

Исследования гидротермальных полей на дне Мирового океана с применением глубоководных обитаемых аппаратов «Мир»

А.М.САГАЛЕВИЧ (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П.Ширшова Российской академии наук (ФГБУН ИО РАН); 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36),
В.Д.САГАЛЕВИЧ (Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова; 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские Горы)

В данной статье рассматриваются вопросы методики геологических исследований гидротермальных полей на дне океана с применением ГОА «Мир», вопросы преимущества этих технических средств перед другими средствами изучения океана. Дается краткое описание устройства ГОА «Мир», их преимуществ перед зарубежными аналогами. Приводятся результаты геологических исследований гидротермальных полей различных типов в разных районах Мирового океана. Даются количественные оценки рудообразования и метановых сочений в некоторых районах исследований, проводившихся с помощью ГОА «Мир».

Ключевые слова: ГОА «Мир-1», «Мир-2», гидротермальные поля, методики геологических исследований, спрединг, рифтовые зоны, плюмы.

Сагалевич Анатолий Михайлович
доктор технический наук



sagalev1@yandex.ru

Сагалевич Вячеслав Дмитриевич

slavsag@gmail.com

The study of hydrothermal fields on ocean bottom with deep submersibles «Mir»

A.M.SAGALEVICH (Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences),
V.D.SAGALEVICH (Lomonosov Moscow State University)

In this article, the methods of geological research of hydrothermal fields on the ocean floor with the use of deep manned submersibles Mir-1 and Mir-2 are considered. A brief description of the Mir submersibles and their advantages over foreign counterparts is given. The results of geological studies of hydrothermal fields of various types in different regions of the World Ocean are presented. Quantitative estimations of ore formation and methane seeps in some areas of Mirs research are given.

Key words: Deep manned submersibles «Mir-1», «Mir-2», hydrothermal fields, methods of geological research, spreading, rift zones, plumes.

Развитие знаний об океане и, в частности, о его геологии во многом связано с внедрением в практику океанологических исследований принципиально новых технических средств и методов изучения океана.

Применение широкого комплекса геолого-геофизических методов исследований, позволившего собрать огромное количество научных данных о рельефе дна океана, закономерностях строения атмосферы и океанической коры, магнитных и гравиметрических полях, тепловом обмене между верхними слоями осадков и природным водным слоем и др.,

произвело в 1950–1960-х гг. подлинную революцию в науках о Земле. Американские учёные Р.Дитц и Г.Меннард в 1953 г. опубликовали результаты картирования дна Тихого океана с помощью эхолота и методов сейсморазведки: на карту легли крупные протяжённые структуры, возвышающиеся над уровнем океанского ложа на несколько сотен метров и изобилующие разломами и сбросовыми уступами.

На основании результатов многолетних геолого-геофизических исследований американские учёные М.Юинг и Б.Хизен в 1956 г. сделали заключение,

что дно океана пересекают системы срединно-океанических хребтов, которые опоясывают земной шар, имеют общую протяжённость 60 000 км и возвышаются над ложем океана на 1–3 км [17]. Таким образом, были открыты глобальная система океанических рифтов и противостоящая ей система глубоководных желобов и сопряжённых с ней вулканических дуг. На базе этих открытий разработана теория тектоники литосферных плит, позволившая связать воедино процессы, протекающие в верхней оболочке земли. Эта теория получила название Вегенеровской революции в честь геофизика Альфреда Вегенера, который ещё в начале XX в. высказывал предположение о движении континентов. Согласно этой теории, твёрдая оболочка Земли – литосфера – разбита на несколько плит, которые подстилает вязкая астеносфера. В океанических рифтах блоки литосферы – литосферные плиты – раздвигаются, освобождая место для внедрения магматических расплавов, поднимающихся к поверхности из недр и формирующих новую океаническую кору. Причём интенсивность образования геологических структур определяется скоростью раздвижения плит (спрединга), составляющей от 1–2 см на Срединно-Атлантическом (САХ) и других низко-спрединговых хребтах до 18 см на Восточно-Тихоокеанском поднятии (ВТП).

Принципиально новый этап в геологических исследованиях дна океана начался с внедрением в практику изучения океана глубоководных обитаемых аппаратов (ГОО), позволивших исследователю максимально приближаться к объекту изучения и проводить непосредственные визуальные наблюдения донных геологических структур через иллюминаторы аппаратов. Обитаемые аппараты открыли учёным новые возможности в плане достоверности и детальности исследований.

Первые глубоководные научные погружения относятся к середине 1930-х гг., когда Вильям Биб и Отис Бартон погрузились в батисфере на тросе на глубину 923 м [11]. В процессе погружений проводились биологические наблюдения. Следующим этапом была эра батискафов. Швейцарский учёный Огюст Пикар¹ по принципу стратостата изобрёл «подводный стратостат» – батискаф, с той разницей, что в первом лёгкий газ (гелий, водород) создаёт стратостату подъёмную силу, а во втором – лёгкая жидкость (бензин) обеспечивает плавучесть батискафа. 23 января 1960 г. на батискафе «Триест» совершилось погружение во впадину Челленджер в Марианском желобе на глубину 10 916 м. Членами экипажа были

сын Огюста Жак Пикар и офицер ВМФ США Дон Уолш [26]. Ранее О.Пикар создал батискафы «ФНРС-2 и 3» (максимальная глубина 4000 м), а во Франции Анри Делёз – батискаф «Архимед» (11 000 м). Однако батискафы были несколько неудобны в эксплуатации из-за громоздкости и маломаневренности. Большие габариты были обусловлены наличием огромного металлического поплавка длиной 18 м, заполняемого 250–300 т бензина. К этому добавлялось 16 т стальной дробы, сбрасываемой на дно для обеспечения всплытия. Батискафы доставлялись к месту проведения работ путём буксировки.

В 1963 г. утонула атомная подводная лодка (АПЛ) «Трешер» на глубине 2800 м. В то время, кроме батискафа «Триест», искать её останки было нечем. Однако после нескольких погружений батискафа стало ясно, что для проведения поисковых и детальных технических операций на дне «Триест» не пригоден. В начале 1960-х гг. в США был изобретён глубоководный плавучий материал – синтактик, представляющий композит из стеклянных микросфер и эпоксидной смолы. Потом в течение нескольких лет в США создали десятки аппаратов на базе синтактика. Вновь построенные аппараты (рис. 1) были в 3–4 раза меньше батискафов и в 15–20 раз легче [11].

В то же время возникли трудности при поисках АПЛ «Трешер» с помощью «Триеста». Стало ясно, что необходимо мобильное и эффективное средство для осуществления поиска лежащих на дне объектов. В Океанографическом Институте Скриппса (США) был создан первый глубоководный буксируемый аппарат «Deep tow», который представлял собой небольшую платформу, оборудованную локатором бокового обзора, фотосистемой и набором гидрофизических датчиков и, буксируемую на кабеле вблизи дна – от 5 до 100 м, в зависимости от размеров искомого объекта.

Эти две инновации в дальнейшем сыграли большую роль не только в решении специальных задач ВМФ, но и в научных исследованиях океана. Исследовательский комплекс «буксируемый и обитаемый аппарат» до сих пор остаётся наиболее эффективной комбинацией технических средств, способных решить практически любую научную или прикладную задачу. Учитывая то, что ГОО имеют ограниченный энергетический ресурс и небольшую подводную скорость, осуществление поиска объектов и явлений на дне с их помощью нерационально. Поэтому принята методика поиска объектов на дне с помощью буксируемых аппаратов, а затем проведение детальных исследований или точных технических операций с применением ГОО. Именно благодаря применению такой методики было сделано одно из важнейших открытий на дне океана – гидротермальные поля.

¹Огюст Пикар летал в стратосферу и достиг рекордной для тех времён высоты 23 000 м (1934 г.).

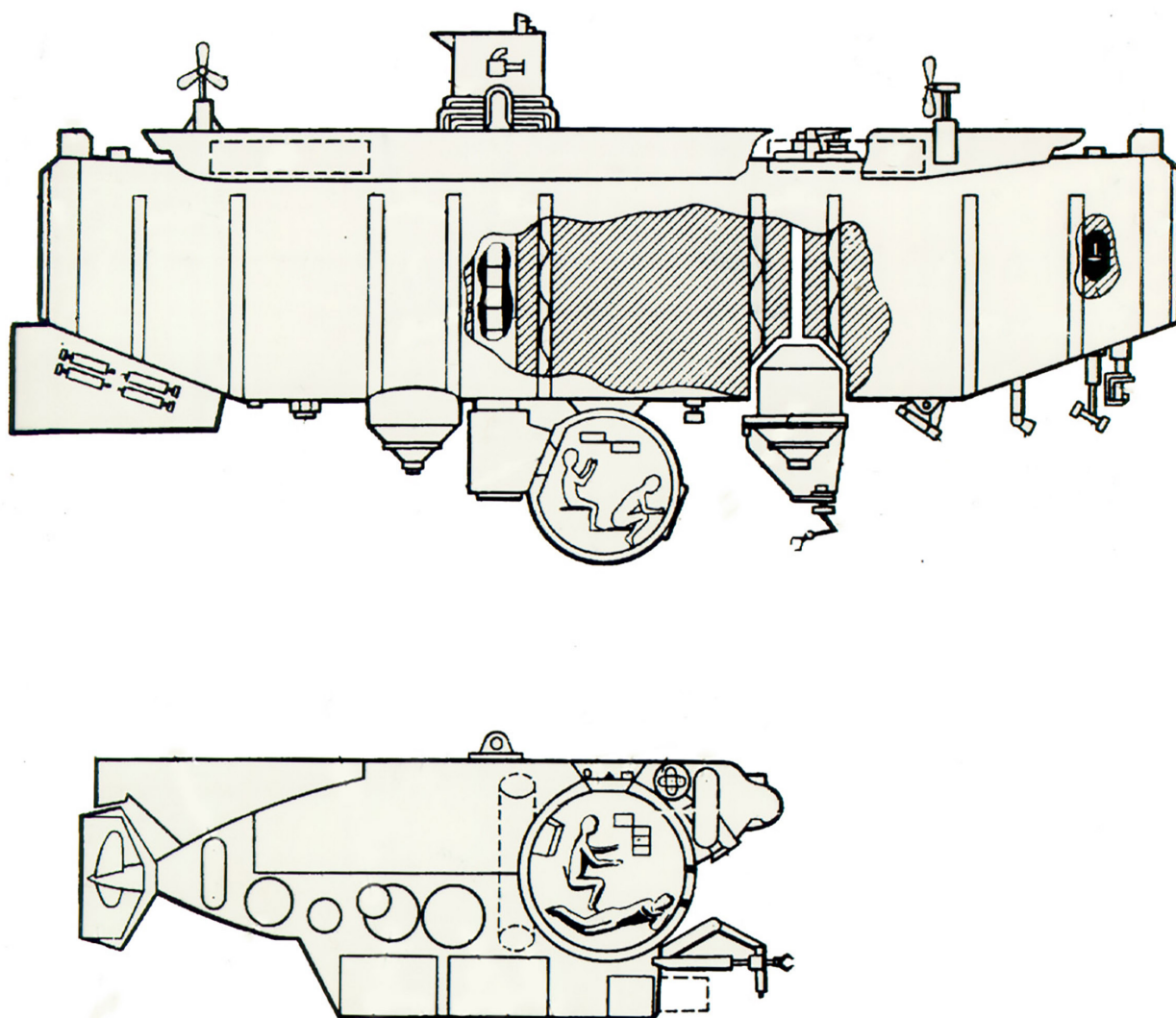


Рис. 1. Батискаф и современный ГОА (сравнение габаритов)

