

УДК 551.510.4

Результаты измерений физико-химических характеристик аэрозоля в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на маршруте от Балтийского до Баренцева моря

С.М. Сакерин¹, Д.М. Кабанов¹, Д.А. Калашникова², И.А. Круглинский¹,
В.И. Макаров³, А.Н. Новигатский⁴, В.В. Полькин¹, С.А. Попова³,
А.О. Почуфаров¹, Г.В. Симонова², Ю.С. Турчинович¹, В.П. Шевченко^{4*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

³Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, г. Москва, пр. Нахимовский, 36

Поступила в редакцию 10.03.2021 г.

Обсуждаются физико-химические характеристики аэрозоля над морями Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана, измеренные в 80-м и двух предшествующих (67-й и 71-й) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш». Показано, что значения большинства характеристик аэрозоля (концентрации аэрозоля, сажи, элементного и органического углерода, элементный состав) в атмосфере Балтийского и Северного морей выше в сравнении с Норвежским и Баренцевым морями. В изотопном составе углерода в аэрозольных пробах преобладали легкие изотопы, что указывает на преимущественное влияние сгорания нефтепродуктов и природного газа.

Ключевые слова: атмосфера над океаном, аэрозоль, сажа, элементный и органический углерод, элементный и изотопный состав; atmosphere over the ocean, aerosol, black carbon, elemental and organic carbon, elemental and isotopic composition.

Введение

Аэрозоль играет важную роль в процессах формирования климата и переноса различных веществ (в том числе загрязнений) в системе «континент–атмосфера–океан» [1–3]. Отличительные особенности атмосферного аэрозоля — это сложный физико-химический состав, высокая подвижность и многомасштабная временная изменчивость. Несмотря на многолетние исследования, сохраняется неопределенность характеристик аэрозоля и законо-

мерностей их изменчивости в различных регионах. В первую очередь это относится к морским районам, где проведение регулярных наблюдений невозможно, поэтому основной источник информации — экспедиционные измерения характеристик аэрозоля с борта научных судов.

Состав и содержание аэрозоля над океаном определяются как собственными источниками, так и переносом воздушных масс с континентов, в частности из Евразии и Северной Америки [4, 5]. Следствием циркулирующей являются: 1) обогащение морской атмосферы континентальным аэрозолем различного типа (антропогенным, дымовым и т.д.); 2) значительные вариации характеристик аэрозоля в синоптическом масштабе колебаний. Большая синоптическая изменчивость затрудняет корректное определение характеристик аэрозоля, типичных для того или иного района океана, по данным отдельных экспедиций: необходимы продолжительные измерения в многообразии атмосферных условий каждого района.

Дефицит натурных измерений в определенной степени компенсируется многочисленными модельными расчетами, основанными на инвентаризации

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Дарья Александровна Калашникова (terezapr@mail.ru); Иван Александрович Круглинский (iak@iao.ru); Валерий Иванович Макаров (makarov@kinetics.nsc.ru); Александр Николаевич Новигатский (novigatsky@ocean.ru); Виктор Викторович Полькин (viktor@iao.ru); Светлана Анатольевна Попова (popova@kinetics.nsc.ru); Антон Олегович Почуфаров (poa216@iao.ru); Галина Владимировна Симонова (galina_simonova@inbox.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Владимир Петрович Шевченко (vshevch@ocean.ru).

источников аэрозольных загрязнений и статистических данных траекторий движения воздушных масс [4–10]. Кроме того, важную роль играют спутниковые данные восстановления аэрозольной оптической толщи (АОТ) и реанализа других аэрозольных характеристик с использованием моделей циркуляции атмосферы, метеорологических полей и 3D-распределения различных типов аэрозоля [11–14]. Но для верификации активно развиваемых модельных расчетов тоже необходимы результаты реальных измерений характеристик аэрозоля в различных регионах.

В последние годы экспедиционные исследования аэрозоля в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане приобрели регулярный характер [15–20]. В настоящей работе обсуждаются результаты измерений физико-химических характеристик аэрозоля в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на маршруте от Балтийского до Баренцева моря (рис. 1). Примерно в этих же районах океана проводились измерения в 71-м (25 июня – 14 август 2018 г.) и 67-м (25 августа – 10 октября 2016 г.) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш». Поэтому мы сопоставили результаты трех экспедиций и провели статистическое обобщение данных в отдельных морских районах.

1. Характеристика экспедиционных измерений

Летом 2020 г. (31 июля – 24 августа) проведен очередной цикл исследований аэрозоля на маршруте Балтийское – Северное – Норвежское – Баренцево море. В измерениях использовался стандартный для наших экспедиций [16–18] комплект приборов: счетчик частиц АЗ-10, аэталометр МДА и солнечный фотометр SPM. На основе получен-

ных данных определялись: 1) счетная концентрация частиц аэрозоля (N_A) радиусом 0,15–5 мкм; 2) объемы частиц мелко- и грубодисперсного аэрозоля радиусом меньше и больше 0,5 мкм (V_f и V_c); 3) массовая концентрация поглощающего вещества – сажи (M_{BC}); 4) АОТ атмосферы $\tau^a(\lambda)$ и параметр Ангстрема α ; 5) мелко- и грубодисперсные составляющие АОТ. Грубодисперсная компонента τ^c находилась по минимальным значениям АОТ в диапазоне спектра 1,24–2,14 мкм, а мелкодисперсная оценивалась для длины волны 0,5 мкм как остаточная толща: $\tau_{0,5}^f = \tau_{0,5}^a - \tau^c$.

