

УДК 550.47:556.54

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА НА ГЕОХИМИЧЕСКОМ БАРЬЕРЕ ВОДА–АТМОСФЕРА НА ТРАНСОКЕАНСКИХ РАЗРЕЗАХ

© 2019 г. И. А. Немировская*, А. М. Титова

Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, Россия

*e-mail: nemir@ocean.ru

Поступила в редакцию 27.12.2018 г.

После доработки 27.12.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Представлены результаты исследования гранулометрического состава аэрозолей и поверхностных вод (31-й рейс НИС «Академик Николай Страхов», декабрь 2015 г.–январь 2016 г.; 42-й рейс НИС «Академик Борис Петров», январь–апрель 2017 г.). Установлено, что в 2017 г. среднее количество для частиц аэрозолей 0.3–0.5 мкм уменьшалось в последовательности (в литре воздуха): Баб-Эль-Мандебский пролив (135190)>Аденский залив (102854)>Красное море (91612)>Северное, Балтийское моря (76468)>Индийский океан (64113)>Малаккский пролив (46491)>Средиземное море (28397)>Восточная Атлантика (14803). Биотический фактор между распределением взвеси и органическими соединениями преобладает в открытых водах Индийского океана и в северо-восточной части Атлантического океана, а также в районах с повышенной продуктивностью (Аравийское море). Циркумконтинентальная зональность приводит к доминированию терригенной составляющей во взвеси прибрежных вод. Переход фитопланктонного сообщества от зимнего (2016 г.) к весеннему (2017 г.) привел к уменьшению содержания взвеси в среднем в 8 раз. Отсутствие в отдельных районах корреляции между содержанием взвеси и органическими соединениями свидетельствует о разных источниках их формирования. Несмотря на высокие концентрации углеводов в отдельных пробах в 2016 г. (до 50–70 мкг/л), среднее их содержание практически не изменилось: 10.5 мкг/л (2016 г.), 8.7 мкг/л (2017 г.). Определение в составе углеводов выветренных нефтяных алканов указывает на влияние нефтяных загрязняющих веществ.

Ключевые слова: аэрозоли, поверхностные воды, взвесь, $C_{\text{орг}}$, углеводороды, хлорофилл «а»

DOI: 10.31857/S0030-1574594558-568

ВВЕДЕНИЕ

В поверхностных водах происходит взаимодействие трех геосфер: атмосферы, гидросферы и биосферы, которое можно охарактеризовать, отбирая пробы по маршруту движения судна [6]. В рейсах НИС «Академик Николай Страхов» (п. Коломбо — п. Калининград, декабрь 2015–январь 2016 гг.) и НИС «Академик Борис Петров» (п. Сингапур — п. Калининград, январь–апрель 2017 г.) по ходу движения судов были проведены исследования приводных аэрозолей и поверхностных вод. Цель исследования — установить влияние гумидных и аридных областей на распределение и состав аэрозолей и взвеси поверхностных вод (органических соединений — ОС: $C_{\text{орг}}$, липидов, углеводов — УВ, хлорофилла «а» — хл «а»). Исследования проводили в Индийском и Атлантическом океанах, в Красном,

Средиземном, Северном и Балтийском морях, то есть в различных климатических зонах.

Атмосферный транспорт и атмосферное осаждение — основные пути поступления природных и антропогенных соединений с суши в открытый океан, особенно в аридных областях [2, 3, 6, 15, 22, 24, 27 и др.]. ОС — важная составляющая аэрозолей. В зависимости от молекулярного состава они могут поглощать (или рассеивать) свет, способствуя потеплению или похолоданию, то есть влияют на климатические изменения [16], а также на атмосферный радиационный бюджет [28]. Изучение состава аэрозолей и взвеси необходимо при решении основных вопросов морской геологии и экологии, для развития методов исследования микро- и наночастиц, $C_{\text{орг}}$ и хл «а» — для оценки продуктивности вод, а УВ — для оценки загрязненности поверхностных вод нефтепродуктами [5].

В последние годы большое внимание было уделено Атлантическому океану и его морям [2, 6, 18 и др.]. Основные исследования российских ученых в Индийском океане относятся к 80-м годам XX века. Зарубежные исследования проводили в 90-х годах прошлого века в рамках Международного геофизического года (IGY), эксперимента по муссонам (MONEX), индийских программ по атмосфере (IMAP) и климатическим изменениям (INDOEX), которые доказали роль аэрозолей в глобальных климатических изменениях. Рейсы НИС «Академик Николай Страхов» и НИС «Борис Петров» возвращают исследования российских океанологов в Индийский океан после долгого перерыва.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение гранулометрического состава приводного аэрозоля проводили 4–5 раз в сутки с помощью 6-канального измерителя частиц Aerotrak (США), предназначенного для определения их счетных концентраций в атмосфере. Пробы поверхностной воды отбирали по ходу движения судна 3–4 раза в светлое время суток.

Водную взвесь отфильтровывали на предварительно отмытые (4% особо чистой соляной кислотой) поликарбонатные ядерные фильтры (0.45 мкм) под вакуумом при 0.4 атм. Концентрацию взвеси определяли гравиметрическим методом в лабораторных условиях, состав взвеси — на сканирующем электронном микроскопе VEGA-3sem, фирмы TESCAN (Чехия) с микроанализатором фирмы SEM-EDS Oxford (Англия), (аналитик А. Г. Боев). Концентрации $C_{орг}$ во взвесьях — взвешенный органический углерод (ВОУ) определяли методом сухого сжигания на отечественном анализаторе АН-7560 (аналитик Л. В. Демина).

Для изучения ОС их выделяли фильтрацией из воды при 0.2 атм. на предварительно прокаленные при 450°C стекловолокнистые фильтры GF/F (эффективный размер пор 0.7 мкм). Концентрацию хл «а» определяли флуориметрическим методом на приборе Trilogy фирмы Turner (США), предварительно откалиброванного на кафедре биофизики биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Для выделения хлорофиллов фильтры помещали в 90% ацетон при температуре +4°C и выдерживали в темноте в течение 12–16 часов [29].

Липиды (суммарная фракция, извлекаемая органическими растворителями) выделяли из подсушенных на воздухе проб взвесей метилхлоридом на ультразвуковой бане «Сапфир» при 35°C. Концентрацию липидов (до колоночной хроматографии на силикагели) и алифатических углеводородов — УВ (после колоночной хроматографии) определяли ИК-методом на спектрофотометре IRAffinity-1 фирмы Shimadzu (Япония). В качестве стандарта использовали смесь (по объему): 37.5% изооктана, 37.5% гексадекана и 25% бензола [10]. Чувствительность метода — 3 мкг/мл экстракта. Этот метод в эквиваленте используемого стандарта принят в качестве арбитражного при анализе нефтяных углеводородов [5, 10].

