

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.4

## Статистическое обобщение характеристик атмосферного аэрозоля над Белым морем (экспедиции 2003–2021 гг.)

В.В. Польшкин<sup>1</sup>✉, Л.П. Голобокова<sup>2</sup>, И.А. Круглинский<sup>1</sup>, А.О. Почуфаров<sup>1</sup>,  
С.М. Сакерин<sup>1</sup>, О.И. Хуриганова<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Лимнологический институт СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.;

после доработки 18.07.2022 г.;

принята к печати 17.08.2022 г.

Приводятся результаты статистического обобщения данных о микрофизических характеристиках и ионном составе аэрозоля в атмосфере Белого моря, полученных в экспедициях 2003–2021 гг. На основе перерасчета результатов измерений с помощью единообразного алгоритма фильтрации данных рассматриваются общая счетная концентрация частиц радиусом 0,2–5 мкм, объемы частиц мелко- и грубодисперсной фракций приводного аэрозоля (радиусом меньше и больше 0,5 мкм), функция распределения частиц по объемам. Оцениваются массовые концентрации в составе аэрозоля восьми водорастворимых ионов:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Анализируются пространственные неоднородности и причины anomalно высоких концентраций и ионного состава аэрозоля.

*Ключевые слова:* Белое море, атмосферный аэрозоль, микрофизические характеристики, ионный состав; White Sea, atmospheric aerosol, microphysical characteristics, ionic composition.

### Введение

Атмосферный аэрозоль оказывает большое влияние на климато-экологическое состояние окружающей среды. В связи с изменениями климата и освоением Арктического бассейна возрастает актуальность исследований физико-химического состава аэрозоля и его изменчивости в высокоширотных районах [1–4]. Одним из таких районов является субарктическое Белое море, относящееся к бассейну Северного Ледовитого океана (СЛО). По климатическим условиям и влиянию на атмосферу общих источников континентальных загрязнений Белое море имеет некоторое сходство с соседним Баренцевым морем. Однако есть и отличительная особенность: Белое море практически полностью окружено сушей и имеет небольшие размеры. Поэтому континентальное влияние здесь априори более существенное.

В августе 2003–2007 гг. в акватории Белого моря проводились ежегодные измерения характеристик атмосферного аэрозоля: счетных концентраций

частиц, массовой концентрации поглощающего вещества (черного углерода), а также химического состава проб аэрозоля. Результаты отдельных морских экспедиций обсуждались в [5–8]. После 2007 г. основное внимание стало уделяться исследованиям аэрозоля над арктическими морями, а измерения в Белом море стали эпизодическими.

В настоящей работе приводятся результаты статистического обобщения данных измерений микрофизических характеристик и ионного состава аэрозоля в атмосфере Белого моря во всех экспедициях 2003–2021 гг. В отличие от [8], в этой работе проведен перерасчет результатов измерений с помощью алгоритма фильтрации данных [9]; отдельно рассматриваются характеристики двух фракций частиц (мелко- и грубодисперсной); анализируются пространственные неоднородности и причины (источники) anomalно высоких концентраций аэрозоля; оценивается его относительный ионный состав в сравнении с морской водой.

### 1. Характеристика экспедиционных измерений

Наши исследования аэрозоля в атмосфере Белого моря начались в 2003 г. в 55-м рейсе НИС «Профессор Штокман» и проводились ежегодно до 2007 г. В последующий период измерения в этом

\* Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Иван Александрович Круглинский (iak@iao.ru); Антон Олегович Почуфаров (poa216@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Ольга Иннокентьевна Хуриганова (khouriganowa@lin.irk.ru).

районе стали кратковременными (1–2 сут), при выходе научно-исследовательских судов (НИС) из Архангельска в арктические экспедиции (или возвращении из них). Места измерений в акватории Белого моря показаны на рис. 1 (цв. вкладка); количество полученных данных приведено в табл. 1.

Таблица 1

Экспедиции, в которых проводились измерения характеристик аэрозоля в атмосфере Белого моря ( $N$  – количество дней измерений,  $n$  – количество проб аэрозоля)

№	Название экспедиции	Месяц, год	$N$	$n$
1	55-й рейс НИС «Профессор Штокман»	август 2003	11	9
2	64-й рейс НИС «Профессор Штокман»	август 2004	9	10
3	71-й рейс НИС «Профессор Штокман»	август 2005	12	14
4	80-й рейс НИС «Профессор Штокман»	август 2006	16	15
5, 6	53, 54-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш»	авг.–окт. 2007	12	12
7	АВ/ЛАП/NAVOS-2015, НЭС «Академик Трешников»	авг.–окт. 2015	3	2
8, 9	66, 67-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш»	авг.–окт. 2016	3	2
10	NAVOS-2013, НЭС «Академик Трешников»	авг.–сент. 2018	3	2
11	71-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	июнь–август 2018	2	1
12	80-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	июнь–август 2020	2	1
13	83-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	июнь–июль 2021	2	1
14	84-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	июль–август 2021	3	2
Общее количество данных			–	78 71

