

УДК 551.465

ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА НА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЯХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ХРЕБТА МОНА

© 2021 г. А. А. Клювиткин^{1,*}, М. Д. Кравчишина¹, А. Г. Боев¹

Представлено академиком РАН М.В. Флинтон 16.11.2020 г.

Поступило 16.11.2020 г.

После доработки 18.11.2020 г.

Принято к публикации 11.12.2020 г.

Обсуждаются первые результаты исследований вертикальных потоков осадочного вещества в гидротермальной седиментосистеме субполярного участка Срединно-Атлантического хребта под влиянием гидродинамических факторов, воздействующих на распространение гидротермального плюма. Краткосрочная постановка седиментационных ловушек проводилась в 75-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в июне 2019 г. на гидротермальных полях Троллвегген и Сориа Мориа в южной части хр. Мона. Осаждение частиц в придонном слое происходило при преобладающем переносе вод в северо-восточном направлении, что совпадает с пространственной ориентацией рифтовой долины в зоне исследования. Зафиксированы многочисленные кратковременные положительные аномалии температуры амплитудой до 0.86°C. Потоки частиц в придонном слое исследованного полигона намного ниже, чем на гидротермальных полях более южных участков Срединно-Атлантического хребта. В ловушечном веществе придонных горизонтов выявлено значительное количество минералов гидротермального генезиса (барит, сульфиды и др.). Главные отличия между двумя полями – отсутствие на поле Сориа Мориа кристаллитов гипса и более низкое содержание волокнистых агрегатов (нитей и сфер) аморфного кремнезема.

Ключевые слова: Арктика, гидротермальный плюм, седиментационные ловушки, Троллвегген, Сориа Мориа, бариты, сульфиды

DOI: 10.31857/S2686739721030051

Наиболее эффективные проявления гидротермальной активности в океане – это высокотемпературные источники растворов и газов. Так называемые черные и белые курильщики создают насыщенные частицами плюмы, поднимающиеся на сотни метров над морским дном [1, 5]. Продукция этого материала и его рассеяние в глубинах океана в основном зависят от интенсивности выброса горячих флюидов, которые затем оседают на дно в виде тонких частиц. Эти частицы в составе гидротермальных плюмов нейтральной плавучести переносятся глубоководными течениями и фиксируются на расстоянии в десятки километров от источника [8, 9].

Изучение плюмов в настоящее время – это важная составляющая океанологических исследований в силу значительного влияния высокотемпературных флюидов на баланс химических элементов в океане. Цель работы – оценить потоки вещества и состав оседающих частиц в гидро-

термальной седиментосистеме южной части хр. Мона под влиянием гидродинамических факторов, воздействующих на распространение гидротермального плюма.

Гидротермальные проявления в южной части хр. Мона были открыты в экспедиции BIODEEP-05 норвежского научно-исследовательского судна “G.O. Sars” в 2005 г. [12]. Исследования развивались в последующих экспедициях в разных направлениях [4, 13]. Изучены рельеф, состав построек и флюидов, эмиссия эндогенного CO₂ и метана, биологическая активность гидротермальной фауны, микробные процессы и др. Но прямой сбор осаждающегося вещества гидротермальных плюмов с помощью седиментационных ловушек в этом районе выполнен нами впервые.

Краткосрочная постановка автоматической глубоководной седиментационной обсерватории (АГОС) с седиментационными ловушками (СЛ) проводилась в 75-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” [3] в начале лета 4–8 июня 2019 г. на гидротермальных полях Троллвегген и Сориа Мориа (рис. 1, табл. 1).

Использованы малые цилиндрические СЛ МСЛ-110 [6]. Пробосборники заполнялись филь-

