

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.4

## Пространственное распределение и средние характеристики атмосферного аэрозоля в акватории Карского моря

Д.М. Кабанов<sup>✉1</sup>, И.А. Круглинский<sup>1</sup>, А.О. Почуфаров<sup>1</sup>, С.М. Сакерин<sup>1</sup>,  
О.Р. Сидорова<sup>2</sup>, Ю.С. Турчинович<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>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Поступила в редакцию 27.07.2023;

после доработки 25.08.2023;

принята к печати 03.09.2023

На основе многолетних исследований в акватории Карского моря (11 экспедиций в 2007–2022 гг.) впервые представлено статистическое обобщение характеристик атмосферного аэрозоля: объемного содержания субмикронного и грубодисперсного аэрозоля ( $V_f$  и  $V_c$ ), массовой концентрации черного углерода (еBC) и спектральной аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы. В среднем пространственном распределении хорошо проявилось повышенное содержание субмикронного и поглощающего аэрозоля в юго-западной части Карского моря и минимальное содержание – в северной. Различие средних  $V_f$  и еBC в этих районах составляет 30–60%. Средние значения характеристик аэрозоля для всего Карского моря составили: АОТ атмосферы (0,5 мкм) – 0,043 при показателе Ангстрема 0,8; еBC – 22,8 нг/м<sup>3</sup>;  $V_f$  и  $V_c$  – 0,26 и 1,39 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> соответственно. Показано, что средние  $V_f$  и еBC над Карским морем занимают промежуточное положение между соответствующими значениями, полученными на полярной станции «Мыс Баранова» и в Баренцевом море.

**Ключевые слова:** арктическая атмосфера, аэрозоль, черный углерод, Карское море; arctic atmosphere, aerosol, black carbon, Kara Sea.

### Введение

Актуальность исследований атмосферного аэрозоля обусловлена его важной ролью в распространении оптического излучения (рассеяние, поглощение) и формировании климата [1]. Кроме того, аэрозоль наряду с речным стоком участвует в массообмене различных веществ между континентом и океаном [2]. Повышенное внимание в последние годы уделяется исследованиям аэрозоля в Арктической зоне, отличающейся большой динамикой природной среды и уязвимостью к изменениям климата. Большую часть территории Арктики занимает Северный Ледовитый океан (СЛО), а континентальная часть представлена малонаселенными районами тундры и арктической пустыни, которые значительную часть времени покрыты льдом и снегом. Поэтому в Арктике ослаблено влияние местных источников аэрозоля, кроме морского. Дефицит местных

источников восполняется дальними переносами субмикронного аэрозоля природного и антропогенного происхождения из средних широт Евразии и Северной Америки. Наиболее значительные изменения характеристик аэрозоля наблюдаются при выносах загрязненного воздуха из районов массовых лесных пожаров и промышленных агломераций [3–8]. Кроме дальних переносов, большее влияние могут оказывать выносы аэрозоля из соседних континентальных районов, граничащих с арктическими морями. Например, для атмосферы Карского моря дополнительным источником загрязнений являются выбросы продуктов сжигания попутного газа на предприятиях добычи и переработки нефти и газа, расположенных на территории Ненецкого, Ямало-Ненецкого и Таймырского автономных округов (АО).

Исследования аэрозоля в Российском секторе Арктики активизировались в последние 10–15 лет: организованы наблюдения на полярных станциях («Тикси», «Баренцбург», «Мыс Баранова») [9–11], регулярно проводятся морские [12–15] и самолетные [16, 17] экспедиции. Результаты натуральных измерений характеристик аэрозоля дополняются модельными расчетами, в которых учитываются основные источники аэрозольных эмиссий и траекторий переноса воздушных масс (см., например, [6, 7, 18–20]).

\* Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Иван Александрович Круглинский (iak@iao.ru); Антон Олегович Почуфаров (roa216@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Ольга Руслановна Сидорова (olsid@agi.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru).

Цель работы – исследование аэрозоля в акватории Карского моря: статистическое обобщение данных многолетних измерений в 11 морских экспедициях и анализ пространственно-временной изменчивости характеристик аэрозоля по данным нескольких экспедиций осенью 2022 г. Данные морских экспедиций сопоставляются с модельными расчетами (реанализ MERRA-2), которые основаны на ассимиляции данных наземных или спутниковых измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, траекторий движения воздуха, моделей метеорологических полей и 3D-распределений различных типов аэрозоля [21].

## 1. Материалы и методы исследований

С 2007 г. нами ведутся исследования атмосферного аэрозоля в высокоширотных районах СЛО. В табл. 1 представлен список морских экспедиций в Карском море. Во всех экспедициях использовался комплект приборов в составе солнечного фотометра SPM, фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-10 и аэлометра МДА [22]. Методики измерений и обработки данных рассматривались в предшествующих работах (см., например, [13–15]).

Измерительные приборы на борту НИС располагались на высоте 12–15 м н.у.м. Концентрации аэрозоля и черного углерода измерялись круглосу-

точно, ежечасно. Продолжительность одного цикла измерений составляла 10–20 мин, с 2021 г. измерения проводились непрерывно. Фотометрические наблюдения (измерения АОТ) выполнялись только в ситуациях, когда облачность не закрывала солнечный диск. Вследствие этого ряды наблюдений АОТ прерывистые и объем данных небольшой.