В измерениях микрофизических характеристик аэрозоля использовался одинаковый комплект приборов, включающий фотоэлектрические счетчики частиц АЗ-5 (2003–2007 гг.) [10], АЗ-10 (2015–2021 гг.) [11] и аэталометр (сажемер) МДА [12]. С помощью счетчиков АЗ-5 и АЗ-10 измерялись и рассчитывались: общая счетная концентрация частиц радиусом 0,2–5 мкм ( $N_A$ ); функции их распределения по объемам ( $dV/dr$ ); объемы мелко- и грубодисперсной фракций аэрозоля (радиусом меньше и больше 0,5 мкм) ( $V_f$  и  $V_c$ ). Аэталометром измерялась массовая концентрация в аэрозоле поглощающего вещества в эквиваленте элементного черного углерода  $eBC$  [13]. Измерения концентраций аэрозоля и черного углерода во всех экспедициях проводились в автоматическом режиме, круглосуточно, каждый час. Продолжительность каждого измерительного цикла составляла 10–20 мин. Приборы располагались на высоте 10–12 м над уровнем морской поверхности. Более подробно условия измерений приведены в [5–8].

В результатах экспедиционных измерений встречаются кратковременные пропуски и эпизодические выбросы (ложные замеры) из-за воздействия локальных источников техногенной природы: дым из трубы судна и загрязненный воздух из вентиляционных шахт. Поэтому с помощью специального ал-

горитма [9] осуществлялась фильтрация исходных данных: выявление дефектов (продолжительностью до 3 ч) и восстановление данных.

Кроме приборных измерений с помощью воздухоудовки проводился отбор проб аэрозоля на фильтры для последующего определения ионного состава. Воздух прокачивался через тефлоновый фильтр PTFE с порами диаметром 0,8 мкм. Для осаждения на фильтрах достаточного количества материала объем прокачиваемого воздуха составлял не менее 10 м<sup>3</sup>, а продолжительность прокачки воздуха – от 12 до 24 ч. Вещества с экспонированных фильтров извлекались бидистиллированной водой в ультразвуковой бане WUC-A02H в течение 30 мин и фильтровались через мембранный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. В полученном фильтрате измерялась величина pH на pH-метре Expert. Затем на ионной системе ICS-3000 (Dionex Corporation, Sunnyvale, California, USA) определялись массовые концентрации  $C_i$  восьми водорастворимых ионов:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  [14].

Наряду с абсолютными концентрациями  $C_i$  анализировалось относительное содержание различных ионов с использованием долевых факторов  $FM$  и коэффициентов обогащения  $K_i$  [14, 15]. Долевые факторы  $FM_{cont}$  и  $FM_{sea}$ , связанные соотношением  $FM_{cont} + FM_{sea} = 1$ , позволяют оценить вклад в ионный состав аэрозоля морских источников (в первую очередь  $Na^+$  и  $Cl^-$ ) в сравнении с вкладом преимущественно континентальных источников. Расчет долевого фактора  $FM_{cont}$  проводился по формуле [15]:

$$FM_{cont} = \left[ \sum (C_i^a - k_i^{sw} C_{Na}^a) \right] / \left[ \sum (C_i^a) \right], \quad (1)$$

где  $C_i^a$  – массовая концентрация  $i$ -го иона;  $C_{Na}^a$  – массовая концентрация  $Na^+$ ;  $k_i^{sw} = C_i^{sw} / C_{Na}^{sw}$  – отношение концентраций  $i$ -го иона к концентрации  $Na^+$  в морской воде;  $\sum C_i^a$  – суммарная концентрация всех ионов в аэрозоле.

С помощью коэффициентов обогащения  $K_i$  оценивается ионный состав аэрозоля относительно морской воды. Коэффициенты  $K_i$  рассчитывались по соотношению концентраций разных ионов, нормированных на концентрацию  $Na^+$ , в составе аэрозоля и морской воды [16]:

$$K_i = (C_i^a / C_{Na}^a) / (C_i^{sw} / C_{Na}^{sw}), \quad (2)$$

где  $(C_i^a / C_{Na}^a)$  – концентрация  $i$ -го иона относительно  $Na^+$  в составе аэрозоля;  $(C_i^{sw} / C_{Na}^{sw})$  – концентрация  $i$ -го иона относительно  $Na^+$  в составе морской воды. Заметим, что  $K_i \gg 1$  свидетельствует о континентальном (включая антропогенное) происхождении ионов.