Открытие гидротермальных полей. Гидротермальные проявления на дне океана обнаружили ещё в конце XIX в. во время экспедиции на судне «Челленджер» (1873–1876 гг.). Тогда на Восточно-Тихоокеанском поднятии (ВТП) были открыты донные осадки с необычно высоким содержанием железа. Позднее, в 1940-х гг., в том же районе со дна были подняты осадки с высокой концентрацией целого ряда металлов [25]. В 1972 г. Институт океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР начал проводить регулярные исследования в районе ВТП, а также в Красном море. Немецкие научно-исследовательские суда (НИС) «Вальдивия», «Нереус», американские «Атлантис II» и «Чейн» также работали в Красном море, где в донных впадинах были обнаружены горячие рассолы высокой плотности, а на дне – осадки с высо-

ким содержанием металлов, названные металлоносными [18]. Учёные склонялись к тому, что такая высокая концентрация металлов в осадках возможна только в результате выходов гидротермальных вод из глубинных слоёв земной коры. Главная ставка в поисках гидротермальных излияний была сделана на глубоководные обитаемые аппараты. Для проведения исследований выбрали несколько «горячих точек». Первая крупная экспедиция с применением трёх обитаемых аппаратов – «Алвин» (США), «Сьяна» и батискаф «Архимед» (Франция) – состоялась в 1973–1974 гг. на Срединно-Атлантический хребт (37°с.ш.) в район Азорских островов (проект «Фамус») [8]. В этой экспедиции учёные через иллюминаторы аппаратов впервые увидели как устроены океанические рифты, исследовали формы лавовых

Глубоководные обитаемые аппараты 1980-х гг. с рабочей глубиной 6000 м

ГОВА	Страна	Год постройки	Рабочая глубина
Наутил	Франция	1985	6000
Си Клиф	США	1986 (выведен из эксплуатации в 1998 г.)	6000
Мир-1 Мир-2	СССР (Россия)	1987 1987	6000 6000
Шинкай 6.5	Япония	1989	6500

излияний и др. Однако самих гидротермальных излияний не обнаружили. После этой экспедиции было высказано мнение о том, что выходы гидротермальных флюидов наиболее вероятны в районах с высокой скоростью спрединга, где процесс раздвижения литосферных плит должен сопровождаться большим выделением тепла.

В 1976 г. проводились исследования с применением глубоководного буксируемого аппарата «Ангус» (США, Вудсхольский океанографический институт) в районе Галапагосского рифта, оборудованного фотокамерой с импульсным осветителем и температурным датчиком. При первой же буксировке вблизи дна была измерена повышенная температура, которая держалась на высоком уровне довольно долго. После подъёма «Ангуса» на борт судна проявили фотопленку, на которой были сняты необычные животные – большой величины двухстворчатые моллюски длиной до 16 см. Это оказались неизвестные ранее калиптогены. В феврале 1977 г. в исследуемый район пришло судно «Атлантис II» с ГОВА «Алвин» на борту. Была проведена серия погружений «Алвина», во время которой учёные наблюдали «сказочную» картину гидротермальных излияний на дне. Позже их назвали «розовым садом». Следующим этапом стало открытие высокотемпературных источников в виде «чёрных курильщиков» (21°с.ш.) в экспедиции «Суатех», в которой применялись ГОВА «Алвин» и «Суана» [14]. Здесь были открыты выходы флюидов с температурой 300°–350°С в виде чёрного дыма из сульфидных труб, а также новый вид гидротермальных животных – вестиментифер – длинных (до 1,5 м) червей, наполненных кровью, убежищем которых являются белые патрубки. По наблюдениям одного из авторов данной статьи при погружениях «Миров»: «Вестиментиферы высовывают из трубок красные головки, и издали их поселения смотрятся как лужок с тюльпанами, но при приближении к ним ма-

нипулятора красные головки прячутся внутрь». На самом деле в первых экспедициях на гидротермальные поля было сделано одно из величайших открытий в океане: был открыт хемосинтез – рождение жизни и её существование при полном отсутствии солнечного света за счёт окисления восстановленных соединений серы хемоавтотрофными бактериями. Немного позже, когда были открыты сочтения метана на дне, около которых обнаружили поселения бактерий в виде бактериальных матов, а также погонофор, актиний и других животных, было установлено существование метанотрофии – окисления метана метанотрофными бактериями [5].

Открытие гидротермальных полей сподвигло учёных и инженеров-океанологов ведущих океанологических держав мира подумать о создании ГОВА с глубиной погружения 6000 м, которые позволяли бы погружаться на 98% площади Мирового океана. В 1980-е гг. в ведущих странах мира было создано пять ГОВА с глубиной погружения 6000 м и более (см. таблицу). Именно с вводом в строй шеститысячников началось интенсивное изучение гидротермальных полей, так как до этого лишь два аппарата в мире, не считая батискафов «Триест» и «Архимед», могли погружаться на глубины более 2000 м, на которых расположено большинство гидротермальных полей: «Алвин» (4000 м, США) и «Сьяна» (3000 м, Франция). Необходимо отметить, что почти 10 лет после открытия гидротермальных полей существовало твёрдое мнение, что горячие источники на дне океана могут быть только в районах с высокой скоростью спрединга.

Лишь в 1985 г. с борта судна «Researcher» в районе Срединно-Атлантического хребта на 26°с.ш. были измерены высокие температуры в придонном слое и подняты образцы гидротермально изменённых пород. В 1986 г. судно «Атлантис II» с экспедицией, возглавляемой Питером Рона, пришло в этот

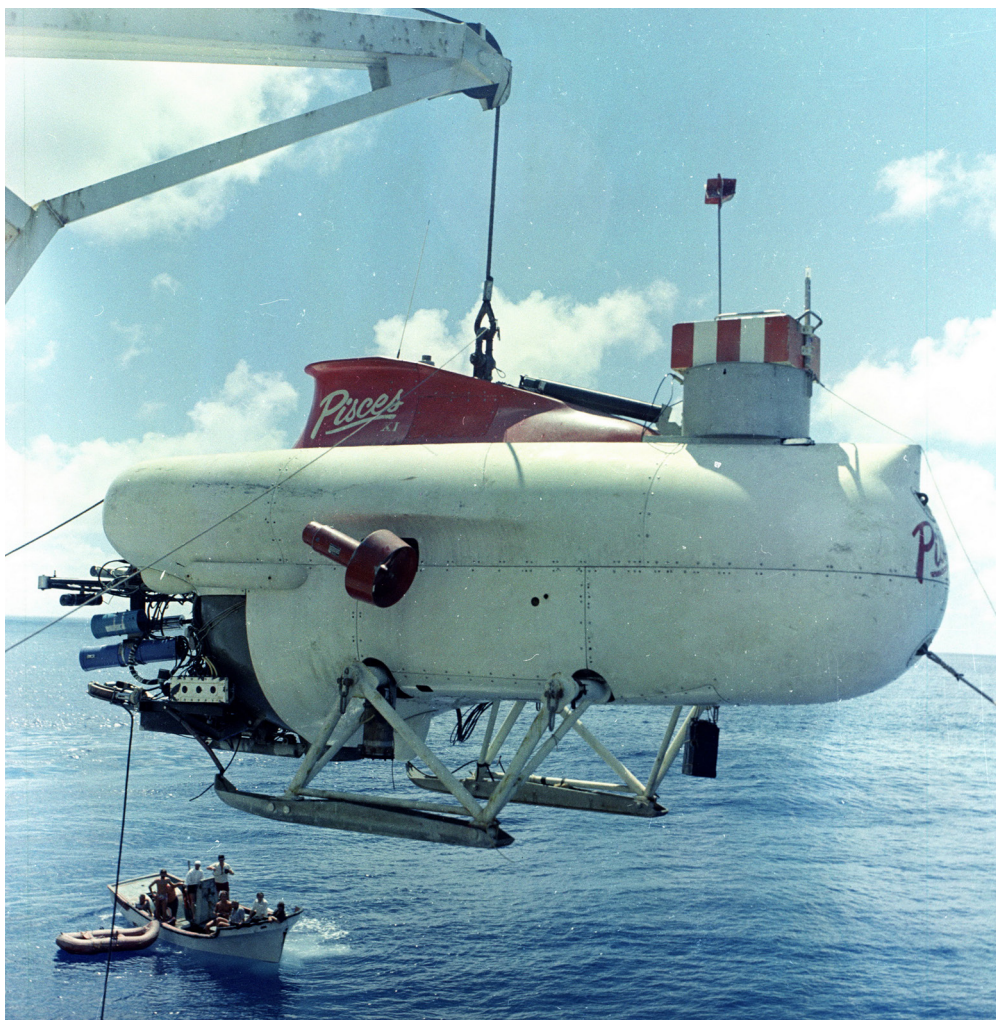


Рис. 2. ГОА «Пайсис XI»

район. ГОА «Алвин» сделал несколько погружений. Учёные обнаружили высокую гидротермальную активность на глубине 3600 м в виде мощных сульфидных построек, большого количества чёрных курильщиков, обширных роев креветок, заполнявших практически всё пространство между чёрными дымами. Открытие Питера Рона стало очень важным, так как оно показало, что гидротермальные поля могут существовать при любой скорости спрединга. В течение нескольких последующих лет на САХ была открыта целая серия гидротермальных полей.

Новое направление в исследованиях океана в ИО РАН. В нашей стране планомерные научные исследования гидротермальных полей начались с введением в практику изучения океанов глубоководных обитаемых аппаратов «Пайсис VII» и «Пайсис XI» с рабочей глубиной 2000 м, приобретённых в Канаде

в 1975 и в 1976 гг., соответственно (рис. 2). С внедрением «Пайсисов» институт океанологии вышел на мировой уровень проведения глубоководных исследований океана. В 1980-е гг. были выполнены работы в Красном море, где «Пайсис XI» впервые в мире погружался в горячие рассолы донных впадин Атлантик и Вальдивия [24]. В 1985–1986 гг. оба «Пайсиса» проводили глубоководные исследования на гидротермальных полях хр. Хуан де Фука и Гуаймас (Калифорнийский залив), а также на метановом сипе в Охотском море – в районе о. Парамушир. В этих экспедициях наши учёные впервые увидели через иллюминаторы аппаратов чёрные дымы, журчащие воды, поселения бактериальных матов на метановых сочениях. С вводом в строй ГОА «Мир-1» и «Мир-2» (глубина 6000 м) в 1987 г. российским учёным стали доступны все районы Мирового



Рис. 3. ГОА «Мир-1» и «Мир-2» на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш»

океана с гидротермальными полями (рис. 3). В течение двух десятилетий «Миры» работали на 23 гидротермальных полях Мирового океана (рис. 4), причём на некоторых из них неоднократно, что дало возможность проследить динамику развития полей во времени.

