

УДК 551.465

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА НА МНОГОЛЕТНЕМ ТРАНСОКЕАНИЧЕСКОМ РАЗРЕЗЕ В ЗОНЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ И АРКТИКИ

© 2019 г. А. А. Клювиткин*, А. Н. Новигатский, Н. В. Политова, Е. В. Колтовская

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

Поступила в редакцию 30.11.2018 г.

После доработки 15.02.2019 г.

Принята к публикации 05.12.2018 г.

Приводятся новые данные о потоках осадочного вещества и основных его компонент на меридиональном разрезе по 59°30' с. ш. в Северной Атлантике под воздействием разнонаправленного переноса водных масс. Материал для исследования собирался в течение двух лет (с июля 2015 г. по июль 2017 г.) с помощью седиментационных ловушек, установленных в составе четырех автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий. В подповерхностном слое годовой ход потоков и изменение состава осаждающегося вещества определяется первичной продукцией фитопланктона. Придонные потоки осадочного вещества на склонах хребта Рейкьянес формируются в условиях переноса водных масс и, соответственно, взвеси, в юго-западном направлении — вдоль хребта со стороны Фареро-Исландского и Гренландско-Исландского порогов. У подножия европейского континентального склона имеет место обратно направленный перенос вещества. В составе осаждающегося вещества преобладает биогенная компонента, доля которой уменьшается с глубиной за счет растворения, а зимой — из-за ослабления биологической активности верхнего деятельного слоя. Роль литогенного вещества максимальна в придонном слое, в том числе за счет поставки материала со дна.

Ключевые слова: Северная Атлантика, Исландский бассейн, море Ирмингера, рассеянное осадочное вещество, потоки вещества, седиментационные ловушки

DOI: 10.31857/S0030-1574593454–465

ВВЕДЕНИЕ

Изучение осадочного вещества от его формирования до отложения на дно — важнейшая задача современной седиментологии. Рассеянное осадочное вещество, взвешенное в многокилометровой толще вод океанов, является тем материалом, из которого, в конечном счете, образуются донные осадки и осадочные породы [9]. Потоки осадочного вещества в океане — это одна из основных количественных характеристик осадкообразования, которая позволяет в динамике изучать процессы седиментации осадочного вещества, преобразование его при прохождении водной толщи; оценивать количество и состав вещества, поступающего на дно.

Процессы осадконакопления в Северной Атлантике определяются сочетанием различных источников поступления осадочного материала (первичная продукция фитопланктона, аэрозольная поставка, абразия берегов, ледниковый сток, айсберговый и ледовый разнос, донная эрозия и переотложение донных осадков, поставка эндогенного вещества из срединговой

зоны хребта Рейкьянес), а также различных механизмов его переноса и осадения.

Исключительная особенность Северной Атлантики — это сложная динамическая система формирования и переноса водных масс, тепла, соли, растворенных элементов и газов в толще океанских вод в зоне взаимодействия Атлантического и Северного Ледовитого океанов [9, 16, 31]. Структура водной толщи здесь напоминает слоеный пирог, причем не только в вертикальном простирании, но и в горизонтальном. Вертикальная структура меридионального переноса вод всей совокупностью течений на севере Атлантического океана в первом приближении — двухслойная система противоположно направленных потоков [31]. В верхнем слое Гольфстрим, переходящий далее в Северо-Атлантическое течение, переносит на север субтропические воды. В этом очень динамичном районе происходит интенсивное перемешивание глубинных и поверхностных вод в силу значительного охлаждающего влияния атмосферы и ветрового воздействия. Отток сформир-

рованных таким образом холодных плотных вод из субарктической Атлантики в умеренные и низкие широты образует нижнее звено глобального термохалинного конвейера [2].

В пространственном отношении широтная климатическая зональность Северной Атлантики нарушена Гольфстримом и его продолжением — Северо-Атлантическим течением, что делает систему смены климатических поясов не параллельной, а наклонной по отношению к экватору. Таким образом, при пересечении Атлантики по 60° с.ш. мы наблюдаем смену нескольких зон не только по законам циркумконтинентальной зональности, но и субширотной климатической.

Столь сложная гидрологическая структура вод изучаемого региона активно воздействует на процессы формирования потока рассеянного осадочного вещества. Возрастает роль латерального переноса вещества, что было выявлено ранее на отдельных полигонах [11, 14].

Изучение осаждающегося в толще океана вещества в Северной Атлантике началось практически с момента изобретения и внедрения основного инструмента сбора оседающих час-

тиц — седиментационных ловушек. Первые работы были приурочены к изучению потоков в рамках глобальной ловушечной программы в 80–90-е гг. XX столетия [17, 27, 29]. Однако при всей плотности сети ловушечных станций [27] Северная Атлантика — далеко не самый изученный регион Мирового океана. Значительная доля работ приходится на континентальную окраину Европы [17, 18], а многие авторы в последние годы рассматривают отдельные составляющие потока [28] или охватывают только верхний деятельный слой океана [21].

Основная цель нашей работы — изучить потоки осадочного вещества и основных его составляющих на меридиональном разрезе по 59°30' с.ш. в Северной Атлантике, выявить особенности формирования потока частиц в разных частях разреза под воздействием разнонаправленного переноса водных масс.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал для исследования собирался в течение двух лет — с июля 2015 г. (49-й рейс НИС «Академик Иоффе» [6]) по июль 2017 г. (68-й рейс