Для анализа алканов использовали отечественный хроматограф Кристалл-Люкс 4000-М, оснащенный пламенно-ионизационным детектором (ПИД), с капиллярной колонкой 30 м×0.22 мм фирмы Supelco (с фазой 5% фенил и 95% поликсилан), при программировании температуры от 60 до 300°C со скоростью 8°/мин, газ-носитель — гелий (скорость прохождения газа 1.5 л/мин). Для калибровки прибора и определения времени выхода идентифицируемых алканов использовали смесь калибровочных стандартов $n-C_{10}-C_{40}$ фирмы Supelco, а в качестве внутреннего стандарта — сквалан, фирмы Sigma Aldrich (аналитик А. В. Храмцова).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав приводных аэрозолей и их содержание значительно изменялись в зависимости от района исследования (рис. 1). Атмосфера — самая подвижная и переменчивая из геосфер Земли, в которой быстро меняются потоки вещества, обусловленные движением воздушных масс [3]. В частности, количество частиц приводного аэрозоля 0.3–0.5 мкм, на долю которых приходилось 78–88% от суммы в пересчете на литр воздуха, изменялось от 1441 до 379 361, более чем в 263 раза (табл. 1). При этом в распределении мелких частиц (0.3–0.5 и 0.5–1 мкм) наблюдалась корреляция: $r = 0.78$ ($n = 113$), а для частиц 0.3–0.5 и 1 мкм такая связь отсутствовала: $r = 0.05$. Малый размер частиц в атмосфере обусловлен тем, что они легче поднимаются с земли и переносятся ветром на большие расстояния. Раньше в аэрозолях у берегов Европы в основном были определены только мелкие

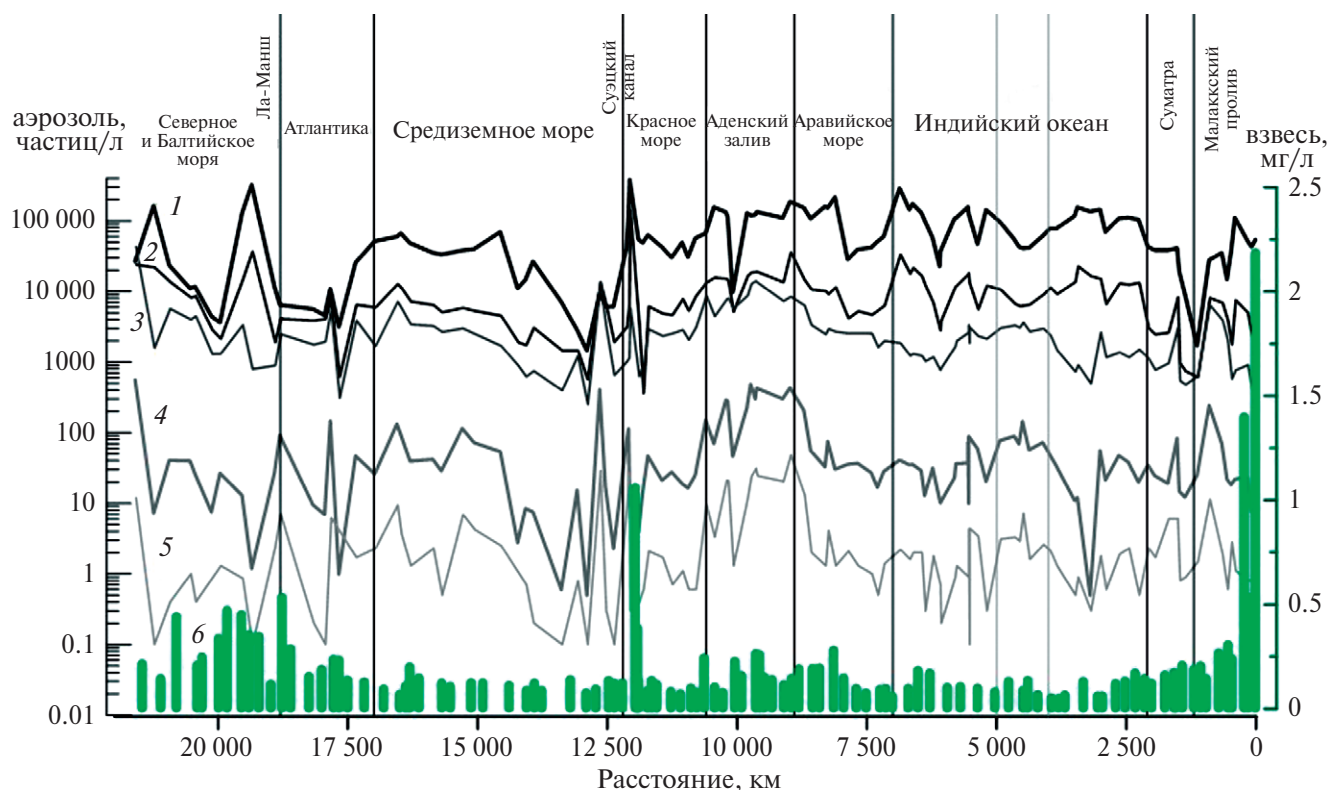


Рис. 1. Распределение приводного аэрозоля по маршруту п. Сингапур–п. Калининград (НИС «Академик Борис Петров», 2017 г.) для частиц с размерностью (мкм): 1 – 0.3–0.5, 2 – 0.5–1, 3 – 1–5, 4 – 5–10, 5 >10 мкм, 6 – взвесь в поверхностных водах (мг/л).

Таблица 1. Концентрации аэрозолей разного размера в приводной толще атмосферы различных районов Индийского и Атлантического океанов

НИС «Академик Борис Петров», 2017 г.											
Район	Кол-во проб	0.3–0.5 мкм		0.5–1 мкм		1–5 мкм		5–10 мкм		>10 мкм	
		интервал	σ	интервал	σ	интервал	σ	интервал	σ	интервал	σ
Малаккский пролив	7	14802–109564 46491	28471	1765–8013 4805	2413	419–6398 1952	2148	7.7–245 52	80	0.4–11.3 2	4
Индийский океан	45	1684–287271 90560	58667	608–33012 9993	6434	479–3632 1872	914	0.5–144 39.6	28	0.1–7.2 2	2
Район Аравийского п-ова	7	106487–184836 131394	25890	10590–35731 18332	7612	3342–14126 9314	3813	56–490 307	143	2–48.1 22	14
Красное море	15	9582–379362 86091	87967	361–139471 15823	33289	625–8657 3749	2666	4–291 75.8	91	0.3–26.7 6	9
Средиземное море	16	1441–68933 27720	22836	560–13603 5297	4007	253–13485 2998	3313	0.5–410 61.5	99	0–28.6 4	7
Восточная Атлантика	5	3111–51082 16741	18697	614–7720 4764	2509	310–5555 2528	1876	1–146 39.6	55	0–6.2 2	2
Ла-Манш-Балтика	10	3584–320154 64200	100445	1886–36547 12543	11036	794–42933 6260	12270	1.2–564 77	163	0–11.9 2	4

Примечание. σ – стандартное отклонение.