Лишь три года (1988–1990) «Миры» работали полностью по научным программам, а после прекращения бюджетного финансирования на проведение научных исследований пришлось искать контрактные работы за рубежом. В течение почти 20 лет «Миры» трудились по контрактам, снимая глубоководные фильмы, проводя научные исследования с зарубежными учёными, выполняя специальные технические операции на больших глубинах и др. Во всех этих экспедициях на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш» находилась группа учёных в составе 12–15 человек, проводившая научные исследования и в районах контрактных работ, и на гидротермальных полях, которые обычно включались в программу рейсов по договорённости с партнёрами. Во всех экспедициях группу учёных возглавлял известный российский геолог профессор Юрий Александрович

Богданов, который начиная с наших первых погружений в «Пайсисах» был бессменным членом команды подводных наблюдателей. В состав команды вначале входили Лев Павлович Зоненшайн, Александр Петрович Лисицын, Михаил Иванович Кузьмин. Эта «звездная четвёрка» положила начало новому направлению геологических исследований океана с применением глубоководных обитаемых аппаратов в нашей стране. О значении ГОА для геологических исследований Л.П.Зоненшайн, выйдя из аппарата после погружения, прекрасно сказал: «Я теперь не представляю исследований океанского дна без обитаемых аппаратов. Сегодня я себя чувствовал так, как будто иду маршрутом с киркой где-то на Алтае!» А это было на глубине 3600 м на ТАГе (Транс-Атлантический Геотраверз)!

Наибольший объём исследований на гидротермальных полях был проведён с помощью ГОА «Мир». Они могли погружаться практически в любой точке Мирового океана, исключая желоба и впадины, занимающие всего 2% площади дна океана; глубина некоторых из них превышала 6000 м. Главное преимущество ГОА «Мир» перед зарубежными



Рис. 4. Карта гидротермальных полей на дне океана:

звёздочками обозначены поля, на которых работали ГОА «Миры» и «Пайсисы»

аналогами – большая ёмкость аккумуляторов, вдвое превышающая энергоресурс других шеститысячников (см. таблицу). Это даёт возможность находиться под водой и проводить исследования гораздо дольше: до 20 часов и более по сравнению с 8–10 часами других аппаратов. Кроме того, «Миры» являются экологически чистыми аппаратами, так как балластировка ГОА обеспечивается морской водой: утяжеление – приёмом воды в прочные балластные сферы и облегчение – путём откачки воды из этих сфер. Такая конструкция даёт возможность «Мирам» регулировать плавучесть в широких пределах, зависеть на любой глубине, регулировать плавучесть при работе у грунта и отборе образцов и др. В то же время зарубежные аппараты для их всплытия сбрасывают твёрдый балласт: либо чугунные грузы, либо мешки с песком и др. ГОА «Мир» оборудованы широким комплексом измерительных датчиков, данные измерений которых регистрируются непрерывно в течение всего погружения. Отбор образцов осуществляется с помощью манипуляторов с семью степенями свободы, а также с помощью инструментов, которые берутся в манипуляторы: геологические трубки для

отбора проб осадков, титановые батометры для отбора горячего флюида из курильщиков, специальные устройства для отбора бактериальных матов, сачки для отбора животных и др. Кроме того, имеется всасывающий пробоотборник для отбора животных в сменные стаканы (5 штук по 2 литра каждый). Навигационная привязка под водой обеспечивается системой гидроакустической навигации по донным маякам, определяющей место положения аппарата с точностью до первых метров. Главная (обитаемая) сфера диаметром 2,1 м рассчитана на погружение трёх человек. Первоначально в состав экипажа входили командир аппарата – пилот, бортиженер и научный наблюдатель. Позже, при переходе в режим научно-коммерческих погружений (после 1990 г.) все операции с аппаратом легли на плечи пилота, так как в погружении участвовали два наблюдателя. На этом этапе пилоту приходилось выполнять разного рода операции, требующие участия двух специалистов, иногда в аппарате погружались специалист и наш учёный. В таких погружениях контрактные работы сочетались с научными исследованиями. В некоторых экспедициях работы с ГОА

«Мир» сочетались с поисковыми операциями, проводившимися с помощью буксируемого аппарата «Звук». Это позволило обнаружить на дне реликтовую постройку Мир (названа в честь ГОА), которая затем была обследована ГОА «Мир».

Применение ГОА «Пайсис», а затем внедрение «Миров» дали возможность создать в институте океанологии РАН новое направление исследований, позволившее проводить изучение океана с высокой степенью достоверности и детальности. Благодаря этому Россия вошла в лидирующую группу стран, проводящих исследования океана на самом современном уровне.

Гидротермальные поля на дне океана. В настоящее время открыто более 100 районов с гидротермальными полями на дне океана (см. рис. 4). Учёные ИО РАН работали в 23 районах. Причём эти исследования охватили основные типы гидротермальных излияний, известных в настоящее время. На некоторых гидротермальных полях «Миры» были первыми обитаемыми аппаратами, из иллюминаторов которых учёные впервые увидели уникальные явления выхода флюидов из недр океанической коры и необычный животный мир.

На основании многолетних исследований гидротермальных излияний и сопряжённых с ними геологических отложений эти источники можно разделить на следующие группы:

1. Гидротермальные проявления в осевых частях океанических рифтов:

- рифты низкоспрединговых хребтов;
- рифты высокоспрединговых хребтов.

2. Проявления, связанные с «аномальными» краевыми уступами внутреннего рифта и, возможно, с трансформными разломами. Сюда относятся формации глубинных циркуляционных систем.

3. Проявления, связанные с рифтами задуговых бассейнов.

Помимо названных групп, могут быть рассмотрены варианты, когда поднимающиеся к поверхности дна гидротермальные растворы разгружаются, проходя мощную осадочную толщу (например, бассейн Гуаймас). Кроме этого, имеются гидротермальные образования, которые накапливаются в глубоководных впадинах, заполненных придонным высокоминерализованным рассолом. Типичными представителями таких образований являются впадины Красного моря Атлантис-II и Вальдивия, в которые в 1980 г. погрузился «Пайсис XI».

Как уже отмечалось, аппараты «Мир» и «Пайсис» проводили исследования во всех типах гидротермальных излияний. Рассмотрим некоторые из них.

Гидротермальные проявления в районах низкоспрединговых хребтов. Гидротермальное поле ТАГ.

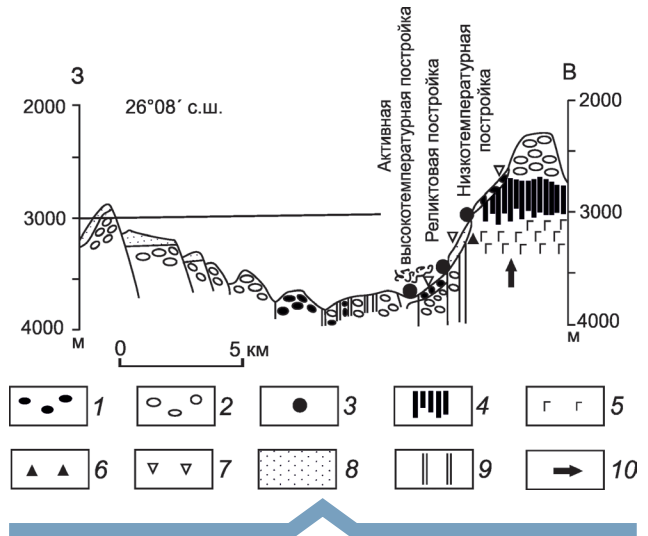


Рис. 5. Поперечный разрез через рифт САХ по 26°08'с.ш.:

1 – молодые лавы; 2 – более древние лавы; 3 – гидротермальные отложения; 4 – дайки; 5 – габбро; 6 – зеленокаменные метаморфиты; 7 – осыпь; 8 – рыхлые осадки; 9 – гьяры; 10 – направление вертикального воздымания блока океанической коры

Срединно-Атлантический хребет. Напомним, что первое гидротермальное поле на Срединно-Атлантическом хребте было открыто в 1985 г. и обследовано с помощью ГОА «Алвин» в 1986 г. в экспедиции, возглавляемой Питером Рона [28]. В настоящее время это одно из наиболее исследованных гидротермальных полей спрединговых хребтов. Только аппараты «Мир» работали на этом поле в разные годы четыре раза. Первая экспедиция в район исследований состоялась весной 1988 г., практически сразу после постройки аппаратов. В этой экспедиции было изучено общее положение поля ТАГ и главным образом высокотемпературного холма с чёрными дымами. В следующей экспедиции 1991 г. принимал участие Питер Рона, в погружении с которым мы провели детальное исследование реликтовых построек. В последующих двух экспедициях изучались детали строения рифта и находящегося на нём поля.

Главной морфологической особенностью рифтовой зоны ТАГ является её резкая асимметрия. Рифтовая долина образована на западе многоступенчатой системой краевых сбросовых уступов, образующих подобие сбросовой лестницы, высота которой составляет примерно 1000 м. Западный склон сложен базальтами, образцы которых были подняты с помощью ГОА «Мир», а также путём драгирования (рис. 5).

На востоке рифтовая долина представляет собой мощный горный массив, превышающий западный

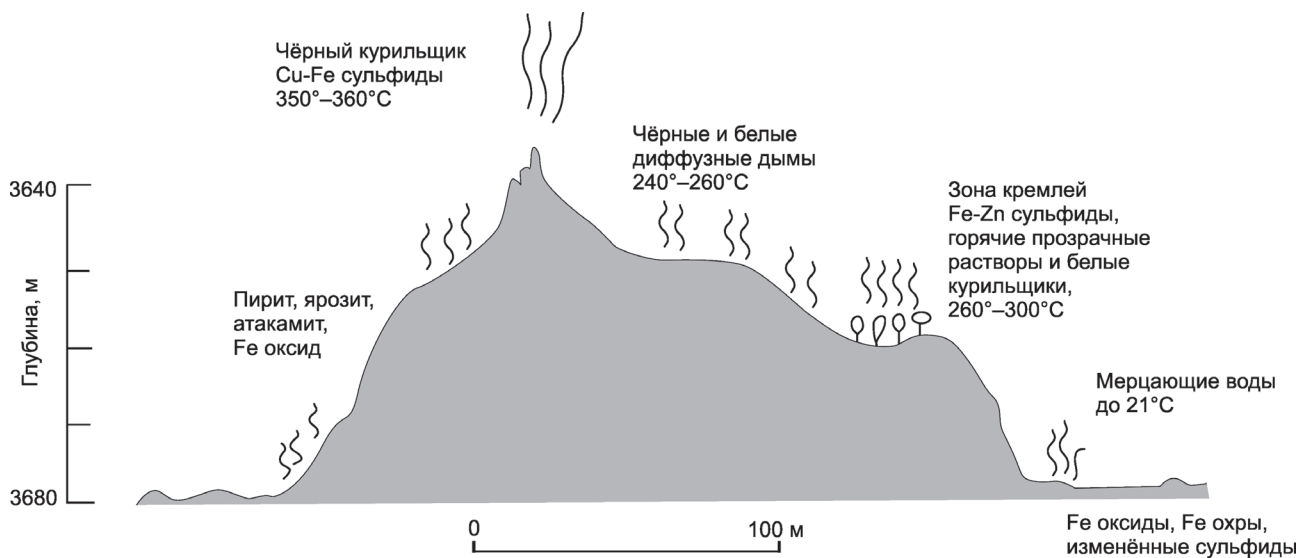


Рис. 6. Поперечный разрез через активную гидротермальную постройку поля ТАГ (Mills, 1995)