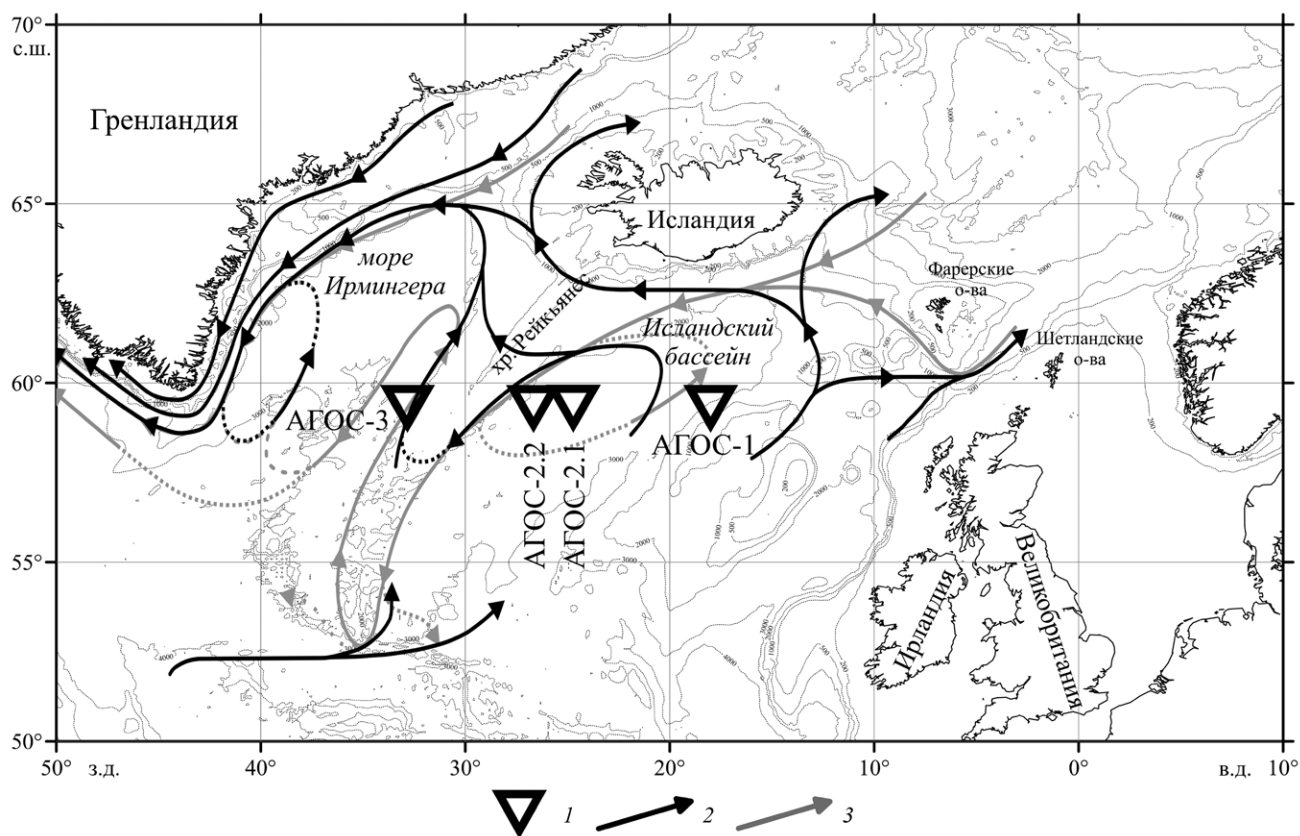


Рис. 1. Карта-схема района работ: 1 — точки постановки АГОС; 2 — поверхностные течения по [22]; 3 — придонные течения по [22].

НИС «Академик Мстислав Келдыш» [5]) с перезарядкой в июле 2016 г. (51-й рейс НИС «Академик Иоффе» [7]) на четырех автоматических глубоководных седиментационных обсерваториях (АГОС [10]) в Северной Атлантике на разрезе по $59^{\circ}30'$ с. ш. Положение АГОС приведено на рис. 1. Используются два типа ловушек. Дифференциальные 12-стаканные конические седиментационные ловушки «Лотос-3» с площадью сбора 0.5 м^2 производства ОКБ ОТ РАН позволяют получить непрерывный во времени (до года и более) ряд проб осаждающего вещества с заданной экспозицией (1 месяц). Второй тип ловушек — интегральные малые цилиндрические седиментационные ловушки МСЛ-110 производства ИО РАН имеют площадь сбора 0.0095 м^2 и соотношение длины и входного диаметра равное 5, позволяют собирать материал в течение всего времени работы АГОС [12]. Принципиаль-

ная схема максимальной комплектации АГОС приведена на рис. 2, более подробно — в табл. 1. «Лотос-3» устанавливались на всех АГОС в придонном слое (50 м от дна), а на двух крайних — также под верхним деятельным слоем (450–500 м соответственно). Все многостаканные ловушки дополнительно комплектовались интегральными. МСЛ-110 также устанавливались в промежуточных горизонтах с интервалом 400–500 м. Итого на каждой АГОС сбор материала проводился на 5 горизонтах. Для исключения биологической трансформации собираемого вещества флаконы-пробосборники ловушек заполнялись раствором HgCl_2 (1% от насыщенного раствора). Соленость фиксирующего раствора доводилась добавлением NaCl до двухкратной солености морской воды на горизонте постановки ловушки (~70 епс) для исключения вымывания фиксирующего раствора из пробосборников.

Для определения источника переноса вещества и для учета латеральной компоненты потока вещества в составе АГОС на горизонтах установки многостаканных ловушек по мере возможности устанавливались акустические измерители течений Nortek Aquadopp и Teledyne RD Instruments DVS.

При постановке и подъеме ловушек с помощью судовых зондирующих систем (SBE911 и др.), оснащенных пластиковыми батометрами Нискина, проводился отбор проб морской воды для изучения взвешенного в водной толще вещества (водной взвеси) фильтрационным методом. Дальнейшая обработка собранного седиментационными ловушками осадочного материала и фильтрационной взвеси проводилась по единой для всех проб методике. Каждую ловушечную пробу предварительно просеивали через сито с размером ячеек 1 мм (для удаления свимеров), а затем фильтровали под вакуумом через предварительно взвешенные ядерные фильтры производства Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна) диаметром 47 мм и размером пор 0.4 мкм для определения величины суммарных потоков и дальнейших исследований состава вещества. Одновременно вели фильтрацию через прокаленные при температуре 450°C стекловолнистые фильтры Whatman GF/F для определения содержания общего, органического ($C_{\text{орг}}$) и карбонатного ($C_{\text{карб}}$) углерода.

Химический состав осадочного вещества определялся в Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН. Определение ос-

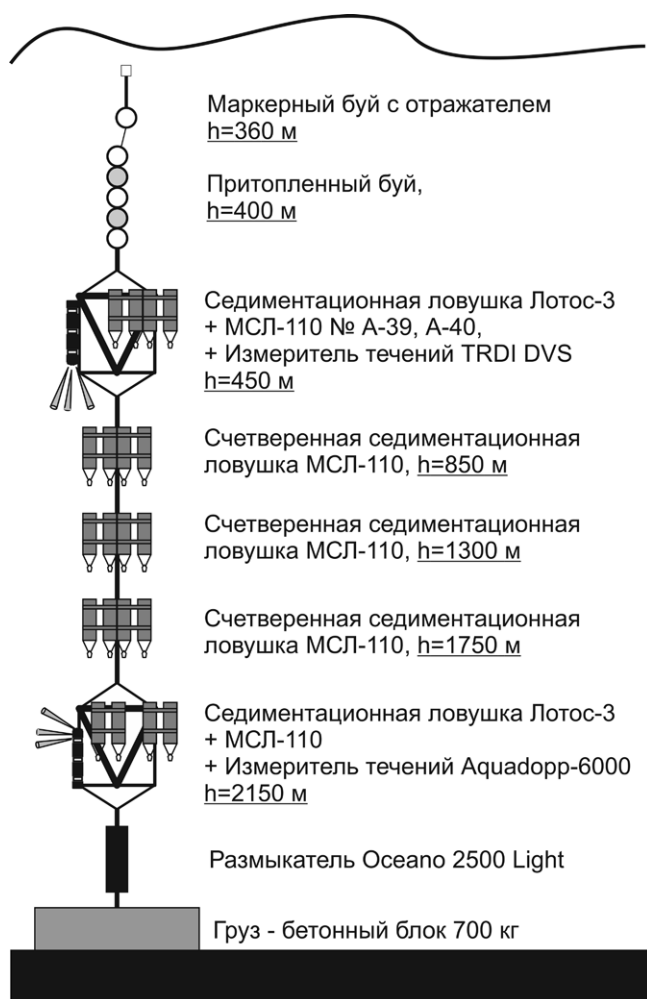


Рис. 2. Принципиальная схема максимальной комплектации АГОС.

