

## HYDROTHERMAL DEPOSITS IN OCEANS

N. V. KORONOVSKII

*Hydrothermal deposits of ocean rift zones, “black smokers”, ore mud composition distribution of metalliferous sediments are considered. These hydrothermal and geochemical processes occur as a result of sea-water penetration into basalt layer of the oceanic crust.*

*Рассмотрены гидротермальные образования в рифтовых зонах океанов, “черные курильщики” и состав рудной взвеси, распространение металлоносных осадков, связанных с гидротермами, и геохимические процессы при инфильтрации морской воды в базальтовый слой океанической коры.*

## ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ОКЕАНАХ

Н. В. КОРОНОВСКИЙ

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

20 лет назад в океанах были обнаружены участки с активной гидротермальной деятельностью — выходами на поверхность океанического дна горячих рудоносных растворов, формирующих современные месторождения сульфидных руд. Это было, вне всякого сомнения, одно из крупнейших открытий века. Впервые исследователь получил возможность непосредственно наблюдать образование рудных месторождений с подводных обитаемых аппаратов. Гидротермальные растворы далеко разносят рудное вещество, оседающее на океанское дно, образуя металлоносные осадки, сведения о которых в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия поступили около 100 лет тому назад. В настоящее время эти осадки хорошо изучены в некоторых местах, особенно во впадинах Красного моря. Вокруг выходов струй гидротермальных растворов, так называемых черных и белых “курильщиков”, была обнаружена фауна, приспособившаяся к высоким температурам и необычным условиям обитания. Для геологов было исключительно важно установить, что современные залежи сульфидных руд в океанах имеют аналоги в древних складчатых областях в виде колчеданных месторождений, и таким образом понять их генезис.

Открытие гидротермальных систем стало возможным только с изобретением в 70-х годах подводных обитаемых аппаратов — маленьких автономных подводных лодок, способных погружаться на глубины в 3–4 км и более.

### ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКЕАНИЧЕСКИХ РИФТОВ

В 1978 году были открыты высокотемпературные гидротермальные постройки — “черные курильщики” на Восточно-Тихоокеанском поднятии и стало ясно, что именно они являются источниками металлоносных осадков (МО). Глубоководное бурение с кораблей “Гломар Челленджер” и “Джондес Резолюшн” позволило установить присутствие МО в осадочных толщах океанического дна. Экспедиции с применением подводных обитаемых аппаратов позволили детально описать гидротермальные постройки черных и белых “курильщиков”, сделать великолепные снимки и фильмы, благодаря которым каждый из нас может наблюдать это природное явление.

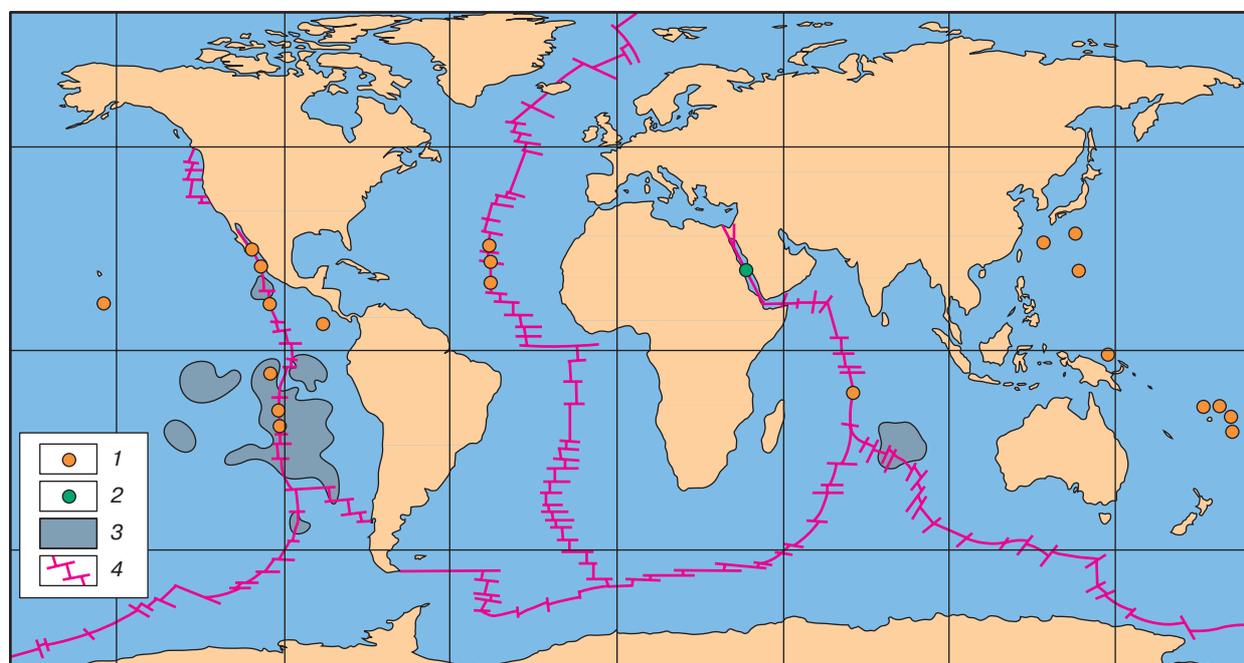
Гидротермы известны в океанических рифтах разного типа строения, находящихся как в начальной

