

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ НА ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРА–ВОДА (ЮЖНЫЙ И АТЛАНТИЧЕСКИЙ ОКЕАНЫ)

© 2022 г. И. А. Немировская*

Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Нахимовский проспект, 36, Москва, 117997 Россия

*e-mail: nemir44@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2021 г.

После доработки 21.05.2021 г.

Принята к публикации 10.12.2021 г.

Результаты изучения гранулометрического состава приводного аэрозоля, а также взвеси и органических соединений во взвеси (ОС) в поверхностных водах Южного и Атлантического океанов показали, что в приводной атмосфере минимальное количество частиц установлено в прибрежных районах Антарктики из-за ледового покрова на континенте (для частиц 0.3–1 мкм, в среднем 6182 ч/л). Максимальное количество аэрозолей (в среднем 28 186, максимум 55 389 частиц/л) приурочено к прибрежным районам Европы из-за их поступления из промышленных районов и от судоходства. Последнее привело к хаотичному изменению концентраций аэрозолей и ОС в поверхностных водах (в проливе Ла-Манш для углеводов до 70 мкг/л, 214 мкг/мг взвеси). Потоки из Патагонии и африканских пустынь приводят к росту аэрозолей до 33 824–34 893 частиц/л, где они оказывают наибольшее влияние (из-за минерального характера) на концентрации взвеси в поверхностных водах. На распределение аэрозолей наиболее существенное влияние оказывают фронтальные зоны поверхностных вод на разрезе Африка–Антарктида, поэтому их содержание коррелировало со скоростью ветра выдувающего их с морской поверхности: $r = 0.82$. Геохимический барьер р. Ла-Плата – Атлантический океан оказывает влияние на изменчивость концентраций ОС и взвеси в поверхностных водах в акватории п. Монтевидео, где содержание взвеси изменялось от 0.23 до 1.3 мг/л, а УВ – от 7 до 48 мкг/л (до 37 мкг/мг взвеси).

Ключевые слова: аэрозоли, поверхностные воды, взвесь, органические соединения, $C_{\text{орг}}$, хлорофилл *a*, липиды, углеводороды, атмосфера-вода

DOI: 10.31857/S0016752522090047

ВВЕДЕНИЕ

Более двух третей земной поверхности составляет раздел океан–атмосфера, где различные геохимические процессы оказывают влияние на распределение, как аэрозолей, так и различных соединений в океанских водах (Лисицын, 2014). Этот геохимический барьер с уникальными свойствами, которые приводят к сольватационным эффектам, влияющим на химические и фотохимические процессы (Anglada, 2020). Было установлено, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала близок к вкладу речной взвеси за пределами зоны геохимического барьера река–море (Лисицын, 2014; Шевченко, 2006). Структура аэрозолей заметно изменяется во времени в результате их генерации и выведения из атмосферы.

Увеличение общей загрязненности атмосферы и связанные с этим изменения климата Земли вызвали повышенный интерес к изучению свойств атмосферных аэрозолей (Ивлев, 1982). В частности, по имеющимся оценкам при глобальном по-

токе нефтяных углеводородов в Мировой океан 2350 тыс. т, около 365 тыс. т (~13%) поступает из атмосферы (АМАР, 2007). Поэтому актуальность изучения геохимического барьера атмосфера–вода не вызывает сомнений.

В марте–июне 2019 г. по маршруту рейса НЭС “Академик Федоров” (64 Российская Антарктическая Экспедиция – РАЭ) было проведено изучение гранулометрического состава аэрозолей и органических соединений (ОС) во взвеси поверхностных вод (рис. 1).

Цель исследования: изучить влияние эоловых поступлений и фронтальных зон Южного и Атлантического океанов на распределение осадочного вещества и основных компонентов ОС ($C_{\text{орг}}$, липидов углеводородов – УВ, хлорофилла *a* – хл *a*) на границе атмосфера–вода. Во фронтальных зонах повышается первичная продукция – ПП (Федоров, 1983; Donahue et al., 2014), что должно оказывать влияние на потоки взвеси и сорбированных ими соединений в атмосферу и в толщу вод.

