УДК 550.41.553.3 (491.4)

С.М. СУДАРИКОВ, *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *sergei_sudarikov@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», *Санкт-Петербург*

S.M.SUDARIKOV, *Dr. in geol. & min. sc.*, *professor*, *sergei_sudarikov@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *Saint Petersburg*

ОБОГАЩЕННЫЕ ВОДОРОДОМ И МЕТАНОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ФЛЮИДЫ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Рассматриваются результаты российских и международных экспедиций в тропической зоне Атлантики по изучению гидротермальных растворов и плюмов на глубоких гидротермальных полях Срединно-Атлантического хребта, связанных с ультрабазитами. Визуальные наблюдения и опробование с использованием обитаемых и буксируемых аппаратов показали неустойчивый характер гидротермальной разгрузки, наличие фазовой дифференциации высокотемпературных (около 350 °С) растворов с высоким содержанием метана и водорода, железа и марганца, низкими значениями pH и меняющейся по площади полей и во времени минерализацией. Высокое содержание H_2 и CH_4 может быть связано с взаимодействием ультрамафитов с морской водой при высоких значениях температуры и давления и процессами серпентинизации.

***Ключевые слова*:** гидротермальный раствор, серпентинизация, H_2 и CH_4.

ENRICHED IN HYDROGEN AND METHAN HYDROTHERMAL FLUIDS OF THE MID-ATLANTIC RIDGE

The results of Russian and international expeditions for investigation of hydrothermal plumes and solutions in the Atlantic tropic zone on deep Mid-Atlantic Ridge hydrothermal fields connected with ultrabasic rocks are considered. Visual observations and sampling using submersibles and tow vehicles show the unsteady character of hydrothermal discharge, phase separation of high-temperature (~350 °C) solutions with high content of hydrogen and methan, iron and manganese, low pH and changeable on time and fields area mineralization. High content of H_2 and CH_4 could be connected with interaction of ultramafics with seawater on high-temperatures and pressures and serpentinization processes.

***Key words*:** hydrothermal solution, serpentinization, H_2 and CH_4.

Введение. Открытие и первоначальное изучение склоновых субокеанических массивов Срединно-Атлантического хребта (САХ) с непрерывной (125000 лет и более) гидротермальной деятельностью, сопряженной с процессами метаморфизма мантийных гипербазитов (поля Логачев и Ашадзе), было результатом нескольких российских экспедиций. В 10-м рейсе научно-исследовательского судна «Геолог Ферсман» 1991-1992 годов при исследовании гидротермальной активности между 12°40′ и 15°20′ с.ш. нами были зафиксированы геохимические и гидрофизические признаки гидротермальной разгрузки (аномалии коэффициента ослабления света, температуры и растворенного Mn, наряду с высокими концентрациями метана в придонных водах и осадках, увеличение активности гетеротрофных железо-марганцевых бактерий) на нескольких горизонтах придонных вод в рифтовой долине южнее 15° с.ш. и на 13° с.ш.

В 7-м рейсе НИС «Профессор Логачев» проведены гидрофизические исследования между 14°40′ и 14°48′ с.ш. Обнаружены аномалии естественного электрического поля и сульфидной серы в придонной воде на 14°45′ с.ш. [3] и открыто поле Логачев. В рейсе НИС «Южморгеология» в 2000 г. в процессе изучения участка от 12°47′ с.ш. до 13°07′ с.ш. впервые были обнаружены аномалии гидротермальной природы на западном склоне рифтовой долины на глубинах, заметно превышающих глубины расположения известных активных полей САХ [2].