## 2. Микрофизические характеристики аэрозоля

В данных измерений первых экспедиций [9] отмечались повышенные концентрации аэрозоля и черного углерода в проливе Горло в сравнении с центральной частью Белого моря. Предпосылки

повышенного содержания аэрозоля в проливе действительно есть: плотность судоходства и близость к континентальным источникам. Однако анализ общего массива данных (рис. 2) не подтвердил этот предварительный вывод: более высокие концентрации чаще всего наблюдаются в Двинском заливе (обозначены звездочками). Пунктиром на рис. 2 обозначена граница высоких концентраций, в три раза превышающих средние значения. В Двинском заливе высокие концентрации  $N_A$  и  $eBC$  зарегистрированы в 51 и в 52% случаев соответственно. При этом максимальные концентрации достигали значений:  $N_A = 97,5 \text{ см}^{-3}$  и  $eBC = 2750 \text{ нг/м}^3$ . В остальной части Белого моря высокие концентрации  $N_A$  и  $eBC$  зарегистрированы в 3 и в 13% случаев соответственно.

Результаты траекторного анализа движения воздушных масс (модель HYSPLIT [17]) показали, что в большинстве случаев высокие  $N_A$  и  $eBC$  были обусловлены ближними (местными) переносами воздушных масс с территории Архангельской области. Следовательно, причинами повышенного загрязнения атмосферы Двинского залива являются антропогенное воздействие крупного портового города Архангельска и интенсивное судоходство в устье Северной Двины. Кроме местных источников, на увеличение концентраций  $N_A$  и  $eBC$  влияют также дальние переносы загрязнений. Например, высокие концентрации в приземной атмосфере Белого моря наблюдались с 10 по 16 августа 2005 г. (обведены на рис. 2):  $N_A = 53,8 \text{ см}^{-3}$ ,  $eBC = 2461 \text{ нг/м}^3$ . Траектории переноса воздуха в этом случае проходили через Северное море (платформы нефтегазодобычи) и промышленно развитые районы Европы (рис. 3, цв. вкладка).

Малое количество данных и разная плотность их распределения по акватории Белого моря не позволяют построить карту пространственного распределения концентраций аэрозоля. Поэтому для количественной оценки пространственных неоднородностей были рассмотрены данные модельных расчетов — реанализа MERRA-2 [18]. На карте на рис. 1 приведено среднее пространственное распределение концентраций  $eBC$  над Белым морем, рассчитанное по данным реанализа для периодов морских экспедиций: август 2003–2007, 2015–2018, 2020 г. Данные независимого источника (MERRA-2) подтверждают более высокую концентрацию черного углерода в Двинском заливе: среднее  $eBC \approx 100 \text{ нг/м}^3$ , а в остальной части Белого моря (включая пролив Горло)  $eBC < 80 \text{ нг/м}^3$ .

Сравнение характеристик аэрозоля в экспедициях 2003–2007 и 2015–2021 гг. показало [19], что в первый период средние концентрации были существенно выше:  $eBC$  и  $V_f$  в 2,7–2,9 раз, а  $V_c$  в 9,4 раза. Причина завышения средних характеристик аэрозоля в 2003–2007 гг. состоит в более частых измерениях в Двинском заливе и во время выносов загрязнений (например, с 10 по 16 августа 2005 г.). Если исключить такие ситуации, то средние характеристики в оба периода выравниваются и теряется смысл рассматривать многолетнюю изменчивость. Поэтому оценим только пространственные неоднородности — отличие характеристик аэрозоля в Двинском заливе от остальной части Белого моря. В табл. 2 приведены статистические характеристики аэрозоля в двух районах и в целом для Белого моря за общий период измерений (2003–2021 гг.). Район Двинского залива выделялся по широте от  $64,5$  до  $65,5^\circ$  с.ш., по долготе от  $38,2$  до  $41^\circ$  в.д.

