

Белые столбы Покинутого города

А.Ю.Леин,

доктор геолого-минералогических наук

Ю.А.Богданов,

доктор геолого-минералогических наук

А.М.Сагалевиц,

доктор технических наук

В.И.Пересыпкин,

кандидат геолого-минералогических наук

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН

Л.Е.Дулов,

кандидат биологических наук

Институт микробиологии РАН

Москва

Американская экспедиция на научно-исследовательском судне «Атлантис» с подводным обитаемым аппаратом «Алвин» на борту 5 декабря 2000 г. обнаружила на океанском дне светлые карбонатные гидротермальные постройки, по форме напоминающие столбы. Верхушки и стенки некоторых из них омываются теплыми (40—75°C) растворами, так называемыми мерцающими водами, или муарами.

Участок дна с карбонатными постройками был назван Лост Сити (Покинутым городом), видимо, из-за отсутствия скопления фауны на дне, характерного для других активных гидротермальных полей [1, 2].

Гидротермальное поле Лост Сити расположено на 30°с.ш. в 15 км от точки пересечения Срединно-Атлантического хребта (САХ) с трансформным разломом Атлантис. Возраст океанической коры здесь составляет около 1.5 млн лет. Массив Атлантис поднимается с глубины 3800 м со дна прилегающей части трансформного разлома до глубин менее 1000 м [2].

Следует сказать, что глубоководные гидротермальные проявле-

ния океанических рифтов интенсивно исследуются с помощью глубоководных обитаемых аппаратов на протяжении уже 25 лет, но до сих пор полей, аналогичных Лост Сити, встречено не было.

В связи с этим в программу 47-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» входило наряду с исследованиями пяти других, ранее известных полей САХ — Снейк Пит (23°с.ш.), ТАГ (26°с.ш.), Брокен Спур (29°с.ш.), Рейнбоу (36°с.ш.), Лаки Страйк (37°с.ш.), — изучение геолого-геохимических, биологических и микробиологических особенностей этого нового гидротермального поля.

Поле Лост Сити находится в верхней части южного склона массива Атлантис на глубине 700—850 м, в поперечнике оно чуть больше 100 м.

Наши маршруты на глубоководных аппаратах «Мир-1 и -2» начались на южном склоне с глубины около 1100 м. Это позволяло получить представления не только о самом гидротермальном поле, но и о фундаменте, на котором оно находится. Нижние 100 м крутого, почти вертикального склона состоят из черных практически неизменных ультраосновных пород с немногочисленными светлыми

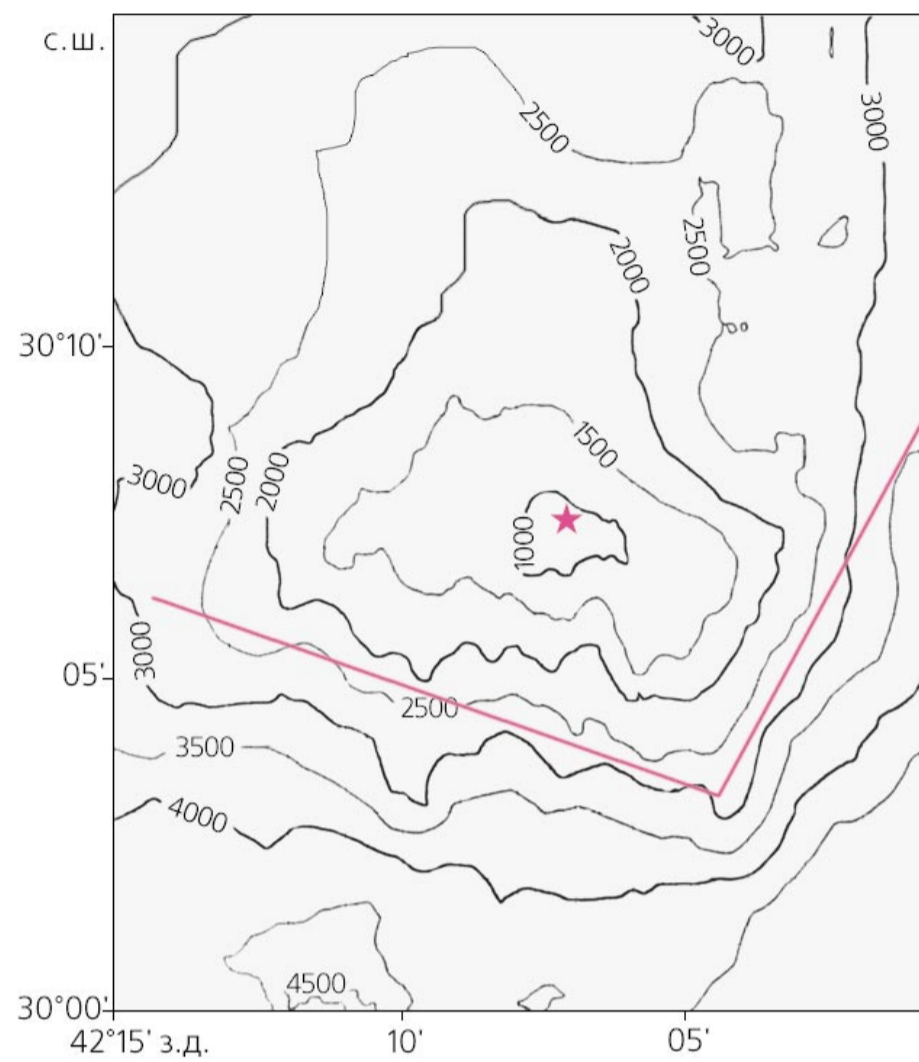
карбонатными (арагонитовыми) жилами и прожилками.