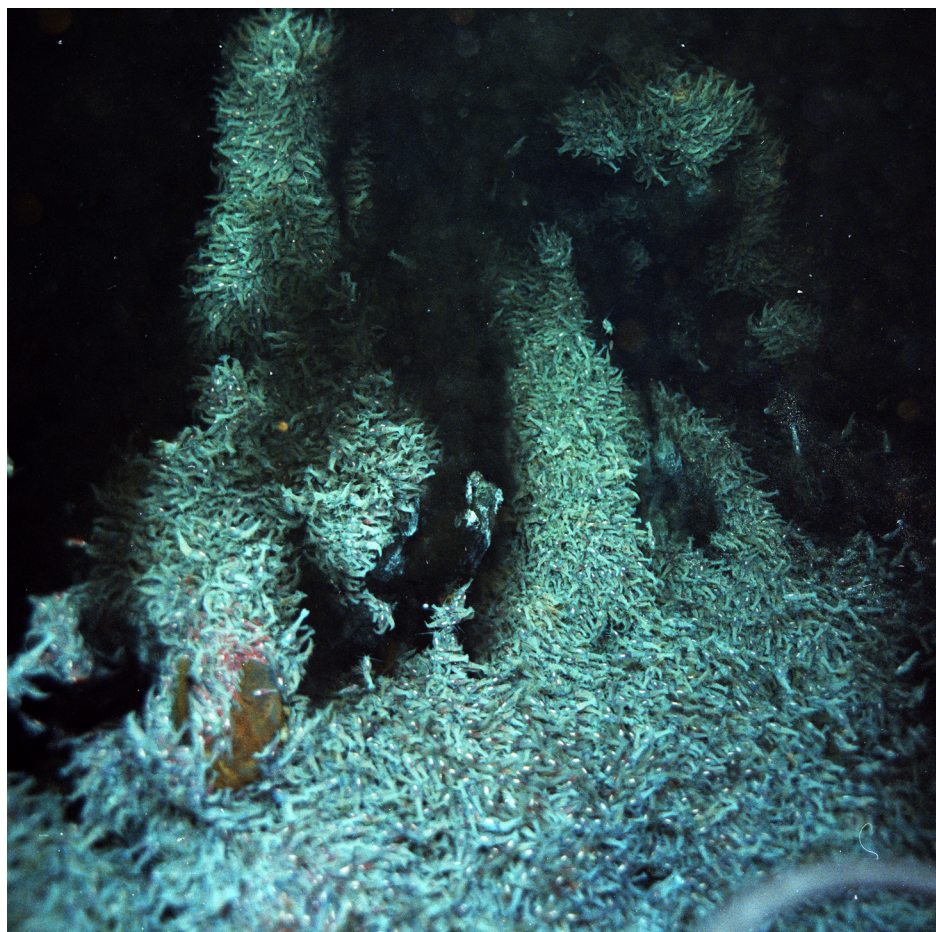


Рис. 7. Чёрные курильщики на главной активной постройке поля ТАГ. Рои креветок Римикарис



Рис. 8. Зона кремлей в юго-восточной части цоколя главной постройки поля ТАГ

краевой уступ на 1000 м. На восточном склоне рифта обнаружено три группы гидротермальных проявлений: активная высокотемпературная гидротермальная постройка, цепочка реликтовых высокотемпературных построек и низкотемпературные образования.

Активная высокотемпературная постройка представляет собой усечённый конус диаметром у основания около 200 м и высотой 30 м, который служит цоколем для вершинной конической части диаметром около 40 м у основания и 15 м высотой. Как на поверхности конуса, так и на прилегающих частях цоколя наблюдаются многочисленные трубы высотой до 10 м и диаметром до 3 м, через которые проходит разгрузка высокотемпературных рудоносных растворов или флюидов – «чёрных курильщиков» (рис. 6) с максимальной измеренной температурой 338°C (рис. 7). Во время погружений «Алвина» была зафиксирована температура 366°C [15]. Здесь развиты в основном сульфидные отложения медной специализации с примесью ангидрита [1]. У подножья конической постройки наблюдаются низкотемпературные выходы прозрачных вод и чёрных тёплых флюидов (тёплые чёрные курильщики с температурой около 100°). Также широко развиты сульфидные отложения с высоким содержанием ангидритов. На некотором удалении от верхней кони-

ческой постройки поверхность цоколя слагают сульфидные рудопроявления медной и цинковой специализации. В юго-восточной части цоколя находится зона «кремлей», получившая название по форме построек, напоминающих церковные строения Суздаля или других древних городов (рис. 8). Это активные белые курильщики с температурой разгружающихся температурных растворов 200°–300°C. Высота этих курильщиков 1–2 м. Внешний крутой (около 30°) склон цоколя сложен отдельными блоками сильно изменённых сульфидных отложений.

Методы изотопного датирования [21] показали, что формирование массивных сульфидов началось 40–50 тыс. лет назад. По последним оценкам, запасы гидротермального вещества в активной высокотемпературной постройке составляют примерно 4 млн. т. Если принять продолжительность формирования залежи 40–50 тыс. лет, то скорость наращивания рудной залежи составляет примерно 100 т в год. Однако многочисленными исследованиями и расчётами установлено, что гидротермальное рудообразование происходило не непрерывно, а циклично. Причём гидротермальное рудообразование чередовалось с возрастанием вулканической деятельности. Если принять, что эти процессы во времени занимали равные периоды [4], то скорость наращивания сульфидных



Рис. 9. Склон реликтовой постройки Мир

руд во время гидротермальных циклов составила 200 т в год. Выходящий на поверхность дна высокотемпературный раствор обладает высокой плавучестью. На поле ТАГ при температуре раствора около 360°C скорость его выхода превышает 1 м/с [15]. При подъёме вверх лёгкий раствор смешивается с океанской водой, где часть гидротермального вещества переходит в твёрдую фазу в виде взвеси. Это, прежде всего, сульфиды железа, меди и цинка, сульфаты бария и кальция и др. При погружении аппарата наблюдатель через иллюминатор видит такой гидротермальный раствор, как чёрный дым. Поэтому такие активные гидротермальные трубы получили название «чёрные курильщики». Частицы металлов в этих дымах имеют размеры от 10 мкм до 500 мкм [16]. По мере подъёма раствор постепенно теряет плавучесть из-за его смешивания с водой и, достигая состояния нейтральной плавучести, зависает на определённой глубине. Эта восходящая часть гидротермального факела получила название всплывающего плюма. Размеры плюма определяются высотой

подъёма взвешенных частиц, которая ограничивается их размером. Более крупные и тяжёлые частицы уже на первых десятках метров от дна покидают восходящий поток и осаждаются на дно. И только самые мелкие частицы размером около 50 мкм поднимаются до высоты 200 м. Эта новая водная масса, образовавшаяся в результате смешения гидротермального раствора и океанической воды, «зависает» в водной толще в виде нейтрального плюма над гидротермальным полем. Гидротермальный плюм отличается от окружающих вод по целому ряду гидрофизических и геохимических параметров и является хорошим ориентиром при поиске гидротермальных излияний на дне.

Зоны активных гидротермальных излияний сопровождают поселения креветок, плотным ковром покрывающих обширные поверхности между чёрными дымами, журчащими водами и др. (рис. 9). Креветки рождаются и живут за счёт хемосинтеза. Они являются типичными и преобладающими животными на гидротермальных полях САХ. В настоящее время открыто 9 видов гидротермальных креветок. Один из видов – *Mirocaris* – открыт учёным ИО РАН А.Л.Верещакой и назван в честь ГОА «Мир».

Реликтовая высокотемпературная постройка Мир. В нижней части восточной стенки поля ТАГ на глубине 3400–3600 м с помощью подводного фотографирования обнаружены обширные поля реликтовых построек, которые были объединены в две зоны: Мир и Алвин в соответствии с приоритетами их обследования с помощью аппаратов «Мир» (1988, 1991 и 1994 гг.) и «Алвин» (1990 и 1993 гг.) [2]. Эти реликтовые гидротермальные постройки были образованы также высокотемпературными растворами. Самая крупная реликтовая постройка – гора Мир – получила название в честь ГОА «Мир» так же, как и вся группа построек этой зоны. Первое обследование горы Мир было произведено в 1991 г. на ГОА «Мир-2» с участием Питера Рона и Юрия Богданова. Тогда аппарат погружался с двумя наблюдателями. Гора Мир расположена в одной миле к северо-востоку от активной постройки. Диаметр постройки у основания более 700 м, высота около 70 м. На склонах и в верхней части постройки обнаружен целый лес вертикально стоящих и поваленных сульфидных труб, размер которых увеличивается от периферии к центру по высоте от 1 до 10–15 м (см. рис. 9). Среди большинства поднятых на борт судна аппаратами «Мир» образцов сульфидов наиболее часты отложения медной специализации. Распределение редких элементов в сульфидах активной и реликтовой постройки Мир сходно. Высокотемпературные сульфидные отложения медной специализации

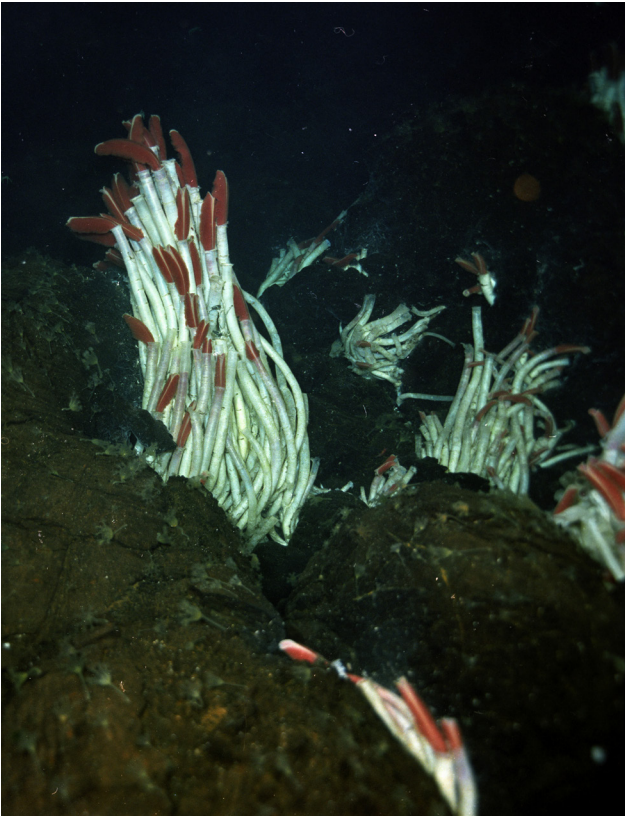


Рис. 10. Скопление вестиментифер *Riftia pachyptila* в местах выхода муаровых вод через трещины в базальтах

обогащены Cu, Co, Sn и Bi, что отличает их от сульфидных отложений других типов. Для среднетемпературных отложений цинковой специализации характерны максимальные содержания Zn, Pb, Ag, Cd, Sb, As и Hg. В низкотемпературных гидротермальных отложениях по сравнению с другими разностями наблюдаются более высокие концентрации Si, Fe, Mn и Mo. Наши измерения и расчёты показывают, что объём гидротермального вещества в массивных залежах реликтовой постройке Мир составляет около 10 млн. т [3]. На сегодняшний день это самое крупное гидротермальное рудное образование на дне Мирового океана.

