
гидротермаль-
альную зональ-
одной стороны,
бразования, а с
их вод (сульфат-
и словами, в пре-
ируются подпо-
ные функциони-
носных раство-
рмальных полей
рмируется в ре-
пературных ру-
генетически свя-

остные части за-
зоров существен-
элементов, ASSO-
ложений, и соот-
высокотемпера-
отложений. Изв-
ми и переотлага-
дробленного вул-
пизованные отло-
ей формируются

ского дна присут-
мальных раство-
ассоциирующих в
плиты. Причем в
к генераций. Пер-
построек и явля-

ются производными рудоотложения при начальных стадиях частичной закупорки подводных каналов концентрированных потоков гидротермальных рудоносных растворов, их горизонтальной миграции по трещинам от основных каналов. Вторые генерации развиваются в пределах зрелых залежей над массивными подповерхностными отложениями, ассоциирующими с диффузными потоками рудоносных растворов.

Что из этого следует для характера развития гидротермальной биоты? Основной областью развития биоты, связанной с интенсивным хемосинтезом, являются гидротермальные образования вокруг концентрированных потоков гидротермальных растворов (гидротермальные трубы, диффузоры). Они включают как устьевые участки этих образований, так и стенки труб и диффузоров и плиты первой генерации, ассоциирующие с выходами растворов по трещинам в постройке.

Диффузные потоки, с которыми ассоциируют массивные отложения и плиты второй генерации, на поверхности дна, как правило, сопровождаются выходами остаточного раствора, чаще всего с небольшим дебитом, который тем не менее должен содержать небольшое количество важных для хемосинтеза газов. По крайней мере, об этом свидетельствует присутствие на поверхности дна в таких районах аномально высоких для океана количеств железобактерий. В большинстве случаев развитие организмов, использующих в питании органическое вещество, продуцируемое в результате хемосинтеза, резко ограничено. Это могут быть, главным образом, активно перемещающиеся организмы, собирающие органику с субстрата. Однако не исключается, что при увеличении дебита низкотемпературных источников иногда среди низкотемпературных гидротермальных отложений присутствуют достаточно крупные скопления типичных организмов гидротермали (9° 45' с.ш. ВТП).

*Восточно-Тихоокеаническое
поднятие*

1.5. СООТНОШЕНИЕ РОЛИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ И ДИФФУЗНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ФОРМИРОВАНИИ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ РИФТОВ ВЫСОКОСПРЕДИНГОВОГО ХРЕБТА НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ РУДНОГО ПРОЦЕССА

Несколько иное соотношение отложений концентрированных и диффузных потоков высокотемпературных рудоносных гидротермальных растворов характерно для начального этапа рудного процесса высокоспрединговых хребтов.

В 2003 г. НИС «Академик Мстислав Келдыш» были исследованы гидротермальные поля на 9°50' с.ш. Восточно-Тихоокеанического поднятия. Они представляют особый интерес, ибо на них в начале 1991 г. произошли вулканические излияния, которые полностью разрушили ранее существовавшие гидротермальные поля. По этой причине в данном районе представилась возможность исследовать самые начальные стадии становления гидротермального поля, формирования гидротермальной залежи.

Данная область гидротермальных проявлений находится в пределах одного из сегментов Восточно-Тихоокеанического поднятия, ограниченного с

севера на $10^{\circ}10'$ с.ш. трансформным разломом Клиппертон, а с юга на $9^{\circ}03'$ с.ш. оверлеппингом (перекрытием двух отрезков срединговых центров). В этом районе литосферные плиты раздвигаются со скоростью 11 см/год. Описанные ниже рудопроявления относятся к высокосрединговому хребту.

Вдоль осевого поднятия хребта в области проведения наших работ присутствует осевой грабен шириной 40–70 м и глубиной 5–10 м, который, как полагают многие, не является тектонической структурой, а представляет собой вытянутую осевую кальдеру.

В центре осевой кальдеры находится центральная трещина шириной от 1 до 5–8 м и глубиной до 10 м и более. Судя по морфологии, осевая трещина при активном вулканизме представляла собой целую систему лавовых озер, которые периодически опустошались, фиксируя ребрами положение их поверхности.

Преобладающее большинство обследованных гидротермальных проявлений приурочено к его осевой кальдере, а в пределах кальдеры – к центральной трещине. Иными словами, трещины, нарушающие сплошность вулканического фундамента, являются каналами, по которым к поверхности поднимаются гидротермальные растворы. При этом эти трещины не тектонического происхождения, а возникли в результате обрушения кровли магматической камеры.

В исследованной части хребта протяженностью около 1 км встречено по крайней мере 6 активных и несколько реликтовых гидротермальных полей. Столь большая частота гидротермальных полей по сравнению с областями развития гидротермальных процессов на низкосрединговых хребтах является одной из черт активных рифтов высокосрединговых хребтов.

Встречено две разновидности высокотемпературных гидротермальных образований в пределах исследованных полей. Первый тип – это плиты толщиной до 10–15 см, покрывающие базальты фундамента. В преобладающем большинстве они с поверхности покрыты пленками окисных минералов железа и являются реликтовыми. Они слоистые, причем нижние части плит, прилегающие непосредственно к поверхности базальтов, сложены наиболее высокотемпературными отложениями медной специализации. Сверху эти отложения перекрываются ангидритовым слоем. Часто присутствуют и залегающие выше слои более низкотемпературных гидротермальных сульфидных отложений.