Таблица 1. Время и место работы и комплектация АГОС

№№	Постановка	Снятие	Широта, с.ш.	Долгота, з.д.	Глубина, м	Горизонт, м	Приборы
АГОС-1	19.06.2015	18.06.2016	59°30.020'	17°59.972'	2182	444	Лотос-3, МСЛ-110
						868	МСЛ-110
						1288	МСЛ-110
						1708	МСЛ-110
						2128	Лотос-3, МСЛ-110
	18.06.2016	05.07.2017	59°30.045'	17°59.980'	2229	491	Лотос-3, МСЛ-110
						915	МСЛ-110
						1335	МСЛ-110
						1755	МСЛ-110
						2175	Лотос-3, МСЛ-110, Aquadopp
АГОС-2.1	22.06.2015	21.06.2016	59°30.301'	24°42.962'	2517	419	МСЛ-110
						930	МСЛ-110
						1441	МСЛ-110
						1952	МСЛ-110
						2463	Лотос-3, МСЛ-110
АГОС-2.2	22.06.2016	08.07.2017	59°29.791'	26°39.821'	2237	451	МСЛ-110
						884	МСЛ-110
						1317	МСЛ-110
						1750	МСЛ-110
						2183	Лотос-3, МСЛ-110, Aquadopp
АГОС-3	24.06.2015	24.06.2016	59°30.267'	32°50.563'	2192	526	Лотос-3, МСЛ-110
						932	МСЛ-110
						1334	МСЛ-110
						1736	МСЛ-110
						2138	Лотос-3, МСЛ-110
	24.06.2016	09.07.2017	59°30.018'	32°49.647'	2203	461	МСЛ-110, DVS
						883	МСЛ-110
						1305	МСЛ-110
						1727	МСЛ-110
						2149	Лотос-3, МСЛ-110, DVS

новых компонентов химического состава проб взвеси — Si, Al и P — проводилось фотометрическим методом по алгоритму, разработанному в Институте геохимии и аналитической химии РАН [1] в модификации А. Б. Исаевой для взвеси (точность 2–5%), аналитик Е. О. Золотых. Опре-

деление взвешенного общего и органического углерода (после обработки соляной кислотой для удаления карбонатного углерода) проводилось методом кулонометрического титрования на анализаторе углерода АН-7529 (Россия), точность определения — 5–10%, аналитик Л. В. Демина.

Данные о химическом составе вещества позволили идентифицировать основные взвешивающиеся компоненты:

- 1) литогенное вещество (ЛВ), индикатором которого является прежде всего Al, определялось через терригенную матрицу умножением значения элемента на 100/8 исходя из среднего состава земной коры [32];
- 2) органическое вещество (ОВ), индикатором которого является $C_{орг}$, определялось умножением значения этой величины на 2, исходя из общепринятой практики исследований [10, 13, 19, 23];
- 3) $CaCO_3$ рассчитывали умножением на 100/12 $C_{карб}$, который, в свою очередь, вычисляли по разнице $C_{общ}$ и $C_{орг}$;
- 4) аморфный кремнезем кремнистых организмов планктона ($SiO_2_{ам}$) определялся также методом терригенной матрицы по разнице содержания валового кремнезема и терригенного.

Сумма ЛВ, ОВ, $CaCO_3$ и $SiO_2_{ам}$ составляла в среднем 100% при незначительном отклонении в пределах 15%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидродинамическая обстановка. Седиментационные обсерватории действовали на разрезе поперек основной границы водных масс регио-

на — Субарктического фронта (рис. 1). АГОС-3 находилась в зоне Субарктической водной массы, АГОС-1 — в Северо-Атлантической воде, а АГОС-2.1 и 2.2 — в области промежуточных вод, образующихся при трансфронтальном обмене. В 2016 г. при перестановке АГОС-2.1 была перенесена ближе к хр. Рейкьянес в точку АГОС-2.2, но при этом обсерватории расположены относительно недалеко друг от друга и с определенной долей приближения можно рассматривать АГОС-2.2 как продолжение работы АГОС-2.1 под общим названием АГОС-2.

Соответственно термохалинной структуре, геострофические течения на поверхности океана в восточной части разреза направлены генерально на северо-восток. Поток на АГОС-3 соответствует направленной к Исландии ветви Северо-Атлантического течения, которая образует восточную часть Субарктического циклонического круговорота. Течение на АГОС-1 является продолжением главной ветви Северо-Атлантического течения и направлено в сторону Фареро-Исландского порога. В промежуточных водах, на АГОС-2, наблюдаются течения с меньшими скоростями и большой завихренностью.

На рис. 3 приведены результаты прямых измерений течений акустическими профилографами, обработанными в составе АГОС. Полученные данные показали, что придонные