На основе данных счетчика АЗ-10 рассчитывались: концентрация частиц в диапазоне радиусов 0,15–5 мкм  $N_a$ ; объемное содержание частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля (радиусом меньше и больше 0,5 мкм)  $V_f$  и  $V_c$ . С помощью аэлометра измерялась массовая концентрация поглощающего вещества в составе аэрозоля в эквиваленте элементарного черного углерода eBC [23]. По данным наблюдений солнечного фотометра определялись: спектральные АОТ атмосферы  $\tau^a(\lambda)$ ; параметр Ангстрема  $\alpha$ ; мелко- и грубодисперсные составляющие АОТ ( $\tau^f$  и  $\tau^c$ ) на длине волны 0,5 мкм. Раздельный анализ характеристик двух фракций аэрозоля обусловлен их разным генезисом, временем жизни и дальностью распространения в атмосфере. Вариации мелкодисперсных составляющих ( $V_f$  и  $\tau^f$ ) отражают влияние выносов аэрозоля с континента, а грубодисперсных ( $V_c$ ,  $\tau^c$ ) – местных источников.

На рис. 1, а показана карта пунктов измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в акватории Карского моря. Общее количество

Таблица 1

Экспедиции, в которых проводились исследования аэрозоля в Карском море

| №    | Период                   | НИС/Экспедиция                                    | $N_m$ | $N_\tau$ |
|------|--------------------------|---|-------|----------|
| 1    | Сентябрь–октябрь 2007 г. | «Академик Мстислав Келдыш»/54-й рейс              | 26    | –        |
| 2    | Август–сентябрь 2013 г.  | «Академик Федоров»/NABOS-2013                     | 4     | –        |
| 3    | Август–сентябрь 2015 г.  | «Академик Трешников»/NABOS-2015                   | 15    | –        |
| 4    | Июль–август 2016 г.      | «Академик Мстислав Келдыш»/66-й рейс              | 35    | 18       |
| 5    | Август–сентябрь 2018 г.  | «Академик Трешников»/«Арктика-2018»               | 7     | 1        |
| 6    | Август–сентябрь 2019 г.  | «Профессор Мультановский»/«Трансарктика-2019»     | 8     | 1        |
| 7    | Июнь–июль 2021 г.        | «Академик Мстислав Келдыш»/83-й рейс              | 11    | 7        |
| 8, 9 | Сентябрь–ноябрь 2022 г.  | «Академик Мстислав Келдыш»/89- и 90-й рейсы       | 43    | 6        |
| 10   | Сентябрь 2022 г.         | «Академик Трешников»                              | 5     | –        |
| 11   | Сентябрь–ноябрь 2022 г.  | Ледовая самодвижущаяся платформа «Северный полюс» | 1     | –        |

Примечание.  $N_m$  и  $N_\tau$  – количество дней измерений микрофизических характеристик и АОТ.

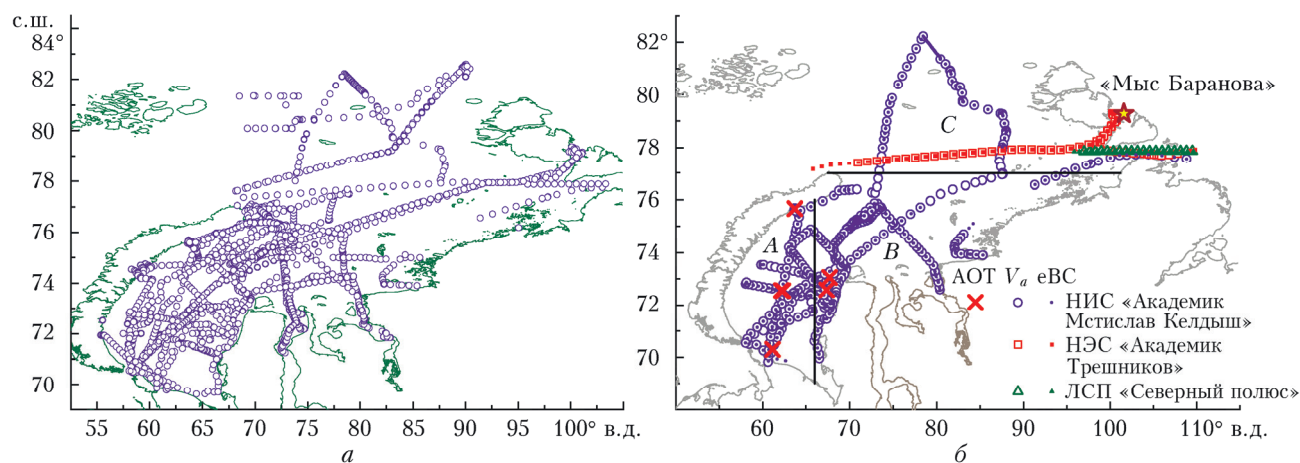


Рис. 1. Карта пунктов измерений характеристик аэрозоля в Карском море: а – в 11 экспедициях 2007–2022 гг.; б – осенью 2022 г. (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

дней измерений составило: приземных концентраций аэрозоля и черного углерода – 155 дней измерений, АОТ атмосферы – 33 дня. Большинство экспедиционных измерений (94%) проведено в период с августа по октябрь.