стадии своего образования, так и в более зрелых, обладающих низкой, средней и высокой скоростью спрединга – расширения океанического дна (рис. 1). Рифтовые зоны океанов – это глубокие ущелья, располагающиеся вдоль осей срединно-океанических хребтов, они представляют собой дивергентные границы литосферных плит. Повышенный тепловой поток в рифтовых зонах связан с многочисленными, неглубоко залегающими магматическими очагами, из которых и происходят излияния базальтовой магмы, наращивающей океаническое дно. Подробнее о рифтовых зонах можно прочесть в статье [1].

Калифорнийский залив представляет собой самую молодую стадию зарождения океанического рифта, знаменующую собой раскол Северо-Американского континента, начавшийся 5 млн лет тому назад. За это время новообразованный рифт раскрывался со скоростью 6 см/год, в результате чего он и достиг ширины около 300 км. В 1986 году одна из впадин этого рифта – Гуаймас была детально изучена экспедицией Академии наук СССР на корабле “Академик М. Келдыш”.

Калифорнийский рифт обладает крутыми стенками, образовавшимися в результате разломов – сбросов, а самые молодые разломы возникли всего лишь 50–100 тыс. лет назад. Гидротермальное поле, исследованное с помощью наблюдений из подводных обитаемых аппаратов, приурочено к осевой, наиболее трещиноватой части дна рифта и состоит из многочисленных конусовидных построек высо-

той от первых метров до 50–70 м и диаметром в основании до первых сотен метров, но чаще всего в 20–30 м. Морфология конусов различная. Встречаются крутые конусы с острой вершиной; пологие, с башенкой в верхней части; конусы, меняющие свою крутизну, и т.д. На вершине конусов находится сооружение, напоминающее каменную трубу, из отверстия которой вырывается черная взвесь, похожая на клубы густого дыма, поэтому такие образования и назвали “черными курильщиками”. У действующих “курильщиков” температура взвеси, выходящей из отверстий труб, достигала 320°C. Иногда вместо конусов с поверхности дна поднимаются вертикальные колонны высотой 10–25 м, на вершине которых находятся одна или несколько труб. На поверхности башен, колонн и конусов, сложенных шлакоподобным веществом, располагаются, как наросты на березе, бактериальные маты – скопления бактерий, прикрепленных к субстрату, и, кроме того, весьма необычные организмы – вестиментиферы в форме крупных и длинных (1,5–2 м) трубок, белого, красного и зеленого цветов, колышущихся при движении воды как щупальца животного (рис. 2). Эти организмы являются большими трубчатými червями *Riftia pachyptila*, верхняя часть которых окрашена в ярко-красный цвет, так называемый султан, а сама трубка обладает перламутрово-белой или зеленоватой окраской (рис. 3, б). Вокруг построек часто в изобилии распространены очень крупные (до 25 см в длину) матово-белые



**Рис. 1.** Распространение современных гидротермальных построек и металлоносных осадков в океанах: 1 – гидротермальные постройки и сульфидные руды, 2 – илы с сульфидами (стратиформные залежи), 3 – металлоносные осадки (по данным Дж.П. Кеннета и С.Г. Краснова), 4 – рифтовые зоны

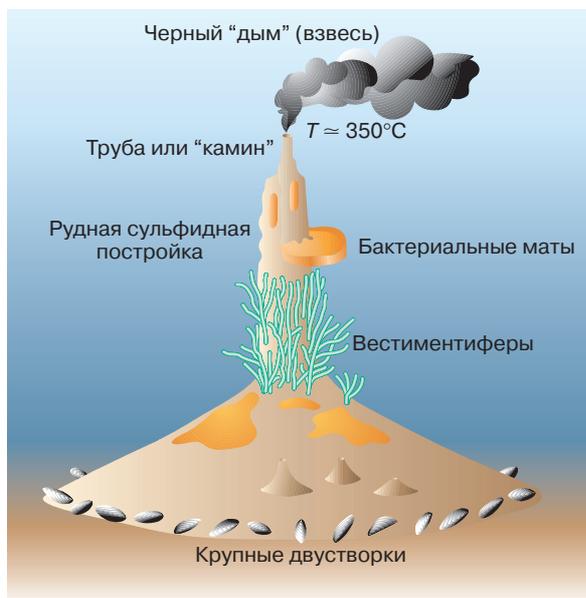


Рис. 2. Схема строения "черного курильщика"

раковины двустворчатых моллюсков – калиптоген (*Calyptogena magnifica*), а также кольчатые черви *Alvinella pompejana*, названные помпейскими, потому что они непрерывно посыпаются, как пеплом, частицами серы из взвеси дымов "черных курильщиков" (рис. 3, а).