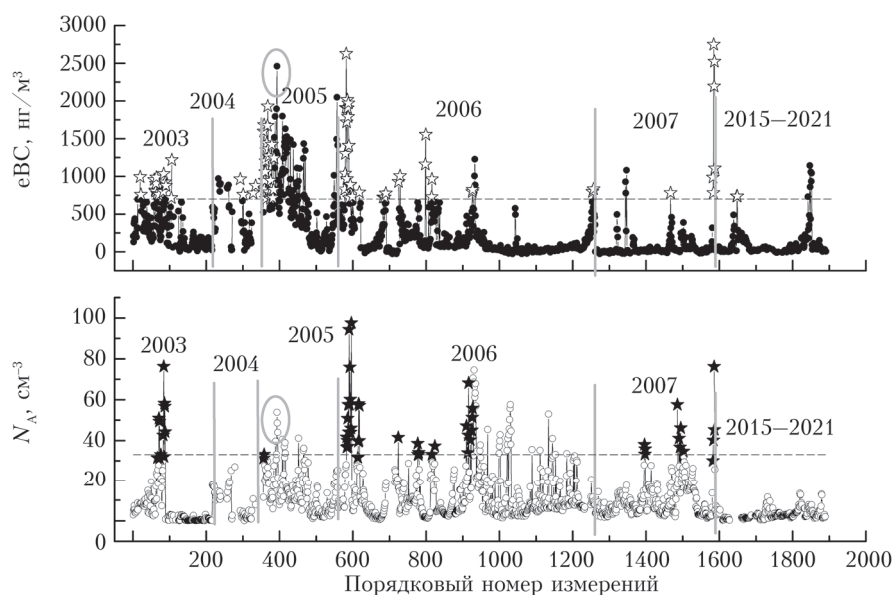


Рис. 2. Вариации концентраций черного углерода и аэрозоля над Белым морем за весь период измерений (данные измерений в Двинском заливе обозначены звездочками)

Таблица 2

Средние ( $\pm$  СКО) значения характеристик аэрозоля в акватории Белого моря

Характеристика	Двинской залив	Основная часть Белого моря	Все данные (2003–2021 гг.)	Баренцево море [19]
$N_A$ , $\text{см}^{-3}$	$46,23 \pm 14,88$	$9,25 \pm 9,41$	$10,59 \pm 11,88$	$3,67 \pm 3,14$
$V_f$ , $\text{мкм}^3/\text{см}^3$	$3,80 \pm 1,68$	$0,761 \pm 0,901$	$0,871 \pm 1,098$	$0,29 \pm 0,29$
$V_c$ , $\text{мкм}^3/\text{см}^3$	$21,18 \pm 16,23$	$12,71 \pm 23,23$	$13,01 \pm 23,08$	$1,80 \pm 3,78$
eBC, $\text{нг}/\text{м}^3$	$1118 \pm 483$	$193 \pm 293$	$233 \pm 358$	$45 \pm 68$

Из табл. 2 видно, что средние концентрации аэрозоля и черного углерода в Двинском заливе существенно больше, чем в остальной части Белого моря: eBC в 9 раз;  $V_f$  в 13 раз;  $V_c$  в 1,7 раз. Район Двинского залива контрастно выделяется и по данным реанализа MERRA-2 (см. рис. 1). Общие средние значения характеристик аэрозоля для Белого моря (предпоследний столбец) не сильно отличаются от значений для основной части Белого моря, так как весомой вклад данных, полученных в Двинском заливе, примерно на порядок меньше.

Средние характеристики аэрозоля в основной части Белого моря существенно меньше, чем над соседним Баренцевым морем: eBC в 4,3 раза;  $V_f$  в 2,6 раза;  $V_c$  в 7 раз. Еще большее отличие (превышение) концентраций аэрозоля и черного углерода наблюдается над Двинским заливом. Более детальное представление об особенностях концентраций аэрозоля в трех районах дают функции распределения частиц по объемам  $dV/dr$ .

Из рис. 4 видно, что основные различия  $dV/dr$  наблюдаются для субмикронных частиц; их объемное содержание уменьшается в северном направлении (от Двинского залива до Баренцева моря)

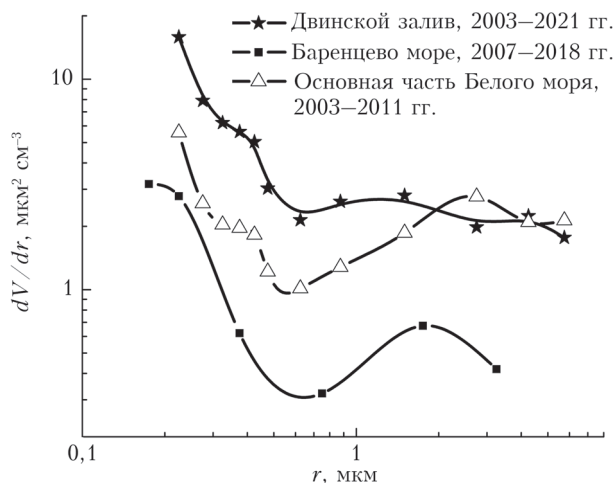


Рис. 4. Средние функции распределения частиц по объемам ( $dV/dr$ ) в атмосфере Белого и Баренцева [20, 21] морей

примерно на порядок. Объемное содержание более крупных частиц ( $r > 1,5$  мкм) в двух районах Белого моря примерно одинаковое, в несколько раз больше, чем над Баренцевым морем.