Важно отметить, что в нижней части плит сохранились мелкие каналы, подводящие диффузные высокотемпературные гидротермальные рудоносные растворы. Если на низкосрединговом хребте массовое развитие диффузных потоков рудоносных растворов свойственно для зрелых гидротермальных полей, то для исследованного отрезка высокосредингового хребта, где вулканический фундамент уже при начальных этапах вулканизма сильно раздроблен, диффузные потоки резко преобладают над концентрированными с самого начала рудоотложения.

Другая разновидность высокотемпературных гидротермальных образований (активных и реликтовых) представляет собой либо столбообразные, либо шпалеобразные сооружения высотой от 5 до 18 м, представленные в основном серно-колчеданными отложениями (более низкотемпературными

тон, а с юга на
единговых цент-
я со скоростью
высокоспрединго-

наших работ при-
м, который, как
представляет со-

щина шириной от
1, осевая трещина
му лавовых озер,
положение их по-

рмальных проявл-
льдеры – к цент-
е сплошность вулк-
им к поверхности
рещины не текто-
нения кровли маг-

1 км встречено по
ермальных полей.
ению с областями
рых хребтах явля-
хребтов.

гидротермальных
1 – это плиты тол-
В преобладающем
ых минералов же-
жные части плит,
ложены наиболее
рации. Сверху эти
ступуют и залегаю-
ных сульфидных

сь мелкие каналы,
мальные рудноос-
вое развитие диф-
зрелых гидротер-
спредингового хреб-
этапах вулканизма
ют над концентри-

ермальных образо-
о столбообразные,
представленные в
котемпературными

по сравнению с отложениями низов гидротермальных корок). Эти сооруже-
ния возвышаются либо непосредственно над базальтами фундамента, либо
над цоколем, сложенным реликтовыми гидротермальными плитами.

Эти две разновидности гидротермальных рудопроявлений фиксируют
начальные этапы становления гидротермальной циркуляционной системы,
начальные стадии формирования рудных тел. Непосредственно после вулканической активности весной 1991 г. основной формой истечений гидротермальных растворов, в том числе и высокотемпературных, было диффузное, что отмечалось в наблюдениях из подводных обитаемых аппаратов непосредственно после этапа вулканизма. Именно с этим этапом связано становление большинства гидротермальных плит, сложенных высокотемпературными сульфидными отложениями медной специализации. Со временем площади полей, в которых проявлялись диффузные истечения, резко сокращались. Одновременно появлялись подводные источники, с которыми связаны более мощные концентрированные потоки гидротермальных растворов. Именно вокруг них образуются столбообразные и шпалеобразные постройки, сложенные более низкотемпературными серно-колчеданными образованиями.

Важно, что эти две разновидности гидротермальных образований разновременные, что не отмечалось до сих пор на других полях рифтов океанического дна.

Как же в условиях этой очень быстро протекающей перестройки характера гидротермальных проявлений с точки зрения геолога должна развиваться биота? На самом начальном этапе, сопровождающем высокодебитными высокотемпературными выходами диффузных потоков на поверхность, происходило интенсивное развитие микробиологических хемосинтетических процессов. Несомненно, это должно сопровождаться развитием типичного гидротермального сообщества. Ограничителем могло быть время, в течение которого сохранялись подобные условия, и которое определяет скорость заселения гидротерм. Вряд ли оно было очень продолжительным, ибо места выходов должны были перекрываться формирующимися достаточно быстро гидротермальными плитами, в которых по данным их строения только в нижней части имеются высокотемпературные отложения медной специализации. К поверхности они сменяются средне-, а затем низкотемпературными отложениями. Соответственно уменьшался дебит источников и вынос на поверхность дна важных для развития хемосинтеза веществ.

На следующем этапе, когда резко сократились области выходов на поверхность диффузных потоков и появились зоны выходов концентрированных потоков гидротермальных растворов с типичными для таких условий гидротермальными постройками, именно последние начинают заселяться «гидротермальными» организмами.

И еще одну черту, выявленную на этих полях, следует отметить. Большинство исследователей ищут объяснение цикличности развития гидротермальной активности рифтов в чередовании вулканических и тектонических циклов в развитии спредингового хребта. В данном случае о тектонических циклах говорить не приходится. Смена циклов вулканизма и гидротермальной активности связана только с изменчивостью во времени вулканической

активности. Продолжительность гидротермального цикла здесь определяется скоростью поступления базальтового расплава в частично опустошенную магматическую камеру.

1.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование огромных биомасс гидротермальных организмов связано преимущественно с хемосинтезом, обусловленным поступлением на дно важных для развития этого процесса веществ из недр. Поэтому при изучении неоднородности развития гидротермальной биоты наряду с биогеографическими и биоценологическими процессами следует учитывать неоднородность поставки гидротермального материала. Анализ закономерностей функционирования гидротермальных циркуляционных систем Срединно-Атлантического хребта позволяет классифицировать условия, при которых формируются неоднородности составов выходящих на поверхность дна гидротермальных растворов, и показать принадлежность исследованных гидротермальных полей к выделенным классам.