С глубины около 1000 м склон выполаживается, и на черных коренных породах залегают в разной степени окатанные обломки тех же пород, сцементированные коричневато-серым, сильно литифицированным карбонатным осадком. На глубине 900 м наряду с этими отложениями появляются многочисленные, выдержанные по простиранию, карбонатные плиты. Именно здесь начинается гидротермальное поле. По нашим наблюдениям, участок дна, представляющий собой вершину массива Атлантис, еще до начала формирования на нем гидротермального поля был сильно эродирован. Вниз по склону перемещалось огромное количество серпентинизированных перидотитов, а также габброидных пород и даже базальтов, часто деформированных и катаклазированных.

В пределах поля над карбонатными плитами возвышается до 30 построек. Большинство из них (высотой 3—5 м) имеет форму тонких шпилей диаметром до 20 см. Большие постройки (до 60 м высотой и 10 м в диаметре) представляют собой столбы, часто с выровненной горизонтальной вершиной. Их отвесные стены осложнены карнизами, пещерами, шпиле-



Расположение гидротермальных полей Срединно-Атлантического хребта.



Рельеф океанского дна в районе гидротермального поля Лост Сити, расположенного на пересечении Срединно-Атлантического хребта и трансформного разлома Атлантик. (Материалы 47-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш».)



Белые столбы — гидротермальные карбонатные постройки. Высота около 60 м, диаметр у основания около 10 м.

Здесь и далее фото из архива экспедиции

образными и холмовидными боковыми наростами. Даже горизонтальные поверхности здесь не покрыты сколько-нибудь заметным слоем пелагического осадочного материала. Скорости осадконакопления в этом районе составляют менее 1 см/1000 лет. Следовательно, гидротермальные процессы на участке дна поля Лост Сити начались менее 1000 лет назад. Минералогические (оптический, рентгено-дифракционный) и химические (в том числе атомно-абсорбционный, рентгено-флуоресцентный) анализы пород показали, что гидротермальные столбы сложены арагонитом и кальцитом (CaCO_3), а также бруситом $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (табл.1). Из микроэлементов в заметных количествах (0.1—2.74%) присутствует стронций, который входит в кристаллическую решетку карбонатных минералов.

Многие карбонатные постройки активны. Как уже упоминалось, они омываются мерцающими прозрачными теплыми водами, поднимающимися вдоль стенок. Теплые воды высачиваются также на плоских вершинах и уступах. Проба теплого

раствора, отобранного на вершине одного из столбов (отметка 3 «Алвин») титановым батометром, имела $\text{pH}=8.14$, значения pH окружающей океанской воды меньше 7.8 (табл.2).

В гидротермальном растворе поля Лост Сити обнаружены очень низкие концентрации Mg^{2+} и SO_4^{2-} ионов при двойном избытке Са на фоне обычных для окружающей океанской воды концентраций Na, Cl и Si. Растворы пахнут сероводородом и содержат в своем составе, помимо H_2S , заметное количество CH_4 , H_2 и следы аммонийного азота (табл. 2).

В местах выхода (сочений) гидротерм постройки обрастают нитевидными микроорганизмами, так называемыми микробными матами. Кроме того, породы, пропитанные гидротермальными растворами, поступающими по мельчайшим каналам (с диаметром 0.5—3 мм), трещинам спайности и другим видам порового пространства, содержат характерные ярко-белые желеподобные скопления микроорганизмов и продуктов их метаболизма. Вес желеподобной биомассы может достигать 3—5 г на 1 кг породы, а биомасса нитчатых микроорганизмов — 0.3—0.5 г. Заметим, что обрастания нитчатых микроорганизмов характерны для разных экотопов (и на суше, и в океане),

содержащих растворенный сероводород (HS^- -ион).

Сразу после подъема в закрытых контейнерах проб гидротермальных пород были отобраны белые желеподобные сгустки и помещены во флаконы со специальными тестовыми средами для последующего выделения различных групп микроорганизмов. Во флаконе со средой для выявления сульфатредукторов уже на вторые сутки был зафиксирован активный рост сульфатредуцирующих микроорганизмов (почернение питательной среды), а через семь суток активный процесс сульфатредукции был обнаружен даже во флаконе со средой для роста железоредукторов. Оказались положительными и тесты на аэробные гетеротрофы.

На борту судна проведены исследования скорости биогеохимических процессов с использованием меченых субстратов ($^{14}\text{CO}_2$ и $^{14}\text{CH}_4$) в различных экотопах этого необычного гидротермального поля. Самые высокие скорости темновой автотрофной $^{14}\text{CO}_2$ -ассимиляции (до 744 мкг С/кг-сут) обнаружены именно в белых желеподобных сгустках микроорганизмов, что доказывает наличие в них чрезвычайно активных хемоавтотрофов и метанотрофов. В этом же сообществе измерены и самые высокие

Таблица 1

Концентрация микроэлементов в карбонатных постройках гидротермального поля Лост Сити*

Элементы	Обр.6	Обр.2	Обр.14
Ca, %	45.4	5.87	22.7
Mg	0.63	26.8	12.3
Sr	2.74	0.181	0.62
Mn, ppm	146	20	22
Fe	436	287	177
Cu	34	<5	<5
Zn	1-11	8.9-18	8.8
Pb	49	35	28
Ni	26.3	<2	17.4
Co	1.9	<1	<1
Cr	12.5	8.6 (7)	14.5
V	59.2	34.2	26
Sc	25	0.0	—
Rb	23	35	—
Zr	45	10	—
Li	43	40	20
Cd	4.2	5.1	6
Ba	129	18	—

* По данным рентгено-флуоресцентного и атомно-абсорбционного анализов.