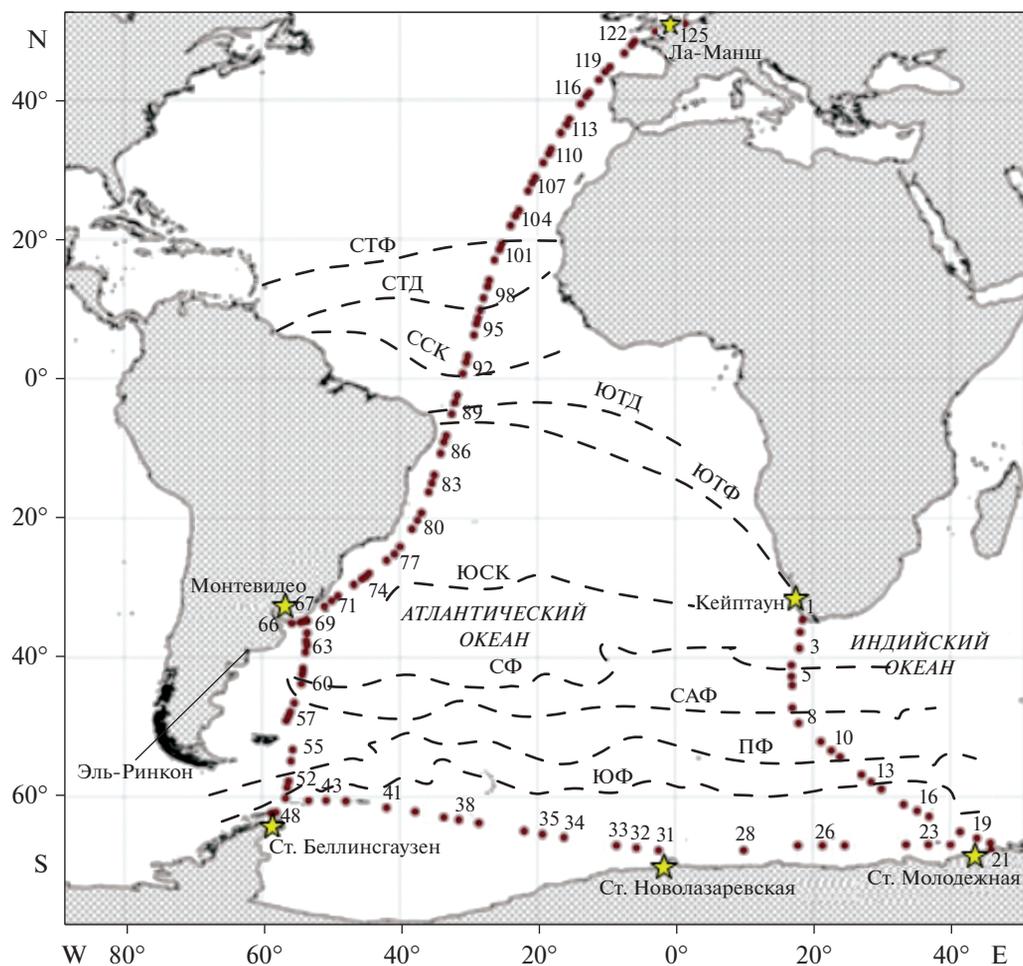


Рис. 1. Маршрут НЭС «Академик Федоров» в марте–июне 2019 г.: цифры – номера станций отбора поверхностных вод, пунктирные линии – океанские фронты: СТФ – северный тропический фронт, СТД – северная тропическая дивергенция, ССК – северная субтропическая конвергенция, ЮТД – южная тропическая дивергенция, ЮТФ – южный тропический фронт, ЮСК – южная субтропическая конвергенция, СФ – субтропический фронт, САФ – субантарктический фронт, ПФ – полярный фронт, ЮФ – южный фронт.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрический состав приводного аэрозоля изучали по маршруту судна с помощью счетчика частиц AeroTrak (США), по трем каналам (мкм): 0.3–1.0; 1.0–5, >5. Ежедневно выполняли от 2 до 8 измерений в зависимости от погодных условий. Параллельно измеряли скорость и направление ветра. Кроме того проводили отбор проб поверхностных вод (3 раза в светлое время суток), в которых определяли концентрации и состав морской взвеси и ОС во взвеси.

Для определения концентрации взвеси гравиметрически ее выделяли на предварительно отмытые 0.1 N соляной кислотой ядерные фильтры, а ОС – при 0.2 атм. на предварительно прокаленные при 450°C стекловолкнистые фильтры GF/F (0.7 мкм).

Липиды (суммарная фракция, извлекаемая органическими растворителями) экстрагировали из подсушенных на воздухе проб взвесей метилхлоридом на ультразвуковой бане «Сапфир» при 35°C. Концентрацию липидов (до колоночной хроматографии на силикагели) и алифатических 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 (Качество ..., 2019; Немировская, 2013). Чувствительность метода – 3 мкг/мл экстракта.

$S_{\text{орг}}$ в аэрозолях и взвесях определяли методом сухого сжигания на анализаторе АН-7560 (Россия), их состав – на сканирующем электронном микроскопе VEGA-3sem, фирмы TESCAN (Чехия).

Концентрации хл *a* определяли флуориметрическим методом на приборе Trilogy фирмы Turner

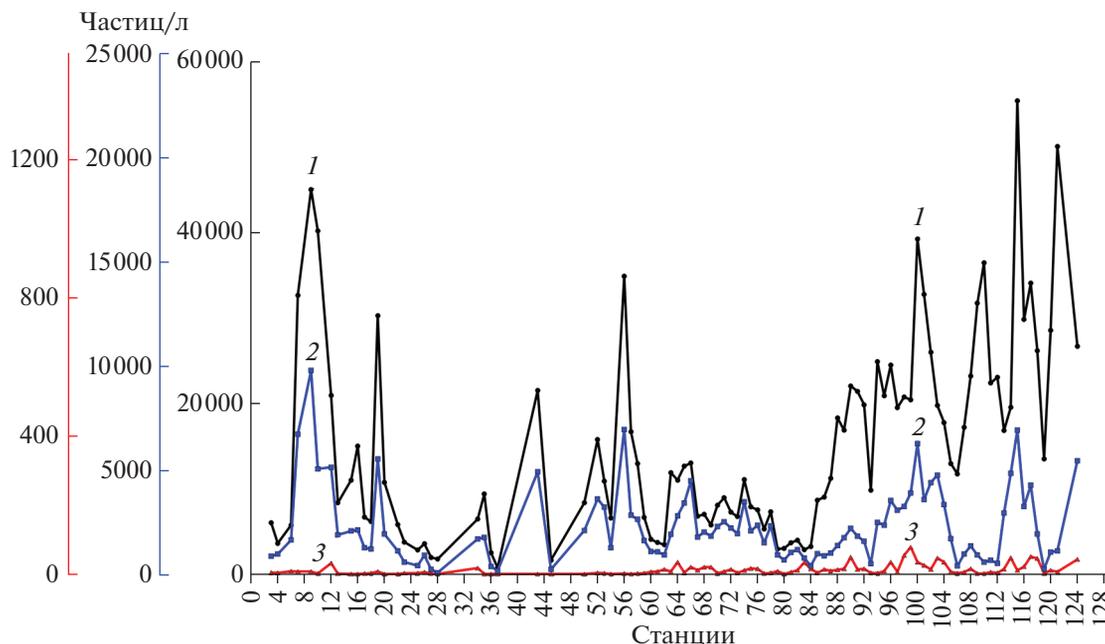


Рис. 2. Распределение гранулометрического состава аэрозолей в приводном слое атмосферы по маршруту судна: 1 – 0.3–1 мкм, 2 – 1–5 мкм, 3 – >5 мкм.

(США), предварительно откалиброванным на кафедре биофизики биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Для выделения хлорофиллов фильтры GF/F помещали в 90% ацетон при температуре +4°C и выдерживали в темноте в течение 12–16 ч (UNESCO, 1994).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В гранулометрическом составе приводных аэрозолей традиционно доминировала фракция 0.3–1 мкм (рис. 2), так как мелкие частицы легче образуются при конденсации паров или в результате химических реакций, а также легче поднимаются ветром и переносятся на большие расстояния (Клювиткин, 2008; Немировская, 2017; Шевченко, 2006; Baron, Willeke, 2005; Donahue et al., 2009). Концентрации фракции аэрозолей 0.3–1 мкм в приводном слое атмосферы в зависимости от района исследования изменялись в 76 раз от 732 до 55 389 частиц/л (табл. 1). В некоторых районах, частицы размером более 5 мкм отсутствовали (рис. 2).

Разрез Африка–Антарктида пересекал фронтальные зоны Южного океана. Основным элементом крупномасштабной циркуляции вод южной полярной области является антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), которое объединяет САФ, СФ, ПФ и ЮФ (рис. 1). Зональный поток АЦТ обеспечивает взаимосвязь и подобие режимов южных частей Атлантического, Индийского и Тихого океанов, что стало основанием

для их объединения в самостоятельный объект – Южный океан (Антипов, Клепиков, 2011; Антипов и др., 2014). Эти фронты представляют собой сложную систему взаимодействующих между собой вихревых образований, областей конвергенций и дивергенций.

Полученные на разрезе данные показали, что при пересечении течения ЮСК, которое приносит теплые воды из северных районов Индийского океана с меньшей продуктивностью, происходит уменьшение, как аэрозолей, так и всех соединений в поверхностных водах (рис. 3). В акватории северной аридной части разреза существовал локальный максимум приводного аэрозоля (32648 ч/л для фракции 0.3–1 мкм). Здесь, помимо терригенной взвеси, возможен также вынос антропогенных частиц от порта Кейптаун (рис. 3а). Кроме того, при большой скорости ветра (>20 м/с) происходит сильное выдувание пены и частиц с морской поверхности, что увеличивает их общее количество в атмосфере (до 45034 ч/л). В целом на этом разрезе содержание частиц аэрозоля коррелировало со скоростью ветра: $r = 0.82$, $n = 14$.

