

УДК 551.465

ИСТОЧНИКИ МИКРО- И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОСТРОЙКАХ ПРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РИФТОВ С ОСАДОЧНЫМ ПОКРОВОМ (НА ПРИМЕРЕ ВПАДИНЫ ГУАЙМАС, ЮЖНЫЙ ТРОГ)

© 2018 г. А. Ю. Леин, О. М. Дара, О. Ю. Богданова, Г. В. Новиков,
Н. В. Ульянова, А. П. Лисицын

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
e-mail: lein@ocean.ru*

Поступила в редакцию 18.02.2016 г.

Исследованы минералогия и геохимия фрагмента активной гидротермальной постройки из Гидротермального холма Южного трюга впадины Гуаймас в Калифорнийском заливе. Проба отобрана с глубины 1995 м с помощью подводного обитаемого аппарата “Пайсис” в 12-м рейсе ИО РАН им. П.П. Ширшова на НИС “Академик Мстислав Келдыш”. Фрагмент постройки состоит из двух сросшихся труб – рудной (пирротиновой) и нерудной (карбонатной), объединенных в одну постройку внешней барит-опаловой зоной.

Рудная постройка расположена в рифтовой зоне впадины Гуаймас с мощным осадочным покровом и обеднена металлами по сравнению с рудами из рифтовых зон открытого океана, не перекрытых осадочными отложениями. Это объясняется потерей металлов на границе горячих силлов с осадочной толщей и процессами взаимодействия гидротермальных растворов с осадочными отложениями. Осадочная толща способствует длительному сохранению эндогенного тепла и процесса рудообразования.

Рудные постройки впадины Гуаймас состоят, главным образом, из пирротина, имеют специфический набор макро- и микроэлементов и РЗЭ, содержат углеводороды и могут служить поисковым признаком скрытых полиметаллических залежей, рассматриваемых в качестве “корней” рудопроявлений, расположенных под поверхностью дна в молодых активных рифтах с высокой скоростью спрединга и с высокой скоростью седиментации, т.е. в приконтинентальных участках рифтов гумидной зоны с лавинной седиментацией.

DOI: 10.7868/S0030157418020119

ВВЕДЕНИЕ

Геохимическую специфику руд, наряду с их промышленной востребованностью, определяют, как правило, металлы и их источники. Среди гидротермальных колчеданных руд по минеральному составу выделяются рудопроявления рифтовых зон, перекрытых осадочными отложениями. Такие руды обнаружены в молодых приконтинентальных рифтах.

Большинством исследователей априори признается пульсационный характер разгрузки гидротермальных растворов с разным содержанием рудных компонентов. В связи с этим представляется полезным сопряженное исследование современными аналитическими методами минералогии и геохимии рудной и нерудной построек.

Со времени первой публикации по минералогии и геохимии гидротермальных построек впадины Гуаймас прошло 30 лет [16]. Появление новых

методов анализа геологических объектов, в частности метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС) и атомно-эмиссионного с индуктивно связанной плазмой (АЭ), позволяет определять спектр РЗЭ и большое количество микроэлементов.

Цель исследования – установление поведения элементов в рудной и нерудной постройках, образованных из гидротермальных флюидов, трансформированных при прохождении через осадочную толщу, на примере впадины Гуаймас в Калифорнийском заливе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужил фрагмент типичной постройки действующего курильщика поля Гидротермальный холм из Южного трюга впадины Гуаймас (рис. 1, 2), отобранный в 12-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”

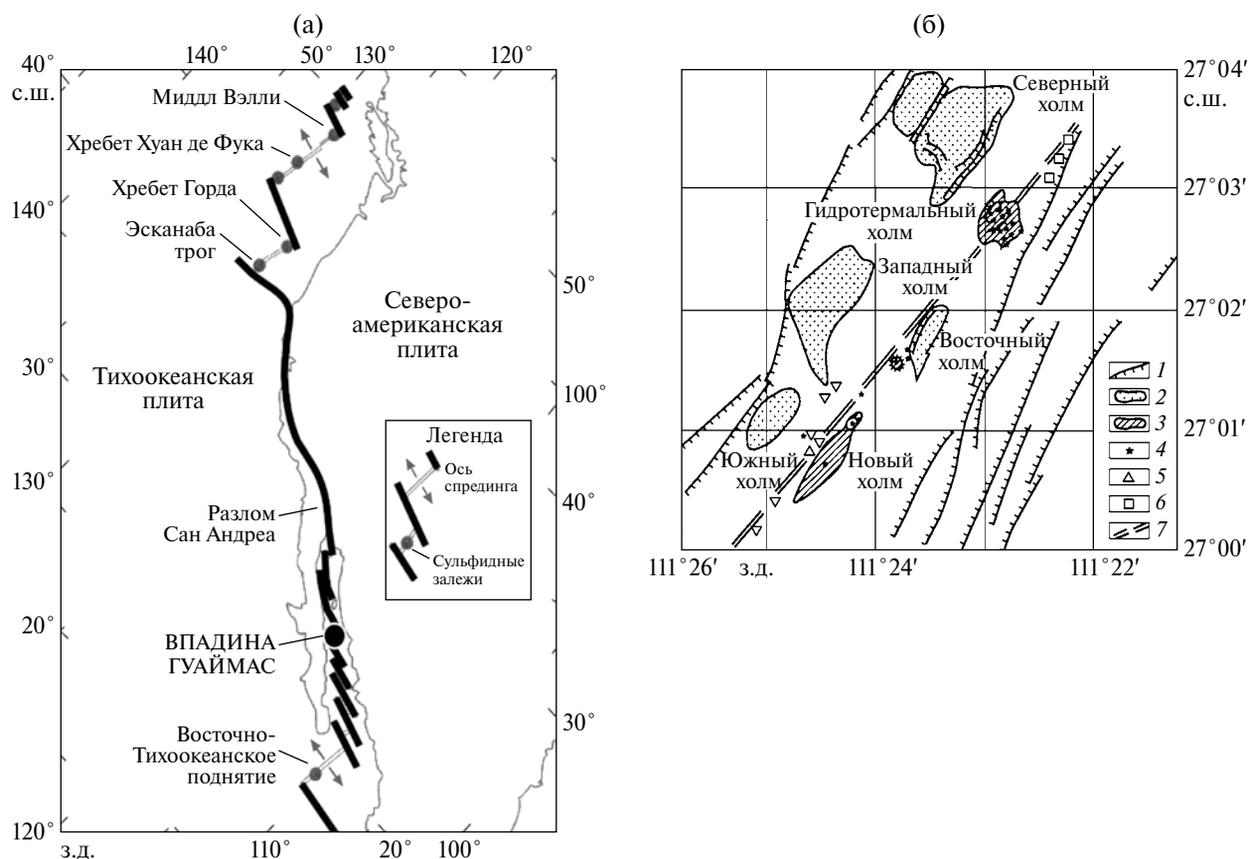


Рис. 1. Схема расположения пирротиновых залежей в зонах спрединга, перекрытых осадками. С юга на север: впадина Гуаймас (Guaymas Basin), Эсканаба трог (Escanaba Trough) и Миддл Вэлли (Middle Valley) (а) и структурная схема Южного трюга впадины Гуаймас (б). 1 – разломные уступы; 2 – холмы, возникшие под вулканическими куполами; 3 – гидротермальные холмы; 4–6 – гидротермальные источники: 4 – изученные в 12-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”, 5 – обнаруженные буксируемым аппаратом “Звук Гео”, 6 – изученные американской экспедицией; 7 – главная осевая трещина [2].