Таблица 2

Характеристика флюида Лост Сити и первичных гидротермальных растворов

Характеристики Страйк	Океанская вода (придонная)	Реальный раствор Лост Сити	Первичные гидротермальные растворы САХ				
			Лост Сити	Рейнбоу	Брокен Спур	Лак	
T°, C	7		40—75	360	360	308—324	
pH	7.8	8.14	9—9.8	2.9—3.1	—	3.8—6.4	
Компоненты, мМ/кг	Mg	54.0	59.8	9—19	—	0	0
	Ca	10.4	12.4	21.0—23.3	—	11.8—12.8	32.3—36.7
	Na	475	—	479—485	—	419—422	347—426
	Cl	553	555.1	546—549	753	469	417—472
	SO_4^{2-}	28.6	25.9	5.9—12.9	—	—	—
	H_2S		0.0012	0.064	2.0—2.5	8.5—11.0	2.1—3.0
	CH_4	$4 \cdot 10^{-7}$	0.093	0.13—0.28	2.0—2.2	0.065—0.130	0.3—0.7
	H_2	$4 \cdot 10^{-4}$	0.683	0.25—0.43	13.0	0.426—1.0260	0.4 —
CO_2	2.3	—	—	2.9—3.1	6.0—7.1	13.0—28.0	
Исходная порода		перидотит + габбро	перидотит + габбро	перидотит + габбро	базальт	базальт	

скорости процесса анаэробного метаноокисления.

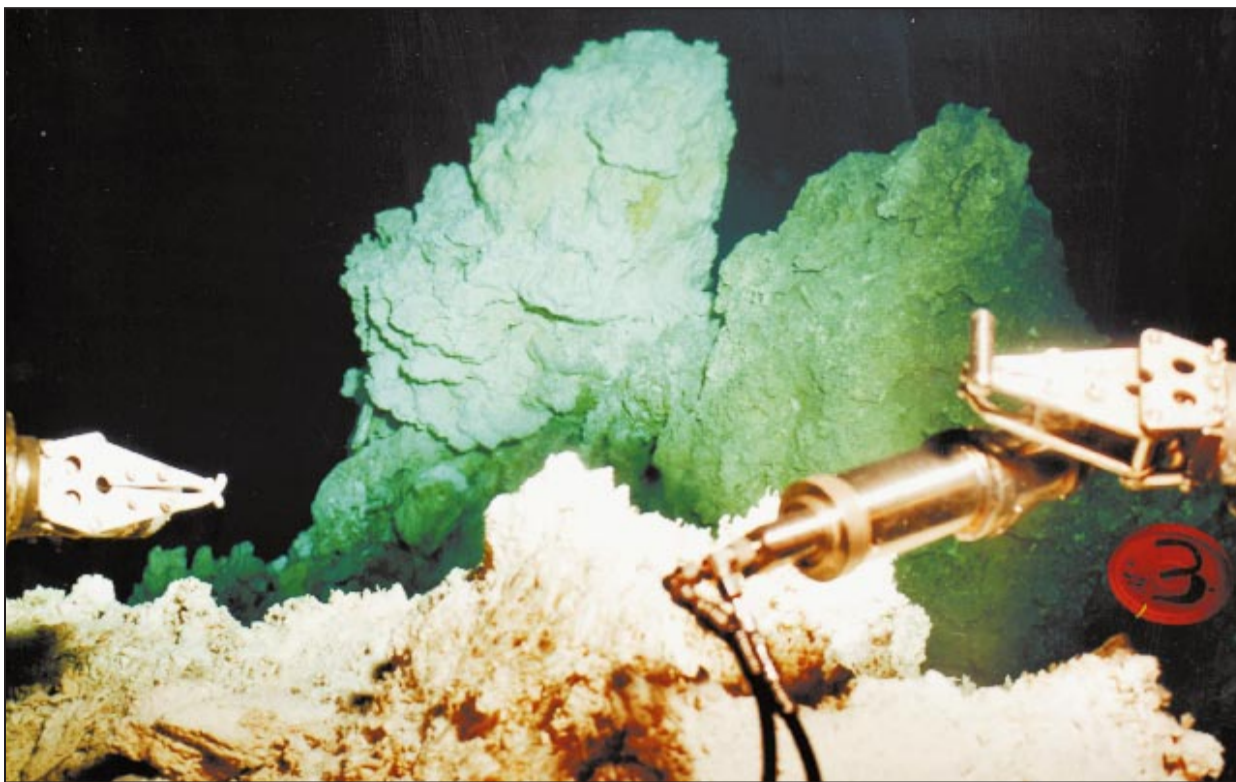
Из донной фауны в пределах поля Лост Сити американской экспедицией обнаружены крабы, морские ежи и многочисленные одиночные кораллы. В нашей экспедиции собрана более представительная коллекция фауны, включающая, помимо перечисленных выше животных, моллюски, морские звезды, офиуры и полихеты. Зона массового поселения последних — нижняя поверхность карнизов, омываемых теплыми водами.