### 3. Ионный состав аэрозоля

В табл. 3 представлены средние значения концентраций ионов и их СКО в составе аэрозоля в двух районах Белого моря и для сравнения в Баренцевом море [20]. В конце таблицы приводятся средние суммарные значения ионов и статистика долевого фактора  $FM_{\text{cont}}$ .

Таблица 3

Средние ( $\pm$  СКО) концентрации ионов,  $\text{мкг}/\text{м}^3$ , в составе аэрозоля и статистика долевого фактора  $FM_{\text{cont}}$  над Белым и Баренцевым морями

Ион	Белое море, основная часть	Двинской залив	Баренцево море [20]
$\text{Cl}^-$	$5,7 \pm 6,7$	$7,4 \pm 4,9$	$1,7 \pm 1,5$
$\text{Na}^+$	$2,9 \pm 3,3$	$3,5 \pm 2,6$	$0,6 \pm 0,5$
$\text{SO}_4^{2-}$	$2,5 \pm 2,6$	$3,5 \pm 1,8$	$0,6 \pm 0,7$
$\text{Ca}^{2+}$	$0,4 \pm 0,7$	$1,2 \pm 1,3$	$0,2 \pm 0,3$
$\text{K}^+$	$0,2 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,3$	$0,2 \pm 0,4$
$\text{Mg}^{2+}$	$0,2 \pm 0,4$	$0,5 \pm 0,6$	$0,06 \pm 0,12$
$\text{NH}_4^+$	$0,6 \pm 0,7$	$0,9 \pm 0,9$	$0,2 \pm 0,3$
$\text{NO}_3^-$	$0,5 \pm 0,4$	$0,6 \pm 0,2$	$0,02 \pm 0,05$
$C_\Sigma$	$13,2 \pm 13,2$	$18,7 \pm 11,1$	—
$FM_{\text{cont}}$	$0,3 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,3$	0,5

Большой разброс СКО концентраций ионов, представленных в табл. 3, свидетельствует о значительной неоднородности химического состава аэрозоля. Из средних статистических данных за 2003–2021 гг. видно, что в составе аэрозоля преобладали ионы морского происхождения —  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  и континентального —  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Наибольший вклад в средние значения ионного состава аэрозоля вносят данные измерений в районе Двинского залива.

Мощными источниками выбросов в атмосферу в этом районе являются промышленные предприятия Архангельска и особенно целлюлозно-бумажные производства, расположенные в бассейне Северной Двины [22]. Переносу загрязняющих примесей способствовали ветры юго-восточного направления со скоростями 5–10 м/с [7]. По данным станции Зимнегорского маяка порывы приземного ветра иногда доходили до 19 м/с. В составе аэрозоля Двинского залива главными ионами континентального происхождения были  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ; концентрации ионов  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{K}^+$  превышали средние значения для всего Белого моря. Особенно высокие коэффициенты обогащения в Двинском заливе относительно основной части Белого моря у ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  (в 4 раза) и  $\text{Ca}^{2+}$  (в 3 раза). Высокие значения

коэффициентов обогащения аэрозольных частиц ионами  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в районе Двинского залива и на всей акватории Белого моря свидетельствуют о значимом вкладе континентальных источников в формирование химического состава аэрозоля (табл. 4).

Таблица 4

Средние коэффициенты обогащения  $K_i$  атмосферного аэрозоля ионами над Белым и Баренцевым морями

Ион	Белое море, основная часть	Двинской залив	Баренцево море [20]
$\text{Na}^+$	$0,8 \pm 0,3$	$0,8 \pm 0,4$	—
$\text{K}^+$	$3,4 \pm 5,7$	$5,9 \pm 9,8$	5,1
$\text{Mg}^{2+}$	$0,7 \pm 1,2$	$1,4 \pm 1,5$	1,3
$\text{Ca}^{2+}$	$8 \pm 14$	$23 \pm 39$	15,8
$\text{Cl}^-$	$1,5 \pm 1,6$	$2,2 \pm 2,6$	1,8
$\text{SO}_4^{2-}$	$8 \pm 17$	$30 \pm 69$	4,1