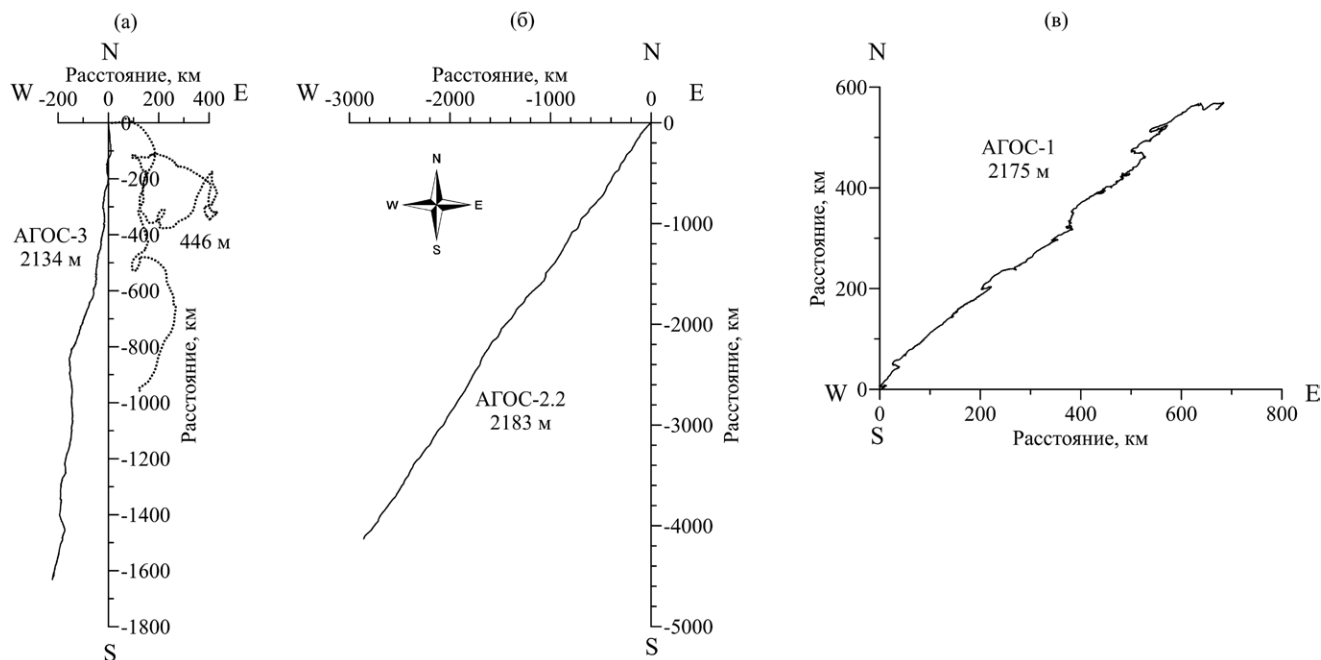


Рис. 3. Накопленная прогрессивная векторная диаграмма перемещения водных масс через точку измерения течений на западном склоне хребта Рейкьянес на горизонтах 446 м и 2134 м на АГОС-3 (а), на восточном склоне хребта Рейкьянес на горизонте 2183 м на АГОС 2.2 (б), у подножия континентального склона Европы на горизонте 2175 м на АГОС-1 (в).

Таблица 2. Основные характеристики течений по данным акустических профилографов в составе АГОС

№№	Горизонт, м	Средняя скорость течения, см/с	Максимальная скорость течения, см/с	Генеральное направление переноса
АГОС-1	2175	6.9	27.3	северо-восток
АГОС-2.2	2183	16.0	35.1	юго-запад
АГОС-3	461	9.7	34.3	юго-юго-запад
	2149	6.4	24.2	юго-юго-запад

течения на склонах хребта Рейкьянес (АГОС-3 и АГОС-2.2) противоположны направлению Северо-Атлантического течения на поверхности океана. Напротив, вне Субарктического круговорота (АГОС-1, подножие европейского континентального склона) направление течений сохраняется до дна. Наиболее мощный и постоянный поток зафиксирован в придонном слое на восточном склоне хребта Рейкьянес (АГОС 2.2) в средней струе Северо-восточной глубинной воды (СВГВ) в нижнем звене атлантической ветви глобального конвейера [2]. Суммарный векторный накопленный перенос водных масс через точку постановки составил здесь более 5000 км в юго-западном направлении. Для западного склона хребта Рейкьянес (АГОС-3) и подножия континентального склона Европы (АГОС-1) это значение составило 1650 км и 870 км в юго-юго-западном и северо-восточном направлении соответственно. Этому соответствовали и средние, и максимальные показатели скорости течений в изученных точках (табл. 2). Движение водных масс в точке работы АГОС-1 привязано, скорее всего, к рециркуляции СВГВ [2].

В слое промежуточных вод на восточном склоне хребта Рейкьянес имеет место мощный реверсивный (относительно Северо-Атлантического течения) поток вод на юго-запад с высокой средней скоростью 16 см/с (табл. 2).

Интересно, что согласно общепринятой схеме придонной циркуляции в Северной Атлантике [16, 22, 31] генеральный перенос водных масс в районе АГОС-3 направлен на северо-восток, однако по данным наших измерений он проходит в противоположном направлении — на юго-запад (рис. 3). Подобное расхождение можно объяснить существованием на разрезе квазистационарных вихрей, а в придонном слое также — отклоняющим влиянием сложного расчлененного рельефа западного склона хребта Рейкьянес. Так, по данным LADCP-зондирований в различных экспедициях [3, 22, 26], в верхнем тыся-

четметровом слое океана в исследуемом районе также обнаруживается нестационарное движение вод в южном направлении, что по нашим данным отмечается на горизонте 461 м.

Отмечается, что средняя (за год) придонная температура на АГОС-1 ($T_{cp} = 3.369^{\circ}\text{C}$) была выше на $0.469 \pm 0.001^{\circ}\text{C}$ (колебания в пределах $0.1-0.8^{\circ}\text{C}$), чем на АГОС-2.2 ($T_{cp} = 2.901^{\circ}\text{C}$). Амплитуда флуктуаций температуры за год составила по среднеквадратическому отклонению $0.07-0.10^{\circ}\text{C}$ на АГОС-1 и АГОС-2.2. Сезонный ход придонной температуры не просматривается.

Таким образом, можно говорить, что придонные потоки осадочного вещества на склонах хребта Рейкьянес (АГОС-2 и АГОС-3) формируются в условиях переноса водных масс и соответственно, взвеси, в юго-западном направлении вдоль хребта со стороны Фареро-Исландского и Гренландско-Исландского порогов. У подножия европейского континентального склона имеет место обратно направленный перенос. Такие структуры течений, направленных вдоль изобат, являются контурными и могут формировать характерные осадочные тела — контуритовые дрефты [4, 30].