Большая часть животных относится к так называемой фоновой фауне. Этим животных на гидротермальное поле привлекает «свежее» хемосинтезированное органическое вещество — биомасса микроорганизмов. Бактериальные комки, в частности, обнаружены в желудках морских ежей, «пасущихся» на бактериальных матах. Специфическая фауна с симбиотрофным типом питания, характерная для всех известных гидротермальных полей в океане, на поле Лост Сити пока достоверно не определена.

Для уточнения природы органического вещества гидротермальных пород и флюидов проведены исследования концентрации и состава n-алканов — своеобразных биологических маркеров.

В распределении n-алканов в постройках зафиксированы ярко выраженные максимумы четных низкомолекулярных алканов C_{12} — C_{16} . Это заставляет предполагать преимущественно биологическую, точнее микробиологическую природу органического вещества в породах поля.

В пробах гидротермальных растворов распределение n-алканов носит несколько иной характер. Максимумы четных n-алканов обнаружены в области C_{10} — C_{14} , C_{20} — C_{24} и C_{28} — C_{32} . На хроматограммах во всех пробах пород и растворов Лост Сити присутствуют в изобилии циклоалканы — соединения, синтезируемые практически только микроорганизмами. Вместе с тем, наличие характерных для нефтяных углеводородов максимумов n-алканов C_{10} — C_{14} при



Карбонатные постройки с бактериальными обрастаниями в районе выхода теплой воды (муаров). Идет измерение температуры автономным термометром с помощью манипулятора подводного аппарата «Мир-2».



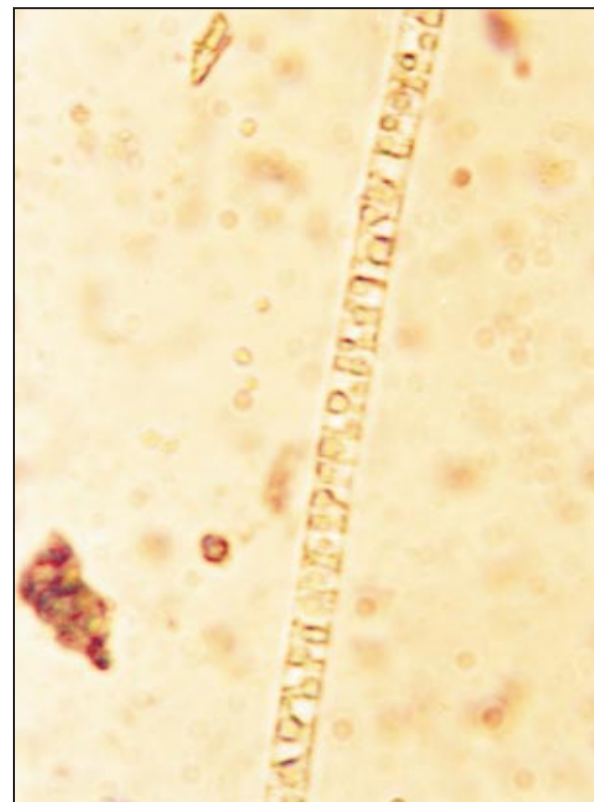
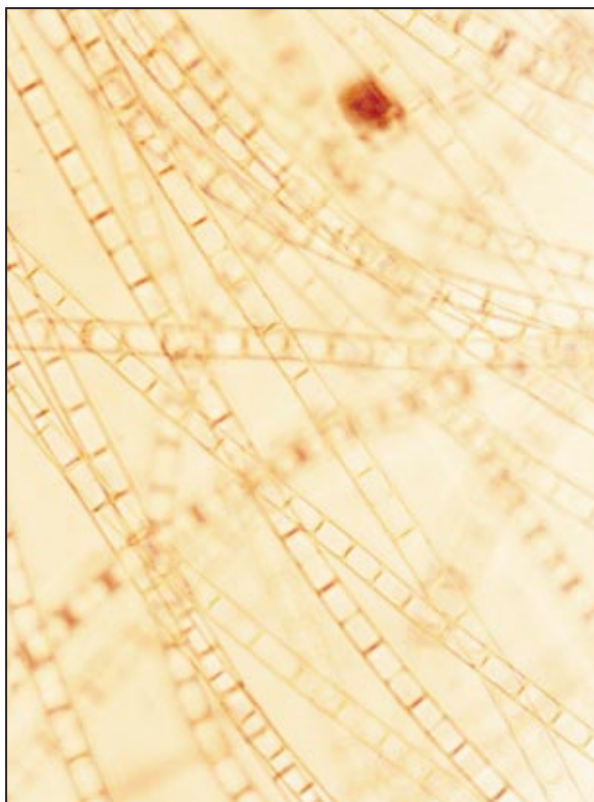
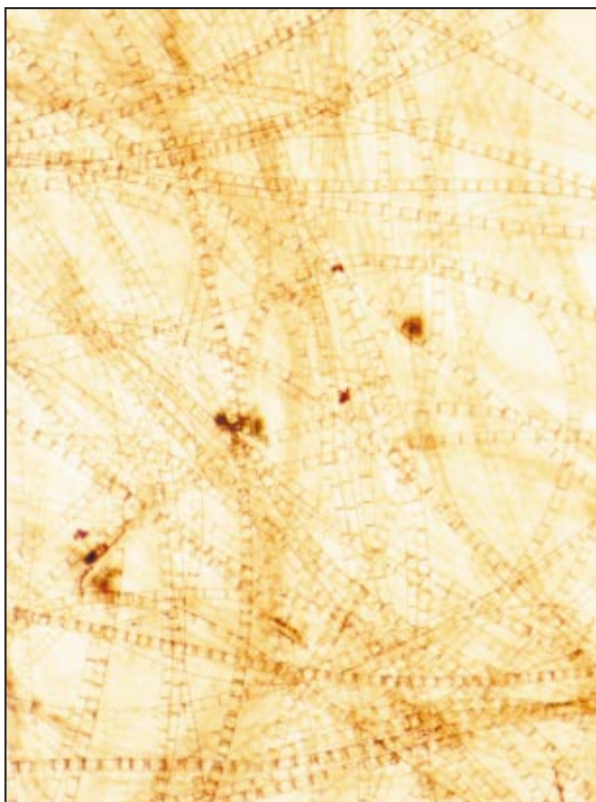
Осыпь обломков карбонатных пород и отмерших кораллов на склоне гидротермальной постройки. Размер обломков от нескольких сантиметров до двух-трех метров. Хорошо видна биологическая ловушка.