Существенное влияние на анализируемые характеристики могут оказывать относительно редкие случаи аномально высоких концентраций аэрозоля, обусловленных выносами загрязнений из континентальных районов (например, дымов лесных пожаров), а также техногенными воздействиями судна при неблагоприятном направлении ветра. Поэтому расчеты проводились в двух вариантах: по общему массиву данных и без учета «аномалий».

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Статистическое обобщение экспедиционных данных

Общее представление о пространственном распределении характеристик аэрозоля над Карским морем дает карта (рис. 2, цв. вкладка), построенная методом сплайн-интерполяции измеренных данных в варианте «без аномалий». Программа сплайн-интерполяции входит в стандартный пакет Origin [24]. Самые высокие значения характеристик аэрозоля наблюдаются в юго-западной части Карского моря (район 1). Достаточно большие концентрации еВС проявились также на юге центральной части – вблизи Таймыра (район 2). Повышенное содержание поглощающего и субмикронного аэрозоля в этих районах обусловлено близостью к крупным предприятиям добычи и переработки минеральных ресурсов, расположенным в Ненецком, Ямало-Ненецком и Таймырском АО (включая промышленную агломерацию Норильска). В целом над Карским морем и в районе 3 (северная часть Карского моря) прослеживается уменьшение средних значений большинства характеристик аэрозоля в северо-восточном направлении. Исключением является повышенное содержание  $V_c$  в центральной части 3-го района.

В табл. 2 представлены статистические характеристики концентраций еВС и объемов частиц

$V_f$ ,  $V_c$ , рассчитанных для всего Карского моря и трех отдельных его районов. Из приведенных данных видно, что небольшое число аномально высоких концентраций искажает статистические оценки и приводит к неправдоподобным результатам. Например,  $V_f$  оказалась максимальной в самом северном районе 3. При исключении «аномалий» (см. данные в скобках в табл. 2) результаты становятся адекватными:  $V_f$  и еВС убывают от района 1 к району 3 в 1,3–1,6 раза. Иной вид имеет распределение  $V_c$  по районам. Оно определяется не дальними переносами с континента, а местными факторами: генерацией морского аэрозоля, которая зависит от скорости ветра и волнения моря. Поэтому высокие значения  $V_c$  в районе 3, наиболее удаленном от континента, вполне объяснимы.

На рис. 3 приведены результаты сравнения среднего содержания поглощающего и субмикронного аэрозоля над Карским морем с соответствующими значениями в других районах Арктики, где велись измерения: над Баренцевым морем [15] и на полярных станциях «Мыс Баранова» [10], «Баренцбург» [11], – для основного периода морских экспедиций (август – октябрь). Из приведенных данных видно, что средние  $V_f$  и еВС над Карским морем занимают промежуточное положение между максимальными значениями над Баренцевым морем и минимальными на «Мысе Баранова». Вместе с тем различие средних концентраций в рассматриваемых районах не превышает среднеквадратическое отклонение.

Из-за меньшего числа данных статистические характеристики АОТ рассчитаны для всего Карского моря (табл. 3 и рис. 3, б).

Сравнение со средними данными в соседних районах («Мыс Баранова» [10] и Баренцево море [15]) показало, что Карское море отличается самыми низкими значениями АОТ в видимой области спектра и пологой спектральной зависимостью. Такой характер спектрального хода АОТ обусловлен малым содержанием мелкодисперсного аэрозоля:  $\tau^f$  примерно в три раза меньше, чем в соседних районах Арктики.

Т а б л и ц а 2

Средние ( $\pm$  СКО) значения приземных характеристик аэрозоля над Карским морем и отдельными его районами

| Характеристика                            | Карское море                 | Район 1                      | Район 2                      | Район 3                      |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $V_f$ , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup> | 0,33 ± 0,36<br>(0,26 ± 0,23) | 0,35 ± 0,35<br>(0,29 ± 0,25) | 0,28 ± 0,30<br>(0,24 ± 0,19) | 0,38 ± 0,52<br>(0,23 ± 0,25) |
| $V_c$ , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup> | 1,81 ± 2,49<br>(1,39 ± 1,62) | 2,10 ± 2,66<br>(1,58 ± 1,79) | 1,08 ± 1,60<br>(0,98 ± 1,29) | 2,43 ± 3,07<br>(1,71 ± 1,58) |
| еВС, нг/м <sup>3</sup>                    | 32,1 ± 70,0<br>(22,8 ± 20,2) | 30,0 ± 31,7<br>(24,4 ± 18,9) | 38,2 ± 106<br>(23,9 ± 21,4)  | 24,5 ± 51,8<br>(15,2 ± 19,6) |
| MERRA-2:<br>еВС, нг/м <sup>3</sup>        | 38,3 ± 46,5                  | 46,3 ± 59,0                  | 45,4 ± 51,4                  | 32,2 ± 37,1                  |

Примечание. В скобках приведены средние значения без учета «аномалий».