В 2001 г. во время экспедиции DIVERSEXPEDITION на НИС «Atlantis» структура придонных вод гидротермальных полей САХ, в том числе поля Рэйнбоу, приуроченного, как и поля Логачев и Ашадзе, к серпентинизированным ультрабазитам, изучалась нами [1] CTD-зондированием с отбором гидрохимических проб из аномальных горизонтов и в процессе погружений на глубоководном обитаемом аппарате «Alvin». Отбирались пробы высокотемпературных гидротермальных растворов, руд и осадков. Осенью того же года в рейсе НИС «Профессор Логачев» в пределах западного склона рифтовой долины 12°48′-13°04′с.ш. было уточнено положение гидрофизических и геохимических аномалий, а в следующем рейсе того же судна при заверке драгированием и фототелевизионными наблюдениями гидрофизической аномалии на 12°58,4′ с.ш. было открыто новое гидротермальное поле Ашадзе на глубине 4100 м.

В российско-французской экспедиции SERPENTINE на НИС «Pourquoi Pas?» в апреле 2007 г. основное внимание было уделено гидротермальным полям в ультрамафитах, открытых российскими океанографами [3, 8]. Проводились поиски и картирование источников («черных курильщиков»), замер температуры растворов, опробование придонных вод для изучения состава растворенных газов, отбор проб термальных растворов [7], опробование растворов и взвесей из гидротермальных плюмов, изучение гидрофизических параметров придонных вод областей разгрузки [8]. Основным средством исследований являлся дистанционно управляемый многофункциональный аппарат «Victor 6000».

Типы гидротермальных структур САХ. Открытые к настоящему времени гидротермальные поля САХ по пространственному положению относительно основных структурных элементов преимущественно относятся к внутренним субокеанским гидрогеологическим структурам, приуроченным к нижним частям склонов и днищу рифтовой долины с зонами разгрузки высокотемпературных (до 350 °С) рудообразующих (с сульфидным составом трубных комплексов) гидротермальных растворов [2]. Выделяются два основных типа структур: осевые вулканогенные массивы с циклической гидротермальной деятельностью и склоновые субокеанические массивы с существенно отличными условиями формирования долгоживущих гидротермальных систем на склонах рифта, связанных с процессами серпентинизации и формированием глубинной гидротермальной циркуляции. Именно эти структуры с гидротермальной деятельностью, сопряженной с процессами метаморфизма мантийных гипербазитов, и являются предметом рассмотрения настоящей работы.

Гидротермальные системы приурочены к блокам ультраосновных пород низов коры – верхов мантии, формирующим террасы (уступы) внутренних склонов рифтовой долины. Водовмещающими породами являются в различной степени серпентинизированные габбро, диориты, перидотиты. Наряду с трещинно-жильными водами на поверхности уступов всегда формируются горизонты пластово-поровых вод и трещинно-поровых вод в осадках и щебнисто-глыбовых колювиальных отложениях склонов рифтовой долины.

Характерной чертой этих систем является длительная и непрерывная гидротермальная деятельность. Так, определения возраста гидротермальных отложений поля Логачев радиоизотопными методами показали около 60000 лет, при этом цикличности рудоотложения, в отличие от осевых гидрогеологических массивов, не зафиксировано. Возраст гидротермальных отложений восточного фланга ТАГ 125000 лет и более, поля Ашадзе – более 200000 лет [2].

Результаты и их обсуждение. Одной из главных геохимических особенностей гидротермальных растворов этих полей является высокая концентрация CH_4 и H_2, на один-два порядка превышающая содержания этих газов во флюидах всех других известных гидротермальных систем [1, 4, 5]. В табл.1 для сопоставления приведены данные по типичным гидротермальным полям САХ.

Таблица 1

Температура и концентрации CH_4 и H_2 в гидротермальных растворах САХ

Поле	*T*, °C	CH_4, мг/кг	H_2, мг
Рэйнбоу	346-365 (355)	40,0	32,0
Брокен Спор	356-364 (345)	1,0/2,1	0,86/2,1
ТАГ	270-363	2,0/2,4	0,3/0,7
Логачев	347-353 (348)	34,0	24,0
Ашадзе	353	38	30

Примечание. По данным [6]; параметры по полю Ашадзе получены Ж.П.Донвалем в результате анализа на борту «Pourquoi Pas?» – сообщение на пост-круз конференции участников в Бресте, 2008; в скобках указаны данные замеров С.М.Сударикова с борта подводного обитаемого аппарата «Alvin».