Таким образом, гидротермальные постройки на дне океанских рифтов образуют неповторимым сообществом организмов, приспособившихся к жизни в экстремальных условиях высоких температур и большой концентрации густой взвеси, поступающей из труб на вершинах построек.

Подводные съемки позволили увидеть фантастическую картину многочисленных "черных курильщиков", из труб которых клубами поднимается густой "дым" взвеси, а на поверхности труб и конусов видны белоснежные бактериальные маты и бело-красные извивающиеся трубы вестиментифер. Те формы построек, которые видны на поверхности океанического дна, представляют собой лишь небольшую часть гидротермальной системы, находящейся ниже его уровня. Морские воды, проникая по трещинам и разломам формирующейся рифтовой

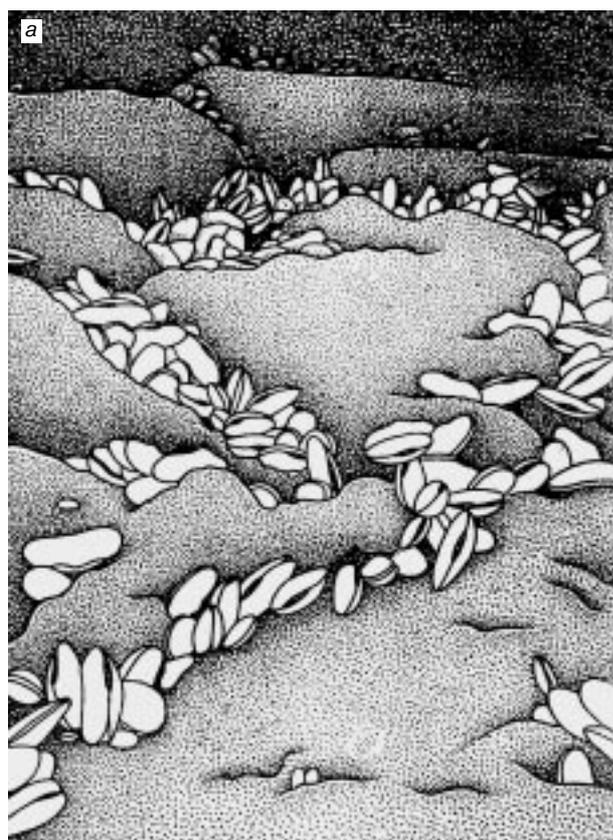


Рис. 3. Галапагосский рифт. Цепочки крупных двустворок *Calyptogena magnifica* (а), расположенных вдоль трещин, из которых просачивается разбавленный гидротермальный рудоносный раствор. Скопление гигантских понофоров *Riftia pachyptila* (вестиментифер) на стенке "черного курильщика". Видны крабы, модииолы и рыбы (б) (по данным Л. Лобье)

зоны в литифицированные осадки и базальты океанической коры на многие сотни метров, нагреваются и обогащаются химическими, в том числе рудными элементами. Такие гидротермальные растворы уже активно взаимодействуют с вмещающими породами, изменяя их и превращая в сульфидные руды.

Вся эта сложной формы колонна измененных пород превышает во многих случаях 0,5 км, то есть больше Останкинской телевизионной башни, а в ее центре находятся подводящие каналы, по которым циркулируют гидротермальные растворы, выходя на поверхность дна в виде труб “черных курильщиков” (см. рис. 2). Таким способом возникают мощные рудные залежи. Весьма поучительно, что в древних месторождениях медноколчеданных руд, например на Урале (Сибайское месторождение) или на Кипре и Ньюфаундленде, геологи находили окаменелые остатки вестиментифер и калиптоген. Но только после обнаружения современных “черных курильщиков” стало ясно, в каких условиях формировались медноколчеданные месторождения геологического прошлого.

#### ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОКЕАНА

Благодаря многолетним исследованиям американских и французских ученых (Дж. Эдмонта, К. фон Дамм, Ж. Мишара) химический состав воды “курильщиков” сейчас уже хорошо известен (табл. 1). По изотопному составу водорода и кислорода гидротермальных растворов было доказано, что единственный их источник – это океанская вода, просачивающаяся в трещины пород дна. Однако химический состав воды “курильщиков” существенно отличается от морской вследствие взаимодействия циркулирующей в трещинах воды с породами стенок трещин. Процессы такого взаимодействия были изучены экспериментально (в автоклавах при высоких температурах и давлениях) и теоретически (путем моделирования на ЭВМ).