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: klyuvitkin@ocean.ru

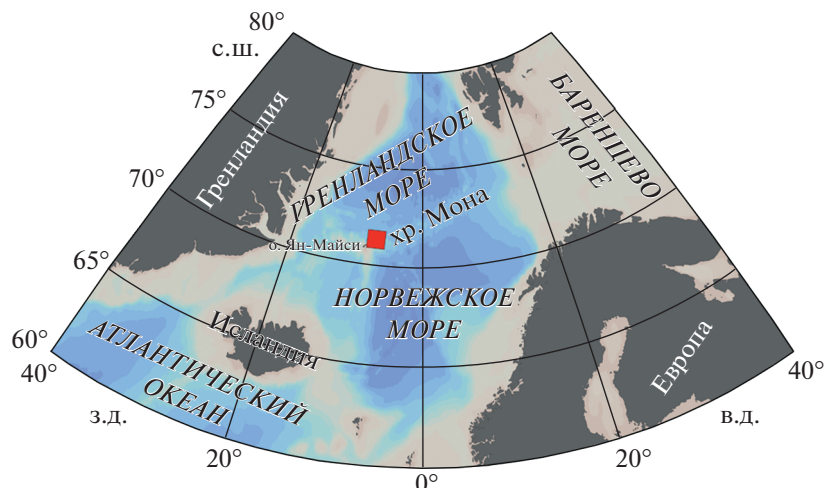


Рис. 1. Положение района исследования.

тратом морской воды с горизонта постановки. Для регистрации параметров среды на придонном горизонте АГОС-1 были установлены акустический измеритель течения Nortek Aquadopp и STD-профилограф SBE37, а на двух нижних горизонтах АГОС-2 – термографы RBRduet. Перед постановкой и после подъема АГОС выполнены STD-зондирования судовым комплексом SBE911plus.

В ловушечном материале определено содержание Si и Al фотокolorиметрическим методом (аналитик Е.О. Золотых) и органического ($C_{\text{орг}}$) и карбонатного ($C_{\text{карб}}$) углерода методом кулонометрического титрования на анализаторе углерода АН-7529 (аналитик Л.В. Демина). Содержание CaCO_3 рассчитано по $C_{\text{карб}}$, литогенного вещества (ЛВ) – по Al, а биогенный кремнезем ($\text{SiO}_{2\text{био}}$) вычислен методом терригенной матрицы по разнице содержаний валового и литогенного SiO_2 на

основании среднего состава верхнего слоя земной коры [15].

Состав частиц ловушечного материала изучен с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA-3sem “TESCAN” с системой рентгеноспектрального микроанализа Oxford “INCA Energy” 350.

ВОДНАЯ ТОЛЩА

Температурный фон в придонных слоях (до 100 м от дна) составил $-0.13...-0.12^\circ\text{C}$ для поля Троллвегген и $-0.26...-0.13^\circ\text{C}$ для поля Сориа Мория. STD-зондирования при постановке и подъеме АГОС выявили у дна положительные температурные аномалии амплитудой 0.64°C на первом и 2.49°C на втором поле соответственно.

Самописцы условий среды в составе АГОС (рис. 2) показали, что осаждение частиц в придонном слое поля Троллвегген происходило при

Таблица 1. Поток и состав осаждающегося вещества на гидротермальных полях Троллвегген (АГОС-1) и Сориа Мория (АГОС-2)

	Координаты, глубина, экспозиция	Горизонт/расстояние от дна, м	Поток, мг/м ² /сут							
			Общий	Si _{общ}	Al	C _{орг}	C _{карб}	Хлорин	ЛВ	SiO _{2био}
АГОС-1	71°17.883' с.ш.	150/400	279.6	33.1	0.31	88.8	25.2	1.459	3.77	69.3
	05°46.359' з.д.	350/200	100.5	14.5	1.31	27.5	7.96	0.528	16.0	24.3
	550 м	450/100	85.6	12.2	1.20	19.9	0.81	0.644	14.7	20.0
	101.7 ч	520/30	103.6	14.2	1.26	22.8	5.74	0.827	15.5	23.9
АГОС-2	71°15.677' с.ш.	270/400	130.3	20.8	1.36	38.6	9.62	0.444	16.6	37.5
	05°48.899' з.д.	470/200	97.5	12.9	1.11	39.4	0.36	0.663	13.6	21.9
	670 м	570/100	90.2	13.6	1.61	18.3	6.48	0.597	19.7	20.8
	95.5 ч	640/30	103.9	14.6	1.43	20.4	9.42	0.367	17.6	23.9