В глубинных циркуляционных системах высокотемпературный флюид образуется при участии океанской воды, проникающей в кору по системе открытых трещин и участвующей в серпентинизации ультраосновных пород. К примеру, реакции, включающие гидратацию ультраосновных пород, окисление Fe(II), восстановление H_2O и образование H_2, обычно представляют в виде

$$5Mg_2SiO_4 + FeSiO_4 + 9H_2O \rightarrow$$

$$\rightarrow 3Mg_3SiO_5(OH)_4 + Mg(OH)_2 + 2Fe(OH)_2;$$

$$3Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + H_2 + 2H_2O.$$

Полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и теоретические построения говорят о том, что высокие концентрации H_2 и CH_4 возникают в результате реакций перидотитов с морской водой:

$$\text{оливин} + H_2O + C \text{ (или } CO_2) \rightarrow \text{магнетит} +$$

$$+ \text{серпентин} + \text{брусит} + H_2 + CH_4.$$

По данным проведенного нами в 5-м рейсе НИС «Atlantis» опробования сопоставлены геохимические особенности флюидов и плюмов гидротермальных полей Логачев и Рэйнбоу. Результаты анализа позволили провести расчет композиции *end members* (конечных гидротермальных растворов) и уточнить состав растворов. Схема расчета базируется на результатах физических и модельных экспериментов, свидетельствующих об образовании в недрах гидротермальных систем бессульфатных и лишенных магния так называемых «конечных» растворов. Концентрации компонентов в конечных растворах соответствуют нулевой концентрации Mg и легко определяются по графикам регрессий [элемент]/[Mg]. Пересчитанные концентрации позволяют сравнивать составы всех субмаринных горячих источников, исключая эффект разбавления растворов морской водой на путях миграции и в зонах разгрузки.

Полученные данные свидетельствуют о существенном отличии состава гидротерм. Если для поля Рэйнбоу характерны флюиды повышенной минерализации, то на источнике Ирина-2 поля Логачев опробованы растворы с существенно более низкими концентрациями макрокомпонентов (прежде всего, натрия и хлорид-иона) по сравнению с океанской водой [1].

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 *end members* заметно меньше по сравнению с флюидами других гидротермальных полей Атлантики. Так, во флюиде поля Рейнбоу концентрация H_2S ниже, чем в растворах таких полей, как ТАГ, Брокен-Спур. Сравнительно низкую концентрацию H_2S можно связать с меньшим содержанием серы в ультрабазитах по сравнению с базальтами и долеритами. Это позволило предположить существование обратной корреляции содержаний сероводорода и метана в гидротермах САХ [1]. По данным среднего химического состава конечных гидротермальных растворов гидротермальных полей северной части САХ проведен корреляционный анализ (табл.2).

Таблица 2

Корреляционная матрица химического состава гидротермальных растворов полей северной части САХ [5]

	Cl	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	H_2S	NH_4	CO_2	H_2	CH_4	N_2
Cl	1,00	0,28	**0,75**	**0,93**	**0,89**	**0,55**	−0,44	0,09	0,33	0,37	0,32	−0,08
Si	0,28	1,00	−0,31	0,08	0,29	−0,30	0,16	−0,26	-0,47	−0,38	−0,38	−0,28
Fe	0,75	−0,31	1,00	**0,92**	**0,53**	**0,91**	−0,52	−0,09	**0,80**	**0,71**	**0,66**	0,16
Mn	0,93	0,08	0,92	1,00	**0,73**	0,80	−0,48	−0,12	**0,61**	**0,57**	0,51	0,03
Cu	0,89	0,29	0,53	0,73	1,00	0,35	−0,08	0,46	-0,06	−0,05	−0,11	−0,46
Zn	0,55	−0,30	0,91	0,80	0,35	1,00	−0,21	−0,30	**0,78**	**0,56**	0,49	−0,03
H_2S	−0,44	0,16	−0,52	−0,48	−0,08	−0,21	1,00	0,18	**-0,66**	**−0,89**	**−0,90**	**−0,85**
NH_4	0,09	−0,26	−0,09	−0,12	0,46	−0,30	0,18	1,00	-0,49	−0,40	−0,41	−0,40
CO_2	0,33	−0,47	0,80	0,61	-0,06	0,78	−0,66	−0,49	1,00	**0,93**	**0,91**	**0,60**
H_2	0,37	−0,38	0,71	0,57	−0,05	0,56	−0,89	−0,40	0,93	1,00	**1,00**	**0,80**
CH_4	0,32	−0,38	0,66	0,51	−0,11	0,49	−0,90	−0,41	0,91	1,00	1,00	**0,84**
N_2	−0,08	−0,28	0,16	0,03	−0,46	−0,03	−0,85	−0,40	0,60	0,80	0,84	1,00