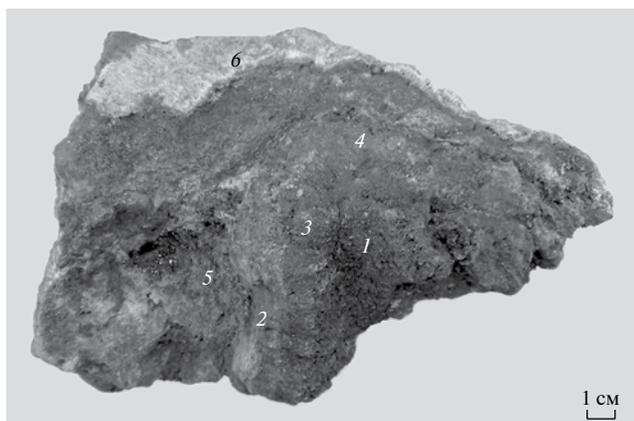


Рис. 2. Фрагмент (20×21×9 см) двух сросшихся пирротиновых труб активного черного курильщика (штупф П-1615-1, 27°02' с.ш., 111°23' з.д.; глубина 1995 м; погружение ПОА “Пайсис-7” 197/22). Впадина Гуаймас: 1 – канал рудной трубы; 2 – перегородка между рудной и нерудной трубами; 3 – средняя зона стенки рудной трубы; 4 – внешняя зона стенки рудной трубы; 5 – приканальная зона нерудной трубы; 6 – внешняя зона постройки, состоящей из рудной и нерудной труб.

на ст. П-1615 (глубина 1995 м) при помощи ПОА “Пайсис-ХІ”.

Фрагмент состоит из двух сросшихся труб. Стенки одной из них сложены преимущественно рудными минералами (пробы 1 и 3, карбонат-пирротиновая руда), а другой – преимущественно нерудными (проба 2). Обе трубы объединены в единую постройку внешним слоем (проба 4), состоящим в основном из опала и барита с высоким содержанием Sr (табл. 1, 2).

Содержание макрокомпонентов (Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe_{общ}) в составе проб определяли атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой, FeO – титриметрическим методом, Fe_{магн} – магнитно-химическим, S_{общ}, SO₃, ппп – гравиметрическими методами, F – ионометрическим. Содержание Cu, Zn и следующий ряд микроэлементов (Li, Cr, Co, Ni, Sr, Cd, Ba) определяли масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой и методом АЭ. Содержание остальных микроэлементов (Be, Se, Ga, As, Se, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Sn, Sb, Te, Cs, Hf, Ta, W,

Таблица 1. Химический состав проб из фрагмента гидротермальной постройки, гидротермально-измененных осадочных отложений и неизмененных базальтов из Южного трога впадины Гуаймас

Элементы	Пробы						
	1	2	3	4	5 (n=10)	6 (n=14)	7
Na ₂ O, %	0.085	0.098	0.51	0.28	0.271	1.93	2.76
MgO	0.043	0.110	0.31	0.12	0.217	8.15	7.58
Al ₂ O ₃	0.19	0.061	0.038	0.14	0.629	14.70	15.79
SiO ₂	0.27	1.13	2.66	55.20	3.05	48.75	50.16
K ₂ O	0.029	0.03	0.15	0.059	0.031	0.10	0.13
CaO	2.81	26.70	8.44	4.57	0.820	10.40	12.19
TiO ₂	0.003	0.005	0.002	0.005	0.047	2.06	1.47
MnO	0.23	1.02	0.43	0.28	—	0.17	0.16
Fe _{общ}	48.0	25.50	37.90	8.53	0.400	4.87	—
FeO	4.30	1.14	0.85	1.26	0.18	6.74	9.51
Fe _{магн}	1.49	0.34	1.04	0.13	—	—	—
S _{общ}	35.2	18.40	29.60	8.26	—	—	—
SO ₃	0.27	<0.10	0.59	5.17	—	—	—
F	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	—	—	—
Ппп	12.3	0.80	8.93	6.45	—	—	—
Ba, 10 ⁻⁴ %	67	26	440	2400	162	—	12.2
Sr	36	210	200	1300	479	—	142
Cu	6800	2800	5300	1400	154	103.4	82.3
Zn	43900	22000	41200	8400	690	183.5	80.2

Примечание. Пробы 1–4 из фрагмента постройки П-1615: 1 – сульфидная труба, руда из стенки вблизи полого канала; 2 – нерудная труба, средняя проба, 3 – сульфидная труба, руда из стенки на удалении от канала, 4 – внешняя зона постройки, объединяющая рудную и нерудную трубы; 5 – средний химический состав гидротермально измененных отложений из скважины 478А [7]; 6 – средний химический состав “неизмененных” базальтов из скважины 485 А [6, табл. 18, с. 49–50]; 7 – средний химический состав N-MORB базальтов ВТП [15].

Re, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U) определяли методом МС, так же как содержание редкоземельных элементов (РЗЭ).

Анализы выполнены в ВИМСе на следующей аппаратуре: масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 (“Perkin Elmer”, США), атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima-4300 DV (“Perkin Elmer”, США), фотометре КФК-3 (“ЗОМЗ”, Россия), ионометре “Эксперт001” (“Эжоника”, Россия).

Пределы обнаружения элементов методом ИСП МС составляют 0.0n-0.00n г/т. Для ряда элементов (Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn) и микроэлементов (Li, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Ba) анализ проводили методами ИСП МС и АЭ МС (с погрешностью определения химического состава III категории точности ОСТ 41-08-212-04).

Минеральный состав гидротермальных образований пробы П-1615 изучен на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS, Германия) и сканирующем электронном микроскопе SEM Vega 3 (Tescan, Чехия) с микрозондом INCA Energy 350 (OXFORD Instruments, Великобритания) в аналитической лаборатории ИО РАН.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Впадина Гуаймас (Калифорнийский залив) в тектоническом плане расположена в приконтинентальном развивающемся рифте, на границе Северо-Американской и Тихоокеанской плит. Гидротермальная деятельность в этом районе известна с 1980 г. [17]. Во впадине Гуаймас трижды работали экспедиции ИО РАН на НИС “Академик Мстислав Келдыш” с подводными обитаемыми аппаратами (ПОА) “Пайсис-VII, XI” (12-й рейс), а позднее

Таблица 2. Минеральный состав проб из фрагмента гидротермальной постройки

Содержание минералов, %	Пробы			
	1	2	3	4
Пирротин	60–75	8–10	40–50	–
Сфалерит	10–15	8–10	20–25	3–5
Вюртцит	2–3	2–3	3–4	?
Кубанит	2–3	–	сл.	–
Кальцит	5–7	35–45	25–30	–
Барит	–	+	–	50–60
Ангидрит	+	–	+	+
Магнетит	+	+	–	–
Гематит	–	0.5–1.5	0.5–1.0	–
Халькопирит	–	+	0.5–1.0	–
Кристобалит	–	+	–	–
Сидерит	–	+	–	–
Цинкозит	–	+	–	–
Галенит	–	+	–	–
Опал	–	++	+	+++
Пирролюзит	–	–	+	–
Сложные сульфиды Cu, Zn, Pb	–	–	+	–
Магнезиоферрит	–	–	+	–
MgSO ₄	+	–	–	–
Na ₂ Ca(CO ₃) ₂	–	–	–	+
NaCl	–	–	–	+
MgCl ₂	–	–	–	+

Примечание. Характеристика проб дана в табл. 1. Прочерк – не обнаружено, “+” – единичные определения.

с глубоководными обитаемыми аппаратами (ГОО) “Мир-1, 2” (22- и 49-й рейсы).

Рифтовая зона впадины Гуаймас является продолжением зоны спрединга Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП). В отличие от большей части глобальной рифтовой системы океана, рифтовая зона Калифорнийского залива перекрыта мощной толщей осадочных отложений, через которые поднимаются к поверхности дна гидротермальные растворы. Разгружаясь, они образуют на дне гидротермальные постройки, в составе которых присутствуют колчеданные руды. В океане открыты три таких колчеданных залежи: 1 – во впадине Гуаймас, 2 – Миддл Вэлли на севере хребта Хуан де Фука, 3 – Эсканаба трог на юге хребта Горда (рис. 1).

Преимущество этих трех залежей по сравнению с рудопроявлениями открытого океана в том, что они расположены на сравнительно небольшой глубине и вблизи континента. В связи с этим их минеральный и химический составы представляют первостепенный интерес в научном и прикладном плане.

Геологическое строение Южного трога впадины Гуаймас детально описано в работе [11]. На поле Гидротермальный холм, откуда отобран исследуемый образец, значительное место занимают сульфидные постройки высотой от первых сантиметров до 50 м. Постройки венчаются трубами, из которых вырываются черные дымы и горячие растворы с максимальной температурой 310–359 °С.