Результаты локальных измерений концентраций аэрозоля и сажи на борту судна подвержены эпизодическим техногенным воздействиям: дым от трубы судна, пыль из вентиляционных шахт. Кроме того, в полученных данных могут быть пропуски и ложные замеры из-за сбоев в работе приборов. Выявление и восстановление дефектных значений выполнялись с помощью алгоритма фильтрации исходных данных [21].

Учитывая различие климатических условий и разное влияние континентальных выносов, расчет статистических характеристик аэрозоля выполнен для трех районов экспедиции (рис. 1): 1) Балтийское и Северное моря (BNS); 2) Норвежское море (NS); 3) Баренцево море (BS). Уточним, что район BNS включает юго-западную часть Балтийского и северную часть Северного моря. В нашей работе из-за малого числа данных мы не стали отдельно рассматривать южную часть Баренцева моря, которая отличается более высоким содержанием аэрозоля [17]. Количество часов (дней) измерений характеристик аэрозоля отдельно в 80-м и в целом в трех рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» составило: АОТ – 35 (10) и 100 (30), N_A – 437 (25) и 1533 (86), M_{BC} – 330 (25) и 1404 (87) соответственно.

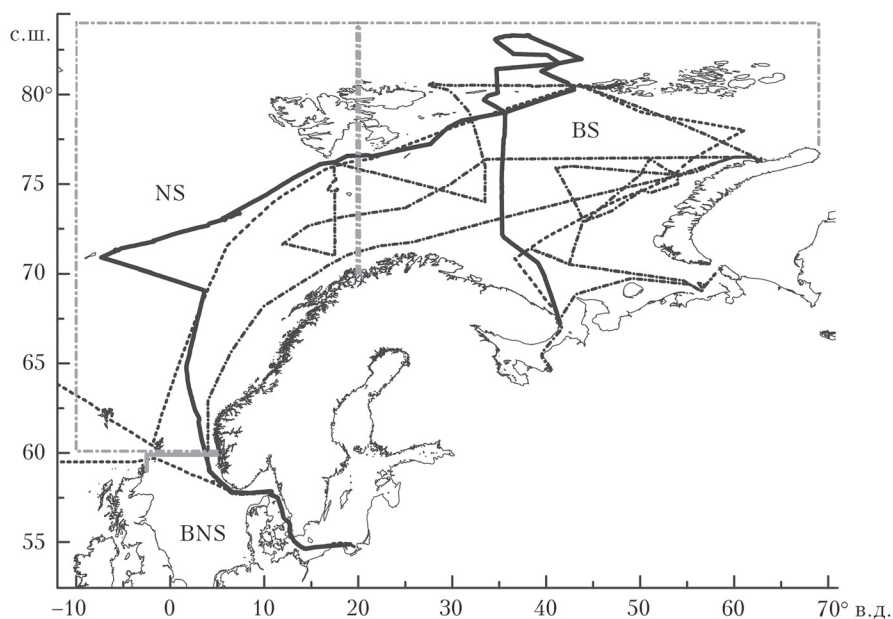


Рис. 1. Маршруты 80-го (сплошная кривая), 71-го (штриховая кривая) и 67-го (штрихпунктирная кривая) рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (серая штрихпунктирная линия обозначает анализируемые районы)

2. Обсуждение результатов

2.1. Оптические и микрофизические характеристики

Кроме инструментальных измерений характеристик аэрозоля, с помощью трехканальной вихревой воздуходувки проводился отбор проб аэрозоля на фильтры для последующего анализа в лабораторных условиях (подробнее см. [17, 22]). За время экспедиции отобрано по девять проб в каждом канале, время экспонирования фильтров составляло 2–3 сут.

Кварцевые фильтры первого канала использовались для определения изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ методом изотопной масс-спектрометрии стабильных изотопов легких элементов [23]. Анализ проводился с помощью масс-спектрометра DELTA V Advantage, системы газораспределения Conflo II и элементного анализатора Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific), предоставленных центром коллективного пользования ТомЦКП СО РАН. Рабочий газ CO_2 калибровался по стандартному образцу МАГАТЭ IAEA-600 Caffeine с величиной отношения стабильных изотопов $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -27,771 \pm 0,043\%$. Погрешность трех последовательных измерений анализируемых проб не превышала $\pm 0,2\%$.

По фильтрам второго канала (Whatman) с помощью метода реакционной газовой хроматографии [24] определялись концентрации органического и элементного углерода (OC и EC) в составе аэрозоля. На основе проб, отобранных в третьем канале (фильтры АФА-ХА-20) в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН, методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения [25] определялось содержание в аэрозоле различных элементов: K, Ca, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Br, Rb, Sr, Zr, Mo, Pb.

На рис. 2 показана временная изменчивость средних (за 6-часовые периоды) значений характеристик аэрозоля в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сравнении со средним уровнем характеристик в разных районах по данным трех экспедиций. Можно выделить три случая повышенных значений характеристик аэрозоля: общий максимум N_A , M_{BC} и $\tau_{0,5}^a$ 22, 23 августа; индивидуальный максимум АОТ 3 августа; N_A 17 августа 2020 г.

Высокие концентрации аэрозоля и сажи, зарегистрированные на юге Баренцева моря 22–23 августа ($N_A = 49 \text{ см}^{-3}$, $M_{\text{BC}} = 361 \text{ нг/м}^3$), в 5–6 раз превысили средние значения. Появлению этого максимума способствовали три фактора: 1) приближение к Кольскому полуострову; 2) более интенсивное судоходство в этом районе; 3) вынос дымов горения растительности с юга Восточной Европы. О последнем свидетельствуют данные траекторного анализа движения воздушных масс (рис. 3, а; <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) и спутниковые карты очагов температурных аномалий (<https://earthdata.nasa.gov/firms>).