частицы, а в проливе Ла-Манш частицы больше 5 мкм отсутствовали [6]. В исследованных районах в 2017 г. были зафиксированы частицы, даже превышающие 10 мкм (рис. 1), образование которых может происходить в атмосфере при конденсации паров или в результате химических реакций. Однако их доля в среднем изменялась от 0.002 до 0.012% от суммарной концентрации.

Повышенные величины аэрозолей приурочены к западной части Индийского океана (табл. 1). В эти районы при северном ветре и близости берега происходит вынос муссонами мелкодисперсных частиц с пустынных районов Аравийского полуострова. В гумидных областях потоки аэрозолей снижались и снова возрастали под влиянием антропогенных поступлений из промышленных европейских областей. Весной 2015 г. на трансатлантическом разрезе максимум приводного аэрозоля для частиц 0.3–1 мкм был установлен в проливе Ла-Манш — 111 739 частиц/л [6]. Однако эта величина оказалась ниже полученной нами в 2017 г., где при выходе из пролива Ла-Манш в Северное море их количество достигло 320 154 частиц/л.

Потоки приводного аэрозоля способствуют росту содержания взвеси в поверхностных водах. Средние концентрации взвеси в 2016 уменьшались в последовательности для отдельных районов (мг/л): Ла-Манш–Балтика (7.284) > Красное море (1.649) > Восточная Атлантика (1.075) > район Аравийского п-ова (1.034) > Индийский океан (0.743) > Средиземное море (0.724). При этом в Индийском океане значение σ (стандартное отклонение) составило всего 12.5% от средней, в районе Аравийского п-ова — 25.4%, в Средиземном море и в Восточной Атлантике повысилось до 65–67%. В Красном море дисперсность данных была настолько велика (из-за высоких концентраций в Суэцком канале в районе скопления судов), что значение σ превысило среднюю величину в 1.2 раза. Как зимой 2016 г., так и весной 2017 г. минимум содержания взвеси определен в Средиземном море, а наиболее высокие концентрации — в Северном и Балтийском морях (табл. 2).

Большая изменчивость концентраций отразилась и на составе взвеси. В 2016 г. в районе Аравийского п-ва при содержании 1.35 мг/л, взвесь состояла из диатомовых водорослей, органических остатков детрита и минеральных частиц, представленных баритом и кварцем. Кроме того, в пробе было обнаружено незначи-

тельное количество сажи антропогенного происхождения с примесью железа, кремния и алюминия. Максимальное содержание взвеси в этом районе было установлено в Суэцком канале — 9.539 мг/л, где в ее составе преобладали тонкодисперсные глинистые частицы, но также присутствовали и диатомовые водоросли (рис. 2а).

В Баб-эль-Мандебском проливе в 2016 г. при концентрации 1.995 мг/л взвесь была представлена разнообразными диатомовыми водорослями и детритом. При входе в пролив Ла-Манш при содержании 7.250 мг/л взвесь состояла из различных минеральных частиц: доломита, кальцита, альбита и кварца. В меньшей степени обнаружены фрагменты диатомовых водорослей и детрита. При максимальной концентрации взвеси 15.92 мг/л (выход из пролива Ла-Манш в Северное море) в ее составе преобладали глинистые частицы и органические остатки с высокой концентрацией кремния, образующегося из содержащих кремний диатомовых водорослей [9]. В этой пробе определены единичные стекло-сферы золы от сжигания каменного угля (рис. 2б). Крайне неожиданным для нас оказалось отсутствие сфер сгорания или сажи от сжигания нефтепродуктов в проливе Ла-Манш, Северном и Балтийском морях, как в 2016 г., так и в 2017 г.

В 2017 г. в поверхностных водах всех исследованных районов произошло снижение концентраций взвеси по сравнению с 2016 г. (табл. 2). В районе Малаккского пролива наблюдались максимум общей взвеси (2.19 мг/л), повышенные концентрации ВОУ (до 91.88 мкг/л) и хл «а» (до 1.2 мкг/л) (рис. 3). Однако связь в распределении этих соединений отсутствовала: $r(\text{Вз}-\text{хл «а»}) = -0.06$, $r(\text{Вз}-\text{ВОУ}) = -0.17$ ($n = 8$), видимо, из-за преобладания в ее составе минеральных частиц. Последнее подтверждает наличие корреляции между распределением ВОУ и хл «а», где $r = 0.65$. Лучшая зависимость между этими параметрами наблюдалась в водах Индийского океана и Средиземного моря: $r(\text{Вз}-\text{хл «а»}) = 0.67$, $r(\text{Вз}-\text{ВОУ}) = 0.65$ и $r(\text{хл «а»} - \text{ВОУ}) = 0.75$ ($n = 33$), так как только при биогенных источниках взвеси происходит синхронное распределение ее и ОС [6]. Содержание хл «а» увеличивалось в северной части Аравийского моря и южной части Красного моря (рис. 3). В районе Сомалийского апвеллинга концентрации хл «а» повышались до 2.11 мкг/л.

В 2017 г. наиболее высокие величины хл «а» (4.24 и 4.84 мкг/л, рис. 4) установлены в Северном

Таблица 2. Концентрации взвеси и органических соединений во взвеси в поверхностных водах различных районов Индийского и Атлантического океанов

