УДК 550.4:553.2.065:551.234(261-17)

С.М.СУДАРИКОВ, М.В.КРИВИЦКАЯ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*
Д.В.КАМИНСКИЙ
Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, *Санкт-Петербург*, *Россия*

ГЕОХИМИЯ СУБМАРИННЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ ГИДРОТЕРМ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ОПРОБОВАНИЯ С ПОДВОДНЫХ ОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ

Сопоставлены геохимические особенности флюидов и плюмов гидротермальных полей Срединно-Атлантического хребта (САХ). Сходной чертой геологии полей Логачев и Рэйнбоу является приуроченность к ультрамафитам. Высокие концентрации H_2 и CH_4 отражают влияние процессов серпентинизации на формирование состава флюидов. При этом концентрация H_2S заметно меньше, чем флюидов других гидротермальных полей Атлантики. Регрессионный анализ показывает, что практически вся сера, обнаруженная нами в пробах флюидов и плюмов обоих полей, представлена в форме сульфат-иона. Предполагается обратная корреляция содержаний H_2S и CH_4. Проведенное опробование флюидов во время погружений на подводном обитаемом аппарате «Элвин» и плюмов с борта научно-исследовательского судна «Атлантис» позволили провести расчет композиции конечных гидротермальных растворов, свидетельствующий о существенном отличии состава растворов Рэйнбоу и Логачев. Для поля Рэйнбоу характерны флюиды повышенной минерализации. На источнике Ирина-2 поля Логачев опробованы растворы с существенно более низкими концентрациями макрокомпонентов (прежде всего Na и Cl-иона) по сравнению с океанской водой. Весьма заметны различия в концентрациях Fe и Mn. Для растворов Рэйнбоу характерны наиболее высокие среди гидротермальных полей САХ содержания Fe (свыше 1300 мг/л) и Mn (до 123 мг/л). В источнике Ирина-2 концентрации этих элементов уменьшаются на порядок.

Fluid and plume geochemical characteristics of Mid-Atlantic Ridge (MAR) hydrothermal fields have been compared. Similar geological traits of Logatchev and Rainbow fields are location of their discharge zones in ultramafic environments. High H_2 and CH_4 concentrations reflect the influence of serpentinization processes on forming of a fluid composition. The concentration of H_2S is noticeably less in comparison with fluids of other Atlantic hydrothermal fields. Regression analysis shows that all the sulfur found out in samples from fluids and plumes of both fields is represented in the form of sulphate-ion. This lead to supposition of negative correlation of H_2S and CH_4. Sampling of fluids during dives on *DSRV ALVIN* and plumes from board of *RV ATLANTIS* let me to calculate the *end member* composition. It testifies to sharp distinctions in solution composition of Rainbow and Logatchev fields. In case of the Rainbow highly mineralized fluids are characteristic. On the Irina-2 vent of the Logatchev area solutions with distinctly less macrocomponent (first of all Na and Cl) concentrations were sampled as compared to ocean water. Quite noticeable are differences in concentrations of Fe and Mn. For Rainbow fluids the highest contents of Fe (> 1300 mg/l) and Mn (up to 123 mg/l) observed in MAR hydrothermal fields are characteristic. Concentrations of these elements in Irina-2 vent fluids decrease for the order of magnitude.

Одной из задач исследований является изучение геохимических взаимосвязей в системе *гидротермальный флюид – всплывающий плюм – плюм нейтральной плавучести* (*латеральный*) с дальнейшим комплексным анализом в сочетании с гидрофизическими и геологическими данными. Основные материалы для исследования получены на научно-исследовательском судне «Атлантис» в 2001 г. [5], используются и данные русских морских экспедиций на САХ.