Несмотря на высокие концентрации ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , коэффициенты обогащения этими ионами близки к единице, что свидетельствует об их морском происхождении. В целом, по статистическим данным 2003–2021 гг., концентрации ионов в аэрозоле над Белым морем были выше в  $2,5 \div 4,5$  раза, чем над Баренцевым морем. Влияние континентальных источников на формирование химического состава приводного аэрозоля Белого моря, которое является внутренним, больше. Однако, несмотря на более низкие концентрации ионов в аэрозоле над Баренцевым морем, влияние континентальных источников на формирование его состава также существенно, о чем свидетельствуют коэффициенты обогащения континентальных ионов и долевого фактор  $FM_{\text{cont}}$  (см. табл. 3 и 4).

### Заключение

Статистическое обобщение результатов многолетних измерений счетных концентраций частиц  $N_A$ , массовой концентрации поглощающего вещества  $eBC$ , а также химического состава проб аэрозоля в приводной атмосфере Белого моря в 2003–2021 гг. показало следующее.

В большинстве случаев высокие концентрации  $N_A$ ,  $eBC$  и компонентов ионного состава атмосферного аэрозоля были обусловлены местными переносами воздушных масс с территории Архангельской области, которые подвержены влиянию крупного портового города, интенсивного судоходства в устье Северной Двины, а также целлюлозно-бумажного производства. Наблюдались аномально высокие значения  $N_A = 97,5 \text{ см}^{-3}$  и  $eBC = 2750 \text{ нг/м}^3$ . Максимальные осредненные концентрации, объемы аэрозоля и поглощающего вещества приходится на район Двинского залива. Средние концентрации  $eBC$  в этом районе выше, чем в основной части Белого моря, почти в 9 раз, счетная концентрация  $N_A$  и объемная концентрация субмикронных частиц  $V_f$  — в 5 раз, крупнодисперсных частиц  $V_c$  — в 1,7 раза. Объем субмикронной фракции в Двинском заливе может превышать значение в Баренце-

вом море на величину до одного порядка. Высокие коэффициенты обогащения аэрозольных частиц в районе Двинского залива выявлены для ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Повышенные коэффициенты обогащения аэрозоля аналогичными ионами характерны для всей акватории Белого моря, что может свидетельствовать об антропогенном влиянии на формирование химического состава аэрозоля. Сравнение средних статистических характеристик ионного состава аэрозоля Белого моря за весь период измерений (2003–2021 гг.) с данными, полученными для Баренцева моря, показывает, что концентрации ионов в аэрозоле над Белым морем были выше в  $2,5 \div 4,5$  раза.

**Благодарности.** Авторы признательны за предоставленную возможность выполнять траекторный анализ, пользуясь моделью HYSPLIT, сотрудникам Лаборатории воздушных ресурсов Американской администрации по исследованию океана и атмосферы (NOAA).

Авторы выражают благодарность В.С. Козлову, Вас.В. Полькину, А.Б. Тихомирову за проведение измерений характеристик аэрозоля в экспедициях 2003–2007 гг., а также В.П. Шмаргунову за подготовку аппаратуры.

**Финансирование.** Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-77-20025).

### Список литературы

1. 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.
2. Ferrero L., Sangiorgi G., Perrone M.G., Rizzi C., Cataldi M., Markuszewski P., Pakszyk 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 // Atmosphere. 2019. V. 10, N 54. DOI: 10.3390/atmos10020054.
3. 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.
4. Xing J., Bian L., Hu Q., Yu J., Sun C., Xie Z. Atmospheric black carbon along a cruise path through the Arctic Ocean during the Fifth Chinese Arctic Research Expedition // Atmosphere. V. 2014, N 5. P. 292–306. DOI: 10.3390/atmos5020292.
5. Польшин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П. Ионный состав приводного аэрозоля Белого моря в августе 2003–2006 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, N 1. С. 988–1003.
6. Козлов В.С., Тихомиров А.Б., Панченко М.В., Шмаргунов В.П., Полькин В.В., Сакерин С.М., Луцицын А.П., Шевченко В.П. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в приводной атмо-