В поверхностных водах по мере пересечения СТФ количество всех изучаемых соединений увеличивалось (табл. 2), т. к. здесь к поверхности поднимаются холодные более продуктивные субантарктические воды (Демидов и др., 2007). При этом количество взвеси, как и ранее, изменялось в противофазе с температурой (Немировская, 2013).

После пересечения САФ в распределении взвеси и ОС наблюдались максимумы в районе

Таблица 1. Содержание аэрозолей в приповерхностном слое Южного и Атлантического океанов (частицы/л)

Акватория	<i>n</i> *	0.3–1 мкм	1–5 мкм	>5 мкм
		<u>интервал</u> средняя	<u>интервал</u> средняя	<u>интервал</u> средняя
2019 г.				
Кейптаун–Антарктика	14	<u>3663–45034</u> 17841	<u>947–9826</u> 3370	<u>0–31</u> 5
Вдоль Антарктики	12	<u>792–21519</u> 6182	<u>156–4977</u> 1117	<u>0–17</u> 2
Антарктика–Южная Америка	4	<u>6591–15799</u> 20143	<u>1341–3681</u> 2622	<u>0–3</u> 1
Побережье Южной Америки	35	<u>2896–34893</u> 8682	<u>484–7009</u> 2218	<u>0–34</u> 10
Центральная Атлантика	11	<u>9867–33824</u> 23754	<u>583–4356</u> 2783	<u>1–78</u> 27
Канарский апвеллинг	6	<u>12984–32742</u> 16618	<u>1040–4822</u> 3196	<u>5–46</u> 22
Побережье Европы	14	<u>10368–55389</u> 28186	<u>328–6973</u> 2256	<u>0–50</u> 16
Ла-Манш	1	26692	5510	42
2015 г. (Немировская, 2017)				
Побережье Южной Америки	92	<u>1193–60353</u> 10399	<u>256–5373</u> 1450	<u>0–1247</u> 46
Центральная Атлантика	56	<u>1865–34183</u> 18311	<u>531–5367</u> 2055	<u>0–167</u> 8
Канарский апвеллинг	44	<u>3575–27257</u> 9573	<u>172–2830</u> 964	<u>0–39</u> 4
Побережье Европы	50	<u>2315–15319</u> 6419	<u>84–2231</u> 718	<u>0–19</u> 2
Северное и Балтийское моря, включая Ла-Манш	76	<u>3825–147067</u> 36613	<u>202–4128</u> 1520	<u>0–609</u> 34

Примечание. *n** – количество проб.

53°–55° ю.ш., связанные с очагом вихревых образований (рис. 3б). Повышение продуктивности вод в этом районе согласуется с увеличением содержания хл *a*, концентрации которого достигали значений 0.5 мкг/л при фоновых – 0.1–0.2 мкг/л. В субантарктической климатической зоне (на южной границе САФ), постепенное охлаждение поверхностных вод сопровождалось снижением их продуктивности и уменьшением концентраций взвеси и хл *a*.

Рост концентраций всех соединений начинался по мере приближения к ПФ, с максимальными значениями в ЮФ. Здесь зарегистрировано мас-

совое развитие флуоресцентных микроводорослей (Масленников, 2003). Процессы меандрирования основных фронтов и связанное с ними вихреобразование в зоне АЦТ порождают в поверхностном слое вод завихренность разного знака (Sokolov, Rintoul, 2009). Восходящие и нисходящие движения поверхностных вод изменяют концентрации биогенов, тем самым оказывают влияние на скорость роста фитопланктона, и в свою очередь на содержание биогенной взвеси и ОС во взвеси. Наибольшая изменчивость в их концентрациях в поверхностных водах так же, как и аэрозолей происходит в южной части разреза (рис. 3).

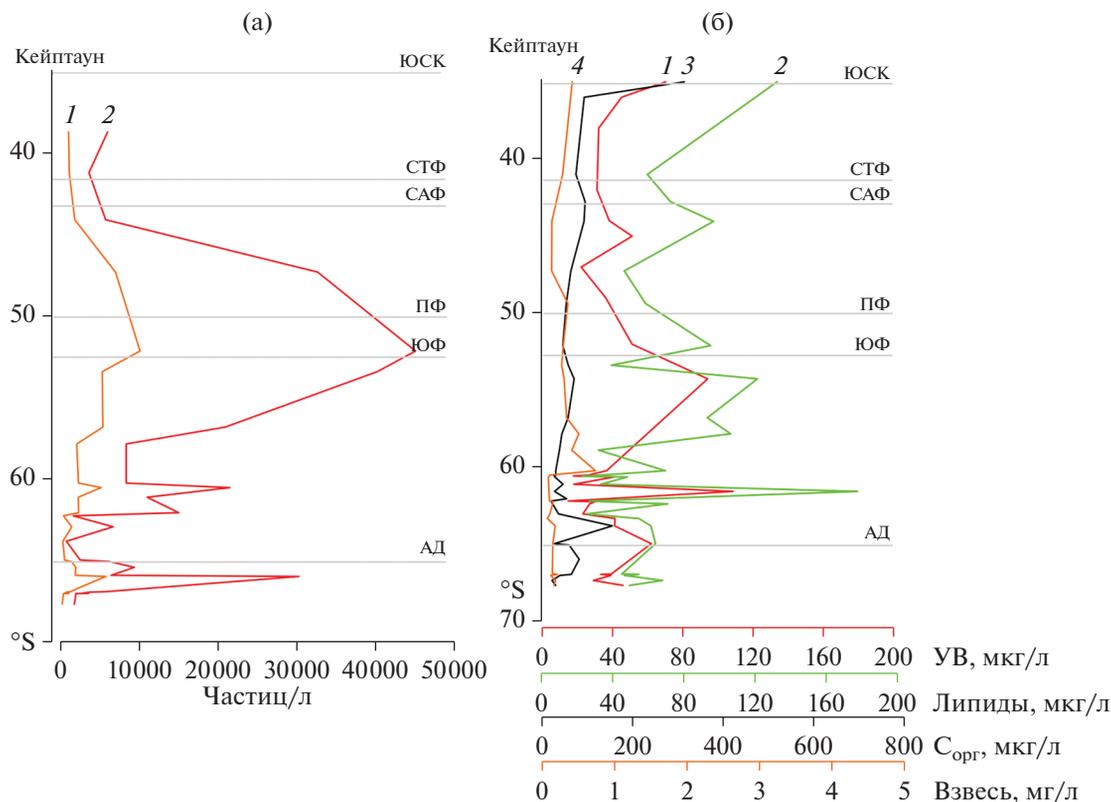


Рис. 3. Распределение (а) приводного аэрозоля: 1 – 0.3–1, 2 – 1–5 мкм; (б) в поверхностных водах: 1 – $C_{орг}$, 2 – липиды, 3 – УВ, 4 – взвесь на разрезе Африка–Антарктида. Обозначение фронтов приведено на рис. 1.