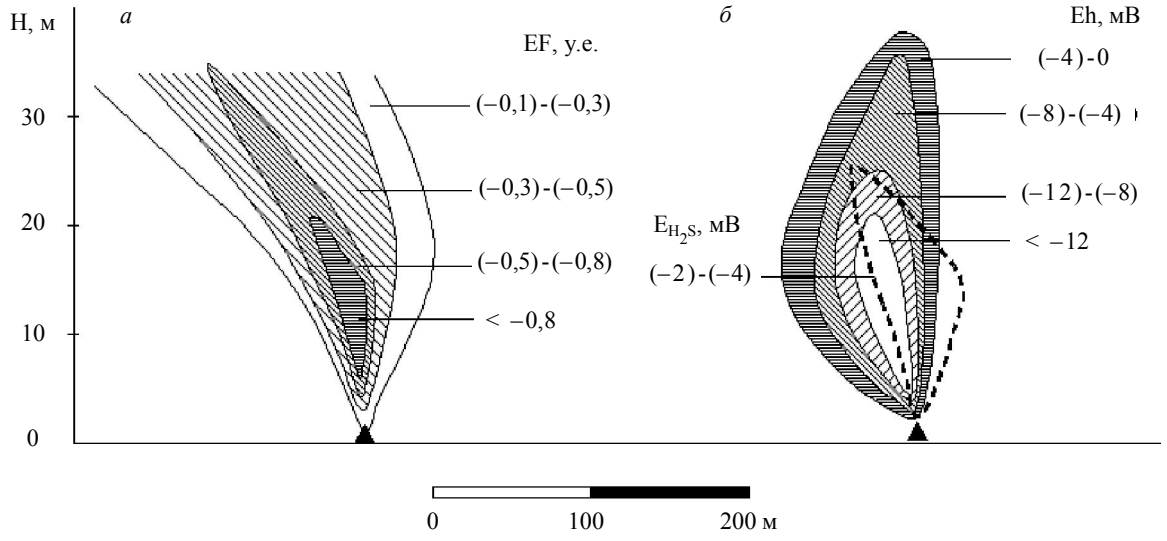


Рис.1. Структура геофизического (*а* – электрическое поле, EF) и геохимического (*б* – потенциалы Eh и E_{H_2S}) полей восходящего плюма [4]

Структура плюмов, формирующихся в придонных водах над зонами термальной разгрузки, отражает влияние различных типов истечения флюида. Характер структуры связан со степенью неравновесности, которая растет одновременно с периодически возрастающей гидротермальной активностью системы. Геохимия рудообразующих гидротермальных растворов определяет формирование геофизических и геохимических полей в области восходящего движения неравновесных всплывающих плюмов.

Обнаруженные при использовании буксируемого комплекса «Рифт» на 14°45' с.ш. САХ (поле Логачев) аномалии электрического поля (EF), Eh и концентрации серы в плюмах положительной плавучести пространственно дифференцированы [4]. Максимальные аномалии EF, Eh и E_{H_2S} обнаружены в нижней (~15 м) части плюма.

Отрицательный окислительно-восстановительный потенциал более локализован, по сравнению с EF (рис.1). Это может быть следствием необратимого процесса формирования и выпадения сульфидных частиц сразу после истечения флюида из курильщика.

Установлено, что структура придонных вод над гидротермальными полями отражает влияние на нее флюида различных типов истечения. Как результат, большинство плюмов отчетливо слоисты. Каждый слой проявляет себя отдельным максимумом мутности и, как правило, аномалиями температуры и солености.

По данным проведенного нами в 5-м рейсе научно-исследовательского судна «Атлантис» опробования сопоставлены геохимические особенности флюидов и плюмов гидротермальных полей Логачев и Рэйнбоу. Результаты анализа позволили провести расчет композиции конечных гидротермальных растворов и уточнить состав растворов указанных полей.

Схема расчета базируется на результатах физических и модельных экспериментов, свидетельствующих об образовании в недрах гидротермальных систем бессульфатных и лишенных магния конечных растворов. Концентрации компонентов в таких растворах соответствуют нулевой концентрации Mg и легко определяются по графикам регрессий элемент – магний (рис.2, 3). Пересчитанные концентрации позволяют сравнивать составы всех субмаринных горячих источников, исключая эффект разбавления растворов морской водой на путях миграции и в зонах разгрузки.

Полученные данные (табл.1) свидетельствуют о существенном отличии состава гидротерм. Если для поля Рэйнбоу характер-

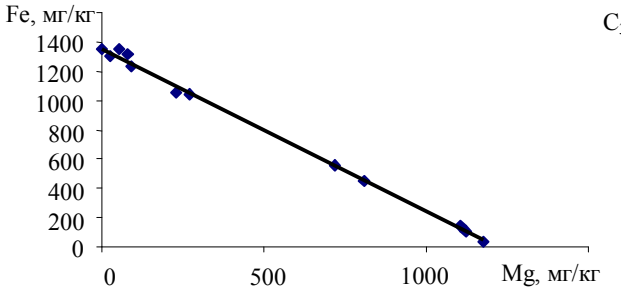


Рис.2. График регрессии Fe/Mg (мг/кг)

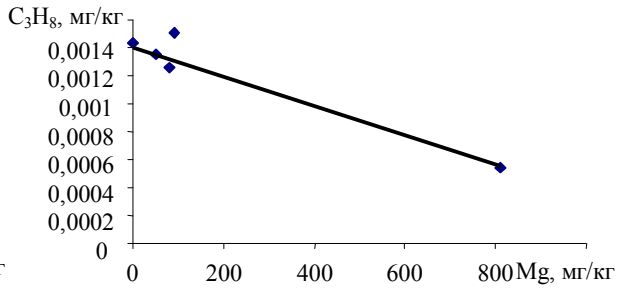


Рис.3. График регрессии C_3H_8/Mg

Таблица 1

Состав и параметры конечных гидротермальных растворов САХ (пересчет М.В.Кривицкой на 1 кг растворов по данным [2, 3])