Гидротермальные проявления высокоспредиговых хребтов. Главной геологической структурой, которая относится к высокоспредиговым хребтам, является Восточно-Тихоокеанское поднятие. Этот район характеризуется высокой скоростью спрединга: от 6,2 см/год на 21°с.ш. [22] до 14–20 см/год в более южных районах [27]. В связи с этим интенсивность вулканизма, гидротермальной деятельности и наращивания океанической коры достигают самых высоких значений. Погружения ГОА «Мир» совершались

в двух районах: на 9°с.ш. и на 21°с.ш. Гидротермальные источники на ВТП были открыты в 1978–1979 гг. на 21°с.ш. во франко-американской экспедиции [14]. Аппараты «Мир» в этом районе работали дважды: в 1990 и 2003 гг. [29]. Наиболее детальные исследования этого района ВТП были проведены с «Мирами» в 2003 г. во время съёмок фильма «Aliens of the deep» Джеймсом Кэмероном. Научные исследования чередовались с киносъёмочными погружениями. На основании этих исследований и литературных данных, основанных на изучении района 21°с.ш., кратко рассмотрим особенности гидротермальной деятельности данного района. Основу осевой части рифта составляет рифтовая долина шириной около 5 км, обрамлённая сбросовыми уступами высотой порядка 80 м относительно ложа рифта [10]. Осевую часть рифта занимает молодая вулканическая зона шириной от 0,6 до 1,2 км, в пределах которой выделяются вулканические образования высотой от 20 до 90 м. Гидротермальные проявления сосредоточены в рифтовой долине и тяготеют к отдельным поднятиям, являвшимся центрами недавней магматической активности. В погружении ГОА «Мир-1» в 2003 г. было детально обследовано поле Clam Field. Основанием поля является базальтовая площадка интенсивного чёрного цвета. Через трещины в базальтах высачивается низкотемпературный раствор, местами высачивание идёт в виде муара (рис. 10). Гидротермальные постройки расположены прямо на базальтовом основании, в северной части поля их подпирают невысокие (2–4 м) доколи, сложенные корковыми сульфидами. Горячие истечения (чёрные и белые курильщики) приурочены к вершинам построек. Всего было обследовано семь построек. Примерно в 500 м к западу от этого активного поля обнаружены реликтовые сульфидные постройки высотой около 10 м и около 8 м в диаметре. Возраст этих образований был определён радиометрическим методом, он равен 4000 лет [20]. По соотношению основных сульфидных минералов в данном районе могут быть выделены две разности сульфидных отложений: пирит-сульфиды цинка (цинковая специализация) и пирит-сульфиды меди (медная специализация). Как известно, частота встречаемости гидротермальных проявлений количественно связана со скоростью спрединга и достигает максимальных значений в рифтах высокоспредиговых хребтов. Расчёты, выполненные Е.Г.Гурвичем [6], показали, что в пределах рифтов ВТП поступление железа в придонную воду с гидротермальными растворами более чем в 250 раз превышает поступление этого элемента в рифты низкоспредиговых хребтов, в частности, в пределах гидротермального поля ТАГ.

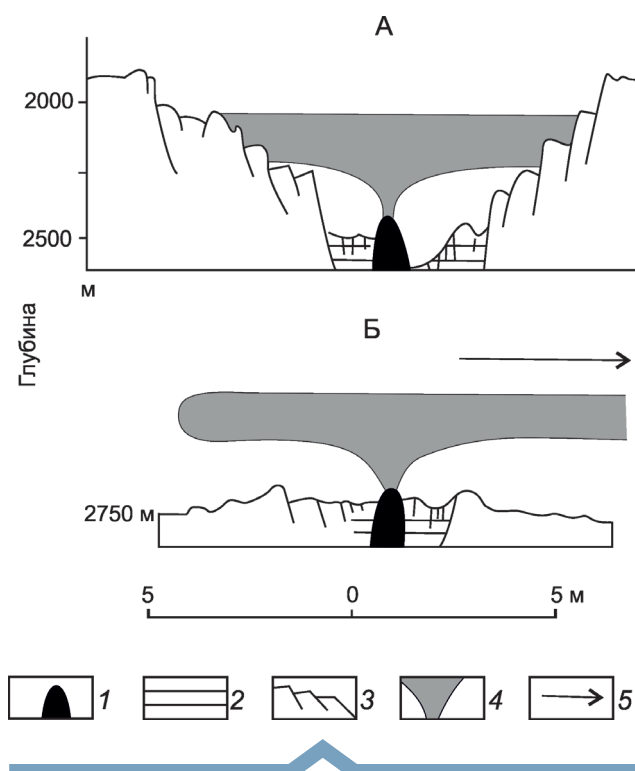


Рис. 11. Положение нейтрального гидротермального плюма относительно внутреннего рифта, рифтов с разными скоростями спрединга. Е.Г.Гурвич, 1998:

А – Срединно-Атлантический хребет, 37°с.ш., скорость спрединга 2,5 см/год; Б – Восточно-Тихоокеанское поднятие, 21°с.ш., скорость спрединга 6 см/год; 1 – неовулканическая зона; 2 – внутренний рифт с условиями растяжения; 3 – краевые тектонические уступы; 4 – гидротермальный плюм; 5 – возможное направление придонных течений

Однако эффективность рудоотложения в гидротермальных полях рифтов высокоспрединовых хребтов, очевидно, не выше, чем в низкоспрединовых хребтах. В работе [13] определена величина потерь гидротермального вещества, выносимого гидротермальными растворами из океанической коры в Тихом океане. При этом отложения в массивные залежи составляют всего 3% взвеси, выносимой гидротермальными растворами, а 97% рассеиваются в придонной воде. Такое рассеяние гидротермального материала в высокоспрединовых рифтах объясняется различиями в рельефах внутреннего рифта с низкоспрединовыми хребтами (рис. 11), в которых рифтовая долина ограничена краевыми уступами высотой значительно больше 500 м. Поэтому гидротермальный плюм нейтральной плавучести не выходит за пределы внутреннего рифта, а распространяется вдоль его оси, и основная масса гидротермального вещества, содержащегося в плюме, переходит в дон-

ные осадки рифтовой долины. В пределах высокоспрединовых хребтов гидротермальный плюм поднимается значительно выше обрамляющих рифт краевых уступов. Следовательно находящееся в плюме гидротермальное вещество может разноситься глубинными течениями на довольно большие расстояния. Именно поэтому металлоносные осадки, аномальность которых связана с поступлением гидротермального вещества из плюма, вдоль ВТП занимают огромные площади. Средняя ширина области распространения металлоносных осадков в юго-восточной части Тихого океана превышает 2000 км, а максимальная величина составляет 3500 км. По составу металлоносных осадков, а также по процентному содержанию в них металлов и других химических элементов можно судить об интенсивности гидротермальных излияний и о степени удалённости изучаемого района от гидротермальных источников.

Сходство и различие гидротермальных проявлений высоко- и низкоспрединовых хребтов. Выше рассмотрено два района, в которых наиболее ярко выражены особенности высоко- и низкоспрединовых хребтов: 21°с.ш. ВТП и поля ТАГ (Транс-Атлантический Геотраверз) Срединно-Атлантического хребта (26°с.ш.). Изложенный материал и анализ литературных источников даёт возможность провести некоторые сравнения двух гидротермальных систем, отличающихся скоростью спрединга, а также своим географическим положением.

1. Высокоспрединовые хребты отличает очень высокая частота встречаемости гидротермальных построек по сравнению с низкоспрединовыми. В рифтах высокоспрединовых хребтов местами на 1 км рифта приходится по 10–15 источников. В то же время на участке Срединно-Атлантического хребта длиной 25 000 км (11°–40°с.ш.) присутствует примерно одно гидротермальное поле на каждые 175 км.

2. Гидротермальные излияния высокоспрединовых хребтов имеют небольшой возраст. Основываясь на всех известных материалах, можно заключить, что ни одна из гидротермальных построек ВТП не старше 1000 лет. Здесь нет поля, подобного ТАГ, где одна активная гидротермальная постройка, занимающая большую часть поля, формировалась бы в течение 50–100 тыс. лет.

3. На ВТП исследователями не было встречено массивных гидротермальных залежей, где вес рудных массивов отдельных построек составляет 4–10 млн. т, как в районе ТАГ, в котором огромной массой гидротермального вещества отличаются и активные, и реликтовые постройки. Постройки высокоспрединовых хребтов по своим размерам напоминают молодые поля низкоспрединовых хребтов типа Брокен Спур

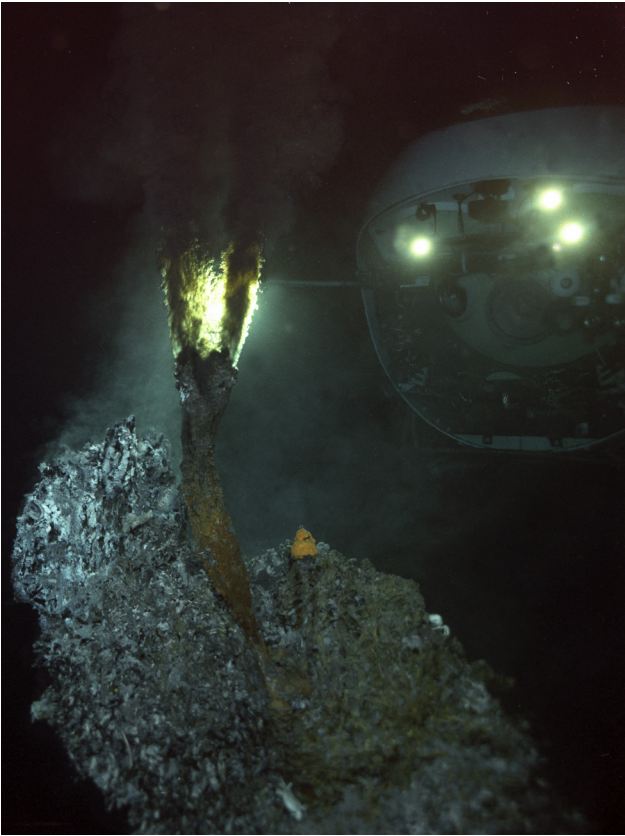


Рис. 12. Активная гидротермальная постройка на 21°с.ш. ВТП

САХ. Как уже отмечалось, они активно живут не более 1000 лет. Были проведены интересные наблюдения на 21°с.ш. В сентябре 1990 г. в ГОА «Мир-1» исследователи вышли на очень красивую постройку (рис. 12) высотой около 18 м. На её вершине из сульфидной трубы в виде рогатки выходил на большой скорости горячий флюид. Два аппарата «Мир» зависли друг напротив друга по разные стороны постройки и сделали прекрасное фото (см. рис. 12). Дно было обильно населено двусторчатыми гигантскими моллюсками *Caliptogena magnifica* и «кустами» вестиментифер *Riftia pachyptila*. Это был незабываемый оазис жизни... Спустя 13 лет, в 2003 г. мы вышли на то же поле, но уже не дымящее и не кипящее обилием гидротермальной фауны. Позднее был определён возраст отобранных на этом поле сульфидов, который оказался немногим более 300 лет.