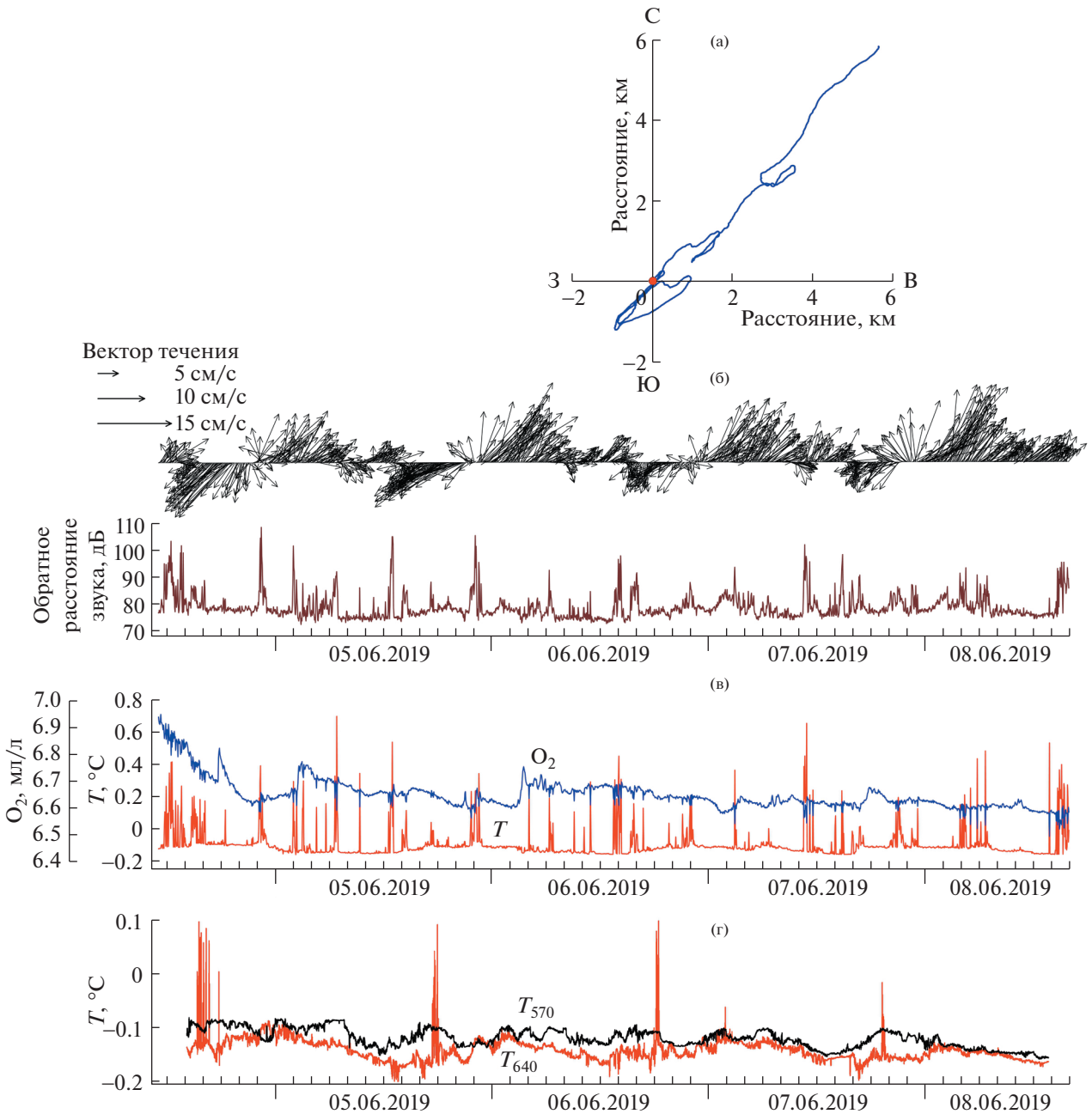


Рис. 2. Параметры водной толщи в точках постановки АГОС: прогрессивная векторная диаграмма течения (а), изменчивость вектора течения и обратного рассеяния звука взвесью по данным акустического измерителя течений на поле Троллвегген (б), температура (T) и растворенный кислород (O_2) на поле Троллвегген (в), температура на придонном (T_{640}) и следующем от дна (T_{570}) горизонте на поле Сориа Мориа (г).