Район	Кол-во проб	Взвесь, мг/л		Углевороходы, мкг/л		Кол-во проб	Взвесь, мг/л		Углевороходы, мкг/л		Хл а, мкг/л		ВОО, мкг/л	
		интервал	σ	интервал	σ		интервал	σ	интервал	σ	интервал	σ	интервал	σ
НИС «Академик Николай Страхов», 2016 г.														
Малаккский пролив	–	–	–	–	–	7	$\frac{0.14-2.19}{0.727}$	0.77	$\frac{10.24-24.5}{16.0}$	5.3	$\frac{0.19-1.22}{0.53}$	0.25	$\frac{34.17-91.88}{59.33}$	22.38
Индийский океан	15	$\frac{0.595-0.880}{0.743}$	0.093	$\frac{3.0-10.2}{6.1}$	2.5	35	$\frac{0.06-0.28}{0.124}$	0.05	$\frac{7.3-17.5}{12.0}$	2.4	$\frac{0.10-0.46}{0.13}$	0.50	$\frac{6.89-81.48}{32.38}$	17.01
Район Аравийского п-ова	10	$\frac{0.660-1.385}{1.034}$	0.263	$\frac{0.3-50}{11.1}$	14.1	9	$\frac{0.11-0.26}{0.183}$	0.05	$\frac{9.4-19.2}{14.0}$	3.1	$\frac{0.20-2.11}{0.72}$	0.02	$\frac{11.89-111.67}{50.14}$	27.81
Красное море	20	$\frac{0.450-9.535}{1.649}$	2.006	$\frac{3.8-76.2}{10.2}$	15.8	13	$\frac{0.07-0.24}{0.125}$	0.06	$\frac{7.3-13.4}{9.5}$	2.0	$\frac{0.05-0.85}{0.38}$	0.03	$\frac{15.56-54.67}{30.22}$	13.63
Средиземное море	24	$\frac{0.190-1.050}{0.724}$	0.202	$\frac{1.9-9.9}{4.8}$	2.2	17	$\frac{0.08-0.2}{0.119}$	0.03	$\frac{6.0-14.0}{9.1}$	2.0	$\frac{0.05-0.90}{0.24}$	0.28	$\frac{15.78-55.78}{29.60}$	11.08
Восточная Атлантика	10	$\frac{0.485-2.345}{1.075}$	0.712	$\frac{3.0-10.2}{6.1}$	2.5	7	$\frac{0.07-0.24}{0.156}$	0.07	$\frac{6.8-10.4}{9.0}$	1.2	$\frac{0.18-1.22}{0.70}$	0.42	$\frac{28.89-46.67}{39.16}$	6.61
Ла-Манш – Балтика	10	$\frac{1.605-15.920}{7.284}$	4.892	$\frac{0.3-50}{11.1}$	8.4	15	$\frac{0.15-0.76}{0.340}$	0.17	$\frac{6.32-14.3}{9.4}$	2.0	$\frac{0.46-4.84}{1.65}$	0.74	$\frac{10.78-93.56}{40.50}$	24.23

Примечание. σ – стандартное отклонение.

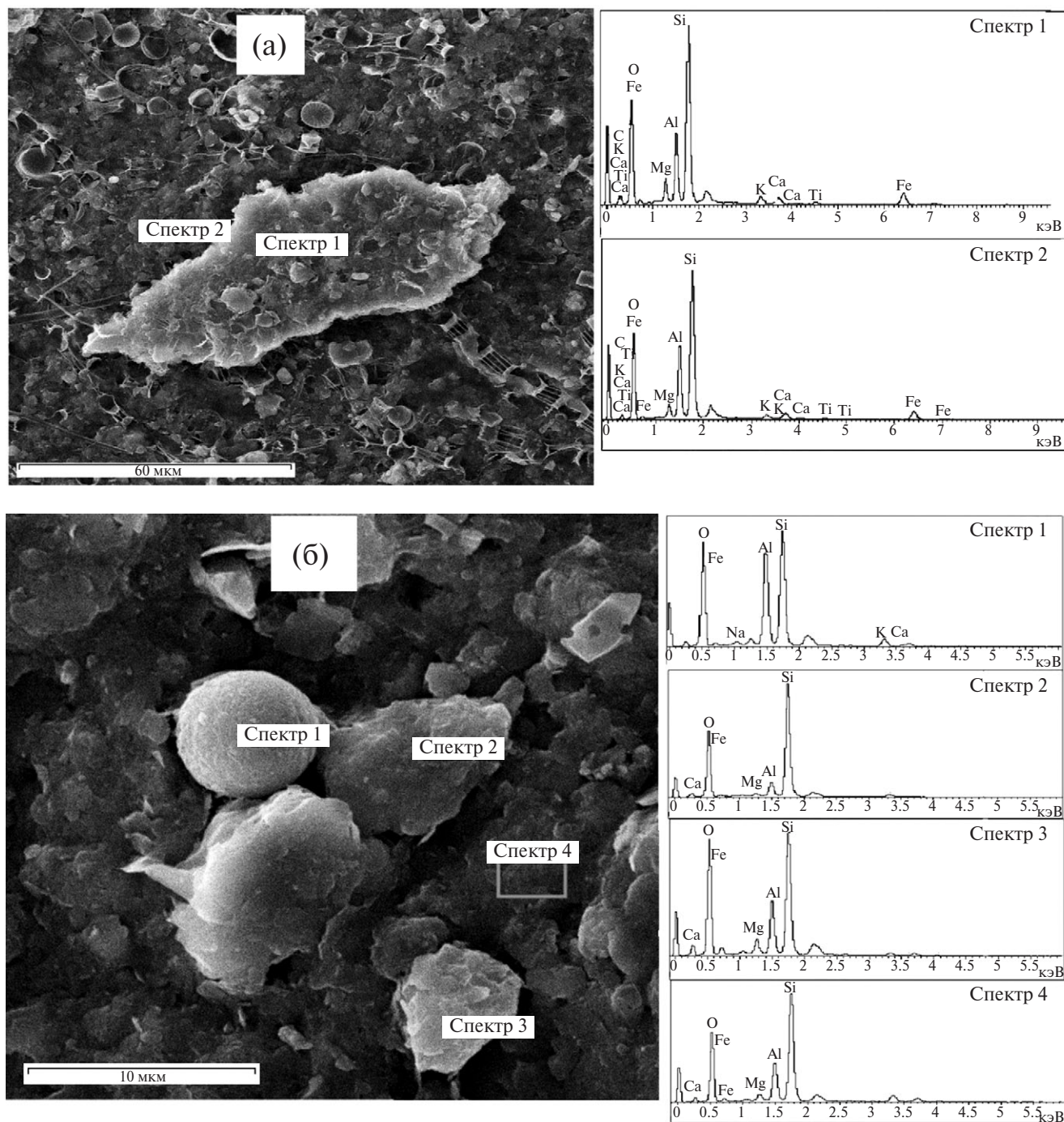


Рис. 2. Состав взвеси (НИС «Академик Николай Страхов», 2016 г.) по данным сканирующего электронного микроскопа: (а) — минеральной частицы в Суэцком канале, (б) — в Северном море, при выходе из пролива Ла-Манш (в центре сфера золи).

и Балтийском морях, где их распределение носило хаотичный характер; в то же время здесь наблюдалась связь между распределением хл «а» и ВОУ — $r = 0.91$, что может указывать на биогенные источники органического вещества.