Во впадине Гуаймас, наряду с сульфидными постройками “черных курильщиков”, широко развиты постройки, сложенные преимущественно нерудными компонентами, с небольшой примесью сульфидных минералов. Температура растворов, из которых высаживаются нерудные образования, колеблется в широких пределах, но чаще всего от 150 до 200 °С [12]. Нередко наблюдаются сросшиеся трубы, образованные, видимо, из растворов с разными температурами и минеральным составом. К их числу относится постройка, фрагмент которой является предметом нашего исследования (рис. 2).

Минеральный и химический составы обр. П-1615.

Как уже отмечалось, фрагмент постройки состоит из двух сросшихся труб: рудной и нерудной (табл. 1). В центре каждой трубы отчетливо выделяется полый канал. В данном фрагменте обнаружено максимальное содержание $Fe_{общ}$, $S_{общ}$, Cu , Zn , Pb , Ba , Sr по сравнению с базальтами и гидротермально-измененными осадочными отложениями, в которых содержится больше Na_2O , MgO , Al_2O_3 , K_2O и TiO_2 (табл. 1).

В химическом составе обеих труб наблюдается характерная зональность, заключающаяся в уменьшении содержания рудных компонентов (Fe , Cu , Zn) и серы в направлении от центра трубы (канала) к ее периферии и в увеличении содержания в этом же направлении нерудных компонентов (CaO , Ba , Sr и SiO_2) (табл. 1).

Во внешней зоне фрагмента постройки содержание железа уменьшается в 6–12 раз, а Cu и Zn – примерно в 5 раз по сравнению с приканальным участком сульфидной трубы в пробе 1 (табл. 1).

Образование разных по химическому составу труб, так же как их зональность, видимо, свидетельствуют о пульсационном режиме гидротермальных эксгаляций и об их зависимости их от температуры, состава и от доли участия в них окружающей морской и иловой воды.

Основными рудными минералами обеих труб являются полиморфные модификации пирротина, составляющие более 40% в рудной постройке и 8–10% в нерудной (табл. 2). Из них надежно идентифицированы антиферромагнитный гексагональный 1С пирротин $Fe_{1-x}S$ и ферромагнитный 4С моноклинный пирротин Fe_7S_8 , которые встречаются как в виде мономинеральных агрегатов, так и в разнообразных соотношениях друг с другом (рис. 3). Текстурно-структурные характеристики колчеданных руд приведены на рис. 4, а электронные микрофотографии минералов руд – на рис. 5 и 6.

Минеральная ассоциация, обнаруженная в пробах 1 и 3, относится к наиболее высокотемпературной. Содержание гексагональной модификации пирротина в приканальной зоне рудной трубы (проба 1) доходит до 75% (табл. 2). В составе этой же пробы присутствуют сфалерит, халькопирит, вюртцит и кубанит. Моноклинный пирротин появляется в рудной трубе при удалении от канала к периферийной зоне постройки. В пробе 1 в небольших количествах обнаружен кальцит и сульфаты Ca и Mg (табл. 2).

В пробе 3 на фоне убывающего количества высокотемпературного пирротина увеличивается содержание сфалерита, а из нерудных – кальцита и опала. В пробе 3 обнаружено также небольшое

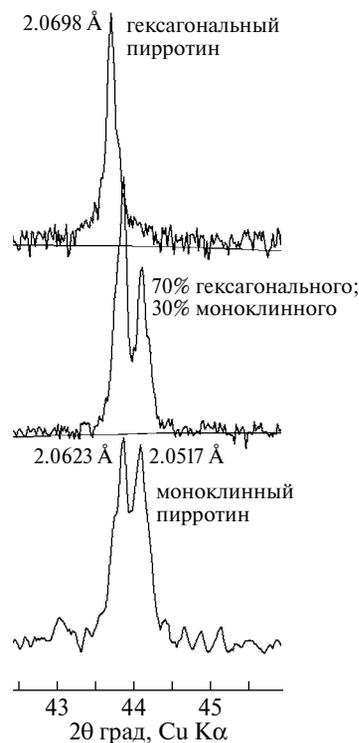


Рис. 3. Фрагменты дифрактограммы образцов, в составе которых идентифицированы полиморфные модификации пирротина и их смесь.

количество пиролюзита, сложных сульфидов Cu , Zn , Pb и магнезиоферрита (табл. 2).

В нерудной трубе (проба 2) моноклинный пирротин сосредоточен в ее приканальной стенке, достигая в ней 30–65%, а в друзах, выполняющих полости, он составляет 100%. Для нерудной трубы также характерно присутствие малых количеств сфалерита, вюртцита, халькопирита, наряду с кальцитом, гипсом, баритом, опалом, элементной серой ромбической структурной модификации (S_8).

Таким образом, минералы из центральной зоны рудной трубы (пробы 1 и 3) представляют собой высокотемпературную ассоциацию, а минералы нерудной трубы и внешней зоны постройки относятся к низко- и среднетемпературной ассоциациям.

Важным критерием выделения температурных минеральных ассоциаций следует считать преобладание одной из двух модификаций пирротина в гидротермальных образованиях. Установлено, что верхний температурный предел стабильности моноклинного пирротина равен 254 °C [3]. Гексагональный пирротин образуется в широких температурных пределах в зависимости от содержания железа в его составе. Он устойчив и при температуре выше 300 °C [5].

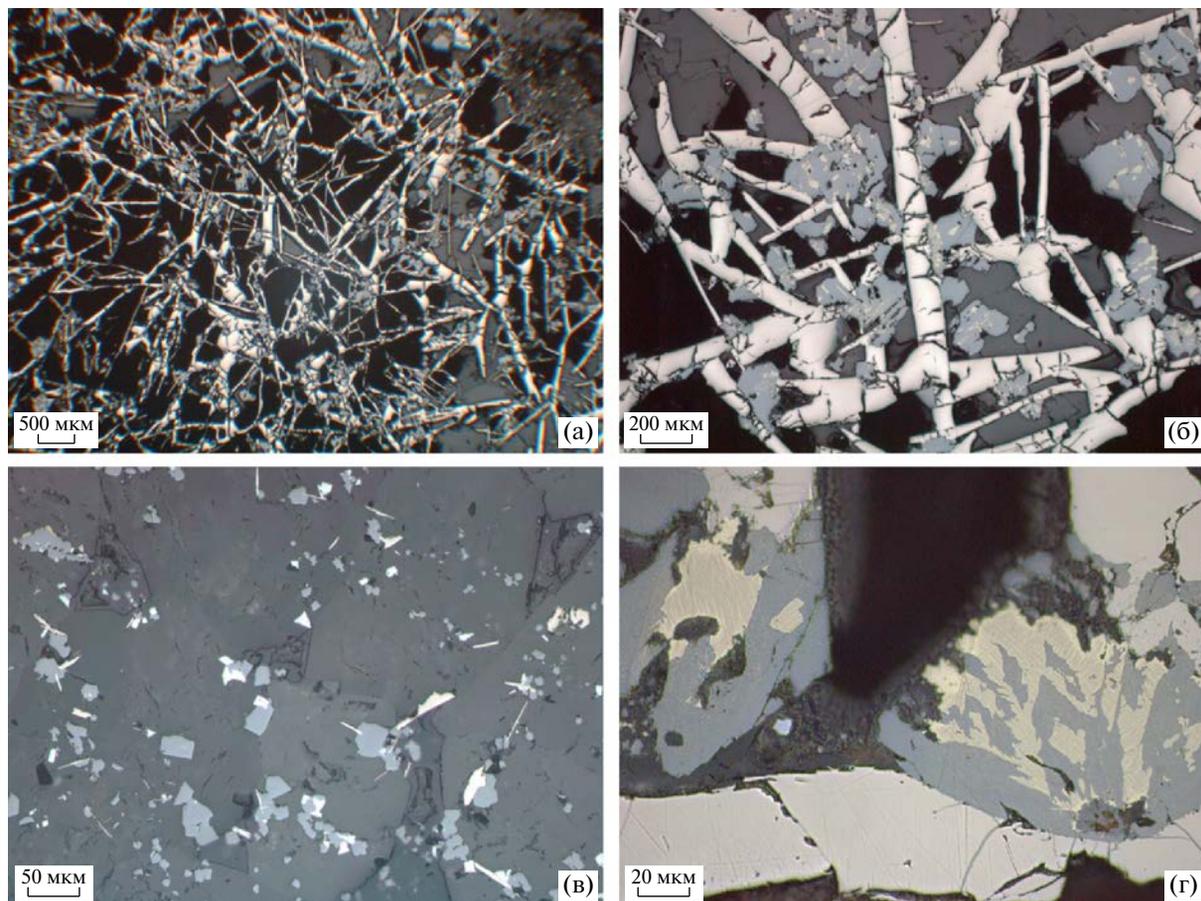


Рис. 4. Текстурно-структурная характеристика колчеданной (пирротиновой) руды из фрагмента постройки “курильщика”, обр. П-1615, проба 1, приканальная зона: (а) – массивная текстура, каркасно-решетчатая структура, образованная кристаллами пирротина (светлые), с подчиненным количеством Cu-Zn-сульфидов в интерстициях; (б) – кристаллы пирротина (светлые) с гипидиоморфнозернистыми кристаллами сфалерита (серые) в интерстициях, с тонкой вкрапленностью халькопирита; (в) – густая эмульсионная вкрапленность халькопирита в кристаллах сфалерита; (г) – дендритовидные агрегаты халькопирита, развивающиеся по сфалериту.