преобладающем переносе вод в северо-восточном направлении, что практически совпадает с пространственной ориентацией рифтовой долины в зоне исследования. При этом движение воды носило возвратно-поступательный характер. Скорости течения изменялись от 0.3 до 18.7 см/с при среднем значении 6.1 см/с. Выявлена периодическая изменчивость скорости и направления течений с полусуточным приливным циклом. В придонном горизонте зафиксированы много-

численные, хаотично возникающие, кратковременные положительные аномалии температуры амплитудой до 0.86°C. К этим же пикам привязаны минимумы концентраций растворенного кислорода, а также максимумы коэффициента обратного рассеяния звука взвесью. Очевидно, что ловушки в придонном горизонте на поле Троллвегген попадали в область влияния гидротермального плюма, что и было целью постановки.

Таблица 2. Общий поток осаждающегося вещества под влиянием плюма гидротермальных полей на разных участках САХ

Гидротермальное поле	Координаты	Глубина, м	Горизонт, м	Поток, мг/м ² /сут	Источник
Троллвегген	71°17.883' с.ш. 05°46.359' з.д.	550	520	103.6	Данная работа
Сория Мориа	71°15.677' с.ш. 05°48.899' з.д.	670	640	103.9	Данная работа
Лаки Страйк	37°17.508' с.ш. 32°16.473' з.д.	1630	1628	264.3	[9]
Рейнбоу	36°13.8' с.ш. 33°54.1' з.д.	2275	2273	280–19200	[10]
Брокен Спур	29°10.1' с.ш. 43°10.3' з.д.	3030	3028	1800	[7, 11]
ТАГ	26°09.2' с.ш. 44°49.6' з.д.	3650	3648	5200	[7]

Термографы в придонном слое на поле Сория Мориа также зафиксировали пики температуры, но с гораздо меньшей амплитудой (~0.25°C). Повышение температуры отмечалось гораздо реже (всего 1 раз в сутки) и было привязано к фазе прилива (рис. 2). На следующем горизонте от дна (570 м) подобные температурные аномалии не обнаружены, т.е. вблизи источника гидротермальный плюм распространяется в субгоризонтальном направлении в 10–30 м от дна, что также подтверждено STD-зондированиями.

Интересно, что на поле Сория Мориа при зондировании перед постановкой АГОС у дна наблюдался холодный слой мощностью около 50 м с температурой –0.26°C, что на 0.13°C ниже фонового. Зондирование после подъема АГОС этот слой не обнаружило. Придонный термограф в составе АГОС также фиксировал колебания фоновой температуры с той же амплитудой (до 0.13°C). Период колебаний составил 1 сут, что характерно для суточной составляющей прилива. Таким образом, под воздействием приливных течений происходит заток холодных глубинных вод на исследуемое поле с глубин, превышающих исследуемые на десятки метров. На фоновой станции при глубине моря 2375 м в 50 км от полигона воды с температурой –0.26°C фиксировалась в слое 850 м.

ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА

Максимум потока рассеянного осадочного вещества (279.6 мг/м²/сут) на изученном полигоне приходится на подповерхностный горизонт 150 м на поле Троллвегген (табл. 1). Глубже, с 270 м до дна, потоки варьировали в пределах 85–130 мг/м²/сут. Минимум потоков (85–97 мг/м²/сут) зафиксиро-

ван в промежуточном слое 450–570 м на обеих АГОС. Выявлено небольшое увеличение потоков в придонном слое (30 м от дна) +18 мг/м²/сут (до 103.6 мг/м²/сут) на поле Троллвегген и +13.7 мг/м²/сут (до 103.9 мг/м²/сут) на поле Сория Мориа, что может свидетельствовать как о поставке эндогенного вещества, так и о возможном влиянии придонного нефелоидного слоя. Однако изучение распределения водной взвеси как фильтрационным методом, так и оптическим (нефелометрия), не выявило в исследуемом районе присутствия у дна выраженного нефелоидного слоя, не привязанного к гидротермальной активности, что отмечалось также в работе [4].