Содержание УВ в поверхностных водах в 2016 г. (в среднем 10.5 мкг/л) оказалось лишь

незначительно выше, чем в 2017 г. (в среднем 8.7 мкг/л). Причем если в 2016 г. в таких судоходных районах, как выход из Баб-эль-Мандебского пролива в Красное море, и в проливе Ла-Манш их величины достигали 50–76 мкг/л, то в 2017 г. даже в Малаккском проливе содержание УВ не превысило 25 мкг/л — максимальной их

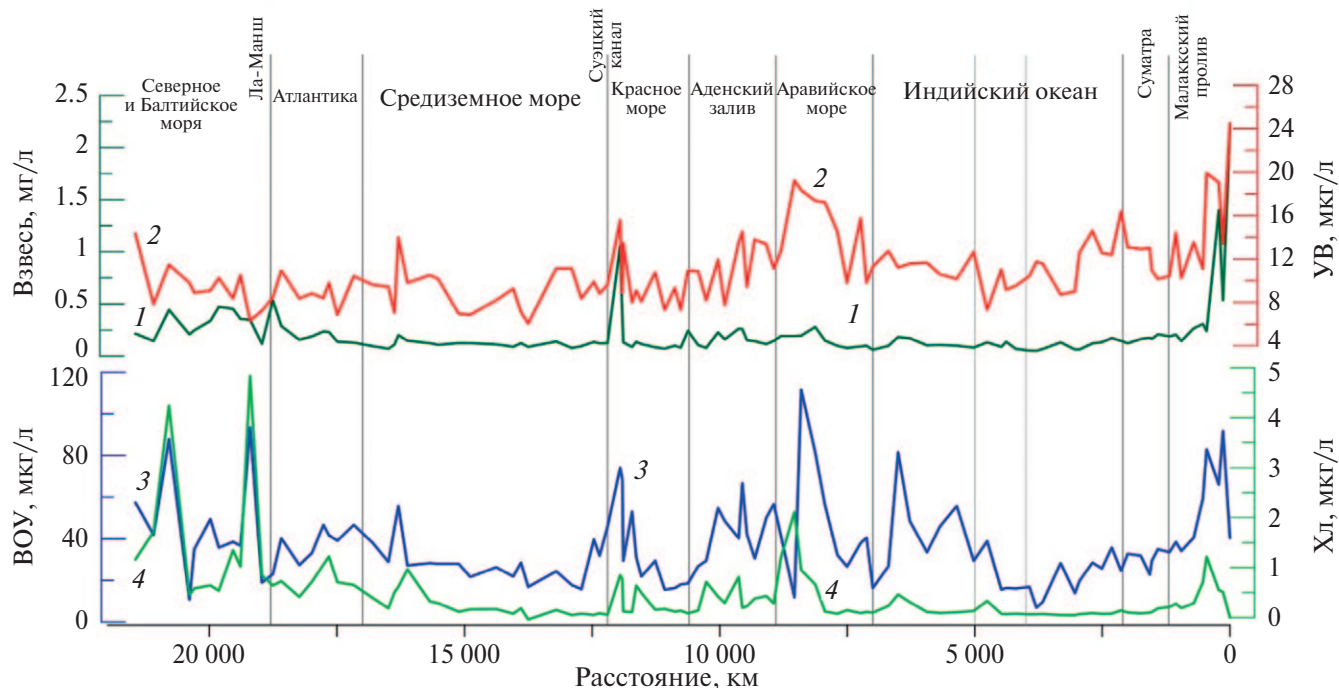


Рис. 3. Распределение в поверхностных водах: 1 — взвеси, 2 — алифатических углеводородов, 3 — ВОУ, 4 — хл «а» (НИС «Академик Борис Петров», 2017 г.)

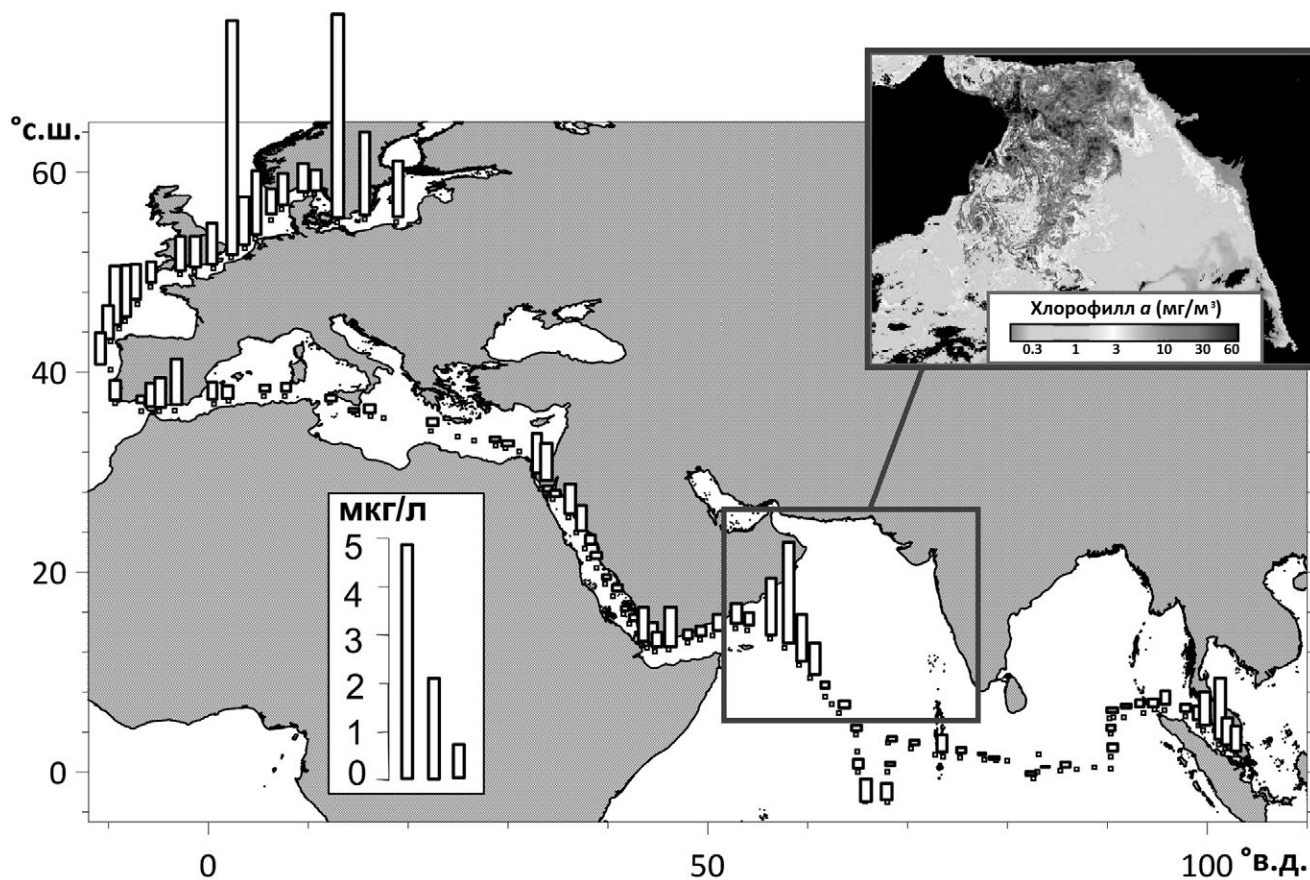


Рис. 4. Распределение хлорофилла «а» в поверхностных водах по маршруту НИС «Академик Борис Петров» (на врезке — содержание хлорофилла «а» по данным спутника Terra MODIS за период с 26.02. по 3.03.2017 г.).