Интегральные потоки. По результатам обработки материала, собранного интегральными ловушками МСЛ-110, величина годовых потоков вещества изменялась от 14.9 до $123.9 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (рис. 4). В пространственном отношении в среднем наибольшие потоки зафиксированы на западной оконечности европейского шельфа (АГОС-1, $20.3-92.1 \text{ г/м}^2/\text{год}$), наименьшие — в море Ирмингера на западном склоне хр. Рейкьянес (АГОС-3, $14.9-24.9 \text{ г/м}^2/\text{год}$). Соответствующие близкие значения ранее фиксировались также на континентальной окраине Европы с июля 1993 г. по сентябрь 1994 г. [18] и в глубоководной зоне моря Ирмингера (горизонт 250 м от дна при глубине 2750 м), но ближе к Гренландии, по материалам работы седиментационных ловушек в 2003–2006 гг. [28]. Макси-

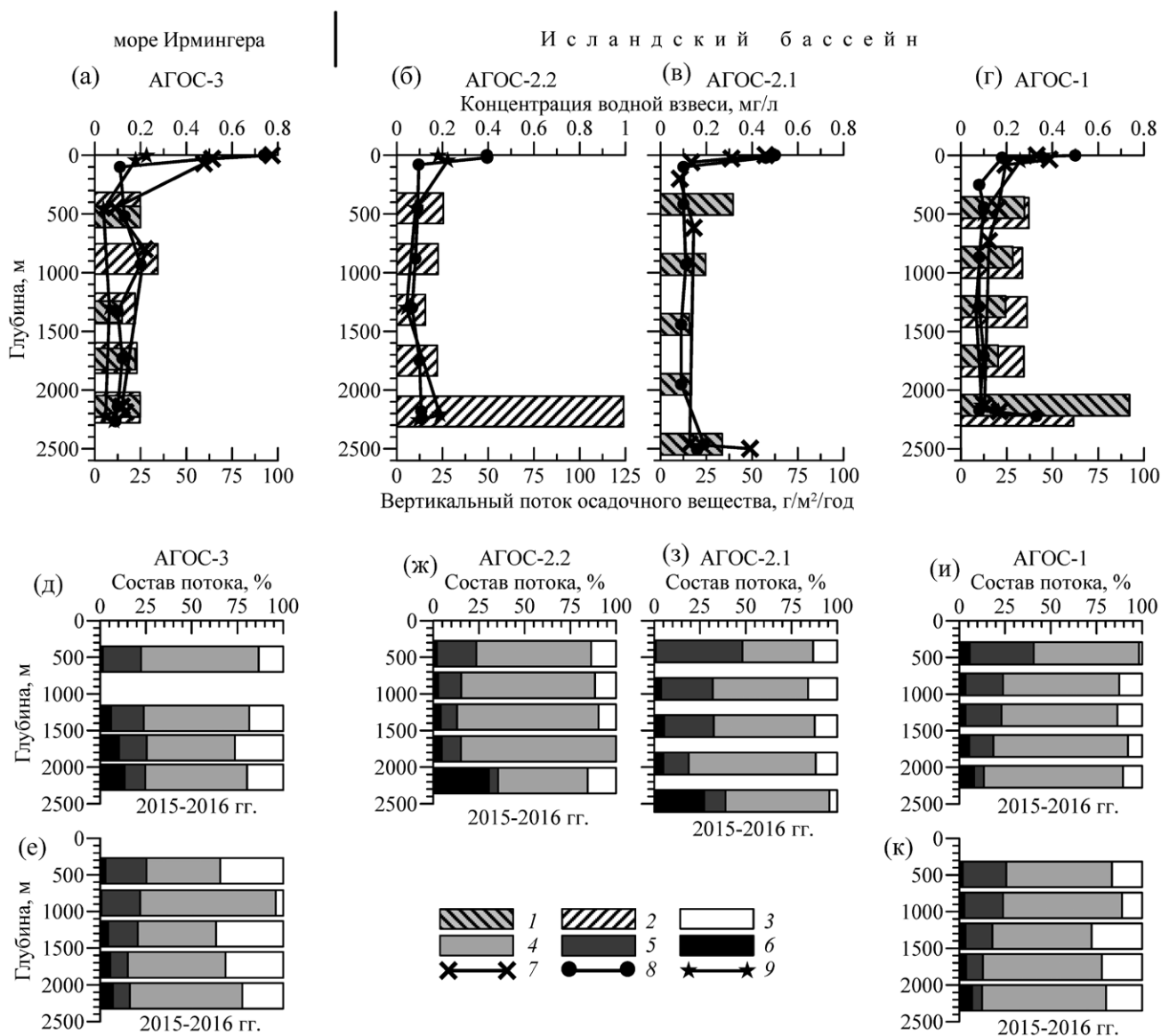


Рис. 4. Вертикальная изменчивость интегральных годовых потоков осадочного вещества и концентрации водной взвеси в момент постановки и поднятия АГОС на разрезе по $59^{\circ}30'$ с. ш. на западном склоне хребта Рейкьянес, АГОС-3 (а), на восточном склоне хребта Рейкьянес, АГОС-2.1 (б) и АГОС-2.2 (в), на восточном склоне Исландского бассейна (г), состав потоков на АГОС-3 в 2015–2016 гг. (д), в 2016–2017 гг. (е), на АГОС-2.2 в 2015–2016 гг. (ж), на АГОС 2.1 в 2016–2017 гг. (з), на АГОС-1 в 2015–2016 гг. (и), на АГОС-1 в 2016–2017 гг. (к) по данным ловушек МСЛ-110: 1 – суммарный поток в 2015–2016 гг., $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$; 2 – суммарный поток в 2016–2017 гг., $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$; 3 – $\text{SiO}_{2\text{ам}}$, %; 4 – CaCO_3 , %; 5 – органическое вещество, %; 6 – литогенное вещество, %; 7 – концентрация взвеси в 2015 г., $\text{мг}/\text{л}$; 8 – концентрация взвеси в 2016 г., $\text{мг}/\text{л}$; 9 – концентрация взвеси в 2017 г., $\text{мг}/\text{л}$.

мальные потоки в поверхностном слое отмечены нами в восточной части разреза на АГОС-1 ($39.6 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$) и на АГОС-2.1 ($33.0 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$).

Для вертикального распределения интегральных потоков характерны максимумы вещества в подповерхностном слое и у дна и минимум в промежуточных водах на горизонтах 1300–1700 м. Именно в придонном слое потоки достигают своего абсолютного максимума на раз-

резе $123.9 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$ на АГОС-2.2 и $92.1 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$ на АГОС-1. В общем, вертикальное распределение потоков хорошо иллюстрирует классическую схему рециклинга в толще вод океана [8]: максимум в верхнем деятельном слое, далее – минимум, связанный с растворением осаждающегося биогенного материала, и максимум в придонном нефелоидном слое за счет взмучивания верхнего слоя донных осадков течениями.

Подобное вертикальное распределение было характерно также для водной взвеси, собранной в ходе экспедиций при постановке и подъеме обсерваторий [6, 7, 15]. Исключением из общей картины является локальный максимум как осаждающегося вещества, так и фильтрационной взвеси в море Ирмингера на западном склоне хр. Рейкьянес (АГОС-3) в слое 800–900 м. К сожалению, материал ловушек, экспонированных в 2015–2016 гг., здесь обработать не удалось, т.к. седиментационные ловушки соответствующего горизонта были заполнены полуразложившимися остатками икhtiофауны (предположительно, морской окунь). Однако этот факт позволяет предположить существование высоких значений потоков вещества на данном горизонте. А по результатам работы ловушек в 2016–2017 гг. на данном горизонте зафиксированы наибольшие для всей водной толщи в этой точке потоки осадочного вещества. Сопутствующие гидрологические исследования в этом районе [3, 5] показали, что исследуемый горизонт находится на восточной периферии ядра Лабрадорской промежуточной водной массы (ЛПВ), образованной в результате аномально глубокой зимней конвекции, которая фиксируется в море Ирмингера, начиная с 2015 г. Здесь залегают насыщенные кислородом воды (>93% насыщения) с относительно высоким содержанием биогенных элементов. В составе осаждающегося вещества на этом горизонте подавляюще преобладает биогенное вещество (более 99%), в основном взвешенный карбонат кальция (74%).