- сфере Белого моря по данным одновременных корабельных и береговых измерений в августе 2006 г. // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 8. С. 767–776; *Kozlov V.S., Tikhomirov A.B., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Pol'kin V.V., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P.* Optical and microphysical parameters of aerosol in the near-water atmosphere of the White Sea as assessed from the data of simultaneous ship-borne and coast-based measurements in August 2006 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 5. P. 517–526.
7. *Полькин В.В., Голобокова Л.П., Погадаева Т.В., Козлов В.С., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Панченко М.В., Пескова М.А., Ходжер Т.В., Шевченко В.П.* Состав аэрозолей приводного слоя атмосферы над Белым морем во второй половине августа 2003 и 2004 гг. // *Фундаментальные исследования океанов и морей.* Н.П. Лаверов (ред.). М.: Наука, 2006. С. 413–439.
  8. *Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Филитова У.Г., Ходжер Т.В., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Приводный аэрозоль Белого и Карского морей в августе-сентябре 2007 г. // *Метеорологические и геофизические исследования.* М.: Paulsen, 2011. С. 199–214.
  9. *Turchinovich Yu.S., Pochufarov A.O., Sakerin S.M.* Algorithm of controlling the quality and retrieval of data from measurements of aerosol and black carbon concentrations in marine expeditions // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. 119161U [11916-20]. DOI: 10.1117/12.2600591.
  10. *Шмаргунов В.П., Полькин В.В.* Аэрозольный счетчик на базе АЗ-5 // *Приборы и техника эксперимента.* 2007. № 2. С. 65.
  11. *Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10-0.* URL: <https://eco-intech.com/product/schetchnik-chastits-az-10/> (дата обращения: 6.05.2022).
  12. *Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V.* Modified aethalometer for monitoring of black carbon concentration in atmospheric aerosol and technique for correction of the spot loading effect // *Proc. SPIE.* 2016, 1003530. DOI: 10.1117/12.2248009.
  13. *Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.-M., Baltensperger U., Holzner-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X.-Y.* Recommendations for reporting “black carbon” measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 8365–8379. DOI: 10.5194/acp-13-8365-2013.
  14. *Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Жученко Н.А., Маринайте И.И.* Химический состав приземного атмосферного аэрозоля в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген) по результатам многолетних исследований // *Лед и снег.* 2020. Т. 60, № 1. С. 85–97. DOI: 10.31857/S2076673420010025.
  15. *Полькин В.В., Щелканов Н.Н., Голобокова Л.П., Панченко М.В.* Сравнение методик оценки вклада континентальных и морских источников в ионный состав приводного аэрозоля Белого моря // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 1. С. 23–26.
  16. *Millero F.J.* *Chemical Oceanography.* 4th ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016. 591 p.
  17. *Air Resources Laboratory – HYSPLIT, Modified April 1, 2020,* <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access February 2022).
  18. *Giovanni: The Bridge between Data and Science v 4.35.* <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (last access: February 2022).
  19. *Полькин В.В., Голобокова Л.П., Круглинский И.А., Почуфаров А.О., Сакерин С.М., Хуриганова О.И.* Статистическое обобщение характеристик атмосферного аэрозоля над Белым морем: экспедиции 2003–2021 годах // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVIII Междунар. симпоз., г. Томск, 4–8 июля 2022 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. С23–С28. ISBN 978-5-94458-190-7.*
  20. *Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г.* Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних арктических районах // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 8. С. 640–646; *Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Chernov D.G.* Comparison of average aerosol characteristics in neighboring Arctic regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 33–40.
  21. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Pol'kin 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 // *Atmosphere.* 2020. V. 11, N 11. P. 1170. DOI: 10.3390/atmos1111170.
  22. *Целлюлозно-бумажное производство / Технология и оборудование лесохимических производств.* [Электронный ресурс]. <http://msd.com.ua>.

*V.V. Polkin, L.P. Golobokova, I.A. Kruglinsky, A.O. Pochufarov, S.M. Sakerin, O.I. Khuriganova.*  
**Statistical generalization of the characteristics of atmospheric aerosol over the White Sea (expeditions 2003–2021).**

Results of a statistical generalization of data on the microphysical characteristics and ionic composition of aerosols in the atmosphere of the White Sea measured during the expeditions of 2003–2021 are presented. Based on the recalculation of the measurement results using a uniform data filtering algorithm, the total number concentration of particles with a radius of 0.2–5  $\mu\text{m}$ , the volumes of fine and coarse near-surface aerosol particles less than and more than 0.5  $\mu\text{m}$  radius, and the function of particle distribution over volume are considered. The mass concentrations of eight water-soluble ions composing aerosols ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$ ) are estimated. Spatial inhomogeneities and causes of abnormally high concentrations and ionic composition of the aerosols are analyzed.