Зона, разделяющая две трубы, имеет сложное субзональное строение. Со стороны низкотемпературной пробы наблюдается сильное обеднение сульфидными минералами. Основными минералами здесь являются гидроксиды железа (акагениит, лепидокрокит, гетит) и сера. Встречаются также линзы, состоящие из агрегатов перечисленных гидроксидов железа и триоктаэдрического смектита – сапонита. Со стороны рудной трубы перегородка между трубами, состоящая в основном из гидроксидов железа, содержит кроме того обе модификации пирротина, халькопирит, вурцит и сфалерит.

Внешняя зона фрагмента постройки, охватывающая обе трубы (проба 4), состоит из трех подзон: 1 – кальцитовой с включениями моноклинного пирротина, сфалерита (3–5%) и гипса; 2 – гипсобаритовой (до 72% BaSO_4) и 3 – сложенной

рентгеноаморфными минералами (опалом и гидроксидом железа).

В минорных количествах встречаются минералы, образующиеся при участии морской воды, – хлориды Na, Mg и Pb, карбонаты Na и Ca (табл. 2).

Содержание микроэлементов в гидротермальной застройке впадины Гуаймас. В четырех пробах из фрагмента гидротермальной постройки (образец П-1615) определено содержание 39 микроэлементов. Анализ химического состава изученных проб позволяет выделить микроэлементы, характерные для относительно высокотемпературных минеральных ассоциаций – Cu, Zn, Pb (рис. 7), а также Co, Ni, Se, Sn (табл. 3). По сравнению со средним составом массивных руд из спрединговых зон без осадочного покрова пирротиновые руды впадины Гуаймас и Эсканаба трог содержат меньше Cu, Zn, Ag, но больше Sn и Bi (табл. 4, рис. 7).

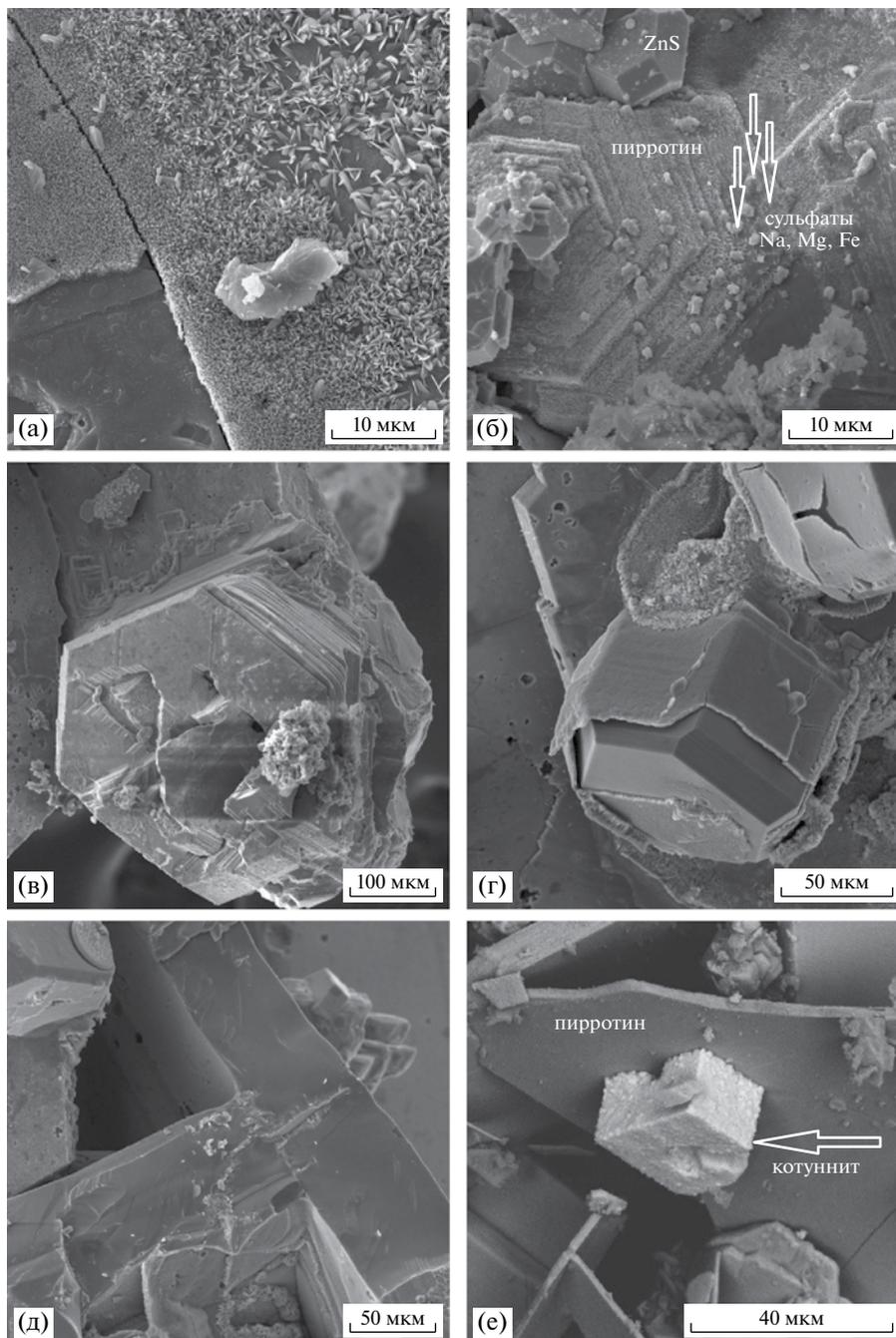


Рис. 5. Микрофотографии сульфидов из фрагмента гидротермальной постройки (впадина Гуаймас, ст. 1615, глубина 1995 м): (а) – окисление пирротина в пробе с образованием гидроокислов железа (проба 2); (б) – образование сульфатов Na, Mg и Fe в зоне окисления пирротина (проба 2); (в) – кристаллы вуртцита; (г) – сфалерит в лимонитовом чехле из рудного канала; (д) – пирротин из рудного канала; (е) – пирротин и котуннит (PbCl₂) из рудного канала.

Проба 2 обогащена W и Bi по сравнению с другими пробами, а проба 3 близка по составу микроэлементов к пробе 1, отличаясь от нее меньшим содержанием Cu, Zn, V, Se, Sr, Cd, Sb, W, Pt (табл. 3).

Набор элементов в пробе 4 превышает их число в других пробах (Cr, Co, Ni, As, Rb, Nb, Mo, Ag, Tl, Cs, Sb, Sr, Ba, Ta, Pb, Pt и U). Часть этих

микроэлементов поступает из средне- и низкотемпературных растворов, а часть – из окружающей морской воды.

Содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) в гидротермальной постройке впадины Гуаймас. Во всех изученных пробах (1–4) четко фиксируется положительная Eu-аномалия, что указывает

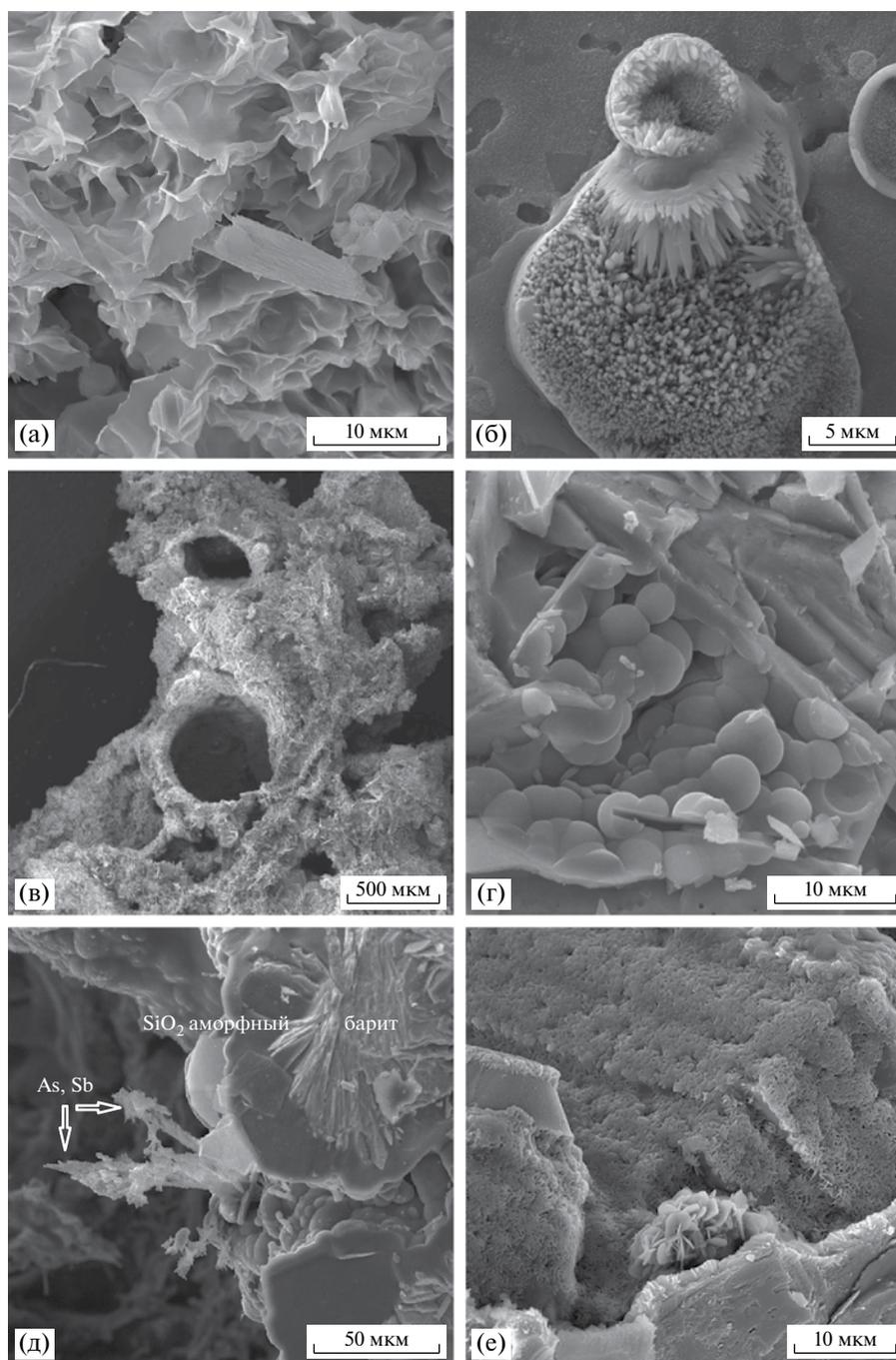


Рис. 6. Микрофотографии образцов из низкотемпературных зон гидротермальной постройки (впадина Гуаймас, ст. 1615, глубина 1995 м): (а) — акагениит из области срастания труб; (б) — лепидокрокит из нерудного канала; (в) — баритовая периферийная оболочка фрагмента постройки с устьями микроканалов высачивания гидротермального флюида; (г) — аморфный кремнезем из периферийной оболочки фрагмента постройки; (д) — самородные сурьма и мышьяк из кремнезем-баритовой внешней оболочки фрагмента постройки; (е) — зона окисления пирротина в пробе 2.

на восстановительные условия среды минералообразования. Все четыре пробы гидротермальной постройки П-1615 обеднены РЗЭ по сравнению с базальтом (табл. 5, рис. 8). Только в пробе 4 содержание Eu также превышает его содержание в базальте (1.7 мкг/г, табл. 5). Известно, что

толеитовые базальты типа N-MORB обеднены по сравнению с другими типами базальтов легкими РЗЭ относительно тяжелых [4].

Дефицит легких РЗЭ в пробах из впадины Гуаймас отражает особенности состава гидротермальных флюидов, прошедших через осадочную

Таблица 3. Содержание микроэлементов (10^{-4} %) во фрагменте гидротермальной постройки (П-1615) и в базальте (N-MORB, ВТП)

Элемент/пробы*	Фрагмент гидротермальной постройки				Базальт**
	1	2	3	4	
Li	0.084	0.46	1.1	0.29	—
Be	0.011	0.020	0.019	0.18	—
Sc	<0.6	<0.6	<0.6	<0.6	42.3
V	19.0	14.0	17.0	6.5	26.5
Cr	<0.007	<0.007	<0.007	27.0	25.3
Co	5.3	0.39	0.60	6.6	50.1
Ni	47.0	2.4	1.5	72.0	120
Cu	6800.0	2800	5300	1400	82.3
Zn	43900.0	22000	41200	840	80.2
Ga	1.3	1.1	1.4	0.56	—
As	<0.5	<0.5	<0.5	310	—
Se	80.0	52	140	14	—
Rb	0.097	0.096	0.24	0.97	1.45
Sr	36.0	210.0	200.0	1300.0	142
Y	0.052	0.17	0.17	0.21	27.2
Zr	1.0	2.10	2.3	2.3	89
Nb	0.24	0.40	0.65	1.2	2.99
Mo	1.1	1.30	2.0	4.4	—
Rh	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	—
Pd	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	—
Ag	29.0	11.0	11.0	88.0	—
Cd	330.0	130.0	390	38.0	—
Sn	10.0	6.1	8.8	6.1	—
Sb	2.4	6.4	9.5	100.0	—
Te	8.5	3.7	6.1	8.4	—
Cs	0.015	0.031	0.063	0.44	0.027
Ba	67.0	26.0	440.0	2400.0	12.2
Hf	0.051	0.11	0.13	0.089	2.14
Ta	0.12	0.086	0.12	0.52	0.203
W	0.58	13.0	5.6	1.6	—
Re	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	—
Ir	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	—
Pt	1.6	0.95	<0.2	1.4	—
Au	0.33	<0.1	<0.1	<0.1	—
Tl	0.21	0.25	1.40	19.0	—
Pb	490.0	840.0	740.0	1000.0	0.359
Bi	13.0	20.0	16.0	6.1	—
Th	0.12	0.12	0.12	0.15	0.141
U	0.018	0.061	0.21	1.7	0.061

Примечание. Прочерк – нет определений.

* Описание проб приводится в табл. 1.

** Базальт по [15].

Таблица 4. Содержание элементов в пирротиновых рудах впадины Гуаймас, Эсканаба трог и в массивных полиметаллических рудах спрединговых зон без осадочного покрова

Элемент	Пирротиновые руды		Массивная руда из спрединговой зоны без осадочного покрова**
	Впадина Гуаймас, П-1615, проба 1	Эсканаба трог*	
Cu, %	0.68	2.2	4.4
Zn	4.40	1.4	9.6
Pb	0.05	0.23	0.10
Ag, мкг/г	29	46	79
Au	0.33	1.39	1.05
Sn	>10	120	<1
As	<0.5	0.27	0.03
Sb	2.4	160	55
Bi	13	79	0.75
Se	80	13	85

* [20].