Состав интегральных потоков. В составе осаждающегося вещества преобладает биогенная компонента, которая складывается из органического вещества, взвешенного карбоната кальция и аморфного кремнезема (биогенная триада взвеси [9]).

Содержание **органического вещества** в интегральных годовых потоках наиболее значимо в Исландском бассейне, где достигает своего максимума 35–47% от суммарного количества вещества. По вертикали содержание ОВ убывает с глубиной вследствие растворения и составляет не более 9–12%.

Карбонатный материал представлен во всех ловушках в значительном количестве — от 38 до 85% от общего вещества потока. В пространственном отношении среднее содержание CaCO_3 также возрастает в восточном направлении и достигает своего максимума на континен-

тальной окраине Европы. Для вертикального распределения потока карбонатного материала сложно выделить какие-либо закономерности, равно как и для $\text{SiO}_{2\text{ам}}$.

Для пространственного распределения **содержаний $\text{SiO}_{2\text{ам}}$** характерно более чем двукратное увеличение в западной части разреза в море Ирмингера (АГОС-3), за исключением уже упомянутого выше горизонта в ядре ЛПВ, где содержание $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ одно из самых низких в исследуемой акватории (4%).

Содержание **литогенного материала** в потоке увеличивается с глубиной на всех обсерваториях, что также отмечалось ранее в исследуемом регионе [18]. Рост обусловлен уменьшением с глубиной содержаний биогенных компонентов (растворение), а также возрастанием абсолютных значений потока ЛВ за счет нефелоидного слоя. Взмучивание верхнего слоя донных осадков, в которых содержание ЛВ намного выше, чем в осаждающейся с поверхности взвеси, служит дополнительным источником ЛВ в материале седиментационных ловушек.

Наибольших значений поток ЛВ достигает в придонном горизонте на восточном склоне хребта Рейкьянес (АГОС 2.1 и 2.2). Этот горизонт расположен в средней струе Северо-восточной глубинной воды (СВГВ) в нижнем звене атлантической ветви глобального конвейера [2], где происходит интенсивный перенос водных масс и, возможно, осадочного вещества, обогащенного литогенным материалом, со стороны Фареро-Исландского порога. Здесь были зафиксированы наибольшие скорости течений на всем разрезе (средняя скорость 16 см/с при максимуме 35 см/с, табл. 2).

Низкое содержание ЛВ в потоке обусловлено значительной удаленностью изучаемой акватории от источника — суши, а также практически замкнутой системой циркуляции вод, когда основной перенос вещества происходит не от материков, а перпендикулярно этому направлению, т.е. вдоль изобат. Для сравнения приведем данные исследований по программе OMEX на разрезе от европейской континентальной окраины, где доля ЛВ в потоке варьирует от 20 до 70% [18].

Сезонная изменчивость потоков. Анализ материала многостаканных ловушек показал значительную изменчивость потоков вещества в течение года (рис. 5). При этом в подповерхностном слое, особенно в море Ирмингера (что уже отмечалось ранее [28]), годовой ход потоков доста-