На разрезе в прибрежных районах Антарктиды к основным источникам аэрозолей относятся морские соли, поступающие из океанических вод (Василенко и др., 1985), а также специфическая антарктическая флора и микроорганизмы. Концентрации аэрозолей на этом разрезе были довольно низкими и составили в среднем для частиц 0.3–1 мкм 6182 частиц/л, а для частиц 1–5 мкм – 1117 частиц/л (табл. 1). Антарктида закрыта ледовым щитом и собственных аэрозолей практически не дает (Лисицын, 1994). Ослабление к зиме меридиональных процессов уменьшает заток на ледник морского воздуха, что приводит к еще большему понижению концентраций мелких частиц (Радионон, Свешников, 1999). Количество аэрозолей возрастало в районах, где на прибрежных холмах отсутствовал снег. В частности, при приближении к ст. Беллинсгаузен количество частиц 0.3–1 мкм увеличивалось более чем в 27 раз, до 21 519 ч/л (рис. 4а). В результате значение стандартного отклонения для этих частиц в аэрозолях ($\sigma = 5767$), составило 83% от средней величины. На этом разрезе связь концентраций аэрозоля и скорости ветра была значительно слабее ($r = 0.34$, $n = 12$), так как существует локальный перенос аэрозолей при отсутствии снега на прибрежных холмах и в районе оазисов (Diaz et al., 2018; Nemirovskaya, Shevchenko, 2020).

Многолетний мониторинг аэрозолей на полуострове Файлдс в Антарктиде показал, что температура играет ключевую роль в их переносе на большие расстояния (Na et al., 2020). В высоких широтах вещества, попадающие на подстилающую поверхность с аэрозолями из атмосферы, могут оставаться в снежно-ледяном покрове в течение многих лет (Голобокова и др., 2016). Поэтому снежно-ледяной покров Антарктиды представляет планшет для сбора атмосферных осадков за длительный период времени. В частности, необычное распределение взвеси и ОС было обнаружено в снежно-ледяном покрове оз. Китеж на станции Беллинсгаузен (Nemirovskaya, Shevchenko, 2020). Снег содержал много взвешенных веществ минерального происхождения из-за выветривания незащищенных снегом почв.

В поверхностных водах в начале разреза резко снижались концентрации всех изучаемых соединений; затем их рост наблюдался среди битого льда (рис. 4б). При подходе к берегам Антарктиды часто происходит понижение температуры, вызванное стоковыми ветрами, которые дуют почти с постоянной скоростью с материка в сторону океана (Антипов и др., 2014; Масленников, 2003). Ветровое воздействие приводит к сгону поверхностной воды от кромки припайного льда в открытое море и подъему глубинных водных масс

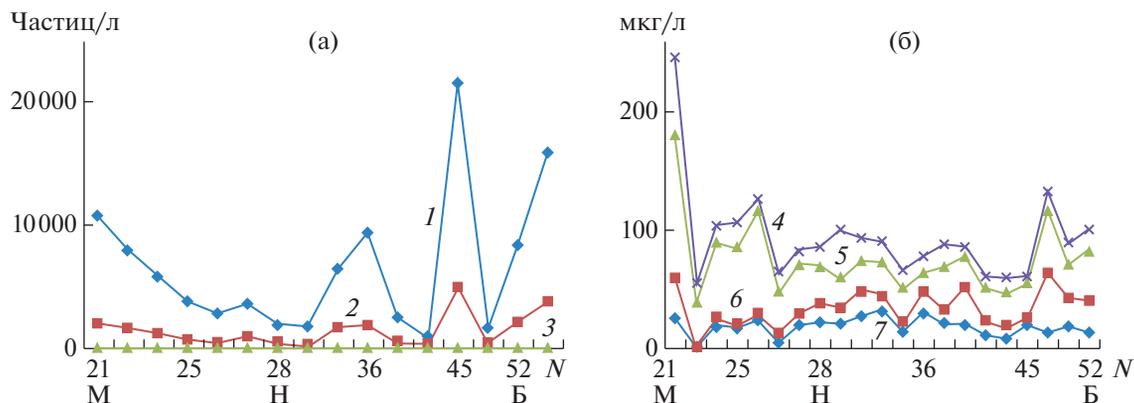


Рис. 4. Распределение (а) – приводного аэрозоля: 1 – 0,3–1, 2 – 1–5, 3 > 5 мкм; (б) – в поверхностных водах: 4 – взвесь ($\times 10^{-1}$), 5 – $C_{\text{орг}}$, 6 – хлорофилла *a* ($\times 100$), 7 – УВ. М – ст. Молодежная, Н – ст. Новолазаревская, Б – ст. Беллинсгаузен, N – номера станций.

Таблица 2. Содержание органических соединений (мкг/л) и взвеси (мг/л) на разрезах в поверхностных водах Атлантического и Южного океанов

Дата	Район	<i>n</i>	$C_{\text{орг}}$	Липиды	УВ	Хл <i>a</i>	Взвесь
			интервал средняя				
2019 г.							
20–27.03	Африка–Антарктида	20	$\frac{39-315}{80}$	$\frac{2-132}{65}$	$\frac{1-70}{35}$	$\frac{0.13-1.71}{0.42}$	$\frac{0.087-0.736}{0.267}$
31.03–1.05	Вдоль Антарктиды	25	$\frac{15-156}{46}$	$\frac{18-121}{42}$	$\frac{4-33}{19}$	$\frac{0.27-0.51}{0.128}$	$\frac{0.075-0.736}{0.184}$
1–27.05	Антарктида–Ла-Манш	62	$\frac{31-130}{83}$	$\frac{14-106}{43}$	$\frac{7-71}{23}$	$\frac{0.06-1.02}{0.38}$	$\frac{0.022-1.548}{0.230}$
2015 г. (Немировская, 2017)							
27–30.03	П. Ушуайя–зал. Эль-Ринкон	11	$\frac{45-171}{96}$	$\frac{21-44}{35}$	$\frac{15-33}{19}$	$\frac{0.24-1.03}{0.38}$	$\frac{0.19-0.45}{0.28}$
34.03–3.04	Зал. Эль-Ринкон	8	$\frac{83-258}{116}$	$\frac{27-53}{39}$	$\frac{5-15}{9}$	$\frac{0.30-2.48}{0.868}$	$\frac{0.26-9.46}{4.56}$
4.04.	Влияние р. Ла-Плата	4	$\frac{64-100}{86}$	$\frac{21-39}{27}$	$\frac{3-28}{11}$	$\frac{0.02-0.40}{0.07}$	$\frac{0.06-0.14}{0.09}$
5–16.04	Устье р. Ла-Плата–экватор	33	$\frac{16-64}{26}$	$\frac{12-47}{17}$	$\frac{3-28}{10}$	$\frac{0.02-0.16}{0.06}$	$\frac{0.06-0.14}{0.09}$
17–26.04	Экватор–пролив Ла-Манш	18	$\frac{39-69}{47}$	$\frac{13-31}{23}$	$\frac{5-25}{14}$	$\frac{0.03-0.19}{0.10}$	$\frac{0.07-0.26}{0.12}$
1–3.05	Пролив Ла-Манш	7	$\frac{31-362}{157}$	$\frac{8-168}{67}$	$\frac{5-100}{37}$	$\frac{0.30-1.30}{0.57}$	$\frac{0.18-4.40}{1.35}$
3–6.05	Северное, Балтийское моря	11	$\frac{72-313}{161}$	$\frac{26-54}{36}$	$\frac{7-32}{19}$	$\frac{0.28-2.80}{0.92}$	$\frac{0.22-1.07}{0.54}$