Повышенные значения АОТ и M_{BC} наблюдались 1–3 августа 2020 г. во время движения судна в проливах Скагеррак и Каттегат. Очевидной причиной максимумов является близость к континенту и высокая плотность судоходства. Максимум концентраций аэрозоля 17 августа зарегистрирован

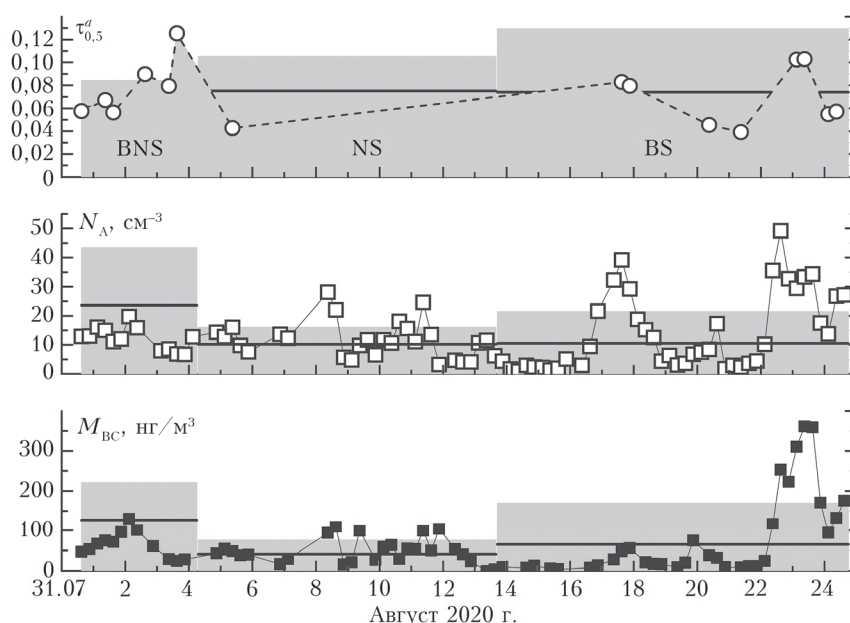


Рис. 2. Вариации $\tau_{0,5}^a$, N_A и M_{BC} в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»: полужирные прямые – средний уровень характеристик аэрозоля по данным измерений в трех экспедициях; серый фон – СКО