Параметр	Морская вода	Лг (14°45' N)	СП (23° N)	ТАГ (26° N)	БС (29° N)	Рб (36°14' N)	ЛС (37°17' N)	МГ (37°5' N)
Глубина, м	–	3000	3460	3670	3200-3300	2300	1700	850
pH	7,8	3,3 (2,8)	3,7-3,9	2,5-3,4	–	2,8-3,1(2,8)	3,5-4,9	4,2-4,8
$Si(OH)_4$, мг	< 19,2	787,6 (146,2)	1750-1760,2	21116,4	–	663,0	1105,3-1567,2	739,7-1114,8
Cl, мг	19766	18622,9	20246,7	23955,3	16931,9	27353,1	15209-19287	12837-13712
Br, мг	67	65	68	84	61	94	74	53-57
$S0_4$, мг	2714	0	0	0	0	0	0	0
Na, мг	10787	9988,8	11869-11849	13614,8	9731-9801	12882,9	8045-10364	7228-7391
Li, мг	0,18	1,72	5,9-5,94	2,9	7,0-7,2	2,4	1,9-2,5	1,7-1,9
K, мг	382	858,7	920,8-932,9	702,5	707-765	796,6	824-1042	863-929
Rb, мг	0,11	2,4	0,9-0,92	0,86	1,11-1,16	3,15	1,94-3,34	1,74-2,51
Cs, мг	0,31	5,12	2,35-2,41	1,46	1,85-1,94	4,43	2,66-3,72	4,39
Mg, мг	1272	0	0	0	0	0	0	0
Ca, мг	409	1095,2	397,2-421,2	1044,1	473,2-513,3	2678,2	1257-1534	1192-1329
Sr, мг	7,66	12,1	4,38-4,47	8,7	3,8-4,2	17,5	5,9-10,4	8,76-9,72
Ba, мг	0,019	> 0,62	> 0,59	> 2,61	> 1,77-> 2,92	> 9,2	1,37-7,14	> 1,65
Fe, мг	$< 0{,}56\cdot10^{-4}$	116 (140)	100-120	92	93-120	1340 (720)	1,7-48	0,11-10
Mn, мг	$< 0{,}55\cdot10^{-4}$	18,2 (12,8)	27-27,1	55	13,8-14,3	123,8 (92)	4,6-25	3,25-3,9
Cu, мг	$0{,}46\cdot10^{-3}$	1-3	0,06-0,11	9,4	2-4	7,6-10,2	0,3-2	0,038-0,19
Zn, мг	$0{,}65\cdot10^{-3}$	1,6-1,92	3,2	3	2,7-5,6	5,4-11,8	0,3/4	0,16-0,28
H_2S, мг	0	17,0-27,0	201,0	228,1	290,1-375,1	41,0	85,0-102,1	< 51,0
CO_2, мг	101,0	444,2	229,1-295,1	128-150	264,1-312,1	704,5	572,3-1233,5	748,6-880,8
$\delta^{13}C(CO_2)$, ‰ PDB	(-5,1)-(-5,9)	-4,3	–	(-8,4)-(-10,0)	-9,0	-3,15	(-7,2)-(-10,6)	(-6,8)-(-9,1)
$\delta^{13}C(CH_4)$, ‰ PDB	–	-13,6	–	(-8,0)-(-9,5)	(-18)-(-19)	-15,8	(-12,7)-(-13,7)	(-18,8)-(-19,6)
CO, мг	$8\cdot10^{-6}$	–	–	–	–	$140\cdot10^{-3}$	–	–
Ar, мг	0,64	0,48	0,68-1,40	0,80-1,60	–	–	0,44-1,20	0,44-1,50
N_2, мг	17,0	84,0	33,0-94,0	25	–	50,0	17,0-27,0	17,0-53,0

Примечания: 1. В скобках указаны значения, полученные по данным опробования С.М.Сударикова с борта научно-исследовательского судна «Атлантис» и подводного обитаемого аппарата «Элвин».

2. Поля: Лг – Логачев; СП – Снейк Пит; БС – Брокен Спур; Рб – Рэйнбоу; ЛС – Лаки Страйк; МГ – Менез Гвен.

ны флюиды повышенной минерализации, то на поле Логачев (точнее, на источнике Ирина-2) опробованы растворы с существенно более низкими концентрациями макрокомпонентов (прежде всего, натрия и хлорид-иона) по сравнению с океанской водой.

Регрессионный анализ показывает, что практически вся сера, обнаруженная нами в пробах флюидов и плюмов обоих полей, представлена в форме сульфат-иона, т.е. концентрация сероводорода в конечных гидротермальных растворах заметно меньше по сравнению с флюидами других (за исключением Менез Гвен) гидротермальных полей Атлантики. Это позволяет предположить существование обратной корреляции содержаний сероводорода и метана в гидротермах САХ. Об этом свидетельствуют и имеющиеся литературные данные. Заметны различия и в концентрациях других элементов.