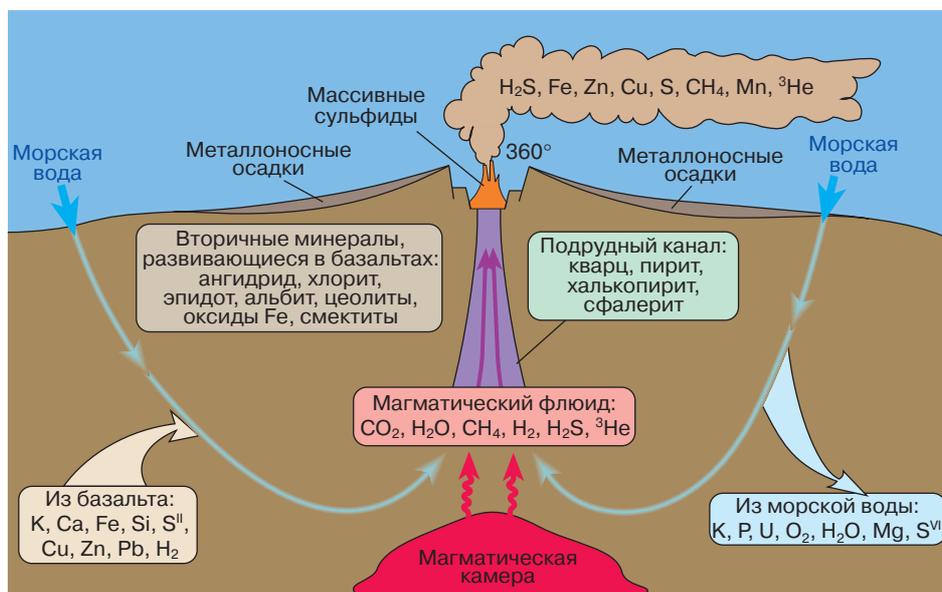
Данные химических анализов (табл. 1, колонки 3 и 4) показывают, что в большей части исследованных гидротермальных систем главные растворенные компоненты морской воды Cl и Na незначительно меняют свою концентрацию. Взаимодействие с базальтами приводит к практически полному удалению из морской воды Mg (с образованием хлорита и актинолита) и SO<sub>4</sub>, а также U и P. При этом первичные минералы базальтов разлагаются, и из них в воду переходят в значительных количествах Ca, K, SiO<sub>2</sub>, Fe, Mn, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и тяжелые металлы Zn, Cu, а также Pb, Ag, Au, Sb, Sr, CH<sub>4</sub> и He. Поведение K и Li более сложно – при низких температурах они связываются породой (в виде глинистых минералов – смектитов), а при высоких, наоборот, вымываются. В результате взаимодействия с породой морская вода, имевшая изначально нейтральную окислительную реакцию, преобразуется в кислый восстановительный рудообразующий раствор.

Таблица 1. Химический состав воды “курильщиков”

	Морская вода	Восточно-Тихоокеанское поднятие		Хребет Хуан-де-Фука	
		21° с.ш.	11° с.ш.	45° с.ш.	осевая гора
Температура, °С					
	2	273	354	262	299
рН (при 25°С)					
	7,8	3,8	3,1	2,8	4,4
Содержание, г/кг					
Cl	19,18	20,53	25,24	44,1	6,24
Na	10,67	11,72	12,67	16	3,4
SO <sub>4</sub>	2,68	–	–	–	–
Mg	1,293	–	–	–	–
Ca	0,409	0,834	2,152	4,369	0,409
K	0,383	1,009	1,075	2,295	0,273
SiO <sub>2</sub>	0,0096	1,172	1,166	1,442	0,811
CO <sub>2</sub>	0,101	0,252	–	–	12,543
Содержание, мг/кг					
H <sub>2</sub> S	–	225	279	63,8	613
Fe	–	48,6	579	916	0,67
Mn	–	55	161	233	7,8
Zn	–	2,6	0,33	34	0,144
Cu	–	0,0013	–	0,089	0,025
Pb	–	0,038	0,0056	0,203	0,021

Обогащение гидротермальных растворов “курильщиков” рудными металлами представляет наибольший интерес для геологии. Здесь воочию можно наблюдать, что высокотемпературные гидротермальные растворы способны переносить одновременно существенные количества металлов и двухвалентной серы. Это оказывается возможным за счет того, что в соленых растворах при температурах выше 300°С металлы переносятся в виде комплексных соединений с хлор-ионом (вида MeCl<sub>n</sub><sup>2-n</sup>), а S<sup>II</sup> – в молекулярной форме (H<sub>2</sub>S). Охлаждение таких растворов при излиянии в придонную воду сопровождается разрушением комплексных соединений, и сера тут же связывается с металлами, давая черные “дымы” и сульфидные руды. Температурные пределы устойчивости комплексов у разных металлов различны (Cu > Fe > Zn, Pb), что обуславливает возникновение температурной зональности океанских сульфидных руд (рис. 4).