Гидротермальные проявления в океанических рифтах с глубинной циркуляционной системой. В 1993–1994 гг. на 14°45'с.ш. САХ учёными ВНИИОкеангеология (Санкт-Петербург) с НИС «Профессор Логачев» было открыто новое активное гидротермальное поле, существенно отличавшееся от всех

выявленных ранее. В этой экспедиции поле было закартировано с помощью эхолота и буксируемого аппарата, оборудованного видеокамерой, а на борт судна были подняты образцы гидротермальных отложений, в том числе массивные сульфиды.

В 1995 г. в 35 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на этом поле были сделаны два погружения ГОА «Мир-1» и «Мир-2», а также зондирование водной толщи с помощью гидрофизического комплекса «Розетт» и опробование донных осадков грунтовой трубкой. В 1998 г. «Миры» совершили ещё четыре погружения на этом поле уже с конкретными задачами, основанными на результатах проведённых ранее исследований. Визуальные наблюдения через иллюминаторы, анализ отобранных с помощью манипуляторов образцов пород, осадков, флюидов из горячих гидротермальных источников (чёрных курильщиков), просмотр видеозаписей, анализ измерений с помощью датчиков, установленных на аппаратах, позволили получить довольно полное представление о природе этого необычного поля.

Следует отметить, что в отличие от большинства гидротермальных полей, расположенных в осевых частях рифа, поле Логачева (название дано по имени судна – первооткрывателя) находится на склоне восточного краевого уступа рифтовой долины (рис. 13). Если западный склон рифта образован системой сбросовых уступов, присыпанных рыхлыми пелагическими осадками, то восточный склон, на котором

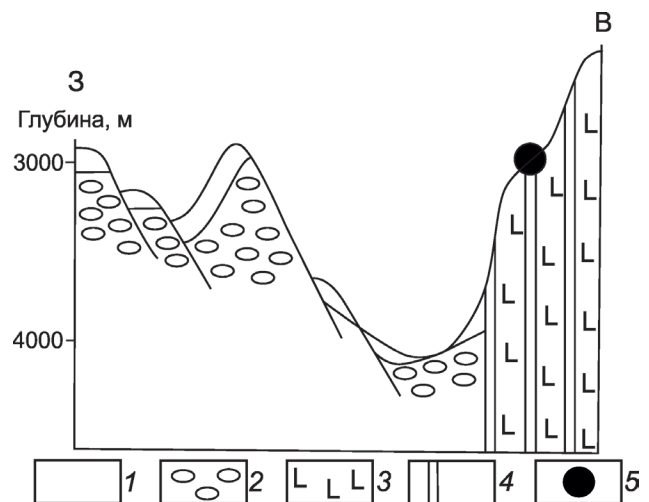


Рис. 13. Поперечный разрез рифтовой долины в районе поля Логачева на 14°45'с.ш. САХ:

1 – рыхлые осадки; 2 – экструзивные базальты; 3 – серпентинизированные ультрабазиты; 4 – вертикальные глубинные разломы; 5 – активное гидротермальное поле

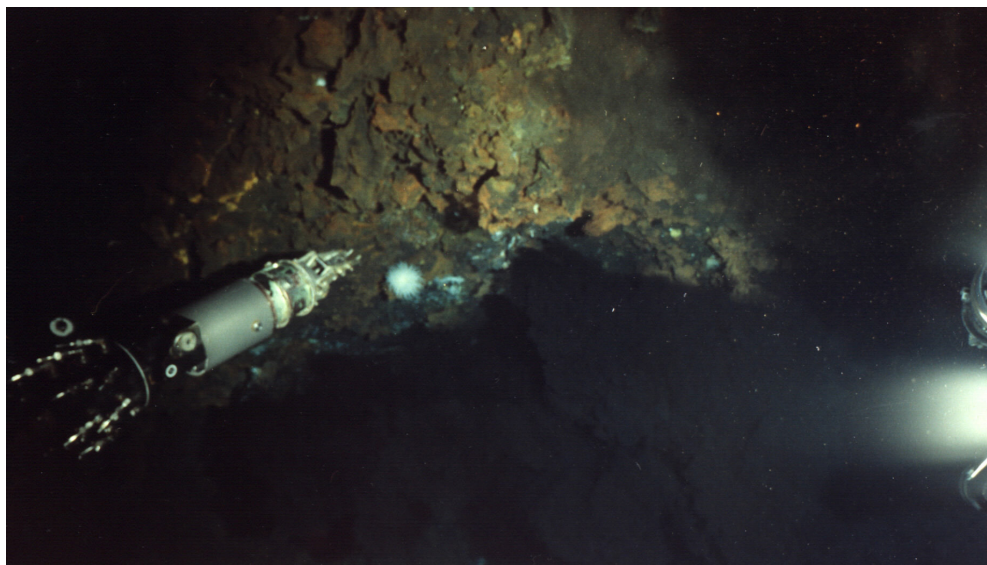


Рис. 14. Чёрный курильщик кратерного типа на поле Логачева, глубина 3005 м

находится поле Логачева, представляет собой довольно протяжённый крутой уступ, приподнятый блок океанической коры, в пределах которого на поверхность выходят глубинные кристаллические породы (габброиды).

Первоначально при обследовании с помощью буксируемого аппарата на поле обнаружено 11 гидротермальных построек [19]. С помощью ГОА «Мир» было детально обследовано четыре из них. Визуальные наблюдения, отбор образцов коренных пород, осадков и горячих флюидов из «курильщиков» дал возможность составить определённое представление о природе этого поля и его отличий от других полей, расположенных в осевой зоне САХ. Наиболее детально была обследована самая крупная гидротермальная постройка овальной формы. Её длина около 200 м, ширина 125 м и высота около 20 м. Постройка протягивается с глубины 3010 м до 2930 м вверх по склону в юго-восточном направлении. В её осевой части на глубинах 3005, 2960 и 2940 м обнаружены три активных гидротермальных зоны, по периферии которых отмечаются выходы тёплых мерцающих вод. На поверхности дна здесь имеются конические бурые постройки высотой 10–15 см кремнисто-железистого состава. На глубинах 3005 м и 2960 м обнаружены высокотемпературные чёрные курильщики, из которых флюид выходит не через сульфидные трубы, а из понижений рельефа в виде воронок (рис. 14). Эти источники получили название кратерных, в отличие от классических, из которых флюид под большим напором движется из сульфидных

труб вертикально вверх. Из кратерных курильщиков чёрный дым (флюид) выходит на поверхность дна и перемещается донными течениями горизонтально или даже вниз по склону в виде «стелящихся дымов». Это явление позволило сделать вывод о высокой плотности флюида. И действительно: непосредственные замеры солёности воды вблизи курильщиков, где она сильно смешана с первичным флюидом, показали величину 36,24 psu при фоновых значениях 35,04 psu.

Классические чёрные курильщики, наблюдавшиеся на глубине 2940 м, выносили флюид через вертикально стоящие сульфидные трубы высотой около 3 м и диаметром 0,5–0,8 м. Здесь флюид обладает высокой плавучестью и устремляется вертикально вверх (рис. 15).

Во время погружений «Миров» в 1995 и 1998 гг. было отобрано около 30 образцов геологических пород, главным образом сульфидов, а также железомарганцевых гидротермальных корок. Анализ сульфидов показал явно выраженную медную специализацию: средняя концентрация (в %): меди – 28,6 (от 8,3 до 35,5), цинка – 7,85 (0,01–8,7), железа – 28,6 (15,8–36,2) [2]. При сравнении состава сульфидов поля Логачева с другими полями САХ выясняется существенно более высокая обогащённость первых медью, цинком, барием, кобальтом и мышьяком. Высокое насыщение гидротермальных отложений этими металлами объясняется тем, что гидротермальный флюид формируется в глубинных слоях океанической коры, на границе с верхней мантией земли. Преодолевая длинный путь к поверхности дна,



Рис. 15. Сульфидная труба классического курильщика с поселениями моллюсков *Bathymodiolus* на поле Логачева, 2940 м

флюид многократно сепарируется и выходит на поверхность существенно уплотнённым, чем и объясняется его высокая солёность, измеренная с помощью датчиков «Миров». Самая большая гидротермальная постройка содержит около 0,8 млн. т гидротермального вещества. Гидротермальная деятельность продолжается около 60 млн. лет [21]. Скорость наращивания гидротермального вещества составляет около 14 тонн в год, то есть более чем на 1,5 порядка ниже, чем в гидротермальных полях осевых гидротермальных циркуляционных систем САХ [1]. У подножья одной из активных построек была получена колонка донных осадков длиной 241 см. Исходя из определённых средних скоростей осадконакопления на основании радиоуглеродного датирования можно предположить, что максимальный возраст осадков данного района составляет 25–30 тыс. лет (Ю.А.Богданов и др., 2006). Состав литогенных минеральных фаз донных осадков может свидетельствовать о характере пород фундамента, окружающих гидротермальную постройку. Главным минералом грубозернистых фракций осадка является серпентин, что указывает на присутствие в районе обнажений серпентинитов или серпентинизированных глубинных пород.

Гидротермальное поле Рейнбоу было открыто в июле 1997 г. во время погружений французского ГОА «Наутил» [12]. Поле расположено на 36°с.ш. САХ на западном склоне осевого поднятия на глубинах 2270–2320 м. В октябре 1998 г. в 41 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» было проведено 6 погружений ГОА «Мир-1» и «Мир-2», а также

выполнен большой объём заборных работ. В погружениях «Миров» было проведено картирование поля, которое позволило обнаружить более 10 активных и множество реликтовых построек (рис. 16). Поле имеет длину 250 м и ширину около 100 м. Оно расположено перпендикулярно простиранию рифта. Наиболее крупные активные постройки расположены в центре поля, ближе к его западной границе. Высота их составляет 12–20 м, диаметр у основания – 5–10 м. Массивные цоколи представляют собой сросшиеся вместе вертикальные трубы (рис. 17). Крутые склоны этих построек покрыты «лесом» гидротермальных труб, высота которых на вершинах постройки достигает 4–6 м. Другой тип построек высотой до 40 м имеет цоколи высотой около 20 м, которые сложены обломками массивных сульфидных отложений. В разных местах этих построек обнаружены сульфидные трубы высотой 1–2 м, некоторые из которых активны, из них выходит чёрный дым (флюид) (рис. 18). С помощью «Миров» поднято большое количество образцов: фрагменты активных и реликтовых труб, массивные сульфиды и их обломки из цоколей. Все образцы покрыты железистой коркой толщиной от 1 до 10 мм. В одном из погружений на западной границе гидротермального поля ГОА «Мир-1» отобрал образец серпентинита. Анализы химического состава образцов показали, что в пределах поля Рейнбоу, преобладают рудопроявления медной и медно-цинковой специализации, существенно обогащённые кобальтом (до первых процентов). Этот факт выделяет