Полученные значения потоков осадочного вещества, в целом, несколько выше, чем в среднем для изучаемого региона. Так, в Норвежско-Гренландском регионе на горизонте около 500 м они обычно не превышали 200 мг/м²/сут [2, 14]. Высокие потоки в нашем исследовании объясняются активностью фитопланктона. В период работы АГОС наблюдалось цветение микроводорослей, что подтверждается высокими концентрациями хлорофилла “а” в поверхностном слое (до 5.4 мг/л) и высоким потоком хлорина на подповерхностном горизонте АГОС-1 (1.46 мг/м²/сут на 150 м).

Потоки частиц в придонном слое исследованного полигона намного ниже, чем на гидротермальных полях Срединно-Атлантического хребта 25–40° с.ш. Как видно из табл. 2, потоки вещества значительно варьируют на разных гидротермальных полях, но все они превышают таковые величины, полученные на полях Троллвегген и Сория Мориа [7, 9–11]. Налицо также высокая временная изменчивость потоков: почти в 70 раз за 16 сут экспозиции ловушек на поле Рэйнбоу [10].

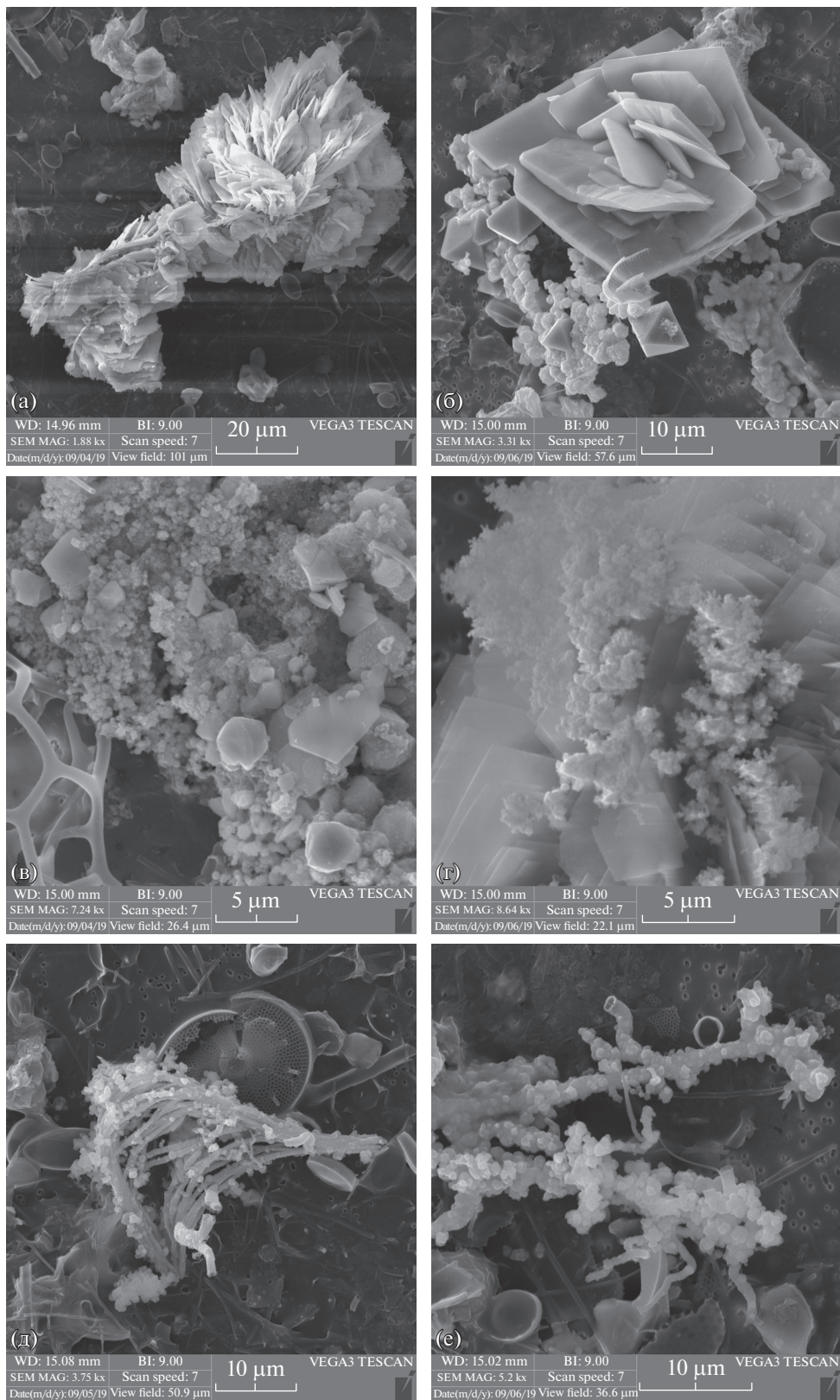


Рис. 3. Вещественный состав осадочного вещества из придонных седиментационных ловушек по результатам сканирующей электронной микроскопии: агрегаты барита на гидротермальном поле Троллвегген (а) и Сория Мориа (б), сульфидные фазы сложного состава в форме дендритов и сплошных масс на поле Троллвегген (в) и Сория Мориа (г), волокнистые агрегаты аморфного кремнезема с примесью железа и кальция на поле Троллвегген (д) и Сория Мориа (е).

Очевидно, интенсивность гидротермальных проявлений изученных нами полей и влияние гидротермального плюма на водную среду существенно ниже, чем на других известных гидротермальных полях САХ, что отмечалось ранее [4]. Показано сходство этих полей с полем Лаки Страйк по составу донных осадков [4].

По значению вертикальных потоков частиц поля Троллвегген и Сория Мориа также наиболее близки к полю Лаки Страйк (табл. 2).

СОСТАВ ВЕЩЕСТВА ПОТОКОВ