Примечание. Выделены значимые (95 %) коэффициенты парной корреляции

При рассмотрении результатов обращает на себя внимание обратная корреляция содержаний сероводорода с метаном и водородом в гидротермах САХ, существование которой мы предположили в работе [1]. Интересен также факт высокой корреляции железа и диоксида углерода с метаном и водородом и другие данные, приведенные в табл.2, обсуждение которых выходит за рамки данной работы.

В составе растворов гидротермальных полей отмечены различия в концентрациях других элементов [1]. Так, для растворов Рэйнбоу характерны наиболее высокие содержания железа (свыше 1300 мг/л) и марганца (до 123 мг/л), в то время как во флюидах источника Ирина-2 поля Логачев концентрации этих элементов уменьшаются на порядок [1].

Анализ данных экспедиции SERPENTINE на поле Ашадзе привел к схожим результатам. Так, первые экспресс-хроматографические определения состава газов на борту судна говорят о высокой концентрации водорода и метана во флюидах. Концентрации железа (750 мг/л) и марганца (98 мг/л) также весьма высоки и сопоставимы с нашими данными, полученными в рейсе «Atlantis» для поля Рэйнбоу. На поле Логачев, в отличие от данных 2001 г., опробовались источники различной минерализации. Средние концентрации железа (425 мг/л) и марганца (70 мг/л) оказались значительно выше чем в растворах источника Ирина-2, опробованного в 2001 г., и приблизились к показателям флюидов Рэйнбоу.

Из других результатов выделим прямые наблюдения отделения газовой фазы от флюидов. Наблюдаемое в виде крупных пузырей выделение свободных газов в процессе разгрузки высокотемпературных термальных растворов на источниках Ашадзе свидетельствует о наличии в недрах системы фазовой дифференциации. Еще более мощное выделение газов в виде паровых струй наблюдалось нами в реальном времени на поле Логачев-2.

Серия гидротермальных взрывов, свидетелем которых был автор на поле Ашадзе, говорит о механизме формирования гидротермальных кратеров, впервые открытых на поле Логачев. По этому вопросу до сих пор не было единой точки зрения. Сейчас можно утверждать, что причиной появления этих структур является резкая интенсификация фазовой дифференциации высокотемпературных растворов в подповерхностных условиях.

На гидротермальном поле Логачев фазовая дифференциация проявляется, прежде всего, в характере разгрузки рудообразующих растворов. Наряду с легкими, газонасыщенными турбулентными потоками, формирующими вертикальные восходящие струи (источники Ирина-2, Барад Дюр), наблюдается разгрузка растворов, видимо, близких по плотности к придонной морской воде. Об этом может говорить субпараллельное морскому дну распространение потока после истечения из жерла источника, характерное для гидротермальных кратеров

Ирина-1, Анна-Луиза, Квест. Наконец, растворы повышенной плотности ярче всего проявились на источнике Шандельер, открытом в рейсе SERPENTINE. Здесь мы наблюдали, как раствор, покидая устье сульфидной трубы, устремляется вертикально вниз и расползается по дну, постепенно смешиваясь с морской водой.