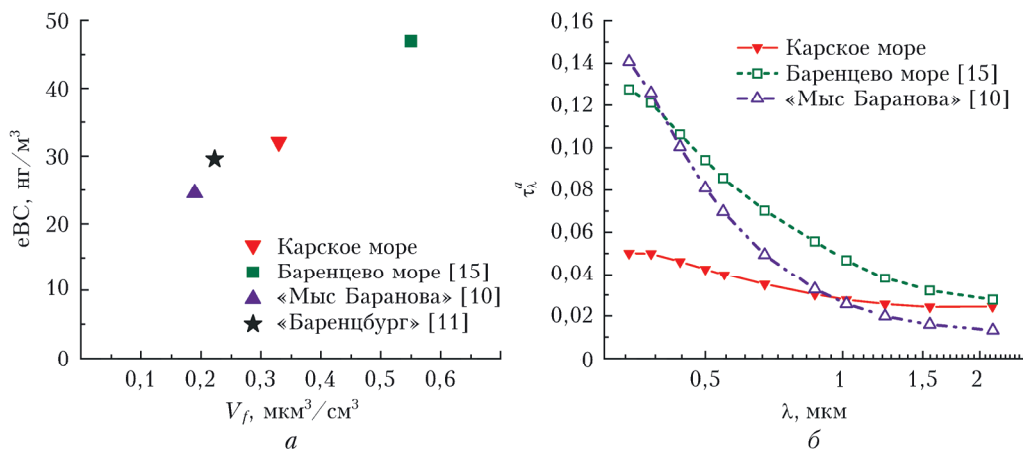


Рис. 3. Средние  $V_f$ ,  $eBC$  (а) и спектральные зависимости АОТ (б) над Карским морем в сравнении с соседними районами (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

Таблица 3

Средние значения ( $\pm$  СКО) характеристик АОТ атмосферы над Карским, Баренцевым морями и на «Мысе Баранова»

| Характеристика | Карское море      | Баренцево море    | «Мыс Баранова»    |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\tau_{0,5}^a$ | $0,043 \pm 0,046$ | $0,094 \pm 0,040$ | $0,081 \pm 0,045$ |
| $\tau^f$       | $0,023 \pm 0,037$ | $0,062 \pm 0,030$ | $0,069 \pm 0,041$ |
| $\tau^c$       | $0,019 \pm 0,021$ | $0,030 \pm 0,010$ | $0,013 \pm 0,011$ |
| $\alpha$       | $0,79 \pm 0,52$   | $0,93 \pm 0,20$   | $1,67 \pm 0,34$   |

## 2.2. Значения $eBC$ по многолетним данным реанализа MERRA-2

Для проверки пространственного распределения концентраций черного углерода над Карским морем проведено сравнение с данными модельных расчетов – реанализа MERRA-2, которые находятся в свободном доступе [25]. На рис. 4 (цвет. вкладка) приведена карта модельных концентраций  $eBC$ , рассчитанная по среднемесячным значениям для периодов измерений в морских экспедициях с пространственным разрешением  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ . В целом характер пространственного распределения модельных концентраций согласуется с измеренными: самые большие значения  $eBC$  в юго-западной части и широтный спад с удалением от континента.

Средние значения  $eBC$ , рассчитанных по данным реанализа MERRA-2, приведены в нижней строке табл. 2. Из сравнения модельных и экспериментальных данных следует, что модельные значения  $eBC$  во всех выделенных районах превышают экспериментальные. Среднее превышение модельных значений над измеренными для всего Карского моря составляет 25%. Указанное отличие может быть обусловлено как ошибками моделирования, так и недостаточной статистической обеспеченностью экспедиционных измерений (количество и однородность данных).

## 2.3. Вариации характеристик аэрозоля по данным экспедиций 2022 г.

Осенью 2022 г. впервые выполнены параллельные измерения характеристик аэрозоля в нескольких экспедициях, проводившихся одновременно в районах Карского моря (см. рис. 1, б): на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (в 89-м рейсе с 8 по 16.09 и с 22.09 по 7.10; в 90-м рейсе с 18.10 по 6.11), НЭС «Академик Трешников» (с 16 по 23.09) и ЛСП «Северный полюс» (с 23 по 25.09), а также на полярной станции «Мыс Баранова» (весь период, но только концентрации аэрозоля). Для оценки пространственно-временной изменчивости аэрозоля проанализированы результаты измерений концентраций  $eBC$  и объемов частиц  $V_f$  (рис. 5, цвет. вкладка) в трех районах Карского моря, выделенных разным цветом на рис. 1, б: А – юго-западная часть, В – юго-восточная часть и С – северная часть.