Судьба серы, поступающей в гидротермальные системы в составе морской воды, до сих пор не до конца понятна. Нагревание морской воды до температур выше 200°С, по данным экспериментов, вызывает осаждение из нее ангидрита (CaSO<sub>4</sub>). Ангидрит такого происхождения в океанских базальтах долго не удавалось обнаружить – по-видимому, он вновь растворяется при остывании гидротермальных систем.



**Рис. 4.** Схема геохимических процессов в гидротермальной системе срединно-океанического хребта (по данным Д.В. Гричука). Показаны соединения, которые извлекаются из базальтов фильтрующейся морской водой, а также флюиды, поступающие в гидротермальную систему из магматической камеры, находящейся под рифтом срединно-океанического хребта

Только когда океанским бурением были вскрыты недра активных гидротермальных систем (скв. 504В в Коста-Риканском рифте, система Middle Valley на хребте Хуан-де-Фука), ангидрит стали находить в трещинах поднятых ядерных пород. Вместе с тем общий объем воды, проходящей через гидротермальные системы океана, настолько велик, что это должно было бы вызывать сильное заражение океанской коры серой, чего не наблюдается. Часть морского сульфата может восстанавливаться при реакции с базальтами до  $H_2S$  и затем удаляться через “курильщики”, однако изотопный состав сероводорода в “курильщиках” показывает, что “морская” сера составляет в них небольшую часть (10–30%), а преобладает вымытая из пород “магматическая” сера.

При исследовании нескольких гидротермальных систем было обнаружено, что соленость гидротермальных растворов в них существенно (в 2–3 раза) отличается от морской воды как в большую, так и в меньшую сторону (табл. 1, колонки 5 и 6). Сейчас доказано, что это следствие вскипания гидротермального раствора в недрах гидротермальной системы, сопровождающегося разделением пароводяной смеси на более минерализованный откипевший рассол и пар. Последний при охлаждении дает опресненный конденсат. Существенным оказалось то, что кипение сопровождается заметным обогащением откипевших растворов металлами (табл. 1, колонка 5). Таким образом, кипение в недрах гидротермальных систем повышает их рудогенерирующий потенциал. До последнего времени считалось, что

вскипание гидротермальных растворов вызывает отложение рудных металлов. В гидротермах океана эффект кипения оказался противоположным — металлы вымываются из пород более интенсивно.

Уже в самых первых подводных исследованиях было обнаружено деление “курильщиков” на черные и белые. Разница окрасок “дымов” вызвана разным составом взвеси, образующейся при излиянии гидротермальных растворов в толщу придонных вод. У “черных курильщиков” дым состоит из пирротина и аморфного кремнезема с примесью сульфидов Zn и Cu, а у “белых” — из аморфного кремнезема, ангидрита и барита.

“Черным курильщикам” свойственны большие дебиты (несколько кг/с) и высокие температуры (до 350–365°C), тогда как “белые” характеризуются относительно вялой разгрузкой и температурами не выше 330°C. На начальном этапе исследований предполагалось, что причина этого различия — температурные условия в недрах гидротермальной системы, приводящие к разному составу гидротермальных растворов. Однако оказалось, что по макрокомпонентам химического состава растворов черные и белые “курильщики” практически одинаковы. “Курильщики” обоих типов часто наблюдаются в пределах одной и той же гидротермальной постройки с общим источником питания. Более того, описаны случаи, когда при опробовании с подводного обитаемого аппарата манипулятор отламывал макушку жерла “белого курильщика”, после чего дебит жерла резко возрастал и источник переходил в состояние “черного курильщика”. Это показало, что перво-

причина различия – разный характер разгрузки гидротермального раствора. При бурной разгрузке охлаждение начинается с момента излияния и вся рудная нагрузка доходит до устья “курильщика”. При медленной разгрузке гидротермальный раствор успевает немного остыть и перемешаться с морской водой еще в теле пористой рудной постройки. При этом значительная часть рудной нагрузки оседает внутри постройки, не доходя до устья источника.

“Черным курильщикам” свойственна очень низкая эффективность рудообразования – по некоторым оценкам, до 95–98% металлов уходит в “дым” и рассеивается в водной толще океана. У крупных построек, обнаруженных в системе подводного хребта Хуан-де-Фука и на Срединно-Атлантическом хребте, характер разгрузки оказался существенно иным – у них преобладает рассеянная разгрузка со всей поверхности постройки (визуально наблюдавшаяся в виде дрожания воды или муара). Эффективность рудоотложения в этом случае резко увеличивается. Постройка растет как бы изнутри, за счет заполнения рудным веществом пор и каналов. Это приводит, по-видимому, к частым гидроразрывам тела постройки, сопровождающимся брекчированием руд. Такое брекчирование весьма характерно и для древних колчеданных руд, оно часто наблюдается в месторождениях уральского и кипрского типов.