** [14].

Таблица 5. Содержание РЗЭ (10^{-4} %) во фрагменте гидротермальной постройки и в базальте

Элемент/пробы*	Фрагмент постройки				Базальт**
	1	2	3	4	
La	0.22	0.49	0.36	0.71	3.34
Ce	0.22	0.63	.037	0.39	10.40
Pr	0.016	0.055	0.032	0.036	1.91
Nd	0.058	0.18	0.14	0.17	9.67
Sm	0.031	0.025	0.032	0.079	3.14
Eu	0.035	0.18	0.34	1.7	1.18
Gd	<0.01	0.02	0.02	0.023	3.97
Tb	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	0.72
Dy	0.0076	0.017	0.018	0.029	4.85
Ho	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	1.03
Er	0.006	0.011	0.023	0.021	2.72
Tm	<0.004	<0.004	<0.004	0.0073	0.38
Yb	<0.008	0.013	0.037	0.10	2.63
Lu	<0.007	<0.007	<0.007	0.035	0.40

* Описание проб 1–4 приводится в табл. 1.

** Базальт по [15].

толщ. Состав РЗЭ изменяется от пробы 1 вблизи канала к пробе 4 из внешней оболочки постройки. В пробе 4 увеличивается содержание La, Sm, Eu, Dy, Tm, Yb, Lu, но особенно Eu (почти в 50 раз). Содержание Yb также увеличивается в пробе 4 в 12 раз. Практически не меняется в пробах содержание Gd, Tb, Ho, Tm (табл. 5).

При прохождении гидротермального раствора через осадочный покров наиболее сильные изменения в растворах установлены для ряда микро- и макроэлементов, в то время как РЗЭ остаются малоподвижными [1, 7].

Подобное распределение РЗЭ в изученных пробах подтверждают имеющиеся в литературе

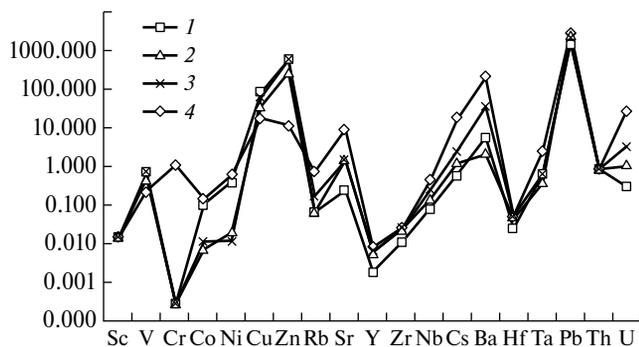


Рис. 7. Состав микроэлементов в пробах из фрагмента постройки, нормализованный на состав микроэлементов в базальте N-MORB ВТП. Описание проб 1–4 приводится в табл. 1.

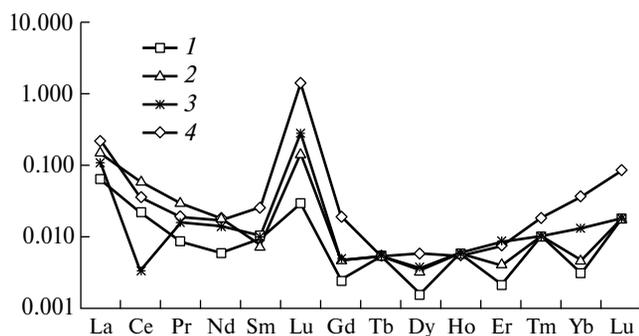


Рис. 8. Состав РЗЭ в пробах из фрагмента постройки, нормализованный на состав РЗЭ в базальте N-MORB ВТП. Описание проб 1–4 приводится в табл. 1.

представления о малой подвижности РЗЭ в описываемых процессах, что редко делает убедительным использование результатов определения РЗЭ для диагностики рудных и нерудных гидротермальных образований, независимо от наличия или отсутствия осадочного покрова над базальтами. Общие свойства РЗЭ, особенно их литофильность, не благоприятны для накопления в колчеданных рудах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдения с подводных обитаемых аппаратов и анализ геологических данных, полученных с помощью дночерпателей и трубок большого диаметра, позволили установить, что Гидротермальный холм, расположенный на главной осевой трещине Южного трога впадины Гуаймас (см. рис. 1), сложен целиком гидротермальными отложениями [2].

Во флюиде из впадины Гуаймас содержится меньше металлов (Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Co, Cd и др.) по сравнению с флюидом ближайшего

гидротермального поля 21° с.ш. ВТП, лишённого осадочного чехла, из-за их частичного осаждения на границе базальт – осадочные отложения и при прохождении растворов в самой осадочной толще, перекрывающей базальты (табл. 6).

Другой отличительной чертой раствора впадины Гуаймас являются высокие концентрации соединений и элементов, связанных с процессами разложения органического вещества осадочной толщи, при прохождении через нее горячих растворов. Содержание $C_{орг}$ в осадках Калифорнийского залива достигает 4–7%. При контакте горячих силлов

Таблица 6. Средний химический состав гидротермального флюида из впадины Гуаймас и 21° с.ш. ВТП [19]

Параметры и элементы	Впадина Гуаймас	21° с.ш. ВТП
$T^{\circ}C$	270–359	273–355
pH	5.9	3.3–3.8
Alk, мг экв/л	8.9–9.6	–
H_2S , мг / кг	163	247
Si	340	510
Cl, г / кг	21.2	18.2
Na	11.2	10.5
K	1.67	0.95
Ca	1.25	0.69
Be, нг / кг	330	170
Li, мг / кг	6.2	6.9
Rb	6.0	2.5
Sr	17.5	7.3
Mn	9.0	51
Fe	3.7	88
Cu	0.013	1.45
Zn	0.720	5.3
Br	86	69
V	17.7	5.6
Ba	3.7	7.9
Pb, мкг / кг	39	56
Cd	1.7	16
Ag	3.5	2.7
As	53.0	17
Co, нг / кг	300	7800
La	204	207
Ce	223	354
Nd	57	220
Sm	8	47
Eu	232	395
Gd	4.8	36
Dy	7.8	25
Er	1.9	8.6

с осадочными отложениями образуются термогенные нафтоиды [9, 10, 18].

Во флюиде впадины Гуаймас содержится в 2–20 раз больше NH_4 , В, а также Вг, К, Са, Rb, Ag, As и Ве, чем во флюидах поля 21° с.ш. ВТП. Обогащение гидротерм впадины Гуаймас К, Rb, Са, Sr и Ве происходит при взаимодействии раствора с биогенными и терригенными компонентами осадочных отложений.

Концентрация Li и La не изменяется при прохождении растворов через осадочную толщу. Мало изменяются и концентрации Се и Eu – редкоземельных элементов с переменной валентностью.

Сера сульфидов (H_2S) в растворе имеет два источника – базальт и сульфат-ион морской воды, который восстанавливается при высокотемпературной

реакции с силикатным железом и/или при участии органического вещества осадочных отложений.

Изотопный состав серы сероводорода в растворе впадины Гуаймас изменяется в диапазоне 1.6–9.1‰ [8], подтверждая тем самым наличие двух источников серы в гидротермальном флюиде.

Значения $\delta^{34}\text{S}$ серы моносльфидных минералов (пирротин+ следы сфалерита) из рудной трубы образца П-1615 лежат в узких пределах 0.2–3.2‰ (табл. 7). В нерудной трубе этого же образца значения $\delta^{34}\text{S}$ серы моносльфидов колеблются от 0.8 до 6.8‰.

Моносльфидные минералы из нерудных пород ряда построек на Центральном и Северном гидротермальных полях впадины Гуаймас обогащены тяжелым изотопом ^{34}S по сравнению

Таблица 7. Изотопный состав серы (‰) в гидротермальных образованиях впадины Гуаймас [8, с дополнениями; 16] и Эсканаба трог [20]

Пробы	Моносльфиды (пирротин+сл. сфалерит)	Дисульфиды (пирит и марказит)	Барит
Южный трог впадины Гуаймас, гидротермальные постройки, отбор с ПОА “Пайсис”			
П-1519-7	–0.2	1.1	21.1
П-1534-3	0.3	–2.2	–
П-1575-6	0.7	0.4	20.3
П-1614-3	2.3	0.6	–
П-1583-6	–	–	–
П-1615-1	0.2	–	–
П-1615-2	3.2	–	–
П-1615-3	0.8	–	–
П-1615-4	6.8	–	21.9
Там же, отбор драгированием			
7Д-2А-1	0.9	–	19.5
7Д-6С	2.3	0.9	–
7Д-27С	1.7	0.3	–
7Д-29В1	1.8	–	20.6
Северный трог впадины Гуаймас			
Талькосодержащие отложения	–3.9	–	–
Эсканаба трог, гидротермальные образования, обогащенные сульфатными минералами			
Баритовая корка	–	2.9	20.4
Баритовая труба	2.5	2.7	20.7
Ангидритовая корка	–	4.7	21.1
Ангидритовая корка	–	4.0; 3.5	–
Баритовая корка	3.2	3.8	–
Баритовая корка	–	–	22.6
Эсканаба трог, сульфидные минералы			
Руда: –0.7 – +11.6 (4.9 среднее)			

с моносulfидами из рудной трубы (обр. П-1615) с Гидротермального холма [8].