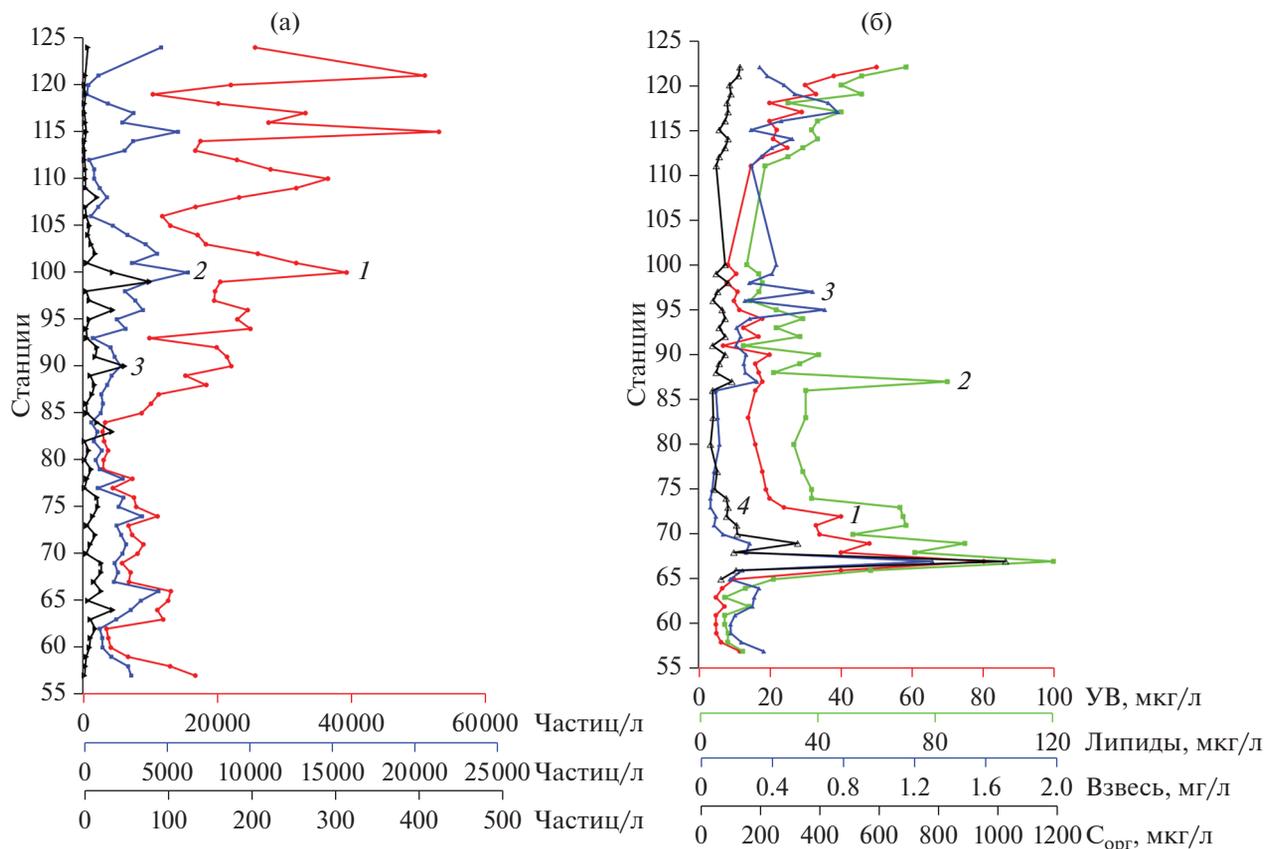


Рис. 5. Распределение на разрезе от Антарктиды до Ла-Манша (а) приводного аэрозоля: 1 – 0.3–1, 2 – 1–5, 3 > 5 мкм; (б) в поверхностных водах: 1 – УВ, 2 – липиды, 3 – взвесь, 4 – $C_{\text{орг}}$.

богатых биогенными элементами. Но из-за быстрого обмена вод, фитопланктонное сообщество не успевает развиваться, что приводит к низким значениям концентраций взвеси, $C_{\text{орг}}$ и хл *a*, средние величины которых составили 0.184 мг/л, 46 и 0.128 мкг/л соответственно (табл. 2).

Локальная изменчивость взвеси и ОС вызвана не только гидрологическими факторами, но и состоянием ледяного покрова. Концентрации УВ в поверхностных водах у берегов Антарктиды в 2019 г. изменялись в интервале 4–33 мкг/л (в среднем 19 мкг/л, $n = 25$, табл. 2). Их величины были довольно постоянными, так как значение стандартного отклонения ($\sigma = 7$) составила 35% от средней величины. Содержание УВ коррелировало с концентрацией липидов ($r = 0.65$), но в меньшей степени с другими компонентами ($r = 0.07$ – 0.23).

Взвешенное вещество в районе станции Беллинсгаузен состояло из угловатых минеральных частиц (~10%, остроконечные куски размером 20–45 мкм). Количество глинистых частиц не превышало 3%, а в остальной части пробы доминировали скелеты диатомовых водорослей. Взвесь в районе сезонной ст. Молодежная также состояла в основном из биогенных частиц (диатомовых водорослей размером 10–20 мкм).

На разрезе от Антарктиды при движении судна на север количество аэрозолей неравномерно увеличивалось, достигая максимального значения для фракции 0.3–1 мкм 34893 частиц/л в море Уэдделла, при максимальной скорости ветра 20.6 м/с (рис. 5, ст. 56). Повышенные концентрации аэрозолей на участке от Антарктиды до Южной Америки связаны с их потоками из Патагонии, которая является центром континентального образования воздуха умеренных широт – южно-атлантического антициклона (Cabos et al., 2017). Здесь распространены два типа циркуляции эоловых потоков: экваториальный – с мощной конвекцией воздушных масс, где происходит сближение пассатов, и субэкваториальный – с сезонными изменениями экваториальных и тропических воздушных масс (муссонный тип) (Diaz et al., 2018).