Гидротермальные образования в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, характеризующихся низкой, средней и высокой скоростью спрединга, в целом похожи, хотя существуют и некоторые различия, особенно в структурной приуроченности. Там, где скорость спрединга высокая, гидротермальные образования располагаются внутри осевого, наиболее молодого трога, находящегося в центральной части рифта, причем они связаны с открытыми раздвиговыми трещинами, так называемыми гьярами. Если скорость спрединга низкая и средняя, гидротермальные постройки могут располагаться и вне трещин, например в Срединно-Атлантическом хребте.

### **ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

Наблюдая действие “черных курильщиков” в океанических рифтах в настоящее время, уместно поставить вопрос о том, как гидротермальная активность проявлялась в прошлом, хотя бы и совсем недавнем. Судить об этом можно по колонкам (керну) буровых скважин, проникшим в осадочную толщу и базальты второго слоя океанической коры на десятки и сотни метров, так как металлоносные слои в общей толще осадков будут отвечать периодам гидротермальной активности. В основу такого выделения положено содержание железа, избыточного по отношению к его фоновому значению.

Западнее Восточно-Тихоокеанского хребта проведено бурение, вскрывшее осадки, накопившиеся за последние 40 млн лет, то есть начиная с позднего эоцена, согласно современной стратиграфической шкале. В этом интервале установлено шесть периодов усиления гидротермальной активности: 1) 38–36 млн лет тому назад, 2) 25–24, 3) 18–17, 4) 14, 5) 9–8 и 6) 5 млн лет тому назад, выразившиеся максимумами накопления железа. Эти периоды усиления гидротермальной активности чередовались с периодами ее затухания. При этом не была установлена какая-либо корреляция с усилением скорости спрединга. Однако ясно, что после интенсивных излияний базальтовых лав в рифтах и исчерпания магматических очагов наступал период некоторого покоя, во время которого и происходил гидротермальный процесс, фиксируемый слоями МО в осадках.

В северной части Тихого океана такие же исследования выявили совпадение четырех возрастных интервалов гидротермальной активности, установленных и для южной части Тихого океана. В Атлантическом океане, в его северной части, бурением были охвачены интервалы от 130 до 70 млн лет и от 15 млн лет до настоящего времени. Корреляции с Тихим океаном не установлено, зато выявлено хорошее соответствие между увеличением скорости спрединга и проявлением гидротермальной активности. В Индийском океане примерно такая же картина.

Таким образом, гидротермальная деятельность в рифтовых зонах океанов, судя по распространению МО в разрезах осадочных толщ, протекала не равномерно, а периодически, то усиливаясь, то затухая, что в целом связано со скоростью тектонического раскрытия рифтов, то есть со скоростью спрединга.

### **ПРОИСХОЖДЕНИЕ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА В “ЧЕРНЫХ КУРИЛЬЩИКАХ”**

Откуда берется рудное вещество в гидротермах? Несомненно, что решающую роль играют вулканические породы – базальты океанического дна и процессы извержения базальтов, которые время от времени происходят в рифтовых зонах, наращивая океаническую кору. Как возникают собственно гидротермальные растворы – флюиды? Сама базальтовая магма и базальты содержат крайне мало воды, не более 0,1 вес. %.

Следовательно, основным источником гидротермальных растворов является вода океанов, просачивающаяся в глубь океанической коры, сложенной базальтами. Для такого процесса вполне достаточно даже мелких (до 3 мм шириной) трещин, хотя широко развиты и более крупные, зияющие трещины – гьяры (гьяу – исл.). Подобные трещины могут рассекать всю океаническую кору в осевых зонах срединно-океанических хребтов на глубины в первые км. Так, для Исландии достоверно установлено просачивание океанских вод до 3 км. Факт глубокого проникновения в океаническую

кору воды устанавливается и по изменениям — метаморфизму древних аналогов современной океанической коры — офиолитовых комплексов, в которых влияние воды на процессы изменения пород затрагивает слой габбро, залегающий под базальтами, то есть на глубинах в несколько км.

На циркуляцию воды влияет повышенный тепловой поток в рифтовых зонах, способный вызвать ее конвективное перемещение. Неустойчивое состояние воды, когда увеличивается ее объем, достигается при разных температурах в зависимости от давления. Так, при давлении в 250 бар критическая температура равна 375°C, а при  $P = 700$  бар — примерно 500°C. Такие температуры на глубине делают воду неустойчивой, и она должна устремляться к поверхности, в сторону понижения градиента давления.