Заключение. При изучении гидротермальных систем на склонах рифта САХ, связанных с процессами серпентинизации и формированием глубинной гидротермальной циркуляции, получены данные, свидетельствующие о неустойчивом характере гидротермальной разгрузки, наличии фазовой дифференциации высокотемпературных (до 353 °С) растворов с высоким содержанием H_2, CH_4, низкими значениями pH, высокими концентрациями железа и марганца и меняющейся по площади гидротермальных полей и во времени минерализацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Судариков С.М.* Геохимия субмаринных рудообразующих гидротерм Северной Атлантики по данным дистанционных наблюдений и опробования с подводных обитаемых аппаратов / С.М.Судариков, Д.В.Каминский, М.В.Кривицкая // Записки Горного института. 2008. Т.176. С.76-80.

2. *Судариков С.М.* Гидрогеологические структуры гидротермально-активных районов Северной Атлантики // Записки Горного института. 2008. Т.176. С.26-30.

3. *Судариков С.М.* Гидротермальные растворы Срединно-Атлантического хребта: первые результаты русско-французской экспедиции 2007 года // Гидрогеохимия осадочных бассейнов. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С.59-65.

4. *Судариков С.М.* Рудообразующие гидротермы и газогидратообразование в океане / С.М.Судариков, С.С.Филатова // Записки Горного института. 2009. Т.183. С.139-143.

5. *Судариков С.М.* Формирование состава гидротермальных растворов в гидрогеологических массивах ультраосновных пород Срединно-Атлантического хребта / С.М.Судариков, М.В.Кривицкая // Записки Горного института. 2011. Т.189. С.68-71.

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

7. *Charlou J.L.* Hydrothermal Fluid Geochemistry / J.L.Charlou, J.P.Donval, S.M.Sudarikov // Serpentine Cruise Scientific Report. Feb. 25 to Avr. 5, R/V Pourquoi Pas? ROV Victor. 2007. P.185-189.

8. Serpentine Cruise-ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge / Y.Fouquet, G.Cherkashov, J.L.Charlou, J.P.Donval, S.M.Sudarikov et al. // InterRidge News. 2008. V.17. P.15-20.

REFERENCES

1. *Sudarikov S.M., Kaminsky D.V., Krivitskaya M.V.* Geochemistry of submarine ore-forming hydrotherms of the North Atlantic according to remote observations data and sampling from manned submersibles // Proceedings of the of Mining Institute. 2008. V.176. P.76-80.

2. *Sudarikov S.M.* Hydrogeological structures of hydrothermally-active regions of the North Atlantic. // Proceedings of the of Mining Institute. 2008. V.176. P.26-30.

3. *Sudarikov S.M.* Hydrothermal solutions of the Mid-Atlantic Ridge: first results of the Russian-French expedition 2007 // Geochemistry of sedimented basins. Tomsk: NTL, 2007. P.59-65.

4. *Sudarikov S.M., Filatova S.S.* Ore-forming hydrotherms and gas hydrate forming at the Ocean // Proceedings of the of Mining Institute. 2009. V.183. P.139-143.

5. *Sudarikov S.M., Krivitskaya M.V.* Forming of hydrothermal solutions composition in hydrogeological massifs of ultrabasic rocks on the Mid-Atlantic Ridge // Proceedings of the of Mining Institute. 2011. V.189. P.68-71.

6. *Charlou J.L., Donval J.P., Fouquet Y.* 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. V.191. P.345-359.

7. *Charlou J.L., Donval J.P., Sudarikov S.M.* Hydrothermal Fluid Geochemistry // Serpentine Cruise Scientific Report. Feb.25 to Avr.5, R/V Pourquoi Pas? ROV Victor. 2007. P.185-189.

8. *Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J.L., Donval J.P., Sudarikov S.M.* et al. Serpentine Cruise-ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge // InterRidge News. 2008. V.17. P.15-20