В районе побережья Южной Америки количество аэрозолей возрастало в заливе Ла-Плата (порт Монтевидео), где повышенное их содержание (11914 ч/л) определено при скорости ветра всего 1.8 м/с. Однако максимальная концентрация аэрозолей в этой области (13045 ч/л) установлена при скорости ветра 9.4 м/с, т.е. ветер оказывает влияние на их распределение.

С удалением от материка в Атлантическом океане количество аэрозолей неравномерно снижалось, изменяясь в диапазоне 2655–10094 ч/л. Минимальная их концентрация была установлена на ст. 83 при скорости ветра всего 4.8 м/с (рис. 5а).

Смена направления ветра также вызывало изменение аэрозолей в атмосфере. В частности на станциях 84 и 85 при смене направления ветра с 135° до 38° при практически равной его скорости (9–10 м/с) количество аэрозолей изменялось почти в 2 раза, от 3289 до 8686 частиц/л.

В области 17°–19° с.ш., находящейся под влиянием потоков из африканских пустынь (станции 100–102), количество аэрозолей 0.3–1 мкм превышало 30000 частиц/л. Для центральной части Атлантики трансокеанский перенос имеет четкую сезонность (Лисицын и др., 2016). В зимне-весенний период потоки аэрозолей продвигаются на юг с максимумом в районе Французской Гвианы (Goudie, 2001). Низкоширотные пустыни Африки и Азии, так называемый “пылевой пояс”, являются основными источниками аэрозолей (Немировская, Титова, 2019; Сакерин и др., 2017; Mitra, Sharma, 2002). Этот пояс включает Сахару, засушливые и полусушливые районы Аравии и Центральной Азии, а также пустыню Такла-Макан и Гоби в Восточной Азии.

Во время сильных пыльных бурь сахарская пыль пересекает Атлантику и достигает американского побережья (Клювиткин, 2008). В 2019 г. эта область переноса аэрозолей располагалась севернее по сравнению с 2015 г. – 11°–15° с.ш. При этом средние концентрации для фракции 0.3–1 мкм оказались близкими: в 2015 г. – 22889 ч/л, а в 2019 г. – 22755 ч/л, поскольку обе экспедиции проходили весной, когда вынос эолового материала из засушливых регионов был относительно низким (Сакерин и др., 2017). Наши исследования, проведенные в марте 2017 г., установили более высокие концентрации аэрозолей в Аденском заливе (до 112532 частиц/л) и в Красном море (до 259416 частиц/л) из-за близости к источникам эолового материала (Немировская, Титова, 2019).

В районе европейского побережья потоки аэрозолей возрастали под влиянием антропогенных поступлений из промышленных европейских областей (рис. 4а). В проливе Ла-Манш их содержание было ниже (26692 частиц/л), возможно из-за прошедшего дождя. В 2015 г. после дождя содержание аэрозолей в проливе Ла-Манш было еще ниже – 3466 частиц/л (Немировская, 2017). Затем их количество начало расти, наиболее резко (в 5 раз) в узком участке пролива Па-де-Кале, где достигло 111239 частиц/л – максимальной концентрации аэрозолей на всем разрезе в этот период.

В поверхностных водах концентрации изучаемых соединений изменялись в основном син-

хронно (рис. 5б). На разрезе через пролив Дрейка в западную часть моря Скоша в юго-западной Атлантике судно пересекло основные антарктические течения и фронты Южного океана: (Jacobs, 1991; Orsi et al., 1995), что привело к изменчивости всех соединений.

Наиболее значительный рост концентраций происходил в районе п. Монтевидео в устье р. Ла-Плата: для взвеси от 0.23 до 1.3 мг/л (в 5.2 раза, рис. 5б). Содержание других соединений также оказалось высоким: $C_{\text{орг}}$ во взвеси достигло 325 мкг/л, а липидов и УВ – до 90 и 48 мкг/л соответственно.

Ранее (Немировская, 2017) резкое увеличение содержания всех изучаемых соединений (особенно взвеси – до 9.46 мг/л и хл *a* – до 2.481 мкг/л) было установлено в устьевой области р. Рио-Колорадо в заливе Эль-Ринкон (табл. 2). Здесь изменение концентраций УВ в пересчете на взвесь (1.5 мкг/мг) было значительно ниже, чем в заливе Ла-Плата – 37 мкг/мг взвеси. Последнее, обусловлено тем, что в устье р. Ла-Плата расположено два больших мегаполиса: Буэнос-Айрес, с населением 14 миллионов человек и Монтевидео – с 2 миллионами человек. В этих агломерациях сосредоточена основная часть промышленности Аргентины и Уругвая (Colombo et al., 2011). Изменение концентраций изучаемых соединений происходило в зависимости от ветровых условий, величины речного стока и поступления УВ от судоходства. Поэтому в плюме поверхностных вод р. Ла-Плата наблюдался также наиболее значительный рост устойчивых органических загрязнений в Южной Атлантике (Lohman, Belkin, 2014).

Севернее на распределение изучаемых соединений влияют фронтальные зоны Бразильского и Фолклендского течений, способствующих образованию биогенной взвеси (Политова и др., 2015). В тропических олиготрофных водах Атлантики содержание взвеси (0.05–0.08 мг/л) и $C_{\text{орг}}$ (45–90 мкг/л) так же, как и других соединений мало менялось.

Судно прошло значительно восточнее устьевой области Амазонки, поэтому влияние этой реки не установлено. Тем не менее, как было показано ранее, часть осадочного материала этой реки по системе подводных каньонов на континентальном склоне распространяется до глубин 5 км вплоть до Срединно-Атлантического хребта, хотя основная масса осаждается на шельфе (Монин, Гордеев, 1988).

В области влияния аридных потоков из африканских пустынь в поверхностных водах в большей степени увеличивается содержание взвеси (до 0.61 мг/л), а концентрации липидов и УВ оставались на фоновом уровне, соответственно 16 и 8 мкг/л (рис. 5б).