пониженном содержании высокомолекулярных гомологов C_{23} — C_{31} не исключает возможности низкотемпературного катализа части углеводородов в подповерхностных условиях.

Именно в процессах, происходящих в близповерхностных условиях под гидротермальным полем Лост Сити, следует искать объяснение всем отмеченным выше ано-

малиям, начиная от низкотемпературных и сильно щелочных растворов и кончая необычным химическим и минеральным составом пород.

Лост Сити, так же как еще два гидротермальных поля САХ (Рейнбоу и Логачев), относится к глубинному типу циркуляционных гидротермальных систем в активных рифтах океана. Это означает, что



Микрофотографии бесцветных нитчатых серобактерий, выделенных из обрастаний на поверхности карбонатных построек. Пучок нитчатых микроорганизмов. Увел.200 (а) и 400 (б). Бактериальная нить с выделениями элементарной серы внутри клеток. Увел. 600 (в).

океанская вода за пределами вулканически активной зоны САХ достигает низов коры—верхов мантии и участвует в серпентинизации ультраосновных пород. При этом остаточная океанская вода нагревается до $T > 350^\circ\text{C}$, взаимодействует с породами и становится рудоносной. Для таких растворов характерны низкие значения $\text{pH}=3.5$ и концентрации CH_4 и H_2 , повышенные почти в 10 раз по сравнению с растворами, образующимися при гидротермальном изменении базальтов (табл.2).

В зоне серпентинитовой протрузии растворы, обладающие положительной плавучестью, устремляются вверх. При этом уменьшается гидростатическое давление, растворы становятся неустойчивыми и испытывают так называемую фазовую сепарацию, при которой часть металлов переходит в твердую фазу.

Такая схема характерна для всех гидротермальных полей, расположенных на глубинах менее 3000 м. Но на фазовой сепарации преобразование флюида поля Лост Сити не заканчивается. Напомним, что это поле расположено в зоне пересечения САХ и трансформного разлома Атлантис, т.е.

в зоне интенсивного дробления пород, слагающих дно. В связи с этим здесь создаются идеальные условия для формирования и длительного существования так называемой подповерхностной биосферы.

Существование подповерхностной биосферы принимается как факт многими исследователями, при этом никто не располагает объективными доказательствами ее реальности. Тем интереснее и важнее остановиться на характеристике процессов, происходящих под дном поля Лост Сити и преобразующих остаточный кислый гидротермальный раствор в щелочной, полностью лишенный металлов, что абсолютно не характерно для растворов других полей, также испытывавших фазовую сепарацию (табл.2).

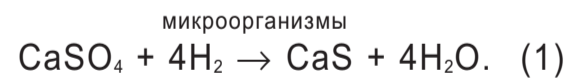
Итак, что же происходит?

В подповерхностных условиях, в зоне дробления пород, горячий гидротермальный раствор, обогащенный метаном и особенно водородом, встречается с проникшей сюда придонной океанской водой и охлаждается до температуры менее 100°C .

Происходит существенное изменение состава флюида, преоб-

разующегося во вторичный смешанный раствор, в котором, с одной стороны, практически нет металлов, с другой — присутствуют в незначительных количествах Mg^{2+} и SO_4^{2-} , которых не могло быть в первичном флюиде, а концентрации Na^+ и Cl^- такие же, как в океанской воде.