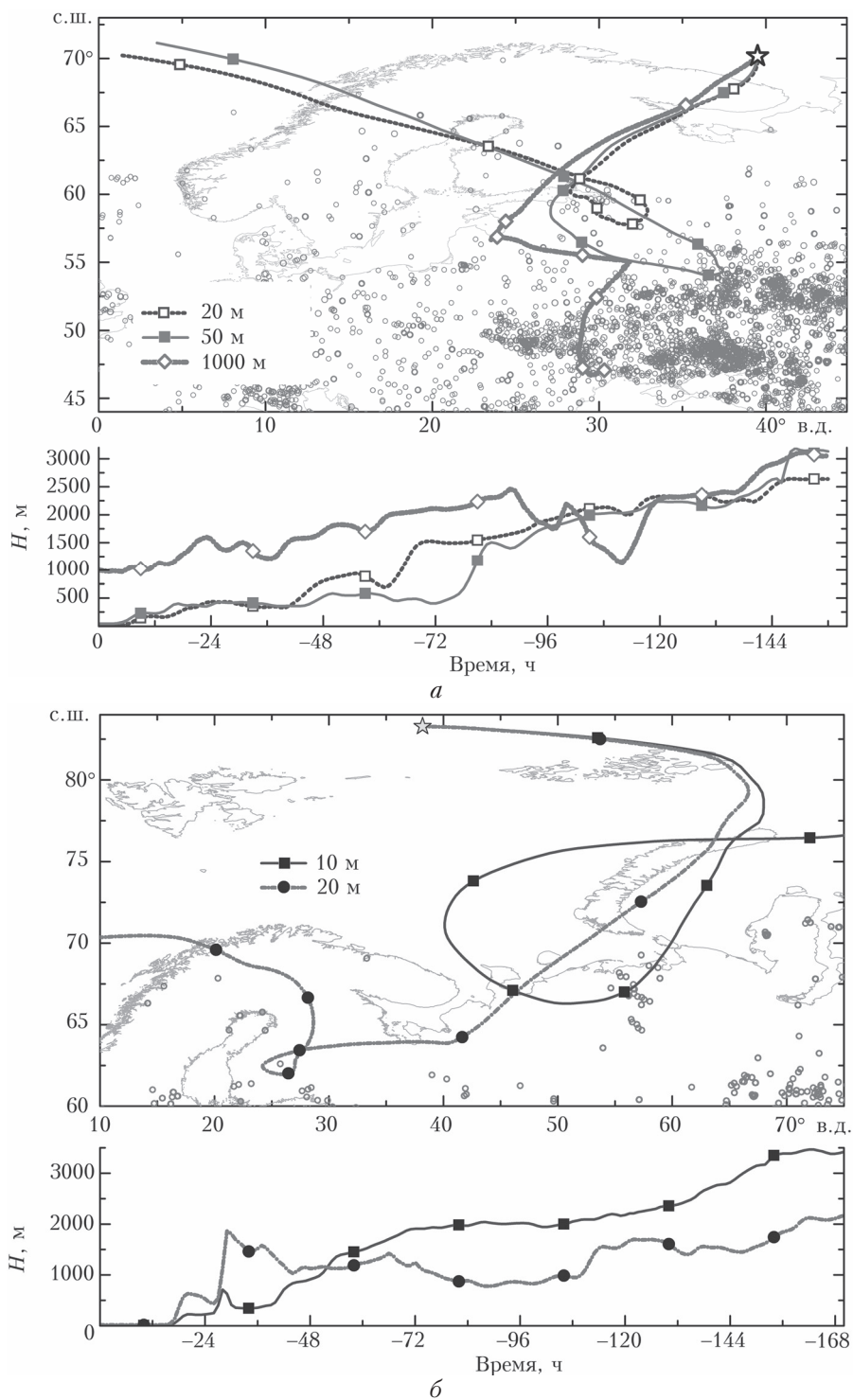


Рис. 3. Обратные 7-суточные траектории движения воздушных масс в районы измерений (звездочки) и очаги температурных аномалий (кружки): 23 августа – с юга Восточной Европы на юг Баренцева моря на высоты 20, 50 и 1000 м (а); 17 августа – с севера Восточной Европы на высоты 10 и 20 м (б)

в условиях туманной дымки, которая практически не повлияла на изменение содержания сажи. Причиной образования туманной дымки могли стать местные факторы и/или дальний перенос дымов с севера Восточной Европы (рис. 3, б).

Сравнение средних концентраций аэрозоля и сажи в разных экспедициях (табл. 1) не позво-

ляет получить однозначный ответ о количественных различиях характеристик в морских районах. То есть данные, полученные в относительно короткие периоды измерений в том или ином районе, определяются, прежде всего, погодными (синоптическими) условиями [18], а пространственные различия завуалированы. Отметим только одну осо-

Таблица 1

Средние (\pm СКО) характеристики аэрозоля в разных районах и экспедициях

Район и характеристики		Рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»			
		80-й	71-й	67-й	80-й + 71-й + 67-й
BNS	N_A , см^{-3}	$12,18 \pm 5,24$	$43,36 \pm 16,70$	$5,52 \pm 2,50$	$23,61 \pm 20,10$
	V_f , $\text{мкм}^3/\text{см}^3$	$0,49 \pm 0,15$	$1,66 \pm 0,65$	$0,25 \pm 0,12$	$0,92 \pm 0,76$
	V_c , $\text{мкм}^3/\text{см}^3$	$1,26 \pm 0,68$	$4,93 \pm 3,25$	$0,44 \pm 0,36$	$2,60 \pm 2,90$
	M_{BC} , $\text{нг}/\text{м}^3$	69 ± 47	182 ± 79	112 ± 115	127 ± 95
NS	N_A	$10,90 \pm 6,50$	$12,82 \pm 6,34$	$8,06 \pm 5,09$	$10,16 \pm 6,19$
	V_f	$0,57 \pm 0,39$	$0,51 \pm 0,24$	$0,43 \pm 0,29$	$0,49 \pm 0,32$
	V_c	$1,65 \pm 1,33$	$2,32 \pm 2,30$	$0,61 \pm 0,50$	$1,37 \pm 1,58$
	M_{BC}	50 ± 34	21 ± 12	44 ± 42	41 ± 36
BS	N_A	$14,62 \pm 13,88$	$21,57 \pm 18,90$	$7,63 \pm 6,70$	$10,51 \pm 11,24$
	V_f	$0,64 \pm 0,57$	$0,99 \pm 0,81$	$0,33 \pm 0,28$	$0,46 \pm 0,48$
	V_c	$1,23 \pm 1,15$	$3,37 \pm 2,60$	$0,34 \pm 0,46$	$0,81 \pm 1,32$
	M_{BC}	89 ± 120	54 ± 40	61 ± 108	65 ± 105

бенность: концентрации аэрозоля (N_A , V_f и V_c) во всех районах в осеннем, 67-м рейсе существенно меньше, чем в 71-м, а в 80-м рейсе получены промежуточные значения. По-видимому, на более низкое содержание аэрозоля в 67-м рейсе дополнительно повлиял сезонный фактор.

Обобщение данных трех экспедиций (см. последний столбец табл. 1 и прямые на рис. 2) позволяет оценить особенности географического распределения характеристик аэрозоля. Максимальные средние концентрации аэрозоля и сажи ожидаемо оказались над Балтийским и Северным морями, которые окружены густонаселенными и промышленно развитыми странами Западной Европы. Самые низкие концентрации аэрозоля и сажи наблюдаются в разных районах: объемы частиц V_f , V_c минимальны над Баренцевым морем, а N_A и M_{BC} — над Норвежским.

Распределение по районам модальных (наиболее вероятных) значений характеристик аэрозоля приведено на рис. 4. Гистограмма повторяемостей концентраций сажи над Балтийским и Северным морями (BNS) находится в области более высоких значений: мода M_{BC} ($\sim 45 \text{ нг}/\text{м}^3$) примерно в 3 раза больше, чем над двумя другими морями. Модальные значения V_f в районе BNS тоже самые большие (рис. 4, б). Немного меньше модальные значения V_f в Норвежском море, а самые низкие —

в Баренцевом. Обратим внимание, что в районе BNS наблюдается вторая мода высоких значений M_{BC} и V_f из-за более частых выносов континентального аэрозоля (с территории Дании и юга Скандинавии), а также загрязнений от проходящих судов. В гистограммах распределения V_c (рис. 4, в) значимое различие между районами есть только в области самых низких концентраций: $V_c < 0,5 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Такие концентрации чаще всего наблюдаются над Баренцевым морем, далее следуют районы NS и BNS.