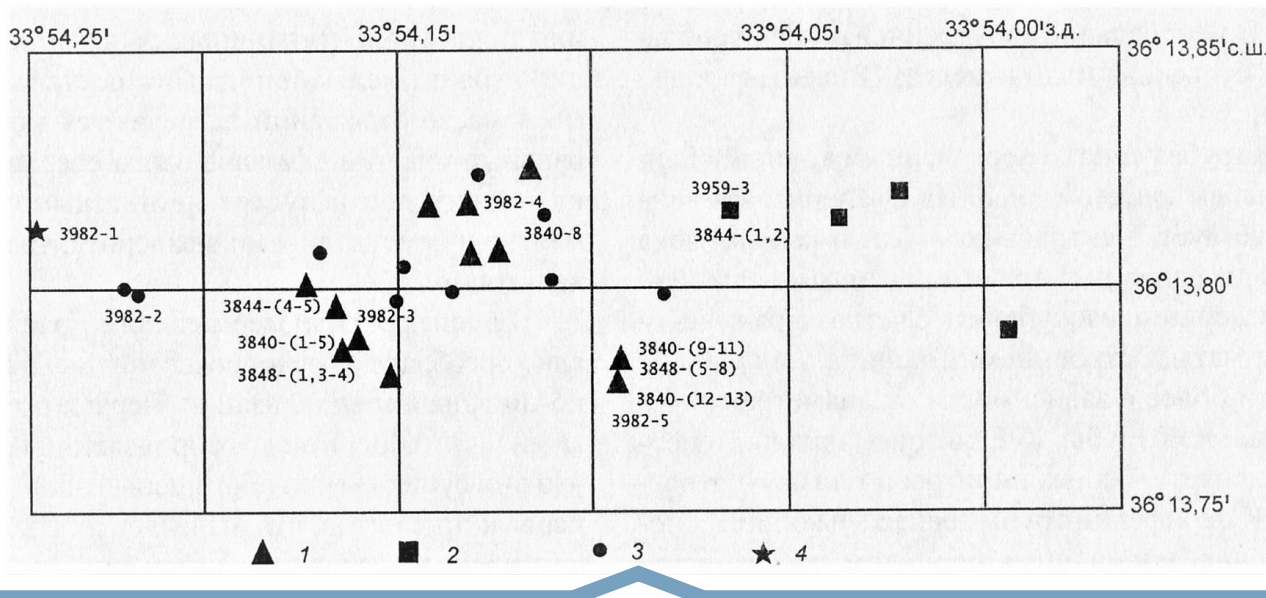


Рис. 16. Карта гидротермального поля Рейнбоу (закартировано ГОА «Мир»):

1 – большие активные гидротермальные постройки; 2 – небольшие активные курильщики; 3 – реликтовые постройки; 4 – место отбора пробы серпентинита; цифрами указаны места отбора проб гидротермальных отложений



Рис. 17. Цоколь центральной гидротермальной постройки поля Рейнбоу

поле Рейнбоу среди большинства исследованных полей мировой рифтовой системы и сближает его с полем Логачева (14°45'с.ш. САХ). При погружениях ГОА «Мир» было отмечено, что на поле Рейнбоу, так же как и на поле Логачева, развиты два типа чёрных курильщиков: с флюидами, обладающими высокой плавучестью, формирующими всплывающий плюм, и с гидротермальными растворами, распространяющимися вниз по склону. Как и на поле Логачева эти два типа флюидов значительно отличаются по солёности. При этом в чёрных курильщиках с большой частотой чередуются струи то более солёных, то более опреснённых растворов относительно вод придонного слоя. Это явление, очевидно, является следствием фазовой сепарации высокотемпературного гидротермального флюида в океанской коре вблизи поверхности. На одном из курильщиков с помощью автономного термометра в течение 20 минут измерялась температура термальных вод с дискретностью в 1 минуту. В течение этого времени она изменялась от 250° до 348°С. Такая изменчивость температуры может быть объяснена только тем, что в подповерхностных условиях наряду с фазовой сепарацией гидротермального флюида происходит его смешение с холодной океанской водой, проникающей в кору по трещинам.

Поскольку из многочисленных источников на поверхность дна выходит гидротермальный раствор с незакономерно меняющейся солёностью, а, соответственно, и плавучестью, над полем Рейнбоу нет

устойчивого гидротермального плюма, который присутствует на большинстве гидротермальных полей мировой рифтовой системы. Измерения с помощью гидрофизического зонда «Розетт» и с помощью датчиков ГОА «Мир» при погружениях и всплытиях аппарата показали, что над полем Рейнбоу наблюдается многослойная неустойчивая плюмовая система, в отличие от других гидротермальных полей (ТАГ, Брокен Спур, Снейк Пит и др.), над которыми на определённом расстоянии от дна (150–200 м) в толще воды «парит» устойчивый гидротермальный плюм.

Исследования гидротермальных полей Логачева и Рейнбоу показали их существенное отличие как от высокосрединговых хребтов, так и от осевых низкосрединговых. В высокосрединговых хребтах довольно близко к поверхности дна располагается обширная магматическая камера (1–1,5 км). Поэтому здесь образование гидротермального флюида происходит в кровле магматической камеры при взаимодействии океанической воды, проникающей по трещинам в коре, с изливающимися базальтами или долеритами дайкового комплекса. В этом случае магматическая камера препятствует проникновению океанической воды в глубинные слои океанической коры. Поэтому в высокосрединговых хребтах внутри рифта существование процесса серпентинизации исключено. В то же время в осевых зонах низкосрединговых хребтов вулканические процессы, развивающиеся над локальными магматическими камерами, сменяются длительной тектонической паузой [7], когда камера полностью исчезает. В этот период океаническая вода по трещинам раздробленной коры проникает в её глубинные слои и в верхние части мантии, вследствие чего часть верхнемантийного материала серпентинизируется. Возможная глубина проникновения в кору в рифтовых зонах океана подсчитана теоретически [9]. Она оказалась равной 4,5 км. Глубинная циркуляционная гидротермальная система характерна для низкосрединговых хребтов с расположением полей на склонах краевых уступов рифта, как поля Логачева и Рейнбоу. Здесь океаническая вода достигает верхнемантийных слоёв через океаническую кору, минуя магматическую камеру. Флюид, формирующийся на глубинах 4–5 км, при подъёме к поверхности дна испытывает значительные изменения гидростатического давления, вызывающие его многократную фазовую сепарацию, последняя из которых происходит в самых подповерхностных горизонтах коры. Об этом свидетельствует наличие двух типов чёрных курильщиков с существенной разницей плотности. Фазовая сепарация раствора при подъёме вверх обуславливает его вскипание, что приводит к измене-



Рис. 18. Вершина одной из гидротермальных построек поля Рейнбоу

нию его физико-химических характеристик. Происходит некоторая дифференциация состава выходящего на поверхность раствора, который существенно отличается от состава флюидов других гидротермальных полей районов САХ. Этот факт отражается и на составе гидротермальных отложений полей Логачева и Рейнбоу, имеющих явно выраженную медную и медно-цинковую специализацию. Отложения значительно обогащены кобальтом (до первых процентов), платиной, иногда никелем. Несомненно, поля Логачева и Рейнбоу являются новым, ранее не встречавшимся типом гидротермальных проявлений на дне Мирового океана.

Заключение. Хорошо известно, что развитие современной науки об океане тесно связано с внедрением в практику исследований новых технических средств. Анализ материалов, изложенных в данной статье, показывает, что применение современных ГОА даёт возможность проводить геологические исследования на дне океана на качественно новом

уровне, базирующимся на непосредственном контакте учёного с изучаемым объектом или явлением. Такой подход значительно повышает достоверность исследований, их детальность благодаря прямым визуальным наблюдениям через иллюминаторы, целенаправленному отбору образцов, прицельным видеозаписям и фотографированию. Важную роль при этом играет точная навигационная привязка наблюдений, которая обеспечивается гидроакустической системой навигации с донными маяками.

На основании анализа результатов исследований четырёх районов с гидротермальными полями на дне, приведённых в этой статье, могут быть сделаны следующие выводы:

1. Обнаружения гидротермальных полей на дне океана, выполненные с помощью ГОА, являются важнейшим открытием XX в. За последние 40 лет в океане открыто более 100 гидротермальных районов, методично изучаемых с помощью ГОА и других технических средств. Это дало возможность учёным подойти вплотную к созданию теории гидротермального рудогенеза дна океана.

2. Было доказано, что высокотемпературные гидротермальные излияния и сопряжённые с ними массивные сульфидные залежи широко развиты в пределах вулканически активных областей дна океана, в частности в зонах срединных океанических хребтов.

3. Установлены закономерности пространственного распределения гидротермальных рудопроявлений и определены причины неоднородности их распределения.

4. Исследованы морфология и размеры гидротермальных залежей, их состав. Установлена связь их состава и физико-химических свойств с геодинамической обстановкой, характером вулканизма и условиями рудоотложения. Обнаружены рудоотложения, по содержанию полезных компонентов и размерам сопоставимые с аналогичными месторождениями, разрабатываемыми на континентах.

5. Изучены минеральная и химическая зональность гидротермальных отложений в пределах гидротермальных полей, выявлены причины этой зональности.

6. Установлены природа гидротермальных высокотемпературных рудоносных растворов, механизм рудоотложения, на базе чего созданы модели формирования гидротермальных рудных залежей.

В настоящее время для исследований геологии дна океана применяются также телеуправляемые и автономные аппараты. Однако эффективность их использования не столь высока, как применение ГОА для этих целей. Следует помнить, что практически все наиболее важные открытия на дне океана сделаны

именно обитаемыми аппаратами, в том числе и ГОА «Мир-1» и «Мир-2».

Однажды Жаку-Иву Кусто при посещении института океанологии им. П.П.Ширшова РАН (1983 г.) был задан вопрос: «Если бы перед вами стоял выбор о технических средствах исследований океана: обитаемый аппарат или телеуправляемый – что бы вы выбрали?» Кусто ответил: «Никогда ни один робот не заменит человека под водой, так как самый точный оптический прибор – это человеческий глаз и самый совершенный компьютер – человеческий мозг». Эта формула подтверждена многими примерами на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Муравьев К.Г., Сагалевич А.М. Высокотемпературные гидротермальные постройки рифтовой долины // Гидротермальные образования срединного хребта Атлантического океана. – М.: Изд-во «Наука», 1992. – С. 125–154.
2. Богданов Ю.А., А.П. Лисицын, Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г. Гидротермальный рудогенез океанского дна. – М.: Изд-во «Наука», 2006. – 527 с.
3. Богданов Ю.А., Рона П.А., Гурвич Е.Г. и др. Реликтовые сульфидные отложения гидротермального поля ТАГ, Срединно-Атлантический хребет (26°с.ш., 45°з.д.) // Океанология. – 1994. – № 34(4). – С. 590–599.
4. Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». – М.: Научный мир, 2002. – 304 с.
5. Галкин С.В., Сагалевич А.М. Гидротермальные экосистемы Мирового океана: исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». – М.: Изд-во ГЕОС, 2012. – 144 с.
6. Гурвич Е.Г. Металлоносные осадки Мирового океана. – М.: Научный Мир, 1998. – 340 с.
7. Монин А.С., Богданов Ю.А., Зоненшайн Л.П. и др. Подводные геологические исследования с обитаемых аппаратов. – М.: Изд-во «Наука», 1985. – 232 с.
8. Риффо К., Ле Пишон К. Экспедиция «Фамоус». – Л.: Гидрометиздат, 1979. – 222 с.
9. Сорохтин О.Г. Тепловые потоки через срединно-океанские хребты / Океанология; геодинамика // Под ред. О.Г.Сорохтина. – М.: Изд-во «Наука», 1979. – С. 178–181.
10. Ballard R.D., Francheteau J., Juteau T. et al. East Pacific Rise at 21°N: the volcanic, tectonic and hydrothermal processes of the central axis // Earth and Planetary Sciences Letters. – 1981. – Vol. 55. – № 1. – P. 1–10.
11. Busby R.F. Manned submersibles // Office of NAVY. – 1976. – 764 p.
12. Charlton J.L., Donval J.-P., Donville E. et al. High methane flux between 15°N and Azores Triple Junction Mid-Atlantic Ridge, hydrothermal and serpentinization processes // Eos Transactions American Geophysical Union. – 1977. – Vol. 78. – № 46. – 831 p.