В осаждающемся материале преобладало биогенное вещество (CaCO_3 , $C_{\text{орг}}$, $\text{SiO}_{2\text{био}}$), достигая в верхнем слое АГОС-1 (150 м) ~99%. $C_{\text{орг}}$ варьировал от 19 до 40% с максимумом в подповерхностных горизонтах. Отмечено практически постоянное во всей водной толще высокое содержание биогенного кремнезема (22.5–28.7%), при этом максимум потока $\text{SiO}_{2\text{био}}$ приурочен к подповерхностным горизонтам 150 м (АГОС-1) и 270 м (АГОС-2) и составляет 69.3 мг/м²/сут и 37.5 мг/м²/сут соответственно. Максимум CaCO_3 в потоке также выявлен в подповерхностных горизонтах. Поток литогенного вещества возрастает ниже эвфотического слоя и остается практически неизменным (13.6–19.7 мг/м²/сут) от 270 м до дна на обеих станциях, составляя 12.8–21.8% вещества в ловушках.

Придонные горизонты, подверженные влиянию поставки вещества из высокотемпературных гидротермальных флюидов, по соотношению основных макрокомпонент потока явно не выделяются. Обращает на себя внимание только незначительное уменьшение содержания в потоке основного маркера литогенного вещества Al на 13–22% от вышележащего горизонта, при том, что суммарный поток не уменьшается, а даже возрастает на 15–20%. Очевидно, увеличение потока происходит все-таки за счет поставки гидротермального материала, имеющего состав, отличный от среднего для верхнего слоя земной коры, на основании которого обычно рассчитывается содержание литогенного вещества во взвеси [15].

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА СЭМ

Во всей толще воды, кроме придонных горизонтов обоих полей, преобладали биогенное вещество и частицы породообразующих минералов пелитовой и мелкоалевритовой размерности – полевых шпатов, кварца, авгита, андалузита.

В осадочном веществе придонного горизонта поля Троллвегген выявлено значительное количество минералов гидротермального генезиса. Среди минералов преобладают крупные, до 140 мкм, кри-

сталлиты гипса, сформированные в результате свободного роста. Микросталлиты барита (рис. 3) характеризуются пластинчатым и таблитчатым габитусом и значительной изоморфной примесью Sr. Барит образует минеральную ассоциацию и сростки с сульфидами Fe, Cu, Zn. Сульфидные минералы формируют пористые почковидные массы с размерами отдельных сферолитов <0.5 мкм, и только пирит образует правильные октаэдры и кубоктаэдры размером до 3 мкм. Обнаружены волокнистые агрегаты (нити и сферы) аморфного кремнезема с примесью Fe и Ca, часто закрученные в спирали (рис. 3).