величины в поверхностных водах (табл. 2). Однако как в 2016 г., так и в 2017 г. их концентрации в основном изменялись в довольно узком диапазоне — 6–16 мкг/л [8] и соответствовали фоновым величинам [5].

Из-за низких концентраций пришлось объединять пробы для проведения анализа алканов. В интегральных пробах 2017 г. содержание алканов изменялось от 0.5 до 6.7 мкг/л, что составило 4–37% от суммарной углеводородной фракции. Наиболее высокие их концентрации в составе УВ определены в Северном, Балтийском морях и в Малаккском проливе, то есть в акваториях с влиянием нефтяных загрязняющих веществ. В большинстве проб в низкомолекулярной области фиксировался максимум $n-C_{17}$, характерный для алканов фитопланктона (рис. 5), который рассматривается в качестве основного источника УВ в поверхностных водах [5, 16, 19]. Повышенная концентрация гомолога $n-C_{19}$ в пробе из Аденского залива может указывать на микробное образование алканов.

Несмотря на разную конфигурацию хроматограм, во всех пробах доминировали наиболее устойчивые высокомолекулярные гомологи, так как отношение $\sum(C_{15}+C_{24})/\sum(C_{25}+C_{37})$ изменялось от 0.15 до 0.44. Значение CPI (отношение нечетных к четным алканам в высокомолекулярной области) колебалось в интервале 1.0–1.8. Поступление терригенного ОВ приводит к увеличению значений CPI, поэтому максимум этой величины в поверхностных водах установлен в Аденском заливе. В воде и фильтрационной взвеси значения CPI для высокомолекулярных

алканов обычно близки к 1, так же как и для нефтяных алканов [5, 14, 17, 19, 23].

Отношение пристан/фитан изменялось от 0.19 до 0.41 с минимумом в водах Северного и Балтийского морей. Если учесть, что в природных объектах содержание пристана больше, чем фитана, то низкие величины этого отношения могут свидетельствовать в пользу влияния на состав алканов нефтяных УВ [26], особенно в Малаккском проливе, Северном и Балтийском морях.

Таким образом, атмосферный перенос играет главенствующую роль в аридных и полуаридных климатических зонах [3]. Пространственно-временная изменчивость аэрозоля над океаном формируется под влиянием выносов различного типа (пылевой, антропогенный, дымовой) с континентов и зависит от географического распределения континентальных источников аэрозоля, циркуляции воздушных масс, климатических и гидрометеорологических условий [4, 12]. С удалением от континентов концентрации приводного аэрозоля убывают за счет механической дифференциации в процессе эолового переноса. Исследование распределения, состава и свойств эолового вещества в атмосфере из всех климатических зон показало, что при дальнем переносе главное значение имеют тонкие алевриты и пелиты и минералы-маркеры аридных зон [2, 3, 6]. Поэтому для частиц аэрозоля 0.3–0.5 мкм средние концентрации уменьшались от Баб-Эль-Мандебского пролива (где установлена максимальная концентрация — 379 361 частиц/л) через Аденский залив и Красное море в Восточную

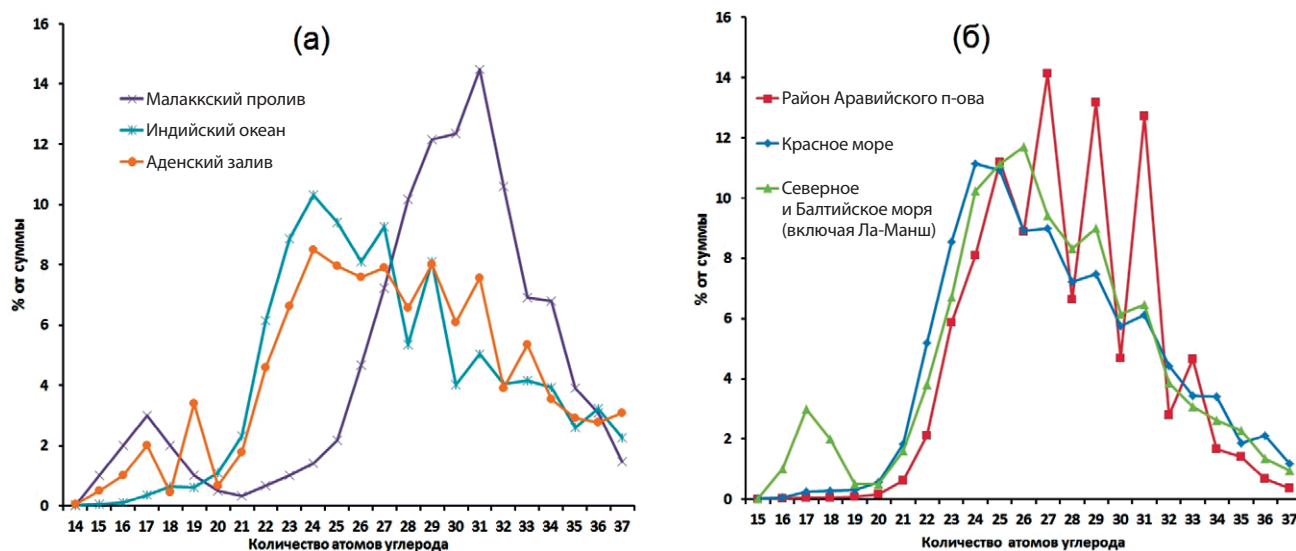


Рис. 5. Состав алканов в интегральных пробах взвеси, выделенных из поверхностных вод различных районов в 2017 г.

Атлантику, повышаясь в гумидных областях Северного и Балтийского морей. В рамках программы INDOEX были установлены высокие концентрации углеродистых аэрозолей в устойчивом слое дымки зимнего периода в тропиках над Индийским океаном, поступающей при сжигании топлива [20]. В эти районы при северном ветре и близости берега происходит снос частиц с пустынных районов Аравийского полуострова [22]. Пыльные бури в южной части Аравийского полуострова приурочены к летнему времени (с мая по август), но в северной части полуострова происходят в основном в весенний период. В 2016 г. над Красным морем визуально наблюдали пылевую дымку, которая отсутствовала в 2017 г. [11]. Исследования показали, что пик активности пыли наблюдался, как правило, в дневное время, так как интенсивное солнечное нагревание земли создает турбулентность и локальные градиенты давления. Поэтому в 2016 г. в атмосфере Аравийского и Красного морей были отмечены более высокие значения большинства характеристик аэрозоля: оптической толщи (в 3–5 раз), счетной концентрации аэрозоля (в 4 раза), концентраций ионов континентального и морского происхождения — в 1.5 раза, а также газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3) [11]. Прозрачность атмосферы возрастала в Средиземном море, где и мы определили минимальное содержание аэрозолей (1441 частиц/л), а также в открытых районах Индийского океана.