Низкая концентрация сульфата в растворе Лост Сити свидетельствует о том, что в зоне смешения горячего флюида (содержащего много водорода) с водой (содержащей сульфат-ион) происходит так называемая водородная сульфатредукция с участием термофильных микроорганизмов, возможно, из группы археобактерий, восстанавливающих сульфат по реакции



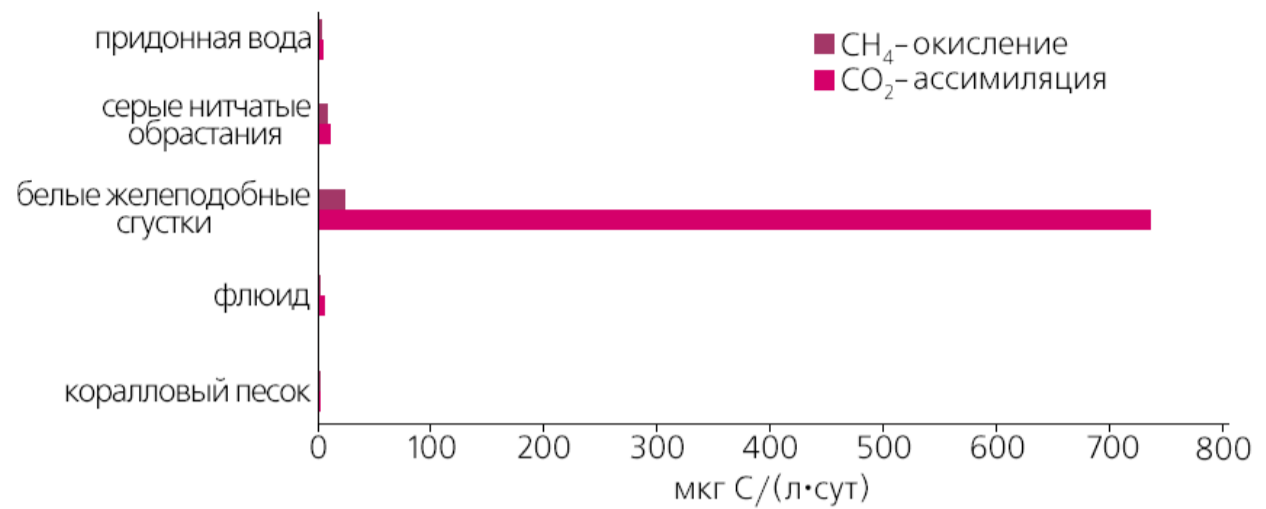
Гидролиз образующегося при этом сульфида кальция по реакции



объясняет подщелачивание раствора до $\text{pH} = 9-9.9$ (табл.2). При выходе на поверхность дна такого раствора создаются условия для выпадения карбонатов кальция и магния, а также брусита

$Mg(OH)_2$ — второго после арагонита минерала в гидротермальных породах поля Лост Сити. Выпадение брусита приводит к резкому снижению содержания иона Mg в растворе (табл.2). На последнем рисунке показана схема преобразования рудоносного глубинного горячего кислого флюида в теплый щелочной нерудоносный восстановленный раствор. В составе раствора, отобранного на поверхности дна, присутствует H_2 , CH_4 , H_2S и NH_4 . Вероятно, часть из них образовалась в подповерхностной биосфере, т.е. имеет биогенное происхождение. Следовательно, в сообществе микроорганизмов подповерхностной биосферы активны не только сульфатредукторы, но и анаэробные метанотрофы, метаногены и другие микроорганизмы.

Масштабы процессов, происходящих в подповерхностной биосфере, и вклад продуктов метаболизма сообщества микроорганизмов в состав флюида и пород постро-



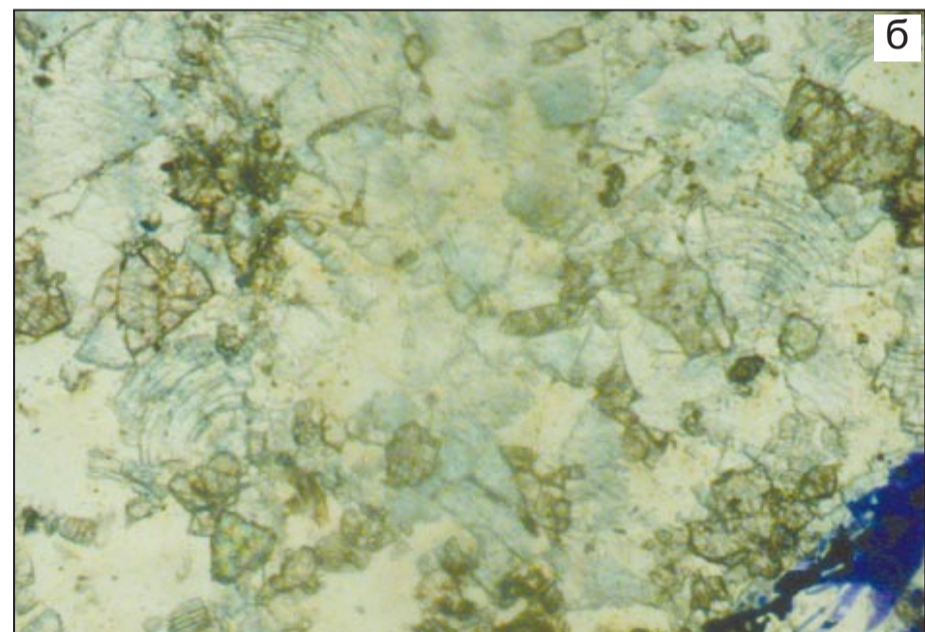
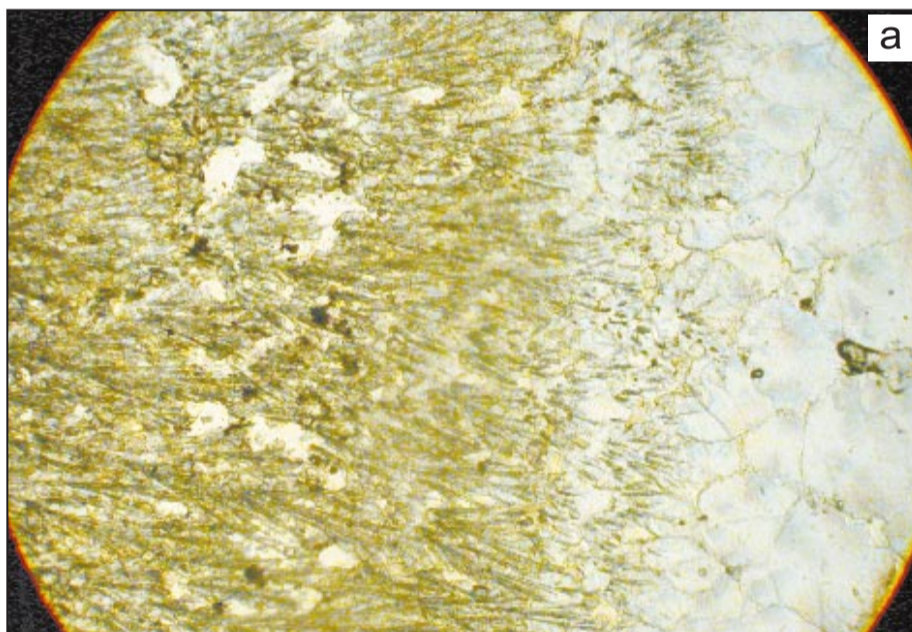
Скорости биогеохимических процессов в различных экотопах поля Лост Сити.