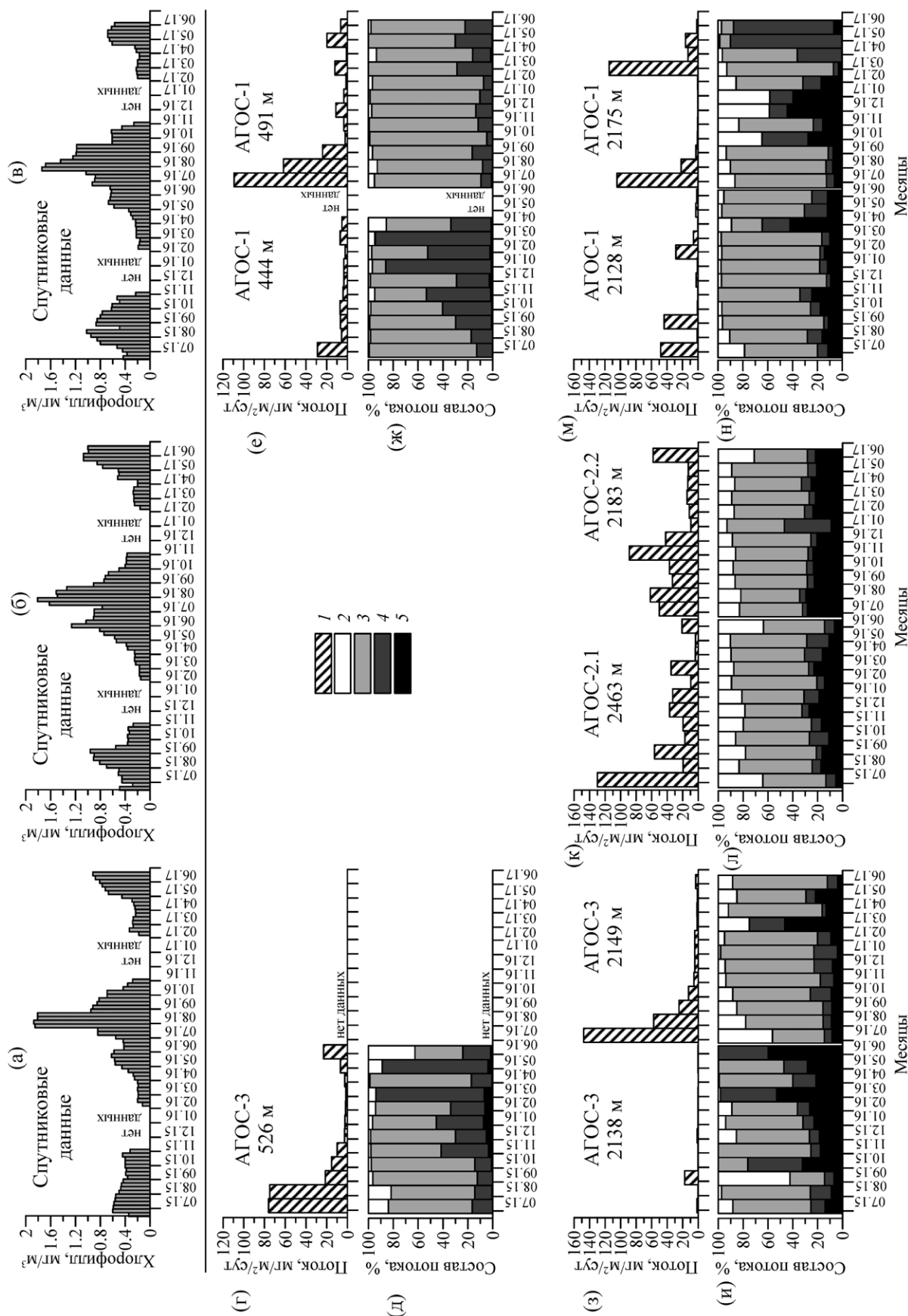


Рис. 5. Сезонная изменчивость хлорофилла в поверхностном слое океана в местах работы АГОС по спутниковым данным на западном склоне хребта Рейкьянес, АГОС-3 (а), на восточном склоне хребта Рейкьянес, АГОС-2 (б), на восточном склоне Исландского бассейна, АГОС-1 (в), изменчивость потоков и их состав по данным ловушек "Лотос-3" в придонных слоях на АГОС-3 (г, д), АГОС-1 (е, ж), в придонных слоях на АГОС-3 (з, и), АГОС-2 (к, л), АГОС-1 (м, н): 1 — суммарный поток, мг/м²/сут; 2 — SiO_{2ам}, %; 3 — CaCO₃, %; 4 — органическое вещество, %; 5 — литогенное вещество, %.

точно плавный и определяется изменчивостью жизненной активности фитопланктона — основного продуцента осадочного вещества в поверхностном слое изучаемого района океана. Это хорошо иллюстрируют спутниковые данные по распределению хлорофилла в районе работы АГОС, приведенные на рис. 5. Так, на АГОС-3 потоки максимальны в июле—августе, осенью плавно уменьшаются и достигают своего минимума в декабре—марте, после чего снова начинают расти. В восточной части разреза (АГОС-1) поверхность океана характеризуется значительной неоднородностью, что находит свое отражение в изменчивости полей хлорофилла “а”, хорошо видной на спутниковых снимках [<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>]. Однако и здесь максимум вещества отмечается летом, а минимум зафиксирован в зимние месяцы. Очевидное увеличение содержания хлорофилла в поверхностном слое океана летом 2016 г. по сравнению с летом 2015 г. также нашло отражение в росте потоков осадочного вещества в подповерхностном горизонте АГОС-1, где удалось получить практически непрерывный двухлетний ряд проб ловушечного материала.

В придонном слое поток определяется, очевидно, изменчивостью придонного нефелоидного слоя под воздействием гидродинамических факторов (течений). При высоких скоростях течений возможно также изменение эффективности улавливания осаждающихся частиц седиментационными ловушками как в сторону уменьшения, так и завышения потока [20, 24, 25]. Возможно поэтому выявить какую-либо закономерность в годовом ходе осадения вещества в придонном слое нам не удалось.

Сезонная изменчивость состава осаждающегося вещества особенно четко проявляется также в подповерхностном слое. Так, в летние месяцы значительно увеличивается содержание CaCO_3 и $\text{SiO}_{2\text{ам}}$, максимальные значения достигают 86 и 37% соответственно. Зимой возрастает доля органического вещества — до 50% и более, очевидно за счет уменьшения доли CaCO_3 и $\text{SiO}_{2\text{ам}}$. В несколько раз также увеличивается содержание литогенного вещества, в основном за счет минимизации потока биогенного материала. Небольшое увеличение абсолютных значений потока литогенного вещества может быть связано с увеличением аэрозольной поставки из-за усиления ветра в период возрастания интенсивности штормов.

В придонном слое изменчивость состава потоков практически не выражена, что подтверждает происхождение существенной доли вещества потока из придонного нефелоидного слоя за счет взмучивания и переотложения верхнего слоя донных осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках изученного разреза наиболее интенсивно процесс осадения вещества происходит на окраине европейского континентального склона. По вертикали потоки соответствуют схеме рециклинга с максимумами выпадения вещества из верхнего деятельного слоя и в придонном нефелоидном слое за счет взмучивания верхнего слоя донных осадков течениями.

В подповерхностном слое годовой ход потоков и изменение состава осаждающегося вещества определяется первичной продукцией фитопланктона. Это также нашло отражение в увеличении потоков летом 2016 г. за счет более интенсивного цветения — межгодовая изменчивость. Придонные потоки осадочного вещества на склонах хребта Рейкьянес формируются в условиях переноса водных масс и, соответственно, взвеси в юго-западном направлении вдоль хребта со стороны Исландских порогов. У подножия европейского континентального склона имеет место обратно направленный перенос вещества.

В составе осаждающегося вещества преобладает биогенная компонента, доля которой уменьшается с глубиной за счет растворения, а зимой еще из-за ослабления биологической активности верхнего деятельного слоя. Роль литогенного вещества максимальна в придонном слое, в том числе за счет поставки материала со дна, а также возрастает зимой в подповерхностном слое при уменьшении потока биогенного материала.

Благодарности. Авторы благодарят академика А. П. Лисицына за общее руководство работами, капитанов и экипажи НИС «Академик Иоффе» и «Академик Мстислав Келдыш», начальников экспедиций С. В. Гладышева и М. Д. Кравчишину и весь научный состав за помощь в проведении экспедиционных исследований, а также аналитиков, помогавших в обработке материала.

Источник финансирования. Экспедиционные исследования выполнены при финансовой под-