Отрицательные величины $\delta^{34}\text{S}$ (-3.9%) были получены при анализе пирротинов из тальксодержащих пород Северного трога впадины Гуаймас [17].

В гидротермальном флюиде поля Эсканаба трог, так же как впадина Гуаймас перекрытом осадочными отложениями, изотопный состав сероводорода составляет 7.8% [13]. Значения $\delta^{34}\text{S}$ моносulfидных минералов (пирротин+ сфалерит) в массивных рудах Эсканаба трог колебались от -0.7 до 11.6% , при среднем значении 4.9% [20]. Источником серы барита во впадине Гуаймас и Эсканаба трог, значения $\delta^{34}\text{S}$ которого лежат в пределах $20.3-22.6\%$ (табл. 7), является сульфат-ион морской воды.

Широкий диапазон значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидных минералов гидротермальных построек впадины Гуаймас и Эсканаба трог подтверждает участие сульфат-иона морской и, возможно, поровой воды осадочных отложений в образовании сероводорода флюида и сульфидных минералов.

Высокое содержание цикланов, аренов и непредельных углеводородов (УВ) в нафтоиде курильщиков впадины Гуаймас, наряду с присутствием алканов лишь керосиновой фракции, свидетельствует о том, что здесь встречены наиболее высокотемпературные продукты термализации кратковременного действия [10]. Нафтоид при этом сохраняет черты высокомолекулярной “незрелой” нефти стадии раннего катагенеза с наложенным эффектом импульсного прогрева, в результате чего образовались легкие фракции УВ. Значения $\delta^{13}\text{C}$ суммарного углерода нафтоидов изменяются в диапазоне $-21.9 - -23.5\%$. Эти величины объясняются процессом абиогенной высокотемпературной сульфат-редукции с утяжелением на $\sim 1.5\%$ остаточных продуктов этой реакции – углеводородов и асфальтенов.

Гидротермальная циркуляция в рифте Гуаймас вызывает миграцию новообразованных изотопно-тяжелых нафтоидов от участков с повышенным тепловым потоком к морскому дну, где они заполняют каналы и пустоты в породах гидротермальных построек.

Исследованный нами фрагмент постройки с Гидротермального холма, состоящий из двух сросшихся труб (рудной и нерудной), представляет особый интерес, поскольку является примером быстро изменяющегося состава гидротермальных растворов – от высокотемпературных к средне- и низкотемпературным. В этом фрагменте обычная горизонтальная минеральная зональность от центра к периферии труб осложнена за счет роста рядом с высокотемпературной рудной трубой безрудной

трубы и последующего их объединения с образованием низкотемпературной барит-опаловой ассоциации (табл. 1, 3).

Основной парагенетической ассоциацией рудной трубы (в порядке возрастания) является халькопирит-сфалерит-пирротиновая. Для нее характерна каркасно-решетчатая структура, образующаяся за счет различной ориентации идиоморфных пластинок пирротина (рис. 4), промежутки между которыми заполнены железистым сфалеритом и халькопиритом. Зональность в стенках рудной трубы заключается в уменьшении общего количества сульфидных минералов от приканальной зоны к периферии. Зональность в стенках безрудной трубы выражена сменой карбонатной минеральной ассоциации барит-опаловой, объединяющей рудную и нерудную трубы.

Помимо характеристики минеральных ассоциаций, различающихся температурой образования, о постоянном колебании температуры и окислительно-восстановительных свойствах гидротермального флюида впадины Гуаймас свидетельствует присутствие полиморфных модификаций пирротина – немагнитного гексагонального (более высокотемпературного) и ферромагнитного моноклинного.

Пирротин содержит ничтожное количество ($0.001-0.004\%$) микропримесей: Cu, Zn и As. Ранее нами был исследован химический состав и рассчитаны кристалло-химические формулы пирротина из 15 проб гидротермальных построек Северного и Центрального гидротермальных полей Южного трога впадины Гуаймас [8]. В их составе также были отмечены малые количества микропримесей.

Осадочный покров участвует в изменении состава гидротермального раствора впадины Гуаймас [1, 7]. Цитируемые авторы показали, что в гидротермально-измененных осадках по сравнению с неизмененными возрастает содержание Zn, Cu в 7 раз, Fe в 3 раза, Cd в 5 раз, а также заметен рост содержания Ag и Sr. Это приводит к уменьшению концентрации этих элементов в гидротермальном растворе (табл. 6).

Осадки обеднены Rb, As, K, Br и Cl, за счет этого увеличиваются их концентрации в растворах.

Следует отметить, что в гидротермальном растворе впадины Гуаймас концентрации Zn, Cu, Fe, Cd, Mn, Ba и Pb меньше, а Rb, As, K, Br, V и Cl больше, чем во флюиде рифтовых зон, лишенных осадочного покрова, перекрывающего базальты (табл. 6).

В руде гидротермальной постройки П-1615 впадины Гуаймас отмечено обеднение Cu, Zn, Pb, Ag, Au и Sb и обогащение Sn и Bi по сравнению

с массивными рудами СОХ в рифтовых зонах без осадочного покрова (табл. 4).

Зональность строения фрагмента постройки П-1615 позволяет судить об изменении гидротермального раствора при образовании минеральных ассоциаций в центре постройки и на периферии. Приканальная зона (проба 1) карбонатно-пирротинового состава содержит максимальное количество рудных компонентов (Fe, Zn, Cu и Cd, а также Se и Sn) (табл. 3), что свидетельствует об участии высоко- и среднетемпературного флюида в образовании этой минеральной ассоциации. В то же время в пробе 1 обнаружено заметное количество V и Ni, что может указывать на проникновение морской воды в приканальную зону (табл. 3).

В пробе 2 пирротин-карбонатного состава обнаружены максимальные содержания Bi, характерного для высокотемпературной минеральной ассоциации, на фоне понижения содержания V и, особенно, Ni (табл. 3). Заметное увеличение содержания Sr связано с высоким содержанием в пробе 2 карбонатных минералов, в структуру которых входит этот микроэлемент.

Ассоциация микроэлементов пробы 3 формировалась, видимо, из пульсирующих растворов, с изменяющейся температурой – от высокотемпературных (C, Tl, Se, Sn) до среднетемпературных, показателем которых служит присутствие Cd, Sb, Ba.

Проба 4 из внешней зоны постройки содержит минимальное количество Cu, Zn, Bi, V, Cd, но превосходит остальные три пробы по Cr, Co, Ni, As, Rb, Sr, Y, Nb, Mo, Ag, Sb, Cs, Ba, Ta, Tl, Pb и U.

Гидротермальные постройки впадины Гуаймас отличаются большим разнообразием минерального состава по сравнению с гидротермальными залежами в рифтовых зонах, лишенных осадочного покрова [2, 8, 16]. Помимо основного рудного минерала пирротина во фрагменте постройки (обр. П-1615) обнаружены сфалерит, халькопирит, марматит, вюртцит, кубанит, Cu-троилит, галенит, алабандин и самородное золото. В гидротермальных постройках впадины Гуаймас ранее были впервые обнаружены сульфоантимониты Ag-Pb ряда фрейслебенита (AgPbSbS_3) и сульфоантимониты Fe и Zn в виде включений в барите [8]. Разнообразны нерудные минеральные ассоциации: барит, кальцит, водные сульфаты, аморфный кремнезем.

Анализ химического состава всех проб из изученного фрагмента гидротермальной постройки на Гидротермальном холме показывает увеличение в них по сравнению с базальтом и гидротермально-измененными осадками $\text{Fe}_{\text{общ}}$, FeO, $\text{S}_{\text{общ}}$, Cu, Zn и уменьшение Na_2O , MgO, Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , MnO и Sr (табл. 1).