роек можно будет оценить после изотопного анализа метана ($\delta^{13}C$), водорода (δD) и восстановленных и окисленных соединений серы.

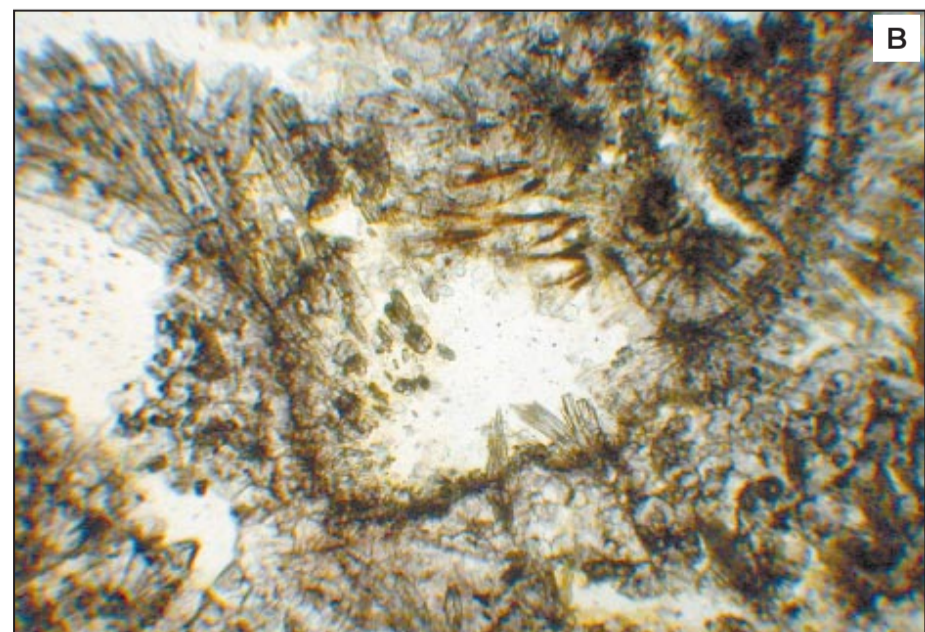
Таким образом впервые, при изучении гидротермального поля Лост Сити, оказалось невозможным объяснить генезис флюи-

да и минералов, слагающих постройку, без привлечения процессов, которые протекают в подповерхностной биосфере с ее литоавтоотрофными термофильными микроорганизмами, предположительно относящимися к живущим на водороде сульфатредукторам из группы архебактерий.

В заключение надо еще раз



Брусит, арагонит, кальцит и другие карбонаты гидротермальных построек поля Лост Сити. Прозрачные шлифы. Минералы карбоната кальция разной степени раскристаллизации: от тонкодисперсных до крупнокристаллических, увел. 160 (а); гидротермальный брусит («древесные кольца») и арагонит в породе, слагающей верхушку столбовидной постройки, увел. 320 (б); фрагменты флюидподводящих каналов в карбонатной матрице гидротермальных