В отличие от средних многолетних данных (см. табл. 2) повышенное содержание субмикронного и поглощающего аэрозоля осенью 2022 г. проявилось не в юго-западной части Карского моря (А), а в двух других районах. Общий максимум  $eBC$  ( $360 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) и  $V_f$  ( $1,34 \text{ mkm}^3/\text{cm}^3$ ) зарегистрирован 29.09 в самом северном районе С. В этом же районе (точнее на станции «Мыс Баранова») наблюдался кратковременный максимум  $V_f$  ( $1,7 \text{ mkm}^3/\text{cm}^3$ ) 10.10 и четырехсуточный – в начале ноября. Кроме того, с 21.10 по 2.11 регистрировались всплески значений  $eBC$  (до  $120 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) в юго-восточной части Карского моря (район В).

На рис. 6 представлены обратные траектории движения воздушных масс (HYSPLIT [26]) и карт тепловых аномалий (очагов горения) [27]. Видно, что высокое содержание субмикронного и поглощающего аэрозоля 29.09 в районе В было обусловлено выносом воздуха с севера Ненецкого и Ямало-Ненецкого АО, где расположены предприятия добычи и переработки нефти и газа (рис. 6, а). Траектории переноса воздуха на «Мыс Баранова» 1–4.11

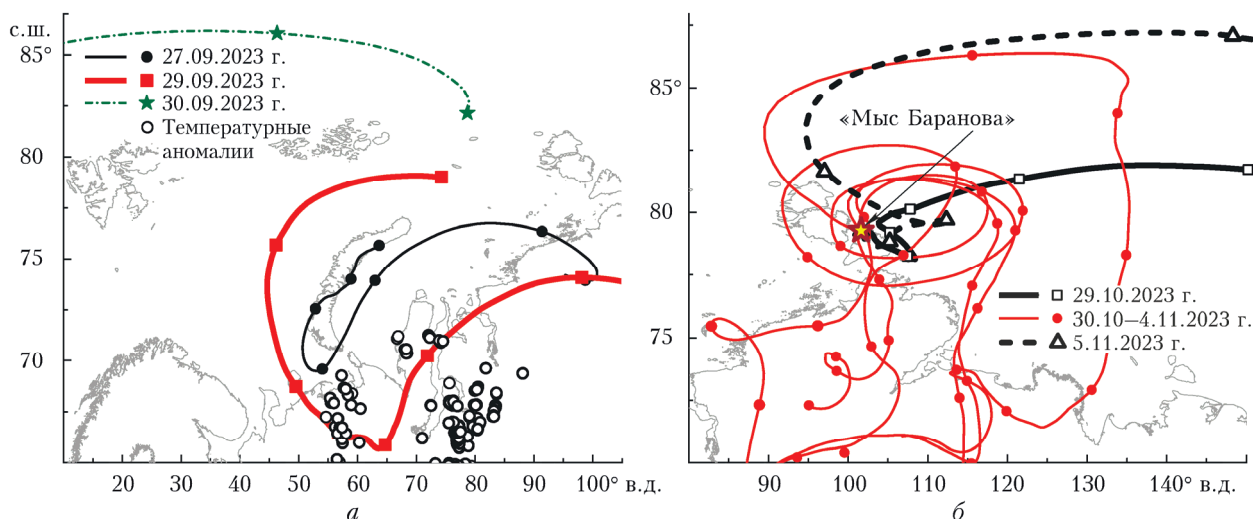


Рис. 6. Обратные траектории движения воздушных масс в районы измерений в периоды максимумов концентраций 29.09 (а) и 1–4.11.2023 г. (б) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.01>)

(во время максимума  $V_f$ ) проходили с севера Западной Сибири (Таймыр, Норильск). До и после этого периода воздух выносился с территории СЛО (рис. 6, б).

### Заключение

Статистическое обобщение результатов многолетних измерений характеристик аэрозоля в атмосфере Карского моря позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Средние значения характеристик аэрозоля для всего Карского моря составили: АОТ атмосферы (0,5 мкм) — 0,043 при показателе Ангстрема 0,8; еВС — 22,8 нг/м<sup>3</sup>;  $V_f$  и  $V_c$  — 0,26 и 1,39 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> соответственно. По среднему содержанию субмикронного аэрозоля и его поглощающего компонента атмосфера Карского моря занимает промежуточное положение между станцией «Мыс Баранова» и Баренцевым морем.

2. В среднем пространственном распределении аэрозоля хорошо проявились повышенные значения всех характеристик в юго-западной части Карского моря. Минимальными значениями большинства характеристик (кроме  $V_c$ ) отличается северная часть Карского моря. Различие средних  $V_f$  и еВС между юго-западным и северным районами составляет 30–60%.

3. Карты пространственного распределения еВС по данным морских экспедиций в Карском море и модельных расчетов (реанализа MERRA-2) качественно согласуются между собой (максимум в юго-западной части и широтный спад). Отличие состоит в более высоких модельных значениях еВС во всех районах (в среднем на 25%).

4. Распределение по районам характеристик аэрозоля осенью 2022 г. не соответствовало средним многолетним данным: самые большие значения  $V_f$  и еВС зарегистрированы на севере Карского моря из-за выноса воздуха с территории нефтегазовых промыслов Западной Сибири.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность П.Н. Зенковой, О.Н. Изосимовой, Вас.В. Полькину, Вик.В. Полькину, А.П. Ростову, С.А. Турчиновичу и В.П. Шмаргунову за подготовку аппаратуры и проведение измерений в отдельных экспедициях, а также первичную обработку данных.