Сходной чертой геологии обоих полей является приуроченность зон разгрузки к ультрамафитам. Считается, что на формирование состава флюидов оказывают влияние процессы серпентинизации, что отражается прежде всего на высоких концентрациях метана и водорода (табл.2). Так, для растворов Рэйнбоу характерны наиболее высокие среди гидротермальных полей САХ содержания железа (свыше 1300 мг/л, рис.2) и марганца (до 123 мг/л), в то время как во флюидах источника Ирина-2 поля Логачев концентрации этих элементов уменьшаются на порядок.

Таблица 2

Температура и концентрации CH_4 и H_2 в гидротермальных растворах САХ по данным [3]

Поле	*T*, °C	CH_4, мг/кг	H_2, мг
МГ	265-284	22,0/42,0	0,05/0,1
ЛС	152-333 (297)	8,0/16,0	0,04/1,5
Рб	346-365 (355)	40,0	32,0
БС	356-364 (345)	1,0/2,1	0,86/2,1
ТАГ	270-363	–	0,3/0,7
СП	335-350 (328)	2,0/2,4	0,4/0,96
Лг	347-353 (348)	34,0	24,0

Примечание. В скобках указаны данные замеров С.М.Сударикова с борта подводного обитаемого аппарата «Элвин»

Обратная корреляция метана, этана, пропана с магнием говорит о связи поступления углеводородов с гидротермальным процессом (рис.3).

В то же время геохимический анализ распределения концентраций этих и других микрокомпонентов на аномальных горизонтах придонных вод поля Логачев, выделенных по оптической прозрачности, свидетельствует о наличии в пределах поля нескольких групп источников, отличающихся по составу.

На состав гидротерм глубинной циркуляционной системы определяющее влияние оказывают процессы метаморфизации растворов в результате серпентинизации и (или) фазовой сепарации флюида (возможно, многократной) при подъеме к очагам разгрузки с разделением на рассолы и распресненные растворы. На гидротермальном поле Логачев многочисленными наблюдениями с подводных аппаратов отмечены два типа разгружающихся высокотемпературных растворов, резко отличающиеся по плотности [1]. Более того, инструментальное изучение термохалинных характеристик флюида в зоне разгрузки показало скачкообразное изменение температуры и солености во времени, что свидетельствует о периодическом вскипании раствора в подповерхностных условиях.

Соленость придонной воды вблизи зон разгрузки более «тяжелых» растворов в так называемых «гидротермальных кратерах», по замерам с подводного обитаемого аппарата «Мир» достигает 36,24 $^{o}/_{oo}$ при фоновых значениях 35,04 $^{o}/_{oo}$ [1]. Учитывая огромную степень разбавления гидротерм в придонных водах, можно достаточно уверенно предположить высокую минерализацию гидротермальных растворов данного типа. С другой стороны, по данным, полученным в результате опробования высокотемпературного флюида высокой плавучести на источнике Ирина-2 с подводного обитаемого аппарата «Элвин», «легкие» гидротермы характеризуются большим дефицитом таких основных компонентов состава, как натрий и хлор, т.е. в значительной степени распреснены по сравнению с морской водой. Эта геохимическая особенность растворов оказывает влияние и на концентрацию рудных компонентов, поскольку основной формой миграции металлов в гидротермальных растворах являются хлоридные комплексы. Пониженная плотность раство-

ров и, как следствие, высокая «плавучесть» плюмов обусловлены, наряду с высокой температурой и низкой минерализацией, повышенным содержанием газов (табл.1, 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богданов Ю.А.* Гидротермальные рудопроявления рифтов Срединно-Атлантического хребта. М.: Научный мир, 1997. 167 с.

2. *Судариков С.М.* Гидроминеральные проявления в Океане // Геодинамика и рудогенез Мирового океана / Под ред. акад. И.С.Грамберга; Всерос. науч.-исслед. ин-т геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. СПб, 1999. С.62-72.

3. *Charlou J.L.* et al. Geochemistry of high H_2 and CH_4 vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14' N, MAR) // Chemical Geology. 2002. 191. P.345-359.

4. *Sudarikov S.M*. Structure of hydrothermal plumes at the Logatchev vent field, 14°45' N, Mid-Atlantic Ridge: evidence from geochemical and geophysical data / S.M.Sudarikov, A.B.Roumiantsev // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. 101. P.245-252.

5. *Sudarikov S.* Hydrothermal Plumes along the Mid-Atlantic Ridge: Preliminary Results of CTD Investigations during the DIVERSExpedition (July 2001) / S.Sudarikov, E.Zhirnov // Inter Ridge. 2001. Vol.10(2). P.33-36.