Минеральное вещество придонного горизонта поля Сория Мориа представлено частицами глинистых минералов, единичными частицами породообразующих минералов, стекловидными нитями, сростками кристаллов барита и сульфидами Fe, Cu, Zn. Сульфидные минералы представлены хорошо окристаллизованными октаэдрами пирита и сфалерита до 6 мкм, а также фазами сложного состава в форме дендритов и сплошных масс. Главные отличия между двумя полями – полное отсутствие на поле Сория Мориа кристаллитов гипса и более низкое содержание агрегатов аморфного кремнезема.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят экипаж НИС “Академик Мстислав Келдыш”, Г.В. Малафеева, А.В. Булохова и А.И. Коченкову за помощь при отборе и обработке проб, а также проф. А.Ю. Леин за помощь в постановке научных задач и обсуждении результатов исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-17-00157). Работа АГОС обеспечена грантом РФФИ № 19-05-00787. Интерпретация результатов частично выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки России (тема № 0149-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов Ю.А., Леин А.Ю. В кн.: Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей. М.: Научный мир, 2010. С. 350–371.
2. Дриц А.В., Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д. и др. // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 576–594.
3. Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. и др. // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 487–487.
4. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Боев А.Г. и др. // Океанология. 2019. Т. 59. № 6. С. 1039–1057.
5. Лисицын А.П. В кн.: Мировой океан. Т. II. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.

6. Лукашин В.Н., Ключиткин А.А., Луцицын А.П., Новигатский А.Н. // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
7. Русаков В.Ю. // *Геохимия*. 2007. № 7. С. 766–785.
8. German C.R., Sparks R.S.J. // *Earth and Planet. Sci. Letters*. 1993. V. 116. № 1–4. P. 129–134.
9. Khripounoff A., Comtet T., Vangriesheim A., Crassous P. // *J. of Marine Systems*. 2000. V. 25. № 2. P. 101–118.
10. Khripounoff A., Vangriesheim A., Crassous P., et al. // *Journal of Marine Research*. 2001. V. 59. № 4. P. 633–656.
11. Lukashin V.N., Rusakov V.Y., Lisitzin A.P., et al. // *Exploration and Mining Geology*. 1999. V. 8. № 3–4. P. 341–353.
12. Pedersen R., Thorseth I., Hellevang B., et al. // *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2005. OS21C-01.
13. Pedersen R.B., Thorseth I.H., Nygård T.E., et al. // *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2010. V. 188. P. 67–89.
14. Peinert R., Antia A., Bauerfeind E., et al. // *The Northern North Atlantic: A Changing Environment*, ed. P. Schafer, W. Ritzrau, M. Schluter, and J. Thiede. Springer, Berlin, 2001. P. 53–68.
15. Rudnick R.L., Gao S. // *Treatise on geochemistry*. 2014. T. 4. P. 1–51.

PARTICLE FLUXES IN HYDROTHERMAL VENT FIELDS IN THE SOUTHERN PART OF THE MOHNS RIDGE

A. A. Klyuvitkin^{a,#}, M. D. Kravchishina^a, and A. G. Boev^a

^a *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: klyuvitkin@ocean.ru*

Presented by Academician of the RAS M.V. Flint November 16, 2020

The first results of vertical particle flux studies in the hydrothermal sediment system of the subpolar area of the Mid-Atlantic Ridge under the influence of hydrodynamic factors affecting the propagation of the hydrothermal plume are discussed. Short term mooring with sediment traps was deployed during 75th cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh on June, 2019 at hydrothermal vent fields Trollveggen and Soria Moria in the southern part of the Mohns Ridge. The sedimentation of particles in the bottom layer occurred with the prevailing transport of water in the northeastern direction, which coincides with the spatial orientation of the rift valley in the studied area. Numerous short-term positive temperature anomalies with amplitude of up to 0.86°C were recorded. Particle fluxes in the near-bottom layer of the studied site are much lower than in hydrothermal vent fields in the more southerly areas of the Mid-Atlantic Ridge. A significant amount of minerals of hydrothermal genesis (barite, sulfides, etc.) were found in the trap material of the bottom layers. A feature of the sedimentary matter of the Trollveggen field is the presence of a large number of fibrous aggregates (filaments and spheres) of amorphous silica with an admixture of iron.

Keywords: Arctic, hydrothermal plume, sediment traps, Trollveggen, Soria Moria, barites, sulfides