**Финансирование.** Исследования выполнялись при финансовой поддержке РНФ (проект № 21-77-20025).

### Список литературы

1. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsov S.A. Atmospheric aerosol properties, formation processes, and impacts: From nano- to global scales. Chichester: Springer/PRAXIS, 2006. 572 p.
2. 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.
3. Stohl A. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N D11306. DOI: 10.1029/2005JD006888.
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.
5. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 8833–8855.
6. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010) // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483; Vinogradova A.A., Ponomareva T.Ya. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian Arctic (1986–2010) // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.

7. *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; *Vinoogradova 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.
8. *Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere* / Ed. by Alexander Kokhanovsky and Claudio Tomasi. Springer, 2020, 717 p.
9. *Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivaikhov V., Makshtas A.* Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 1271–1287. DOI: 10.5194/acp-16-1271-2016.
10. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Чернов Д.Г., Лоскутова М.А., Ризе Д.Д., Турчинович Ю.С.* Результаты пятилетнего цикла измерений характеристик аэрозоля на полярной станции «Мыс Баранова» (2018–2022 гг.) // Сб. тр. «МСАРД-2023». Санкт-Петербург, 21–23 июня 2023 (в печати).
11. *Кабанов Д.М., Масловский А.С., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р.* Сезонная и межгодовая характеристика аэрозоля по данным многолетних (2011–2021 гг.) измерений в Российском научном центре на архипелаге Шпицберген // *Оптика атмосф. и океана.* 2023. Т. 36, № 6. С. 433–442.
12. *Шевченко В.П., Копейкин В.М., Новизатский А.Н., Малафеев Г.В.* Черный углерод в приземном слое атмосферы над Северной Атлантикой и морями Российской Арктики в июле–сентябре 2017 г. // *Океанология.* 2019. Т. 59, № 5. С. 771–776. DOI: 10.31857/S0030-1574595771-776.
13. *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 // *Atmosphere.* 2020. V. 11, N 11. P. 1170. DOI: 10.3390/atmos1111170.
14. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Круглинский И.А., Макаров В.И., Новизатский А.Н., Польшкин В.В., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Шевченко В.П.* Результаты измерений характеристик аэрозоля в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на маршруте от Балтийского моря до Баренцева моря // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 7. С. 515–523; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kruglinsky I.A., Makarov V.I., Novigatinsky A.N., Polkin V.V., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Shevchenko V.P.* Measurements of aerosol physicochemical characteristics in the 80th cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh on the route from the Baltic to Barents Sea // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 5. P. 455–463. DOI: 10.1134/S1024856021050195.
15. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Круглинский И.А., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарьин Ф.А.* Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 6. С. 447–455; *Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kravchishina M.D., Makarov V.I., Novigatinsky A.N., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Darin F.A.* Spatio-temporal variations in atmospheric aerosol characteristics over the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas (2018–2021 expeditions) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 34, N 6. P. 651–660. DOI: 10.1134/S1024856022060203.
16. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Излев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Izlev G.A., Kozlov A.V., Nedelec P., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
17. *Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Панченко М.В., Белан Б.Д.* Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в 2020 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 11. С. 882–890; *Zenkova P.N., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Panchenko M.V., Belan B.D.* Submicron aerosol and absorbing substance in the troposphere of the Russian Sector of the Arctic according to measurements onboard the Tu-134 Optik aircraft laboratory in 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 1. P. 43–51.
18. *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, N D14203. DOI: 10.1029/2003JD003697.
19. *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. 11. 306–333. DOI: 10.1002/2015JD023358.
20. *Виноградова А.А., Иванова Ю.А.* Перенос воздушных масс и загрязнений к арктическим островам России (1986–2016): долговременные, межгодовые и сезонные вариации // *Геофизические процессы и биосфера.* 2017. Т. 16, № 4. С. 5–20. DOI: 10.21455/GPB2017.4-1.
21. *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.
22. *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. P. 1003530. DOI: 10.1117/12.2248009.

23. Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.-M., Baltensperger U., Holzer-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.
24. *OriginLab* – Origin and OriginPro – Data Analysis and Graphing Software. URL: <https://www.originlab.com/> (last access: 19.06.2023).
25. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), MERRA-2 tavgM\_2d\_aer\_Nx: 2d, Monthly mean, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 10.5067/FH9A0MLJPC7N (last access: 14.06.2023).
26. Air Resources Laboratory – HYSPLIT – Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory model. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access: 16.06.2023).
27. FIRMS Fire Information for Resource Management System. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (last access: 15.06.2023).