В поверхностных водах в пробах взвеси наряду с органическими остатками в прибрежных районах повышалась роль минеральных компонентов, обусловленных поступлением терригенного и антропогенного материала с континента. Особенно это заметно в зонах с повышенным содержанием взвеси, в частности в Малаккском проливе и Суэцком канале (рис. 3).

Разный сезон исследований и направление ветра привели к тому, что среднее содержание взвеси в 2016 г. (1.746 мг/л) оказалось более чем в 8 раз выше, чем в 2017 г. (0.21 мг/л). По всему маршруту переход фитоцена от зимнего к весеннему состоянию сопровождался падением концентраций взвеси и ОС во взвеси. В Индийском океане муссонный ветер создает в этих местах особенную крупную по масштабу циркуляционную систему и муссонный круговорот поверхностных вод, изменяющийся по сезонам [1]. Обеднение поверхностного слоя взвесью весной по сравнению с зимой было зарегистрировано

ранее в открытых районах Атлантики между Африкой и Антарктидой [7] и в Саргассовом море [21]. Зимой расширялись районы вод с низким содержанием хл «а»: от 0.1 до 0.3 мкг/л.

В силу масштабности маршрутов преобладающий источник взвеси изменялся от района к району, но в отдельных акваториях остался прежним — как в 2016, так и 2017 г. (табл. 1, 2). Поэтому, несмотря на разные концентрации (в пересчете на литр), пониженные величины взвеси установлены в Средиземном море, а наиболее высокие — в Северном и Балтийском морях. Распределение взвеси в поверхностных водах увеличивалось в 2017 г. в последовательности: Средиземное море \approx Индийский океан < Восточная Атлантика < Аравийский залив < Красное море < Ла-Манш—Балтийское море < Малаккский пролив (рис. 3).

В противоположность взвеси средние концентрации УВ в отдельных районах повысились от 2016 к 2017 г. При этом в акваториях, подверженных антропогенному воздействию, рост концентраций УВ происходил в большей степени, чем в продуктивных. В частности, в 2016 г. при выходе из Суэцкого канала в области скопления судов концентрации УВ увеличились с 5–6 до 11–16 мкг/л, в 2017 г. в Малаккском проливе — до 24.5 мкг/л. В этих судоходных районах состав алканов наиболее близок к нефтяному (рис. 5). Поэтому можно считать, что повышенные концентрации УВ обусловлены нефтяными поступлениями.

Несмотря на то, что в Персидский залив ежегодно попадает около двух миллионов баррелей нефти от сбросов балластных вод и промывки резервуаров [13], нефтяные загрязнения не доходят до Аденского залива и открытых вод Индийского океана, где концентрации УВ колебались в интервале 6–12 мкг/л (табл. 2). Примечательно, что в водах Индийского океана, где доминируют природные источники, содержание УВ было практически постоянным (рис. 3). Однако в пересчете на взвесь концентрации УВ в Красном и Средиземном море и даже в Индийском океане превышали 100 мкг/мг, из-за низкого содержания самой взвеси.

В Средиземном море, которое считается самым «грязным на Земле» [25], установлены наиболее низкие концентрации всех изучаемых соединений, в том числе и УВ. Видимо загрязнены только прибрежные акватории. В 2017 г. наблюдалось некоторое повышение концентраций УВ в Средиземном море и в Восточной Атлантике

(в среднем до 9 мкг/л, табл. 2), однако их уровень оставался низким.

Обращает на себя внимание снижение содержания УВ (до 9.4 мкг/л) в Северном и Балтийском морях — в районах интенсивного судоходства, в которых происходит также добыча нефти. Уменьшение концентраций УВ в поверхностных водах этих морей отмечали и в 2014–2015 гг. [6]. Только в мае 2010 г. в этих морях (по маршруту следования судна от порта Кейптаун до порта Санкт-Петербург, 55-я Российская антарктическая экспедиция), а также в проливе Ла-Манш содержание УВ увеличилось более чем в 2 раза по сравнению с Атлантическим океаном и достигало 102 мкг/л [7] при средней концентрации 52 мкг/л. Последнее может свидетельствовать об эффективности природоохранных мер.

ВЫВОДЫ

На границе атмосфера–вода на распределение взвеси и ОС — $C_{орг}$, липидов, хл «а» влияют сезон исследования и направление ветра. Содержание приводного аэрозоля в 2017 г. уменьшалось от аридных прибрежных областей к открытым районам океанов в последовательности Баб-Эль-Мандебский пролив (135 190) > Аденский залив (102 854) > Красное море (91 612) > Северное, Балтийское моря (76 468) > Индийский океан (64 113) > Малаккский пролив (46 491) > Средиземное море (28 397) > Восточная Атлантика (14 803) при доминировании фракции 0.3–0.5 мкм.

Переход фитопланктонного сообщества от зимнего к весеннему состоянию вызвал снижение концентраций взвеси в поверхностных водах. Средние концентрации взвеси в январе–апреле 2017 г. увеличивались в последовательности для отдельных районов (мг/л): Средиземное море (0.119) ≈ Индийский океан (0.124) ≈ Красное море (0.125) < Восточная Атлантика (0.156) < Аденский залив (0.183) < Ла-Манш–Балтика (0.340) < Малаккский пролив (0.727). Биологическое продуцирование, зависящее от сезона исследования, оказывает решающее влияние на распределение изучаемых ОС в поверхностных водах.

Концентрации УВ в 2016 и 2017 гг. оказались низкими не только в океанских поверхностных водах, но и в таких судоходных районах, как Ла-Манш, Северное и Балтийское моря. Однако наличие в составе алканов выветренных нефтя-

ных УВ может свидетельствовать о влиянии на их распределение нефтяных загрязняющих веществ.