Образование трещиноватых зон в базальтах, излившихся на океанское дно, — процесс весьма непростой, так как более молодые лавовые покровы запечатывают более древние, в которых развились трещины. Породы, располагающиеся непосредственно над близповерхностными магматическими очагами в рифтах, глубина залегания которых около 2–4 км, долгое время остаются горячими, и если до их уровня просачивается вода, то, быстро охлаждаясь и уплотняясь, они растрескиваются, что облегчает дальнейшее проникновение воды.

Надочаговая область, по-видимому, является тем местом, где океанская вода, будучи сильно нагретой, активно взаимодействует с породами, извлекая из них ряд элементов. При этом вблизи осевой зоны рифта наблюдаются восходящие струи флюидов, а по его периферии — нисходящие. Под срединно-океаническими хребтами с высокой скоростью спрединга типа Восточно-Тихоокеанского поднятия магматические очаги, залегающие в 2–4 км от поверхности дна, установлены геофизическими методами, тогда как под низкоспрединовыми хребтами магматические очаги пока не выявлены, возможно, в связи с тем, что очаги здесь появляются периодически, а не существуют постоянно и локализованы только под узкой осевой зоной рифта. Температура гидротермальных растворов на выходе из “черных курильщиков” в Восточно-Тихоокеанском поднятии в районе 21° с.ш. находится в пределах от 350 до 400°C. Когда вода поднимается к поверхности океанского дна и давление быстро падает, тогда из высокотемпературных рудоносных растворов начинают выпадать некоторые химические элементы и уже на выходе из отверстия “черного курильщика” гидротермальный раствор будет относительно низкотемпературным и содержание рудных компонентов в нем будет ниже, чем в высокотемпературном. В начале 90-х годов в Новогвинейском море российской экспедицией были обнаружены гидротермы, в составе пород которых отмечено повышенное содержание золота. Возможно, это связано с тем, что гидротермы развивались в обстановке так называемого задугового спрединга,

то есть в окраинном море, и поэтому на состав гидротерм влияла континентальная кора, подвергнувшаяся растяжению.

## МЕТАЛЛОНОСНЫЕ ОСАДКИ

К металлоносным осадкам (МО) относятся в основном рыхлые, неконсолидированные глубоко-водные отложения, реже твердые корки, содержащие высокие концентрации Fe и Mn (по сравнению с фоновыми) и низкие Al и Ti. К МО обычно относят те из них, которые содержат более 10% железа в их абиогенной части, а осадки с содержанием Fe свыше 30% называются рудоносными.

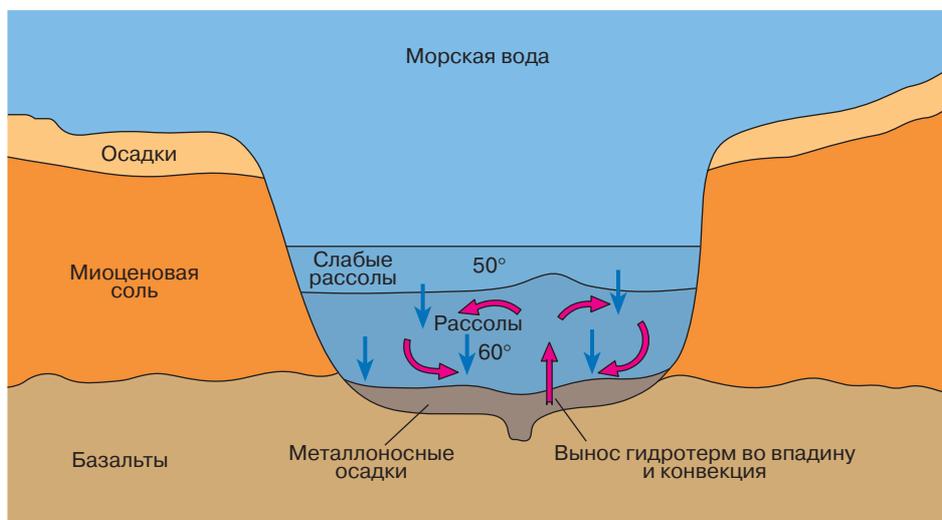
Экспедиция “Челленджера” в 1873–1876 годах первой обнаружила МО на Восточно-Тихоокеанском поднятии. В 60-х годах нашего столетия связь гидротермальной активности и МО была отмечена Н.С. Скорняковой и К.К. Зеленовым и несколько позже К. Бострёмом, М. Петерсоном и Э. Бонатти. Затем начался период интенсивного изучения МО и гидротерм на дне океанов, в котором принимали участие исследователи многих стран, в первую очередь США, СССР, Германии, Италии, Франции, Австралии. В результате этих работ были обнаружены МО в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия, в Срединно-Атлантическом и Индийском хребтах, в Новогвинейском море, в рифте Красного моря, где установлено более 20 впадин с МО и горячими рассолами (см. рис. 1).