*D.M. Kabanov, I.A. Kruglinsky, A.O. Pochufarov, S.M. Sakerin, O.R. Sidorova, Yu.S. Turchinovich.*  
**Spatial distribution and average characteristics of atmospheric aerosol in Kara Sea basin.**

Based on the multiyear expedition studies in the Kara Sea basin (11 expeditions in 2007–2022), we presented for the first time a statistical generalization of the atmospheric aerosol characteristics: the volume contents of submicron and coarse aerosol ( $V_f$  и  $V_c$ ), the black carbon concentrations (eBC) and the spectral aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere. Increased content of submicron and absorbing (eBC) aerosol was clearly manifested in the average spatial distribution in the southwestern part of the Kara Sea and minimal content in the northern part. The difference in the average concentrations  $V_f$  and eBC between these regions is 30–60%. The average aerosol characteristics for the entire Kara Sea had been: the atmospheric AOD ( $0.5 \mu\text{m}$ ) was 0.043 at the Ångström exponent 0.8; the concentrations eBC were  $22.8 \text{ ng/m}^3$ ; and the particle volumes  $V_f$  and  $V_c$  were 0.26 and  $1.39 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$  respectively. The average concentrations  $V_f$  and eBC over the Kara Sea are shown to be intermediate between the data from the “Cape Baranov” and the Barents Sea.

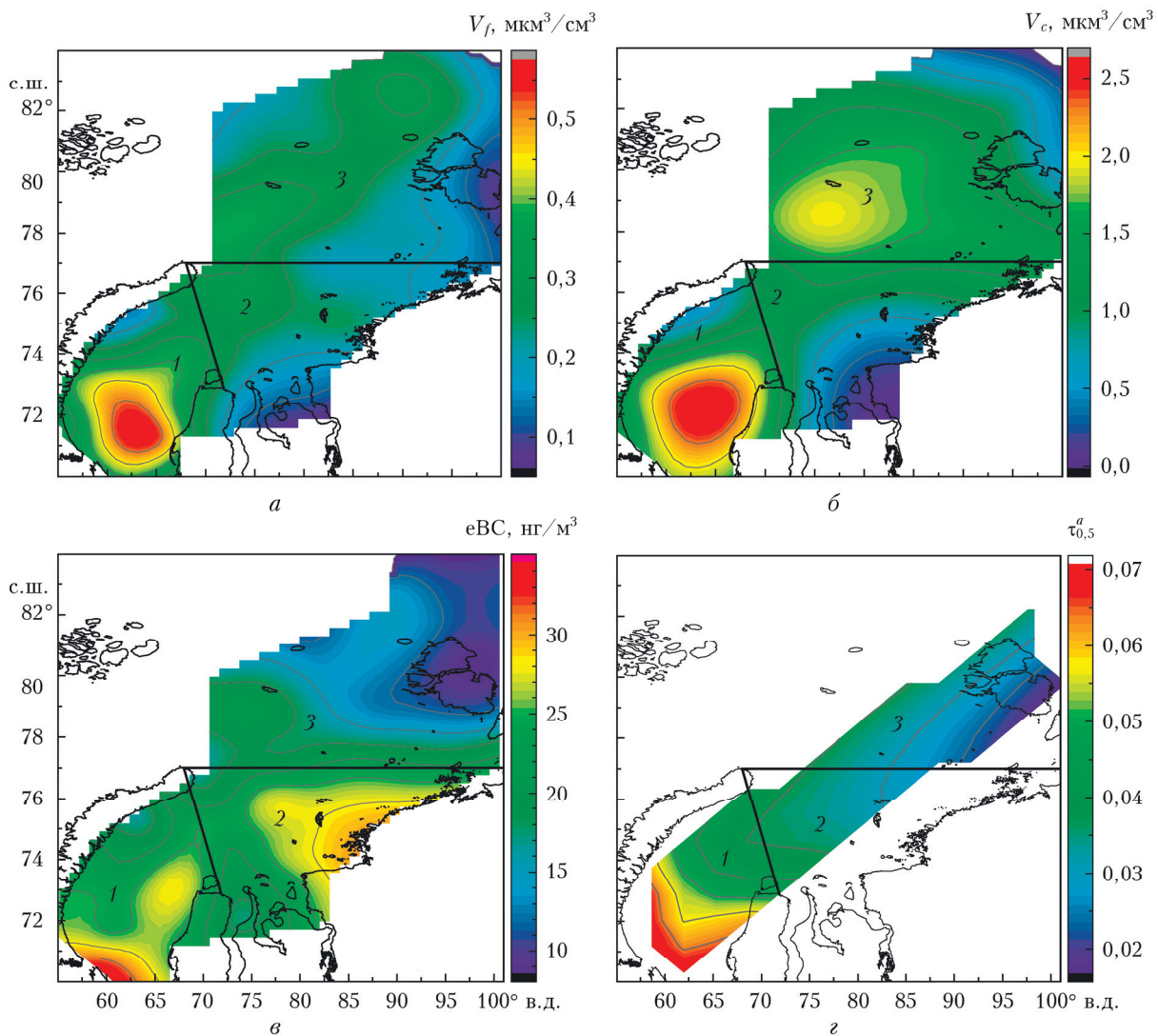


Рис. 2. Среднее пространственное распределение объемного содержания частиц (*a*, *б*), массовой концентрации черного углерода (*в*) и АОТ (*г*) по данным многолетних измерений в Карском море; 1–3 – районы измерений, черные линии – границы между ними

