

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Состав воздуха над Российским сектором Арктики.

4. Атмосферный аэрозоль

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
Б.Д. Белан¹✉, С.Б. Белан¹, О.И. Бердашкинова², Л.П. Голобокова²,
Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹, Н.А. Онищук²,
Т.М. Рассказчикова¹, Д.Е. Савкин¹, Д.В. Симоненков¹,
Т.К. Складнева¹, Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов¹, Т.В. Ходжер^{2*}

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

²Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

Поступила в редакцию 07.08.2023;
после доработки 26.10.2023;
принята к печати 17.11.2023

Впервые анализируется измеренное пространственное распределение счетной концентрации, дисперсного и химического состава аэрозоля над морями Российского сектора Арктики. Были зарегистрированы различные типы вертикального распределения счетной концентрации, характерные как для прибрежных морских, так и континентальных районов. Обнаружено почти полное отсутствие грубодисперсных частиц выше 2–3 км над всеми морями. В химическом составе арктического аэрозоля как на высоте 200 м, так и на уровне 5000 м присутствуют ионы, которые можно отнести и к морским, и к континентальным. Идентифицируемая бесцветная безуглеродная элементная часть аэрозоля над Арктикой в три-четыре раза больше, чем ионная. Над всеми морями и на обеих высотах в состав арктического аэрозоля в основном входят элементы терригенного происхождения Al, Cu, Fe, Si. Почти над всеми морями, кроме Баренцева, в элементном балансе аэрозоля доминирует Si, вклад которого над Чукотским морем достигает 85%. Анализ обратных траекторий показал, что во всех рассмотренных случаях (зарождался ли аэрозоль над континентом или морем) траектории воздушных масс проходили и над морем, и над сушей. В этом случае образовавшиеся частицы могли обогащаться по пути дополнительными ионами и элементами. Данная работа завершает цикл статей, посвященных исследованию состава воздуха, которое было проведено над морями Российского сектора Арктики в сентябре 2020 г. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании атмосферных процессов, происходящих в Арктике в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, аэрозоль, воздух, вертикальное распределение, перенос, примеси, счетная концентрация, химический состав; Arctic, atmosphere, aerosol, air, vertical distribution, transport, impurity, number concentration, chemical composition.

Введение

Несмотря на предпринимаемые мировым сообществом усилия, глобальное потепление, обусловленное в основном изменением состава воздуха [1], продолжается. Еще совсем недавно считалось, что температура в Арктике растет в 2–3 раза быстрее,

чем в других районах земного шара [2, 3], однако результаты анализа последних лет показывают, что температура растет быстрее в 4 раза [4–6]. Вследствие этого возникает вопрос, как потепление влияет на состав воздуха в Арктическом регионе, и наоборот, если состав изменяется, каким образом это отражается на потеплении [7–9].

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Ольга Иннокентьевна Бердашкинова (khuriganowa@lin.irk.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев

(ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Наталья Анатольевна Онищук (onischuk@lin.irk.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru).

Одним из компонентов воздуха, существенно влияющим на радиационные процессы в атмосфере, является аэрозоль [10]. В зависимости от своего состава и от того, на какой высоте он находится, его воздействие может приводить как к охлаждению воздуха, так и к его нагреву [11–13]. Так, например, сажа (черный углерод), входящая в состав частиц, поглощает солнечное излучение и вызывает прямое нагревание воздуха [14]. Сажа, образовавшаяся при пожарах на материке и перенесенная в Арктику [15], при осаждении на лед или снег уменьшает альбедо, что, с одной стороны, обуславливает более быстрое их таяние, с другой — приводит к дополнительному поглощению радиации подстилающей или водной поверхностью [16]. Минеральная пыль, находясь в верхней тропосфере, вызывает охлаждение воздуха [17]. Также аэрозоль может влиять на продуктивность экосистем за счет увеличения рассеянной радиации, стимулируя фотосинтез [18]. Однако при сильном увеличении аэрозольной нагрузки может произойти уменьшение поступления прямой солнечной радиации, что приведет к ослаблению эффективности фотосинтеза [18].

Учитывая, какую неопределенность вносит радиационный форсинг аэрозоля (положительный или отрицательный) в общее изменение климата [1], в зарубежном секторе Арктики проводятся интенсивные исследования пространственно-временного распределения аэрозолей. Для этого используются все современные средства измерений: наземные станции, корабли, самолеты-лаборатории. По данным, обобщенным в [19], с 1990 по 2015 г. в Арктике было проведено 119 полевых кампаний, мониторинг параметров аэрозоля осуществлялся в 350 наземных пунктах наблюдений, судовые измерения составили 33000 ч, самолетные — 11000 ч. В Российском секторе Арктики достижения заметно скромнее [20]. Достаточно регулярные исследования аэрозоля проводятся в приземном слое воздуха с помощью научно-исследовательских судов [21] при отсутствии ледяного покрова. Можно также выделить несколько опорных точек, в которых осуществляются круглогодичные наблюдения в приземном слое воздуха: мыс Баранова [22], о. Белый [23], п. Тикси [24], п. Баренцбург (Шпицберген) [25]. Остальные исследования представляют собой непродолжительные экспедиции. В литературе вообще не удалось обнаружить сведений о зондировании аэрозоля в Арктике с борта самолета. Следовательно, сведения о распределении и свойствах аэрозоля в пограничном слое и свободной тропосфере над Российским сектором Арктики отсутствуют.