Из-за малого количества измерений АОТ ее средние (по районам) характеристики рассмотрены только для общего массива данных трех экспедиций (рис. 5 и табл. 2). В средних спектральных зависимостях $\tau^a(\lambda)$ проявились две особенности: повышенные значения АОТ в коротковолновой части спектра над Баренцевым морем и самые большие значения АОТ в ИК-диапазоне над Норвежским морем. Более детальный анализ показал, что указанные особенности $\tau^a(\lambda)$ сформировались из-за двух аномальных ситуаций, наблюдавшихся во время 67-го рейса: 1) 11-12 сентября 2016 г. в район Баренцева моря выносились дымовые массы лесных пожаров с севера Иркутской области [16]; 2) данные 15 сентября 2016 г. в Норвежском море получены в штормовых условиях (при высоком содержании грубодисперсного морского аэрозоля).

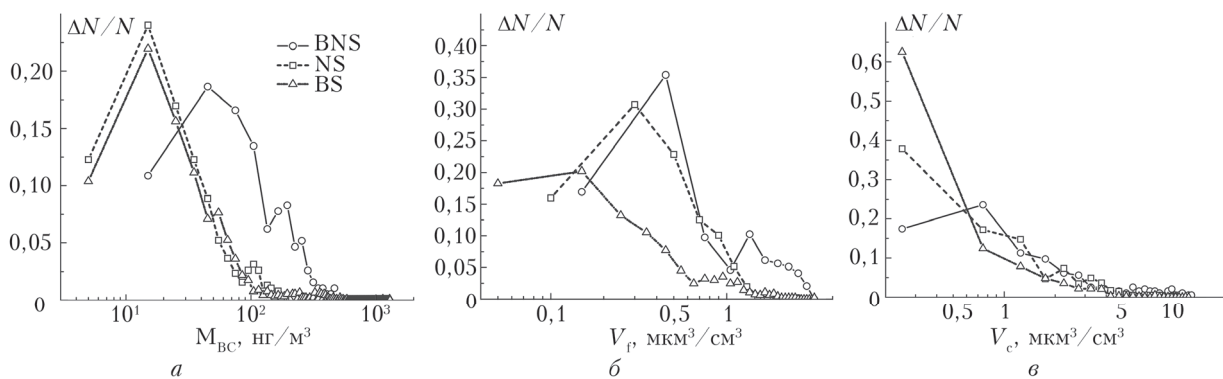
Рис. 4. Гистограммы повторяемостей концентраций M_{BC} (а) и объемов частиц V_f (б) и V_c (в) в трех районах

Таблица 2

Средние характеристики АОТ по данным измерений в трех экспедициях

Район	$\tau_{0,5}^a$	$\tau_{0,5}^b$	τ^c	α
BNS	$0,061 \pm 0,024$	$0,037 \pm 0,017$	$0,024 \pm 0,012$	$0,88 \pm 0,15$
NS	$0,075 \pm 0,031$	$0,029 \pm 0,022$	$0,047 \pm 0,035$	$0,48 \pm 0,52$
BS	$0,074 \pm 0,056$	$0,046 \pm 0,053$	$0,028 \pm 0,017$	$1,00 \pm 0,44$

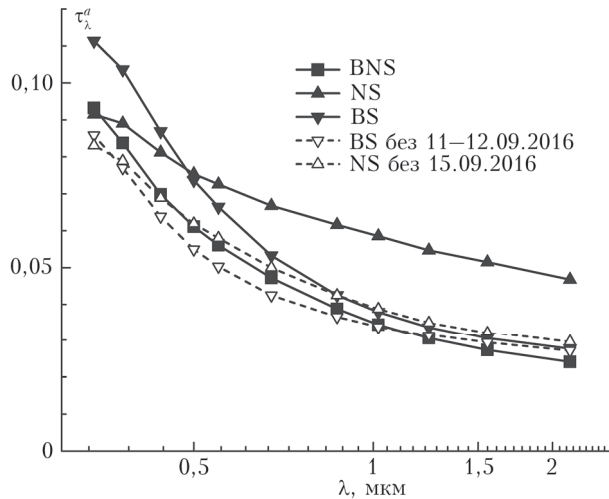


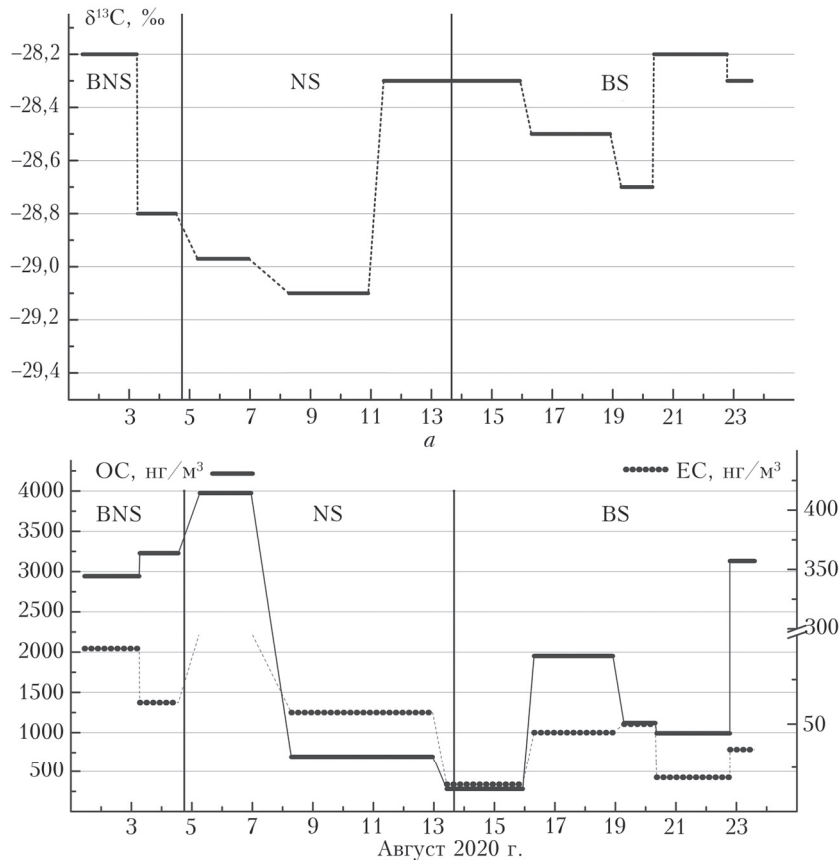
Рис. 5. Средние спектральные зависимости АОТ в районах BNS, NS, BS (пунктирные кривые – средние АОТ с исключенными ситуациями высоких замутнений)