Источник финансирования. Результаты исследований получены в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0007), отбор проб и их обработка — при поддержке РНФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Индийский океан (Серия: География Мирового океана). Л.: Наука, 1982. 388 с.
2. *Клювиткин А. А.* Атмосферные аэрозоли и осадко-накопление в аридных зонах Атлантического океана // Докл. РАН. 2008. Т. 421. № 1. С. 111-115.
3. *Лисицын А. П.* Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер земли // Мировой океан. М.: Научный мир, 2014. Т. 2. С. 331-571.
4. *Лукашин В. Н., Исаева А. Б., Серова В. В., Николаева Г. Г.* Геохимия осадочного вещества и его потоки в восточной части экваториальной Атлантики // Геохимия. 2002. № 3. С. 306-318.
5. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки) // М.: Научный мир, 2013. 432 с.
6. *Немировская И. А.* Осадочное вещество и органические соединения в аэрозолях и поверхностных водах на трансатлантическом разрезе // Геохимия. 2017. № 4. С. 344-357.
7. *Немировская И. А., Артемьев В. А.* Взвесь и компоненты органического вещества в поверхностных водах Южного и Атлантического океанов // Океанология. 2013. № 1. С. 42-52.
8. *Немировская И. А., Титова А. М.* Попутные исследования в рейсе научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов» // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 311-313.
9. *Политова Н. В., Артемьев В. А., Зернова В. В.* Распределение и состав взвеси на меридиональном разрезе в Западной Атлантике // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 984-993.
10. Руководство по методам анализа морских вод. РД 52.10. 243-92 / Под ред. Орадовского С. Г. СПб.: Гидрометеоздат, 1993, 264 с.
11. *Сакерин С. М., Голобокова Л. П., Кабанов Д. М. и др.* Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 42-52.
12. *Afeji G. M., Resch F. J.* Physical characteristics of Saharan dust near The Gulf of Guinea // Atmospheric Environment. 2000. № 34. P. 1273-1279.
13. *Al-Saad H. T., Salman N. A.* Status of Oil Pollution in the Arabian Gulf and Shatt Al-Arab Estuary: A Review // Coastal Environments: Focus on Asian Regions. 2012. P. 36-46.

14. *Bouloubassi I., Saliot A.* Investigation of anthropogenic and natural organic inputs in estuarine sediments using hydrocarbon markers (NAN, LAB, PAH) // *Oceanol. Acta.* 1993. V. 16. № 2. P. 145-161.
15. *Duce R.A., Tindale N.W.* Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean // *Limnology and Oceanography.* 1991. V. 36. № 8. P. 1715-1726.
16. *Goudie A.S., Middleton N.J.* Saharan dust storms: nature and consequences // *Earth-Science Reviews.* 2001. V. 56. P. 179-204.
17. *Fernandes M.B., Sicre M.A.* The importance of terrestrial organic carbon inputs on Kara Sea shelves as revealed by n-alkanes, OC and $\delta^{13}\text{C}$ values // *Organic Geochemistry.* 2000. V. 31. P.363-374.
18. *Lohmann R., Belkin I.M.* Organic pollutants and ocean fronts across the Atlantic Ocean: a review // *Progr. Oceanogr.* 2014. V.128. P.172-184.
19. *Marti S., Bayona J.M., Mejanelle L.* Biogeochemical evolution of the outflow of the Mediterranean deep-living particulate organic matter into the northeastern Atlantic // *Mar. Chem.* 2001. V.76. P.211-231.
20. *Mitra A.P., Sharma C.* Indian aerosols: present status // *Chemosphere.* 2002. V. 49. № 9. P. 1175-1190.
21. *Pedrosa-Pamies R., Conte M.H., Weber J.C., Johnson R.* Carbon cycling in the Sargasso Sea water column: Insights from lipid biomarkers in suspended particles // *Progress in Oceanography.* 2018. V. 168. P. 248-278.
22. *Prakash P., Stenchikov G., Kalenderski S., et al.* The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V.15. P. 199-222.
23. *Saliot A., Goux M., Fefrier A., et al.* Organic sedimentation in the water column in the Arabian Sea; relationship between the lipid composition of small and large-size, surface and deep particle // *Mar. Chem.* 1982. V. 11. №. 3. P.257-278.
24. *Saliot A.* Sources markers in aerosols, oceanic particles and sediments // *Eur. Phys. J. Conf.* 2009. № 1. P. 189-197.
25. State of the Mediterranean marine and coastal environment UNEP/MAP Barcelona Convention. Barcelona: Athens, 2012. 92 p.
26. *Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R., et al.* Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // *Mar. Pollut. Bull.* 2004. V. 48. P. 44-60.
27. *Westervelt D.M., Moore R.H., Nenes A., Adams P.J.* Effect of primary organic sea spray emissions on cloud condensation nuclei concentrations // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V.12. P.89-101.
28. *Wozniak A.S., Willoughby A.S., Gurganus S.C., Hatcher P.G.* Distinguishing molecular characteristics of aerosol water soluble organic matter from the 2011 trans-North Atlantic US GEOTRACES cruise // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 8419-8434.
29. UNESCO Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, IOC/SCOR manual and guides // Paris: UNESCO Publ. 1994. № 29. P. 128-134.

PECULIARITIES OF SUSPENDED MATTER DISTRIBUTION ON THE GEOCHEMICAL BARRIER WATER-ATMOSPHERE ON TRANSOCEANIC SECTIONS

© 2019 I. A. Nemirovskaya*, A. M. Titova

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

*e-mail: nemir@ocean.ru

Received December 27, 2018

Revised version received December 27, 2018

After revision February 05, 2019

The article contains the results of the study of surface waters (31 cruise of the R/V “Akademik Nikolai Strakhov”, December 2015–January 2016) and the particle size distribution of aerosols and surface waters (42 cruise of the R/V “Akademik Boris Petrov”, January–April 2017). It was found that aerosol flows increased in arid regions of the Arabian Peninsula and the number of particles 0.3–0.5 μm decreased in the sequence (particles/l, 2017): Bab El-Mandeb Strait (135190)>Gulf of Aden (102854)>Red Sea (91612)>North, Baltic Sea (76468)>Indian Ocean (64113)>Malacca Strait (46491)>Mediterranean Sea (28397)>East Atlantic (14803). The biotic factor between the distribution of suspended matter and organic compounds prevails in the open waters of the Indian Ocean, in the northeastern part of the Atlantic Ocean, as well as in areas with increased water productivity (the Arabian Sea). Circumcontinental zonality led to the dominance of the terrigenous component in the suspension of coastal waters. The transition of the phytoplankton community from the winter (2016) to the spring (2017) led to a decrease in the suspension content, in 8 times on average. The absence of the correlation between the content of the suspension and organic compounds in some areas indicated different sources of their forming. Despite the high concentrations of hydrocarbons in individual samples in 2016 (up to 50–70 $\mu\text{g/l}$), their average content remained almost unchanged: 10.5 $\mu\text{g/l}$ (2016), 8.7 $\mu\text{g/l}$ (2017). The determination in the composition of hydrocarbons of weathered petroleum alkanes indicated the influence of petroleum pollutants.

Keywords: aerosols, surface waters, suspended matter, C_{org} , hydrocarbons, chlorophyll “a”