Севернее 38° с.ш. в области Канарского апвеллинга содержание взвеси вновь возрастало. На

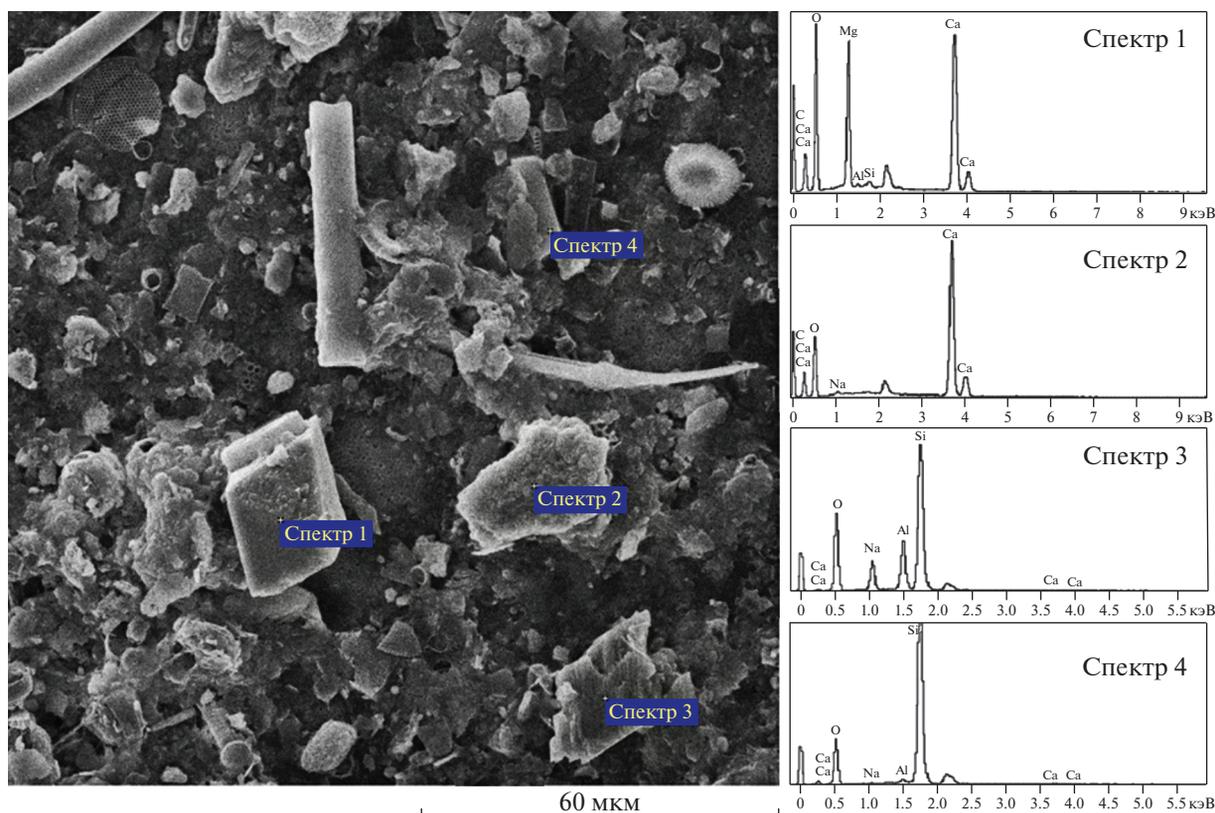


Рис. 6. Состав поверхностной взвеси при входе в пролив Ла-Манш: спектр 1 – доломит, спектр 2 – кальцит, спектр 3 – альбит; спектр 4 – кварц и полево шпат.

шельфе Западной Европы в поверхностных водах произошло хаотичное увеличение содержания всех изучаемых соединений, особенно при приближении к проливу Ла-Манш (рис. 5б). Циркумконтинентальная зональность приводит к доминированию терригенной составляющей во взвеси прибрежных вод. Взвесь в проливе Ла-Манш представлена в основном различными минеральными частицами: доломитами, кальцитами, альбитами, кварцем и полевыми шпатами, в меньшей степени встречаются частицы детрита и диатомовые водоросли. Сферы сгорания и частицы сажи не обнаружены (рис. 6).

В этом районе наблюдался максимальный рост содержания УВ (до 70 мкг/л, до 214 мкг/мг взвеси), вызванный, скорее всего, нефтяным загрязнением. Это подтверждает и состав алканов, который был наиболее близок к нефтяному (Немировская, Титова, 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Маршрут судна в марте–июне 2019 г. Африка–Антарктида–Южная Америка–Ла-Манш пересекал различные климатические зоны с различными гидрометеорологическими и геохимическими условиями. При доминировании в аэрозолях

фракции 0.3–1 мкм, средние их концентрации возрастали в последовательности: прибрежные районы Антарктиды (6182, $\sigma = 5767$) < побережье Южной Америки (8682, $\sigma = 5176$) < Канарский архипелаг (16618, $\sigma = 3697$) < от Антарктиды к Южной Америке (17048, $\sigma = 10805$) \approx от Южной Африки до Антарктиды (17841, $\sigma = 13251$) < центральная часть Атлантики (23754, $\sigma = 6842$) < прибрежный район Европы (28186, $\sigma = 11363$).

На разрезе Африка–Антарктида на формирование приводного аэрозоля оказывает влияние зональный поток из поверхностных вод в атмосферу (антарктическое циркумполярное течение и его фронтальные зоны). Поэтому содержание частиц аэрозоля на этом разрезе коррелировало со скоростью ветра, выдувающего их с морской поверхности: $r = 0.82$, $n = 14$. Наибольшая изменчивость в концентрациях аэрозолей и изучаемых компонентов в поверхностных водах происходит в южной части разреза.

На разрезе в прибрежных районах Антарктиды из-за ледового покрова на континенте и преобладающего направления ветра с материка в океан установлено минимальное количество аэрозолей в приводном слое атмосферы. Связь концентраций аэрозоля со скоростью ветра была значительно слабее ($r = 0.34$, $n = 12$), так как существует ло-

кальный перенос аэрозолей при отсутствии снега на прибрежных холмах. Поэтому наблюдалось резкое увеличение аэрозолей в отдельных районах, что обуславливает максимальную их дисперсию на этом разрезе ($\sigma = 5767$, 83% от средней). В поверхностных водах локальная изменчивость всех соединений обусловлена не только гидрологическими факторами, но и состоянием ледового покрова. Поступление эолового материала с континента (в частности аэрозолей в акватории ст. Беллинсгаузен), сопровождалось увеличением содержания взвеси, липидов и УВ в поверхностных водах.

На разрезе от Антарктиды до пролива Ла-Манш повышенные концентрации аэрозолей у побережья Южной Америки (для фракции 0.3–1 мкм 34893 частиц/л) обусловлены потоками из Патагонии (южно-атлантический антициклон). В поверхностных водах этого района на распределение взвеси и ОС оказывает влияние геохимический барьер р. Ла-Плата – океан. Здесь изменение концентраций изучаемых соединений происходило в зависимости от величины речного стока и ветровых стонов и нагонов, для взвеси – от 0.23 до 1.3 мг/л, а для УВ – от 7 до 48 мкг/л (до 37 мкг/мг взвеси).

С удалением от Южной Америки в Атлантическом океане количество аэрозолей неравномерно снижалось в зависимости от направления ветра. Повышение аэрозолей в области 17°–19° с.ш., находящейся под влиянием потоков из африканских пустынь (до 30000 частиц/л) вызывало рост содержания в поверхностных водах взвеси (до 0.61 мг/л), но из-за ее минерального состава количество ОС не увеличивалось.

На шельфе Западной Европы потоки аэрозолей возрастали под влиянием антропогенных поступлений из промышленных европейских областей, а также от сжигания судового топлива. В поверхностных водах происходило хаотичное изменение концентраций взвеси и ОС, а в их составе рост содержания УВ.