Зональность в распределении нерудных компонентов (Ba, Sr, SiO_2), связанная с ростом их содержания в направлении от центральных каналов к периферии, характерна для многих гидротермальных труб, в том числе для построек, расположенных в рифтовых зонах, не имеющих осадочного покрова. К периферии постройки содержание Cu, Zn, Cd убывает, а содержание As, Pb, Sb, Ba, Sr, Ni, Cr, Ag и U возрастает.

Еще раз подчеркнем, что присутствие пирротина на обеих модификациях свидетельствует о постоянных колебаниях температуры и окислительно-восстановительных свойств рудообразующих растворов.

Пониженная концентрация ионов серы в растворе приводит к осаждению моносulfидов железа (пирротина), а не дисulfидов (пирита, марказита), характерных для колчеданных руд рифтовых зон открытого океана без осадочного покрова.

Таким образом, все четыре пробы из фрагмента гидротермальной постройки обогащены металлами и серой по сравнению с источниками гидротермального материала – базальтами (табл. 1, рис. 5) и гидротермально-измененными отложениями. Металлы (Fe, Cu, Zn и др.) выщелачиваются из базальта, а $\text{S}_{\text{общ}}$, Sr, SiO_2 , CaO, Ba и др. (табл. 1) поступают из базальтов, осадочных отложений и, частично, из океанской воды, разбавляющей гидротермальный раствор.

Существует мнение, что в образцах высокотемпературных построек Гидротермального холма соотношение нерудных и рудных минералов меняется в зависимости от принадлежности образцов к разным элементам построек [2, с. 243]. Исследованный нами фрагмент гидротермальной постройки представляет собой единый “элемент” и заставляет предполагать практически одновременное образование рудной и нерудной труб за счет пульсационной разгрузки флюида с изменяющимся составом.

Все приведенные в работе параметры, характеризующие зональное строение фрагмента постройки, свидетельствуют о непрерывном изменении температуры, окислительно-восстановительных свойств и химического состава гидротермальных растворов, участвующих в образовании гидротермальных отложений на поверхности дна в рифтовой зоне с осадочным покровом.

В скважинах глубоководного бурения во впадине Гуаймас, Эсканаба трог и Миддл Вэли обнаружены мощные толщи сульфидных отложений, обогащенных металлами и являющимися подповерхностными продолжениями (“корнями”), расположенными на дне гидротермальных построек

с пирротиновой минерализацией [2, с. 249]. Цитируемые авторы оценивают запасы рудных веществ в пределах таких залежей в несколько десятков миллионов тонн.

Следует подчеркнуть также консервирующее влияние осадочной толщи, способствующей длительному сохранению эндогенного тепла и процесса рудообразования по сравнению с гидротермальными залежами в зонах спрединга, лишенных осадков.

Приведенные результаты исследований пирротиновых (колчеданных) руд позволяют рекомендовать поиск крупных колчеданных подповерхностных месторождений в молодых активных рифтах с высокой скоростью спрединга и высокой скоростью седиментации, т.е. в приконтинентальных частях рифтов гумидной зоны с лавинной седиментацией.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блинова Е.В.* Гидротермальные преобразования осадочного чехла в рифтовой впадине Гуаймас, Калифорнийский залив. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к. г.-м. н. М., 2015. 25 с.
2. *Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г.* Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.
3. *Воган В., Крейг Дж.* Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 575 с.
4. *Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
5. *Костов И., Минчева-Стефанова И.* Сульфидные минералы. М.: Мир, 1984. 280 с.
6. *Курносков В.Б.* Гидротермальные изменения базальтов в Тихом океане и металлоносные отложения (по материалам глубоководного бурения). М.: Наука, 1986.
7. *Курносков В.Б., Блинова Е.Б.* Гидротермальные изменения осадков и трансформация состава растворов во впадине Гуаймас Калифорнийского залива // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 2. С. 197–200.
8. *Леин А.Ю., Гальченко В.Ф., Гриненко В.А. и др.* Минеральный состав и геохимия пород с бактериальными обрастаниями из подводных гидротермальных построек // Геохимия. 1988. № 9. С. 1235–1248.
9. *Леин А.Ю., Конова Н.И., Лисицын А.П.* Новые данные о природе нафтоидов гидротермальной системы Гуаймас (Калифорнийский залив) // Докл. АН СССР. 1989. Т. 305. № 1. С. 207–211.
10. *Леин А.Ю., Емец Т.П., Лопатин Н.В.* О природе органического вещества в гидротермальном рудообразовании // Геохимия. 1990. № 3. С. 414–419.
11. *Лисицын А.П., Богданов Ю.А., Зоненшайн Л.П. и др.* Черные курильщики Калифорнийского залива // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 5. С. 3–18.
12. *Наумов В.Б., Миронова О.Ф., Прокофьев В.Ю., Леин А.Ю.* Исследование флюидных включений в минералах современных гидротермальных построек // Геохимия. 1991. № 1. С. 39–45.
13. *Bohlke J.K., Shanks W.C. III.* Stable isotope study of hydrothermal vents at Escanaba trough: observed and calculated effects of sediment-seawater interaction // U.S. geological survey bulletin. 1993. V. 2022. Chap. 12 (цит. по Zierenberg et al., 1993).
14. *Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D. et al.* Comparative mineralogy and geochemistry of gold-bearing sulfide deposits on the mid-ocean ridges // Marine geology. 1991. V. 101. P. 217–248.
15. *Geochemistry of the igneous oceanic crust / Eds. Holland H.D., Turekian K.K.* Elsevier. 2003. V. 1. P. 438–452.
16. *Koski R.A., Lonsdale P.F., Shanks W.C. III et al.* Mineralogy and geochemistry of a sediment-hosted hydrothermal sulfide deposit from the southern trough of Guaymas basin, Gulf of California // J. Geoph. Res. 1985. V. 90. P. 6695–6707.
17. *Lonsdale P., Lawver L.A.* Immature plate boundary zones studied with a submersible in the Gulf of California // Geol. Society of Amer. bulletin. 1980. V. 91. P. 555–569.
18. *Simoneit B.R.T.* Hydrothermal petroleum: genesis, migration and deposition in Guaymas basin, Gulf of California // Canad. J. of earth science. 1985. V. 22. P. 1919–1929.
19. *Van Dover C.L.* The ecology of deep-sea hydrothermal vents. Princeton University Press. Princeton, New Jersey, 2000. 424 p.
20. *Zierenberg R.A., Koski R.A., Morton J.L. et al.* Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center. Escanaba trough, Southern Gorda Ridge // Economic geology. 1993. V. 88. № 8. P. 2069–2098.

Sources of Micro- and Rare-Earth Elements in the Rift Hydrothermal Constructions With a Sedimentary Cover (on the Example of the Guaymas Basin, the Southern Trough Valley)

A. Yu. Lein, O. M. Dara, O. Yu. Bogdanova, G. V. Novikov, N. V. Ulyanova, A. P. Lisitsyn

The mineralogy and geochemistry of active hydrothermal construction of a fragment from the Hydrothermal Hill of the Southern trough valley of the Guaymas basin in the Gulf of California are investigated. Test is selected from depth of 1995 m by means of the underwater manned device "Pisces" in the 12th cruises of IO RAS of P.P. Shirshov on R/V "Academician Mstislav Keldysh". The fragment of construction consists of two accrete pipes – ore (pyrrhotite) and nonmetallic (carbonate), united in one construction external barite – an opal zone.

Ore construction is located in a sediment rift zone of the Guaymas basin with a powerful sedimentary cover and grown poor by metals in comparison with ores from the rift zones of the open ocean which aren't blocked by sedimentary deposits. It is explained by loss of metals on border of hot basalt with sedimentary thickness and processes of interaction of hydrothermal solutions with sedimentary deposits. The sedimentary thickness promotes long maintaining endogenous heat and process of ore formation.

Ore constructions of the Guaymas basin consist, mainly, of pyrrhotite, have specific set macro- and microelements and RFA, contain naphthenic hydrocarbons and can be search sign of the hidden polymetallic deposits considered as "roots" of the ore accumulation located under a bottom surface in young active rift with a high speed of spreading and with a high speed of sedimentation.