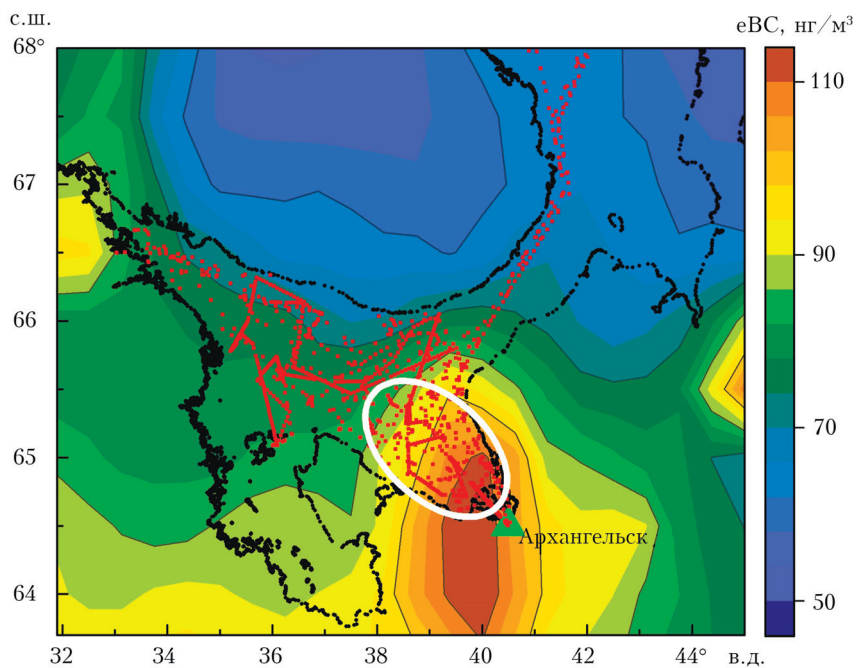


Рис. 1. Карта мест измерений характеристик аэрозоля (красные точки) и среднее пространственное распределение концентраций черного углерода по данным реанализа MERRA-2

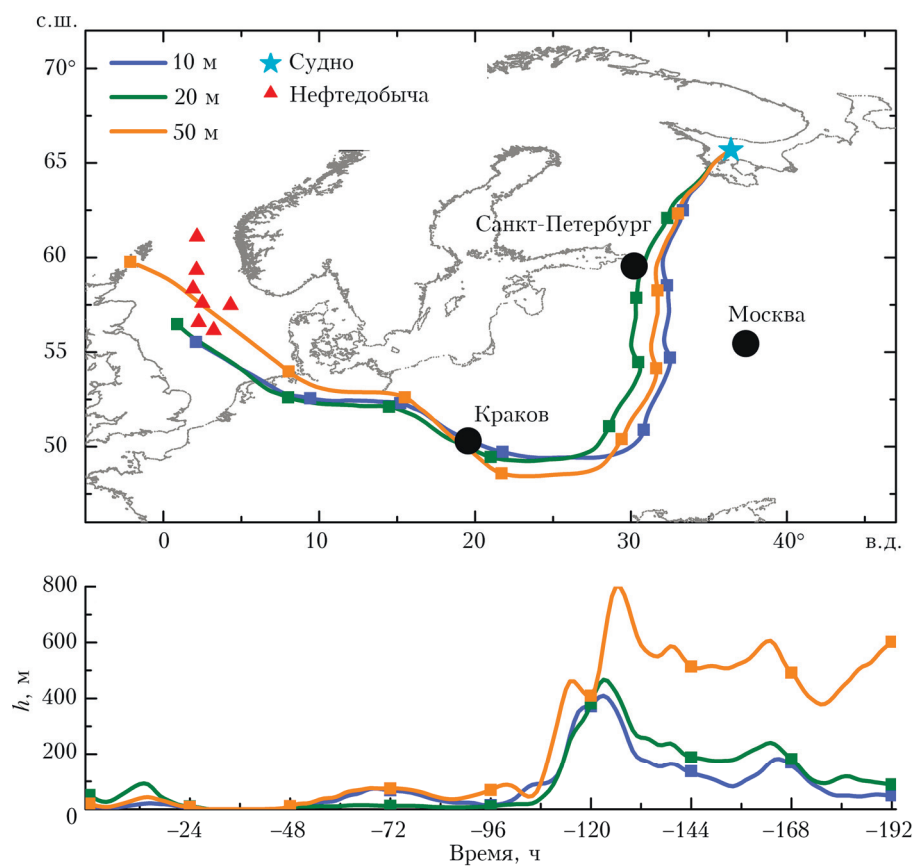


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс в район измерений (на высотах 10, 20 и 50 м) в ситуации 14 августа 2005 г.