При исключении этих аномальных ситуаций различие средних спектральных зависимостей АОТ в трех районах становится несущественным (см. пункт на рис. 5).

2.2. Химический состав аэрозольных проб (ОС, ЕС и $\delta^{13}\text{C}$)

Предваряя обсуждение результатов, отметим факторы, которые препятствуют надежному анализу химического состава аэрозоля в чистой морской атмосфере: 1) низкие концентрации в сочетании с высокой изменчивостью; 2) малое количество проб из-за необходимости прокачки через фильтры больших объемов воздуха; 3) частичная отбраковка проб из-за техногенных воздействий судна. Несмотря на указанные трудности, некоторые особенности пространственно-временной изменчивости химического состава аэрозоля все же удастся выявить.

На рис. 6 показано изменение изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ и концентраций ОС, ЕС в аэрозольных пробах, отобранных в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». Весь диапазон изменения $\delta^{13}\text{C}$ (от $-29,1$ до $-28,2\%$) соответствует легкому изотопному составу, который образуется при сгорании нефтепродуктов и газа [26, 27]. То есть преобладающими источниками сажевого аэрозоля были морской транспорт и сжигание попутного газа на нефтегазовых платформах в шельфовых зонах

Рис. 6. Изменение характеристик аэрозольных проб: а – $\delta^{13}\text{C}$; б – ОС и ЕС; вертикальные линии – границы морских районов, горизонтальные отрезки – периоды отбора проб

Северного и Норвежского морей. Некоторое приближение к тяжелому изотопному составу $\delta^{13}\text{C} = -28,2\%$ одновременно с максимумами концентраций сажи (см. рис. 2) наблюдалось в двух случаях: 1–3 августа во время выноса дымов с юга Восточной Европы (рис. 3, а) и 21–23 августа в проливах Скагеррак/Каттегат из-за повышенного континентального воздействия. Отметим, что средний изотопный состав углерода в 80-м рейсе ($\delta^{13}\text{C} = -28,6\%$) оказался на 1,3‰ ниже, чем в 71-м [17].

Во временном ходе ОС (рис. 6, б) выделяются три периода высоких концентраций: в начале экспедиции (BNS и юг Норвежского моря), 16–18 августа в условиях туманной дымки и 22–23 августа во время выноса дымов с юга Восточной Европы. Высокие значения ОС качественно согласуются с максимумами характеристик аэрозоля на рис. 2.

При сравнении концентраций ЕС и M_{BC} выявлены большие различия в двух случаях: 5–6 и 22–23 августа. Различие в первом случае ($\text{ЕС} = 250 \text{ нг/м}^3$, а среднее $M_{\text{BC}} \approx 30 \text{ нг/м}^3$) возникло из-за большого пропуска в измерениях M_{BC} 6 августа, т.е. сравнение в этом случае не совсем корректно. Причина больших различий во втором эпизоде (22–23 августа) пока непонятна: у всех характеристик зафиксирован максимум во время дымового выноса (в том числе $M_{\text{BC}} = 313 \text{ нг/м}^3$), но концентрация ЕС осталась на низком уровне – $35,6 \text{ нг/м}^3$. За исключением этих сомнительных эпизодов ЕС и M_{BC} имеют сопоставимые значения при коэффициенте корреляции 0,62.

В табл. 3 приведены средние концентрации ОС, ЕС и элементного состава аэрозоля, рассчитанные для двух районов, наиболее различающихся по континентальному влиянию: Балтийское и Се-

верное моря (BNS) и Норвежское и Баренцево моря (NS + BS). Для повышения статистической достоверности здесь же представлены средние концентрации по данным измерений в двух экспедициях (71-й [17] и 80-й рейсы). Из приведенных данных следует, что концентрации ОС, ЕС и большинства элементов над арктическими морями меньше, чем над Северным и Балтийским. Уменьшение концентраций для общего массива данных составляет: ОС и ЕС – в 1,5–1,6 раза, элементов – в 1,2–3 раза. Арктические моря характеризуются менее интенсивным судоходством, удаленностью от континентальных источников и общим широтным спадом содержания аэрозоля, поэтому причина уменьшения концентраций очевидна. Однако для нескольких элементов указанная закономерность нарушается. Прежде всего это касается более высоких концентраций над арктическими морями Cu, Ni и Zr. Для выяснения причин и источников концентраций этих элементов необходим дополнительный анализ на большем массиве данных.