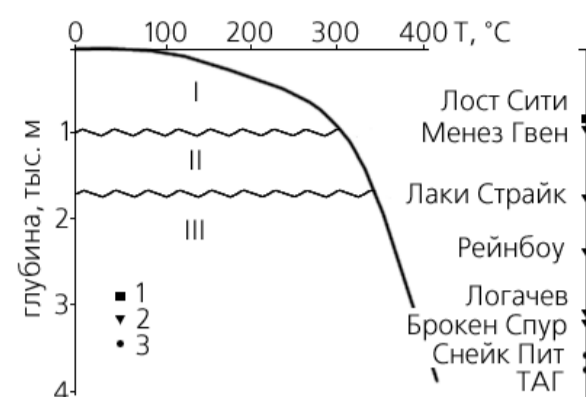
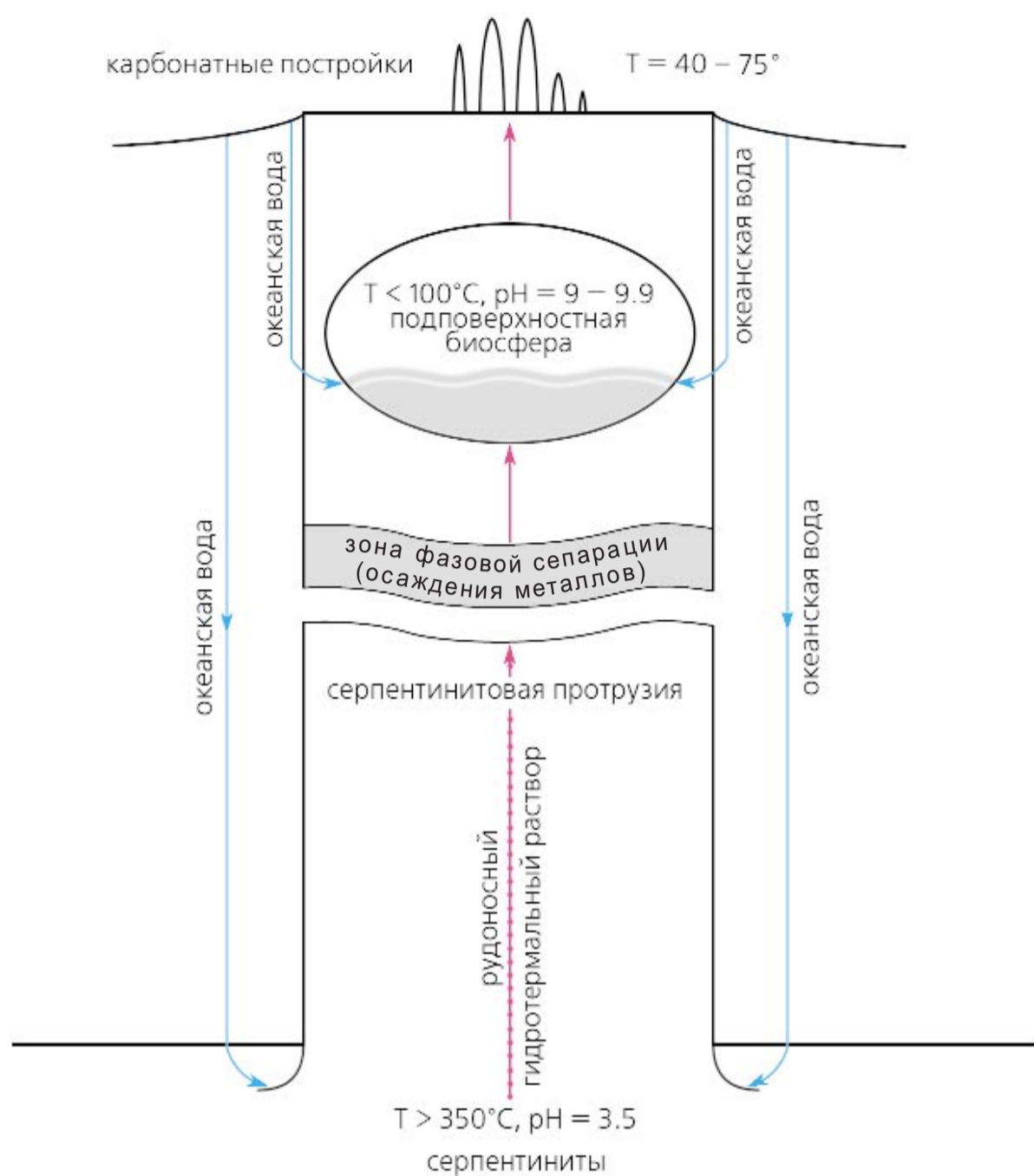


Схема гидротермальной циркуляционной системы поля Лост Сити. Справа: термобарические условия рудоотложения на дне океана. Римскими цифрами показаны минеральные зоны: I — сульфид-содержащая и кремнисто-сульфатная, II — серно-колчеданная и цинково-колчеданная, III — медно-колчеданная и медно-цинково-колчеданная. Арабскими цифрами обозначены флюиды: 1 — первичные глубинные, 2 — после процессов сепарации, 3 — преобразованные в процессе сепарации, а также в подповерхностной биосфере.

подчеркнуть, что открытие поля Лост Сити — это открытие ранее не известного природного явления в глубоководном океане. ■

Литература

1. Blackman D., Karson J., Kelley D. et al. // *InterRidge News*. 2001. V.10(1). P.33—36.
2. Kelley D., Karson J., Blackman D. et al. // *Nature*. 2001. V.412. P.145—148.
3. Douville E., Charlou J.L., Donval J.P. et al. Trace elements in fluids from the new Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR): a comparison with other Mid-Atlantic Ridge fluids // *AGU 1997 Fall Meeting*. Washington, 1997. P.F832.
4. Леин А.Ю., Гричук Д.В., Гурвич Е.Г., Богданов Ю.А. // *Докл.РАН*. 2000. Т.375. №3. С.380—383.
5. Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H. et al. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1998. V.62(13). P.2323—2333.
6. Von Damm K.L., Bray A.M., Buttersmore L.G., Oosting S.E. // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V.160. P.521—536.