держке гранта РФФИ (проект № 14-50-00095). Аналитические исследования частично выполнены в рамках Государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2019-0007). Обработка данных по течениям частично выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00787а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельман Е. М., Старобина И. З. Фотометрические методы определения породообразующих элементов в рудах, горных породах и минералах. ГЕОХИ АН СССР, Центральная лаборатория, Сектор химических методов анализа. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1976. 69 с.
2. Гладышев С. В., Гладышев В. С., Кловиткин А. А., Гулев С. К. Новый взгляд на структуру водообмена между Арктикой и Северной Атлантикой в Исландском бассейне // Докл. РАН. 2019. В печати.
3. Гладышев С. В., Соков А. В., Гулев С. К. и др. Роль циркуляционных механизмов и изменчивость промежуточных вод в море Ирмингера в период глубокой конвекции // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 5. 549–553.
4. Кеннет Д. Морская геология: В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 397 с.
5. Кловиткин А. А., Гладышев С. В., Кравчишина М. Д. и др. Геологические и гидрологические исследования в Северной Атлантике в 2017 г. на разрезе по 59°30' с.ш. (68-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. В печати.
6. Кловиткин А. А., Политова Н. В., Новигатский А. Н. и др. Геологические исследования Северной Атлантики в 49-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Иоффе» // Океанология. 2016. Т. 56. № 5. С. 833–835.
7. Кловиткин А. А., Политова Н. В., Новигатский А. Н. и др. Геологические исследования в Северной Атлантике в 51-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Иоффе» // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 514–516.
8. Лисицын А. П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
9. Лисицын А. П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / Под общ. ред. чл.-корр. РАН Лобковского Л. И. и академика Нигматулина Р. И. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
10. Лисицын А. П., Лукашин В. Н., Новигатский А. Н. и др. Глубоководные обсерватории на транскаспийском разрезе — непрерывные исследования потоков рассеянного осадочного вещества // Докл. РАН. 2014. Т. 456. № 4. С. 485–489.
11. Лукашин В. Н., Богданов Ю. А., Гурвич Е. Г. и др. Исследования нефелоидного слоя // Океанологические исследования фронтальной зоны Гольфстрима. Полигон «Титаник». М.: Наука, 2002. С. 235–262.
12. Лукашин В. Н., Кловиткин А. А., Лисицын А. П., Новигатский А. Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
13. Лукашин В. Н., Лисицын А. П. Геохимия рассеянного осадочного вещества и его потоки в толще вод Каспийского моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 5. С. 741–756.
14. Лукашин В. Н., Щербинин А. Д. Нефелоидный слой и горизонтальные потоки осадочного вещества в Норвежском море // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 894–908.
15. Политова Н. В., Саввичев А. С., Кловиткин А. А. и др. Биогеохимическая характеристика взвеси на широтном разрезе в Северной Атлантике // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 618–628.
16. Фалина А. С., Сарафанов А. А. О формировании нижнего звена меридиональной термохалинной циркуляции вод Северной Атлантики // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 6. С. 710–714.
17. Antia A. N., Koeve W., Fisher G. et al. Basin-wide particulate carbon flux in the Atlantic Ocean: Regional export patterns and potential for atmospheric CO₂ sequestration // Global Biogeochemical Cycles. 2001. V. 15. № 4. P. 845–862.
18. Antia A. N., von Bodungen B., Peinert R. Particle flux across the mid-European continental margin // Deep-Sea Res. I. 1999. V. 46. P. 1999–2024.
19. Bauerfeind E., Nothig E.-M., Beszczynska A. et al. Particle sedimentation patterns in the eastern Fram Strait during 2000–2005: Results from the Arctic long-term observatory HAUSGARTEN // Deep-Sea Res. I. 2009. V. 56. P. 1471–1487.
20. Buesseler K. O., Antia A. N., Chen M. et al. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes // J. of Marine Res. 2007. V. 65. P. 345–416.
21. Collins J. R., Edwards B. R., Thamatrakoln K. et al. The multiple fates of sinking particles in the North Atlantic Ocean // Global Biogeochem. Cycles. 2015. V. 29. P. 1471–1494.
22. Daniault N., Mercier H., Lherminier P. et al. The northern North Atlantic Ocean mean circulation in the early 21st century // Progress in Oceanography. 2016. V. 146. P. 142–158.
23. Fischer G., Romero O., Merkel U. et al. Deep ocean mass fluxes in the coastal upwelling off Mauritania from 1988 to 2012: variability on seasonal to decadal timescales // Biogeosciences Discuss. 2015. V. 12. P. 17643–17692.
24. Gardner W. D. Sediment trap dynamics and calibration: a laboratory evaluation // J. of Marine Res. 1980. V. 38. № 1. P. 17–39.
25. Gardner W. D. The effect of tilt on sediment trap efficiency // Deep-Sea Res. 1985. V. 32. P. 349–361.
26. Holliday N. P., Bacon S., Cunningham S. A. et al. Subpolar North Atlantic overturning and gyre-scale circulation in the summers of 2014 and 2016 // J. of Geophys. Res.: Oceans. 2018. V. 123. P. 4538–4559.

27. Honjo S., Manganini S.J., Krishfield R.A., Francois R. Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: A synthesis of global sediment trap programs since 1983 // *Progress in Oceanography*. 2008. V. 76. P. 217–285.
28. Jonkers L., Brummer G.-J.A., Peeters F.J.C. et al. Seasonal stratification, shell flux, and oxygen isotope dynamics of left-coiling *N. pachyderma* and *T. quinqueloba* in the western subpolar North Atlantic // *Paleoceanography*. 2010. V. 25. PA2204.
29. Lampitt R.S., Antia A.N. Particle flux in deep seas: regional characteristics and temporal variability // *Deep-Sea Res. I*. 1997. V. 44. № 8. P. 1377–1403.
30. Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Van Rooij D., Wåhlin A. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // *Marine Geology*. 2014. V. 352. P. 111–154.
31. Sarafanov A., Falina A., Mercier H. et al. Mean full-depth summer circulation and transports at the northern periphery of the Atlantic Ocean in the 2000s // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C01014.
32. Taylor S.R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim Cosmochim Acta*. 1964. V. 28. P. 1273–1285.

STUDIES OF PARTICLE FLUXES OF SEDIMENTARY MATTER ALONG MULTIYEAR TRANSOCEANIC SECTION IN NORTHERN ATLANTIC AND ARCTIC INTERACTION AREA

© 2019 A. A. Klyuvitkin*, A. N. Novigatsky, N. V. Politova, E. V. Koltovskaya

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: klyuvitkin@ocean.ru

Received November 30, 2018

Revised version received February 15, 2019

After revision December 05, 2018

New data on the particle fluxes of sedimentary matter and its main components at the meridional section along 59°30' N in the North Atlantic under the influence of multidirectional transfer of water masses are given. The material for the study was collected for two years from July 2015 to July 2017 using sediment traps installed as part of four automatic deep-water sedimentary observatories. In the subsurface layer, the annual variation of the fluxes and the change in the composition of the sinking matter are determined by the primary production. Near-bottom fluxes of sedimentary matter on the slopes of the Reykjanes ridge are formed under conditions of water masses and, respectively, suspended particulate matter transfer in a south-westerly direction along the ridge from the Iceland-Faeroe and Greenland-Iceland rises. There is a reverse directional transfer of matter at the foot of the European continental slope. The composition of the sinking matter is dominated by the biogenic component, the proportion of which decreases with depth due to dissolution, and in winter due to the weakening of the biological activity of the upper active layer. The role of lithogenic matter is maximal in the bottom layer, including due to the supply of material from the bottom.

Keywords: North Atlantic, Iceland Basin, Irminger Sea, dispersed sedimentary matter, particle flux, sediment trap