Автор благодарит А.М. Титову и Н.В. Козину за отбор проб, А.А. Храмову за помощь в проведении анализов и графической обработке результатов.

Результаты исследований получены в рамках государственного задания (тема № FMWE-2021-0016), участие в экспедиции за счет средств РАЭ, обобщение результатов и подготовка к публикации – при поддержке РНФ (проект 19-17-00234П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антипов Н.Н., Данилов А.И., Клепиков А.В. (2014) Исследования Южного океана по научным программам ААНИИ: от программы “Полэкс-Юг”. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1(99), 65-85.

Антипов Н.Н., Клепиков А.В. (2011) Термическая структура верхнего слоя океана между Африкой и Антарктидой по данным океанографических работ ААНИИ 2004–2010 гг. Вклад России в Международный полярный год 2007/08. *Океанография и морской лед*. (Под ред. Фролова И.Е.). М.: Paulsen, 280-290.

Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. (1985) *Мониторинг загрязнения снежного покрова*. Л.: Гидрометеиздат, 184 с.

Голобокова Л.П., Польшин В.В., Онищук Н.А., Хуриганова О.И., Тихомиров А.Б., Терпугова С.А., Польшин В.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф. (2016). Химический состав аэрозоля в приземном слое прибрежной зоны Восточной Антарктиды. *Лёд и Снег*. 56(2), 177-188.

Демидов А.Б., Ведерников В.И., Шеберстов С.В. (2007) Пространственно-временная изменчивость хлорофилла “а” в атлантическом и индийском секторах Южного океана в феврале–апреле 2000 г. по спутниковым и экспедиционным данным. *Океанология*. 47(4), 546-558.

Ивлев Л.С. (1982) *Химический состав и структура атмосферных аэрозолей*. Л.: ЛГУ, 368 с.

Качество морских вод по гидрохимическим показателям (2019). Ежегодник 2018. (Под ред. Коршенко А.Н.). М.: Наука, 190 с.

Клювиткин А.А. (2008) Атмосферные аэрозоли и осадконакопление в аридных зонах Атлантического океана. *ДАН*. 421(1), 111-115.

Лисицын А.П. (1994). *Ледовая седиментация в Мировом океане*. М.: Наука, 1994, 448 с.

Лисицын А.П. (2014). Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер земли. *Мировой океан Т.2*. М.: Научн. мир, 331-571.

Лисицын А.П., Клювинкин А.А., Буренков В.И., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Клювиткина Т.С. (2016) Распределение и состав взвешенных веществ в Атлантическом океане: прямые измерения и спутниковые данные. *ДАН*. 466, 221-224.

Масленников В.В. (2003) *Климатические колебания и морская экосистема Антарктики*. М.: ВНИРО, 295 с.

Монин А.С., Гордеев В.В. (1988). *Амазонка*. М.: Наука, 216 с.

Немировская И.А. (2013) *Нефть в океане (загрязнение и природные потоки)*. М.: Научн. мир, 432 с.

Немировская И.А. (2017) Осадочное вещество и органические соединения в аэрозолях и в поверхностных водах на трансатлантическом разрезе. *Геохимия*. (4), 344-357.

Nemirovskaya I.A. (2017) Sedimentary Matter and Organic Compounds in the Aerosols and Surface Waters along the Transatlantic Section. *Geochem. Int*. 55(4), 367-379.

Немировская И.А., Титова А.М. (2019) Особенности распределения взвешенного вещества на геохимическом барьере вода–атмосфера на трансокеанских разрезах *Океанология*. 59(4), 558-568.

Политова Н.В., Артемьев В.А., Зернова В.В. (2015) Распределение и состав взвеси на меридиональном разрезе в Западной Атлантике *Океанология*. 55(6), 984-993.

- Радионон В.Ф., Свешников А.М. (1999) Параметры микроструктуры аэрозольных частиц на побережье восточной Антарктиды. *Информационный бюллетень Российской Антарктической экспедиции*. СПб.: Гидрометеоздат, (119), 64-72.
- Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И. (2017). Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС "Академик Николай Страхов". *Оптика атмосферы и океана*. **30**(1) 42-52.
- Федоров К.Н. *Физическая природа и структура океанических фронтов*. Л.: Гидрометеоздат. 1983. 296 с.
- АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme) (2007). *Ch. 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic*. Oslo: АМАР, 87 p.
- Baron P. A., Willeke K. (2005) *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Hoboken: Wiley, 1160 p.
- Cabos W., Sein D. Pinto V., Fink J. G., Koldunov A. H., Alvarez N. V., Izquierdo F., Keenlyside A., Jacob N., (2017) The South Atlantic Anticyclone as a key player for the representation of the tropical Atlantic climate in coupled climate models. *Climate Dynamics*. **48**, 4051-4069.
- Colombo J.C., Cappelletti N., Williamson M., Migoya M.C., Speranza E., Sereficano J., Muir D. (2011). Risk ranking of multiple POPs in detritivorous fish from the Riode la Plata. *Chemosphere*. **83**(6), 882-889.
- Diaz M.A., Adams B.J., Welch K.A., Welch S.A., Opiyo S.O., Khan A.L. (2018). Aeolian material transport and its role in landscape connectivity in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *J. Geoph. Res.* **123**, 3323-3337.
- Donahue N.M., Robinson A.L., Trump E.R. (2014). Volatility and aging of atmospheric organic aerosol. *Current Chemistry*. **339**, 97-143.
- Goudie A.S., Middleton N.J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Science Reviews*. **56**, 179-204.
- Jacobs S.S. (1991) On the nature and significance of the Antarctic Slope Front. *Mar. Chem.*, **35**(1), 9-24.
- Lohmann R., Belkin I.M. (2014). Organic pollutions and ocean fronts across the Atlantic ocean: A review. *Progr. Oceanog.* **128**, 172-184.
- Mitra A.P., Sharma C. (2002) Indian aerosols: present status. *Chemosphere*. **49**, 1175-1190.
- Na G., Gao Y., Li R.H., Gao Ye. J., Zhang Z. (2020) Occurrence and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmosphere and soil from 2013 to 2019 in the Fildes Peninsula, Antarctica. *Mar. Pol. Bul.* **156**, 111-173.
- Nemirovskaya I.A., Shevchenko V.P. (2020). Organic Compounds and Suspended Particulate Matter in Snow of High Latitude Areas (Arctic and Antarctic). *Atmosphere*. **928**(11), 1-23.
- Orsi A., Whitworth H.I., Nowlin W.D. Jr. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Res., Part I*. **42**, 641-673.
- Sokolov, S., Rintoul S.R. (2009). Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: Mean circumpolar paths, *J. Geophys. Res.* **114**, 1-15.
- UNESCO (1994). Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, *IOC/SCOR manual and guides*. Paris: UNESCO Publ. (29), 128-134.