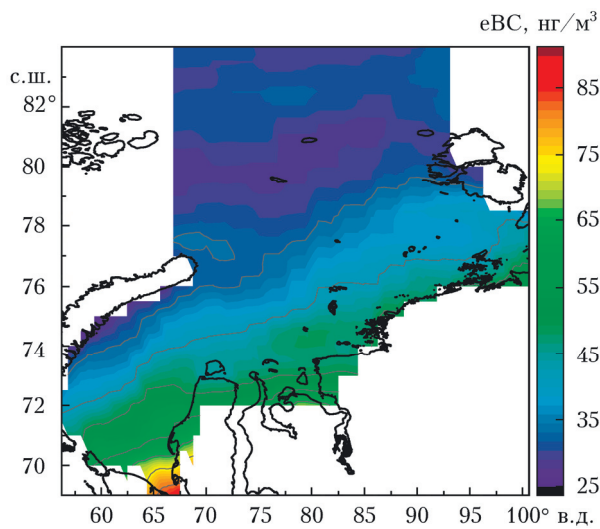


Рис. 4. Среднее пространственное распределение массовой концентрации черного углерода над Карским морем по данным реанализа MERRA-2



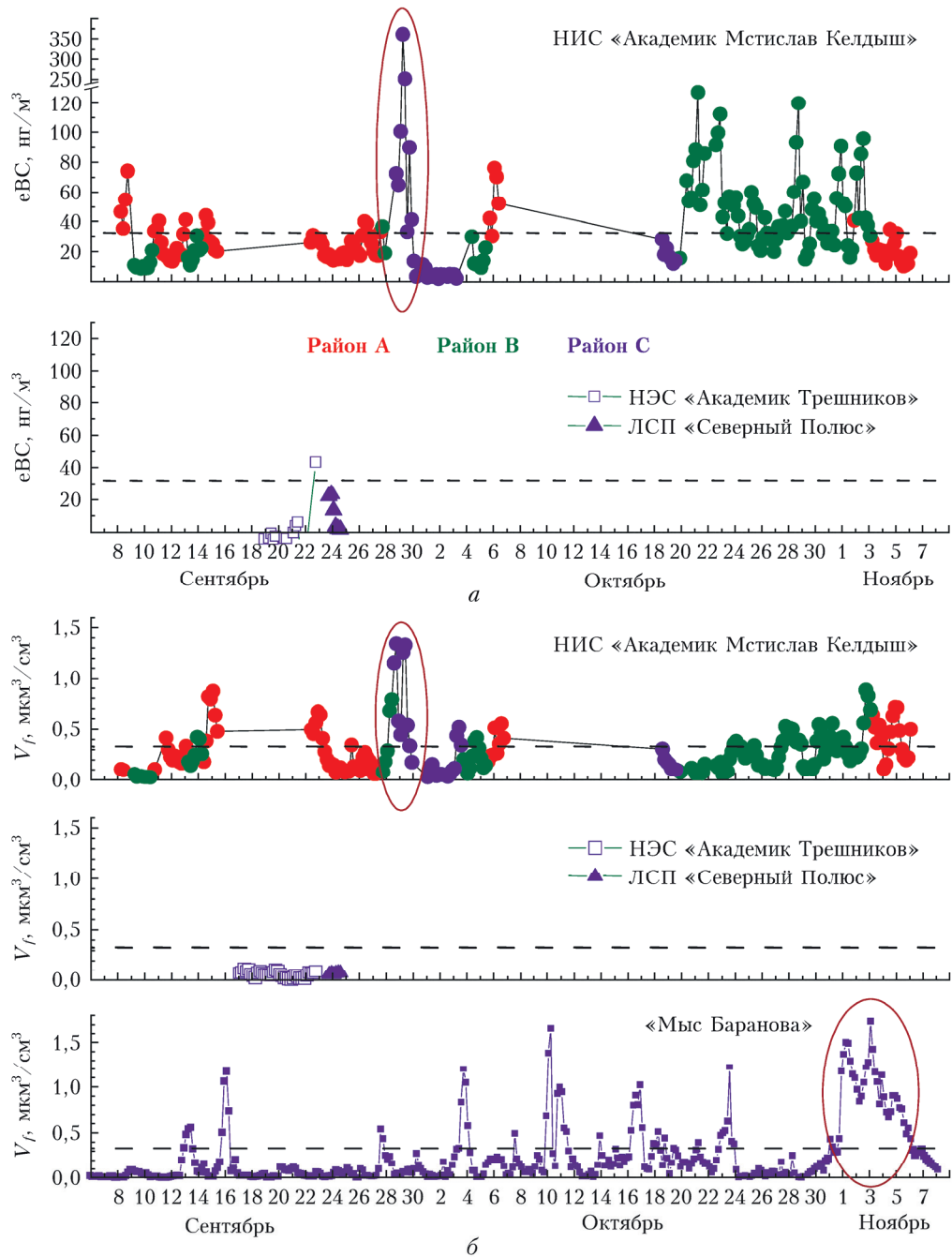


Рис. 5. Вариации еBC (а) и  $V_f$  (б) в трех районах Карского моря в период осенних экспедиций 2022 г.: пунктирные линии — среднее значение по многолетним измерениям; овалы — наиболее сильные всплески