13. *Converse D.R., Holland H.D., Edmond J.M.* Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21°N): Implications for the heat budget and formation of massive sulfide deposits // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1984. Vol. 69. P. 158–175.
14. CYAMEX scientific team: First manned submersible dives on the East Pacific Rise 21°N (Project Rita): General results // *Marine Geophysical Research.* – 1980. – 189 p.
15. *Edmond J.M., Campbell A.C., Palmer M.R. and German C.R.* Geochemistry of hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: TAG and MARK. *Eos. Trans // American Geophysical Union.* – 1990. – Vol. 71. – P. 1650–1651.
16. *Feely R.A., Lewison M.A., Massoth G.J.* et al. Composition and sedimentation of hydrothermal plume particles from North Cleft segment, Juan de Fuca Ridge // *Journal of Geophysical Research.* – 1994. – Vol. 99. – № B3. – P. 4985–5006.
17. *B.Heezen & C.Hollister* The face of the Deep. N.Y. Oxford Univ. – 1971. – 641 p.
18. *Hot brines* and recent heavy metal deposits in the Red sea. N.Y.Springer Verlag. – 1969. – 600 p.
19. *Krasnov S.G., Cherkashev G.A., Stepanova T.V.* et al. Detailed geological studies of hydrothermal vents and processes. – London, 1995. – № 87. P. 46–64.
20. *Lalou C., Brichet E.* et al. Age and implications on East Pacific Rise sulfide deposits at 21°N // *Nature.* – 1982. – Vol. 300. – № 5888. – P. 169–171.
21. *Lalou C., Reyss J.-L., Brichet E.* et al. Hydrothermal activity on a 105-year scale at a slow-spreading ridge, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge 26° N // *Journal of Geophysical Research.* – 1995. – № 100. – P. 17855–17862.
22. *Larson R.L.* Near bottom geologic studies of the East Pacific Rise crest // *The Bulletin of the Geological Society of America.* – 1971. – Vol. 82. – P. 823–841.
23. *Mills R.A.* Hydrothermal deposits and metalliferous sediments from TAG, 26° N Mid-Atlantic Ridge // *Geological Society London Special Publications.* – 1995. – № 87. – P. 121–132.
24. *Monin A.S., Plakhin E.A., Sagalevich A.M.* Visual observations of the Red Sea hot brines // *Nature.* – 1981. – Vol. 291. – № 5. – P. 222–225.
25. *Murray J., Renard A.F.* Deep-sea deposits. Report «Challenger» Expedition (1873–1876). – London: Eyre&Spottiswood, 1891. – 525 p.
26. *Piccard J., Dietz R.S.* Seven miles down. The story of the bathyscaph «Trieste». Jacques Piccard and Robert S. Dietz. – New York, Putnam, 1961. – 178 p.
27. *Rea D. K., Blakely R.J.* Short-wavelength magnetic anomalies in a rapid seafloor spreading // *Nature.* – 1975. – Vol. 255. – P. 126–128.
28. *Rona P.A. Klinkhammer G., Nelsen T.A.* et al. Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic ridge // *Nature.* – 1986. – Vol. 321. – P. 33–37.
29. *Sagalevich Anatoly M., Isley III, Paul T.* The Deep. Voyages to Titanic and Beyond // *Botanical Press.* – 2009. – 299 p.

REFERENCES

1. *Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Murav'yev K.G., Sagalevich A.M.* Vysokotemperaturnyye gidrotermal'nyye postroyki riftovoy doliny [High-temperature hydrothermal structures of the rift valley]. *Gidrotermal'nyye obrazovaniya sredinnogo khrebtta Atlanticheskogo okeana.* Moscow, Nauka publ. 1992. P. 125–154.
2. *Bogdanov Yu.A., A.P. Lisitsyn, Sagalevich A.M., Gurvich Ye.G.* Gidrotermal'nyy rudogenez okeanskogo dna [Hydrothermal ore genesis of the ocean floor]. Moscow, Nauka publ. 2006. 527 p.
3. *Bogdanov Yu.A., Rona P.A., Gurvich Ye.G.* et al. Reliktovyye sul'fidnyye otlozheniya gidrotermal'nogo polya TAG, Sredinno-Atlanticheskij khrebet (26°s.sh., 45°z.d.) [Relict sulfide deposits of the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge (26°N, 45°W)]. *Okeanologiya.* 1994. No. 34(4). P. 590–599.
4. *Bogdanov Yu.A., Sagalevich A.M.* Geologicheskiye issledovaniya s glubokovodnykh obitayemykh apparatov «Mir» [Geological research from deep-sea manned vehicles «Mir»]. Moscow, Nauchnyy mir publ. 2002. 304 p.
5. *Galkin S.V., Sagalevich A.M.* Gidrotermal'nyye ekosistemy Mirovogo okeana: issledovaniya s glubokovodnykh obitayemykh apparatov «Mir» [Hydrothermal Ecosystems of the World Ocean: Research from the Mir deep-sea manned vehicles]. Moscow, GEOS publ. 2012. 144 p.
6. *Gurvich Ye.G.* Metallonosnyye osadki Mirovogo okeana. [Metalliferous sediments of the World Ocean]. Moscow, Nauchnyy mir publ. 1998. 340 p.
7. *Monin A.S., Bogdanov Yu.A., Zonenshayn L.P.* et al. Podvodnyye geologicheskiye issledovaniya s obitayemykh apparatov [Underwater geological research from manned vehicles]. Moscow, Nauka publ. 1985. 232 p.
8. *Riffo K., Le Pishon K.* Ekspeditsiya «Famous» [Expedition «Famous»]. Leningrad, Gidrometizdat publ. 1979. 222 p.
9. *Sorokhtin O.G.* Teplovyye potoki cherez sredinno-okeanskiye khrebtty [Heat flows through mid-ocean ridges]. *Okeanologiya; geodinamika.* Pod red. O.G.Sorokhtina. Moscow, Nauka publ. 1979. P. 178–181.
10. *Ballard R.D., Francheteau J., Juteau T.* et al. East Pacific Rise at 21°N: the volcanic, tectonic and hydrothermal processes of the central axis. *Earth and Planetary Sciences Letters.* 1981. Vol. 55. No. 1. P. 1–10.
11. *Busby R.F.* Manned submersibles. Office of NAVY. 1976. 764 p.
12. *Charlon J.L. Donval J.-P., Donville E.* et al. High methane flux between 15°N and Azores Triple Junction Mid-Atlantic Ridge, hydrothermal and serpentinization processes. *Eos Transactions American Geophysical Union.* 1977. Vol. 78. No. 46. 831 p.
13. *Converse D.R., Holland H.D., Edmond J.M.* Flow rates in the axial hot springs of the East Pacific Rise (21°N): Implications for the heat budget and formation of massive sulfide deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1984. Vol. 69. P. 158–175.

14. CYAMEX scientific team: First manned submersible dives on the East Pacific Rise 21°N (Project Rita): General results. *Marine Geophysical Research*. 1980. 189 p.
15. *Edmond J.M., Campbell A.C., Palmer M.R. and German C.R.* Geochemistry of hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: TAG and MARK. *Eos. Trans. American Geophysical Union*. 1990. Vol. 71. P. 1650–1651.
16. *Feely R.A., Lewison M.A., Massoth G.J.* et al. Composition and sedimentation of hydrothermal plume particles from North Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*. 1994. Vol. 99. No. B3. P. 4985–5006.
17. *B. Heezen & C. Hollister* The face of the Deep. N.Y. Oxford Univ. 1971. 641 p.
18. *Hot brines* and recent heavy metal deposits in the Red sea. N.Y. Springer Verlag. 1969. 600 p.
19. *Krasnov S.G., Cherkashev G.A., Stepanova T.V.* et al. Detailed geological studies of hydrothermal vents and processes. London, 1995. No. 87. P. 46–64.
20. *Lalou C., Brichet E.* et al. Age and implications on East Pacific Rise sulfide deposits at 21°N. *Nature*. 1982. Vol. 300. No. 5888. P. 169–171.
21. *Lalou C., Reyss J.-L., Brichet E.* et al. Hydrothermal activity on a 105-year scale at a slow-spreading ridge, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge 26 N. *Journal of Geophysical Research*. 1995. No. 100. P. 17855–17862.
22. *Larson R.L.* Near bottom geologic studies of the East Pacific Rise crest. *The Bulletin of the Geological Society of America*. 1971. Vol. 82. P. 823–841.
23. *Mills R.A.* Hydrothermal deposits and metalliferous sediments from TAG, 26° N Mid-Atlantic Ridge. *Geological Society London Special Publications*. 1995. No. 87. P. 121–132.
24. *Monin A.S., Plakhin E.A., Sagalevich A.M.* Visual observations of the Red Sea hot brines. *Nature*. 1981. Vol. 291. No. 5. P. 222–225.
25. *Murray J., Renard A.F.* Deep-sea deposits. Report “Challenger” Expedition (1873–1876). London: Eyre & Spottiswood, 1891. 525 p.
26. *Piccard J., Dietz R.S.* Seven miles down. The story of the bathyscaph “Trieste”. Jacques Piccard and Robert S. Dietz. New York, Putnam, 1961. 178 p.
27. *Rea D. K., Blakely R.J.* Short-wavelength magnetic anomalies in a rapid seafloor spreading. *Nature*. 1975. Vol. 255. P. 126–128.
28. *Rona P.A., Klinkhammer G., Nelsen T.A.* et al. Black smokers, massive sulphides and vent biota at the Mid-Atlantic ridge. *Nature*. 1986. Vol. 321. P. 33–37.
29. *Sagalevich Anatoly M., Isley III, Paul T.* The Deep. Voyages to Titanic and Beyond. Botanical Press. 2009. 299 p.

Плата с авторов за публикацию (в том числе с аспирантов) не взимается. Гонорар не выплачивается.

Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым предоставляет редакции право на ее опубликование в журнале и размещение в сети «Интернет».

Направление в редакцию работ, опубликованных ранее или намеченных к публикациям в других изданиях, не допускается.