Заключение

Представлены результаты сравнения характеристик аэрозоля, полученных на маршруте от Балтийского до Баренцева моря в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», с данными предшествующих экспедиций (67-й и 71-й рейсы) в аналогичных районах. Отмечено существенное влияние на арктическую атмосферу дальних переносов загрязнений из средних широт. В частности, в результате выноса дымового аэрозоля 22–23 августа 2020 г. с юга Восточной Европы в акваторию Баренцева моря концентрации аэрозоля и сажи увеличились в 5–6 раз относительно среднего уровня.

Обобщение данных трех экспедиций показало, что средние и модальные значения концентраций мелкодисперсного аэрозоля и сажи ($V_f = 0,92 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$, $M_{\text{BC}} = 127 \text{ нг/м}^3$) над Балтийским и Северным морями в 2–3 раза больше, чем над арктическими морями. Значимых различий характеристик аэрозоля над Норвежским и Баренцевым морями не проявилось.

Анализ химического состава аэрозольных проб, полученных в 80-м рейсе и в целом в двух рейсах (71-й и 80-й), показал более высокие средние концентрации ОС, ЕС и большинства элементов в атмосфере Балтийского и Северного морей относительно Норвежского и Баренцева. Исключением являются более высокие концентрации Cu, Ni и Zr над арктическими морями.

Средний изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C} = -28,6\%$) и весь диапазон его изменения в период 80-го рейса свидетельствуют о том, что в атмосферном аэрозоле преобладал углерод, образованный при сгорании нефтепродуктов и природного газа.

Авторы благодарят В.П. Шмаргунова за подготовку экспедиционной аппаратуры. В части анализа элементного состава аэрозоля выражаем благодарность за использование оборудования ЦКП

Таблица 3

Средние концентрации ОС, ЕС и химических элементов (нг/м^3) в двух районах

Элемент	Рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»			
	80-й		71-й + 80-й	
	BNS	NS + BS	BNS	NS + BS
ОС	3086	1735	1813	1254
ЕС	77,3	67,4	129	79,8
Са	4909	1421	2092	728
К	2221	1399	1029	691
Fe	775	465	430	248
Br	159	86,35	60,89	43,12
Zn	81,40	81,47	61,28	50,74
Ti	70,04	76,33	66,43	37,88
Sr	48,60	16,60	18,90	8,54
Mn	31,04	18,34	18,05	10,05
Cu	20,60	28,20	12,63	13,59
Cr	16,49	4,48	11,91	4,08
V	13,04	6,16	13,36	3,54
Pb	8,24	3,46	6,50	2,28
Co	4,39	2,76	2,73	1,70
Ni	3,38	17,7	7,67	9,24
Se	3,00	1,76	1,69	0,89
Rb	2,40	1,35	1,13	0,80
Zr	1,46	1,98	0,91	1,01
Mo	0,61	0,39	0,53	0,25

«СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022.

Анализ результатов выполнен при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-77-20025). Экспедиционные измерения 2020 г. проводились при поддержке РФФ (грант № 20-17-00157), а предварительная обработка данных – в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Fifth Assessment Report of the United Nations “Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)”, Chapter 7, Clouds and Aerosols. Cambridge: Cambridge University Press. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter07_FINAL.pdf.
2. Kondratyev K.Ya., Iovlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric aerosol properties, formation processes, and impacts: from nano- to global scales. Chichester: Springer-PRAXIS, 2006. 572 p.
3. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // *Мировой океан*. Т. 2. Физика, химия, и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
4. Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 12453–12473. DOI: 10.5194/acp-11-12453-2011.
5. Stohl A. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, iss. D11306. DOI: 10.1029/2005JD006888.
6. Bond T.C., Streets D.G., Yarber K.F., Nelson S.M., Woo J.-H., Klimont Z. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, iss. D14203. DOI: 10.1029/2003JD003697.
7. Koch D., Schulz M., Kinne S., McNaughton C., Spackman J., Balkanski Y., Bauer S., Bernsten T., Bond T.C., Boucher O., Chin M., Clarke A., De Luca N., Dentener F., Diehl T., Dubovik O., Easter R., Fahey D.W., Feichter J., Fillmore D., Freitag S., Ghan S., Ginoux P., Gong S., Horowitz L., Iversen T., Kirkevåg A., Klimont Z., Kondo Y., Krol M., Liu X., Miller R., Montanaro V., Moteki N., Myhre G., Penner J.E., Perlwitz J., Pitari G., Reddy S., Sahu L., Sakamoto H., Schuster G., Schwarz J.P., Seland Ø., Stier P., Takegawa N., Takemura T., Textor C., van Aardenne J.A., Zhao Y. Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 9001–9026.
8. Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120. P. 3306–3333. DOI: 10.1002/2015JD023358.
9. Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // *Atmos. Environ.* 2014. V. 92, N 4. P. 398–410. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.031.
10. Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475. DOI: 10.15372/AOO20170604; Vinogradova A.A., Vasileva A.V. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
11. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Climate*. 2017. V. 30, N 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
12. Randles C.A., da Silva A.M., Buchard V., Colarco P.R., Darmenov A., Govindaraju R., Smirnov A., Holben B., Ferrare R., Hair J., Shinzuka Y., Flynn C.J. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward, Part I: System description and data assimilation evaluation // *J. Climate*. 2017. V. 30, N 17. P. 6823–6850. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0609.1.
13. Buchard V., Randles C.A., da Silva A.M., Darmenov A., Colarco P.R., Govindaraju R., Ferrare R., Hair J., Beyersdorf A.J., Ziemba L.D., Yu H. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies // *J. Climate*. 2017. V. 30, N 17. P. 6851–6872. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0613.1.
14. Журавлева Т.Б., Артюшина А.В., Виноградова А.А., Воронина Ю.В. Черный углерод в приземной атмосфере вдали от источников эмиссий: сравнение результатов измерений и реанализа MERRA-2 // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 4. С. 250–260. DOI: 10.15372/AOO20200402; Zhuravleva T.B., Artyushina A.V., Vinogradova A.A., Voronina Yu.V. Black carbon in the near-surface atmosphere far away from emission sources: Comparison of measurements and MERRA-2 reanalysis data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 591–601.
15. Schevchenko V.P., Kopeikin V.M., Evangeliou N., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Pankratova N.V., Starodymova D.P., Stohl A., Thomson R. Atmospheric black carbon over the north Atlantic and Russian arctic seas in summer–autumn time // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016. Т. 24. С. 441–446. DOI: 10.15372/KhUR20160402.
16. Терпугова С.А., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Политова Н.В., Козлов В.С., Ходжер Т.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г. Результаты исследований характеристик аэрозоля в атмосфере Карского и Баренцева морей в летне-осенний период 2016 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 5. С. 391–402. DOI: 10.15372/AOO20180509; Terpugova S.A., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Pol'shin V.V., Golobokova L.P., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Politova N.V., Kozlov V.S., Khodzher T.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G. Results of the study of aerosol characteristics in the atmosphere of the Kara and Barents Seas in Summer and Autumn 2016 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 507–518.
17. Сакерин С.М., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Польшкин В.В., Попова С.А., Симонова Г.А., Чанкина О.В., Шевченко В.П. Результаты исследований физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» //

- Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 5. С. 358–367. DOI: 10.15372/АОО20200505; *Sakerin S.M., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Lisitzin A.P., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Simonova G.V., Chankina O.V., Shevchenko V.P.* Results of studying physicochemical characteristics of atmospheric aerosol in the 71st cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 5. P. 470–479.
18. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D.* Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in Russian sector of the Arctic Ocean // *Atmos.* 2020. V. 11, N 11. P. 1170. DOI: 10.3390/atmos1111170.
 19. *Ferrero L., Sangiorgi G., Perrone M.G., Rizzi C., Cataldi M., Markuszewski P., Pakszys P., Makuch P., Petelski T., Becagli S., Traversi R., Bolzacchini E., Zielinski T.* Chemical composition of aerosol over the Arctic Ocean from summer ARcticEXpedition (AREX) 2011–2012 cruises: Ions, amines, elemental carbon, organic matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, n-Alkanes, metals, and rare Earth elements // *Atmos.* 2019. V. 10, N 54. DOI: 10.3390/atmos10020054.
 20. *Park J., Dall'Osto M., Park K., Gim Y., Kang H.J., Jang E., Park K.-T., Park M., Yum S.S., Jung J., Lee B.Y., Yoon Y.J.* Shipborne observations reveal contrasting Arctic marine, Arctic terrestrial and Pacific marine aerosol properties // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 5. P. 5573–5590.
 21. *Турчинович Ю.С., Почуфаров А.О., Сакерин С.М.* Алгоритм контроля качества и восстановления данных измерений концентраций аэрозоля и сажи в морских экспедициях // *Оптика атмосфер. и океана. Физ. атмосф.: тез. докл. XXVII Междунар. симпоз. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. С. С-95–98.*
 22. *Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кabanov Д.М., Калишников Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г.* Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на «Ледовой базе Мыс Баранова» в 2018 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 6. С. 421–429; *Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kozlov V.S., Kruglinsky I.A., Makarov V.I., Makshtas A.P., Popova S.A., Radionov V.F., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I., Chankina O.V., Chernov D.G.* Measurements of physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at research station ice base Cape Baranov in 2018 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 511–520.
 23. *Лебедев А.Т.* Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. М.: Техносфера, 2013. 632 с.
 24. *Makarov V.I., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K.* Daily and seasonal changes of organic and inorganic carbon content in atmospheric aerosol Novosibirsk region // *J. Aerosol. Sci.* 1999. V. 30. P. S255–S256.
 25. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Berkaev D.E., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaev S.E., Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Nikitin S.A., Nikolaev I.B., Sinyatkin S.V., Vobly P.D., Zolotarev K.V., Zhuravlev A.N.* Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // *Phys. Proc.* 2016. V. 84. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005.
 26. *Widory D.* Combustibles, fuels and their combustion products: A view through carbon isotopes // *Comb. Theory Mod.* 2006. V. 10, N 5. P. 831–841. DOI: 10.1080/13647830600720264.
 27. *Widory D., Roy S., Moullec Y.L., Goupil G., Cocherie A., Guerrot C.* The origin of atmospheric particles in Paris: a view through carbon and lead isotopes // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38, iss. 7. P. 953–961. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.11.001.

S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, D.A. Kalashnikova, I.A. Kruglinsky, V.I. Makarov, A.N. Novigatinsky, V.V. Polkin, S.A. Popova, A.O. Pochufarov, G.V. Simonova, Yu.S. Turchinovich, V.P. Shevchenko.
Results of measuring the aerosol characteristics in the 80th cruise of RV “Akademik Mstislav Keldysh” on the route from the Baltic to the Barents Sea.

We discuss the physicochemical characteristics of aerosol over seas of the North Atlantic and Arctic Ocean measured in the 80th and two preceding (the 67th and 71st) cruises of RV “Akademik Mstislav Keldysh”. Most aerosol characteristics (concentrations of aerosol, black carbon, elemental and organic carbon, elemental composition) are shown to be larger in the atmosphere of the Baltic and North Seas as compared to the Norwegian and Barents Seas. The isotopic composition of carbon in aerosol samples was in the range of light values, indicating the predominance of carbon formed during combustion of oil products and natural gas.