Наиболее крупное поле современных МО находится в юго-восточной части Тихого океана и занимает площадь в 10 млн км<sup>2</sup> по обе стороны Восточно-Тихоокеанского поднятия. Источником МО там служат разгружающиеся рудоносные растворы из гидротермальных построек. В Индийском океане МО развиты в северо-западной его части там, где смыкаются три литосферные плиты: Африканская, Индо-Австралийская и Антарктическая. Такие места называются точками тройного сочленения.

МО к настоящему времени обнаружены также в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта примерно на 25° северной широты и известны под названием ТАГ и МАРК или Снейк и Пит. Однако наиболее изученными являются МО в рифтовых впадинах молодого Красного моря, образовавшегося всего лишь 5–3 млн лет тому назад.

МО нередко представляют собой обыкновенные пелагические илы, обогащенные в различной степени рудным веществом, поступающим в илы при разносе океанскими водами рудной взвеси из гидротермальных построек. Рудное вещество в МО представлено коллоидными или плохо выраженными минералами Fe и Mn. Шире всего распространены тонкодисперсные частицы оксигидрооксидов Fe и Mn, встречаются сульфиды Fe, Cu и Zn. Диаметр частиц составляет обычно 3 мкм.

Исключительный интерес для выяснения условий образования МО представляют современные



**Рис. 5.** Формирование металлоносных осадков во впадине Атлантис II Красного моря (по данным С.Г. Краснова)

процессы во впадине Атлантис II в рифтовой зоне Красного моря, где сейчас формируются рудоносные (сульфидоносные) осадки (рис. 5). Стенки узкого Красноморского рифта сложены в своей нижней части позднемиоценовой (15–10 млн лет) солью мощностью до 7,5 км. Соль растворяется морской водой и скапливается в виде тяжелых рассолов на дне рифта, из которого выходят гидротермальные рудоносные растворы, конвектирующие в толще рассолов. Температура гидротерм у дна составляет 60°C. Рудное вещество в гидротермальных струях не выходит за верхний уровень тяжелых рассолов и осаждается на дно рифта в виде металлоносных сульфидных осадков. При этом рудное вещество практически полностью не выходит за пределы массы рассолов и, не окисляясь, накапливается в виде сульфидов, поскольку рассолы обладают восстановительным характером. Так образуются слоистые или стратиформные залежи колчеданных руд, хорошо известные нам из геологического прошлого. МО впадины Атлантис II являются современным рудным месторождением, и, если бы не экологические проблемы, его можно было бы пустить в эксплуатацию. По данным новейших исследований, за последние 3600 лет во впадине Атлантис II накапливалось железа 1780 т/год, марганца 742, цинка 110, меди 23 т/год. Нетрудно представить, какой огромный объем руд мог сформироваться только в одной этой впадине, протягивающейся вдоль простирания оси спрединга Красного моря всего лишь на 14 км при ширине 5 км.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие в конце 70-х годов нашего века в рифтовых зонах дна океанов горячих источников, выносящих огромное количество рудного вещества,

которое состоит из сульфидов Fe, Cu и Zn, позволило геологам воочию увидеть, каким образом формируются рудные месторождения. “Черные курильщики” распространены в большинстве рифтовых зон океанов. Но рудные залежи образуются не только в гидротермальных постройках. Взвесь, содержащая рудные компоненты, разносится течениями на большое расстояние от “курильщиков”, которая, осаждаясь, формирует металлоносные осадки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хаин В.Е. Современная геология: Проблемы и перспективы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 1. С. 66–73.
2. Богданов Ю.А., Гуревич Е.Г., Бутузова Г.Ю. и др. Металлоносные осадки Красного моря. М.: Наука, 1986. 288 с.
3. Гричук Д.В. Рудные элементы в гидротермальной системе срединно-океанического хребта // Геохимия. 1996. № 7. С. 650–672.
4. Гуревич Е.Г. Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Науч. мир, 1998. 338 с.
5. Краснов С.Г. Крупные сульфидные залежи в океане // Природа. 1995. № 2. С. 3–14.
6. Лисицин А.П., Богданов Ю.А., Гуревич Е.Г. Гидротермальные образования рифтовых зон океана. М.: Наука, 1990. 255 с.

\* \* \*

Николай Владимирович Короновский, профессор, зав. кафедрой динамической геологии геологического факультета МГУ, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – вулканизм, тектоника и региональная геология Альпийского пояса. Автор учебников “Краткий курс региональной геологии СССР” (1976, 1984), “Основы геологии” (соавтор А.Ф. Якушова), нескольких монографий и 235 статей по различным вопросам геологии.