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газовых и аэрозольных примесей в тропосфере над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» был проведен эксперимент по зондированию атмосферы и водной поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана. В [26] описаны проведенный эксперимент и характеристики использованного оборудования,

проанализированы средние концентрации примесей в атмосфере над всеми морями.

Цель работы — изучить особенности распределения счетной концентрации и химического состава аэрозоля над всеми морями Российского сектора Арктики.

1. Методы и средства измерений

Для исследования вертикальной структуры распределения аэрозольных частиц по размерам на борту самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» были установлены два типа приборов: диффузионный спектрометр аэрозоля (ДСА) (Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН), позволяющий восстанавливать счетное распределение наноаэрозолей в диапазоне от 3 до 200 нм в 20 интервалах размеров, и лазерный аэрозольный спектрометр Grimm Model 1.109 (Grimm Aerosol Technik GmbH & Co., Германия), предназначенный для измерения счетной концентрации аэрозольных частиц в диапазоне размеров от 0,25 до 32,0 мкм. Оба спектрометра составляют единый аэрозольный комплекс, позволяющий охватить диапазон размеров от 0,003 до 32 мкм с хорошим разрешением (51 интервал).

Для подачи к приборам внешнего воздуха, содержащего аэрозольные частицы в диапазоне размеров 0,25–32 и 0,003–0,2 мкм, использовались входные патрубки $\varnothing = 7,5$ и 11 мм и отводы $\varnothing = 16$ и 28 мм соответственно. Подводящие и отводящие воздушные тракты на входе и выходе приборов были соединены между собой обводным шунтом, чтобы избежать излишнего перепада давления между входом и выходом и свести к минимуму диффузионные потери наночастиц на стенках подводящих трактов за счет увеличения общего потока пробы воздуха, обеспечиваемого шунтом. С целью минимизации эффекта электростатического осаждения аэрозолей в качестве подводящих трактов были выбраны электропроводные силиконовые трубки. Для уменьшения инерционных потерь крупных аэрозольных частиц спектрометр Grimm Model 1.109 размещается как можно ближе к заборному устройству на аспирационной стойке. Технические характеристики диффузионного и лазерного спектрометров аэрозолей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики аэрозольного комплекса

Анализатор	D_p (интервалы)	N , см ⁻³ (погрешность, %)	Частота измерений, с
ДСА	3–200 нм (20)	0–500000 (± 10)	80
GRIMM Model 1.109	0,25–32 мкм (31)	0–2000 (± 3)	6

Примечание. D_p — диаметр частиц, N — счетная концентрация.

В период эксперимента осуществлялись три типа отбора проб аэрозоля для определения его химического состава. Пробоотборные установки отличаются

количеством фильтров и скоростью прокачки воздуха через фильтр. Две установки предназначены для определения неорганического и органического компонентов в составе аэрозольных частиц. Отбор аэрозольных проб осуществлялся с соблюдением условий изокINETичности [26]. Он заключался в осаждении аэрозольных частиц на фильтры аспирационным способом. На третьей установке проводился отбор проб биоаэрозолей. Вертикальное распределение органического компонента и сажи было рассмотрено ранее в [27, 28].

Неорганический компонент анализировался в лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН. После предварительной подготовки образцов с помощью ионной системы ICS-3000 (Dionex Corporation, Калифорния, США) определялись ионы H^+ , Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , $CH_3SO_3^-$, F^- . Точность разового измерения 2–6%. [25]. Анализ 23 элементов (Ag, Al, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zr) в составе аэрозольных проб выполнялся на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent-7500 CE (США, Agilent Technologies Int) с точностью 0,2%.

2. Вертикальное распределение

Поскольку аэрозольный комплекс измерял распределение аэрозолей в широком диапазоне размеров, то для анализа вертикального распределения счетной концентрации аэрозолей весь измеряемый диапазон был разбит на три фракции: ядер Айткена (ЯА, 0,003–0,200 мкм), аккумуляционную (АКМ, 0,25–1,0 мкм) и грубодисперсную (ГБД, > 1,0 мкм). Эти фракции отражают фундаментальные особенности механизмов образования и трансформации аэрозольных частиц в атмосфере [29–31]. На рис. 1 (цв. вкладка) приведены вертикальные профили счетной концентрации трех фракций.

Зондирование атмосферы над Баренцевым морем проводилось 4 сентября, над Карским — 6 сентября, морем Лаптевых — 9 сентября, Восточно-Сибирским — 15–16 сентября, Чукотским 14–15 сентября 2020 г. Здесь и далее время приведено по Гринвичу. Это связано с тем, что весь эксперимент проводился в девяти часовых поясах в ряде крупных административных территорий, на которых местное и астрономическое время не совпадают, например регион Республики Саха — Якутия. На рис. 1 профили пронумерованы по мере их получения (нечетные — во время набора высоты, четные — во время снижения). Соответствующее время указано в подписочной подписи.

Следует также отметить, что во время проведения измерительной кампании данная территория находилась под влиянием обширного циклона с развитой облачностью и осадками, поэтому часть профилей, которые были измерены в облаках, исключена из анализа.

Из рис. 1 видно, что были зарегистрированы различные типы вертикального распределения счетной концентрации аэрозоля, характерные как для прибрежных морских, так и полярных и даже удаленных континентальных районов [32]. Некоторые профили концентрации (ЯА над Баренцевым и Карским морями, АКМ над морем Лаптевых и Восточно-Сибирским морем) имели Z-образную структуру, обусловленную процессами образования новых частиц (нуклеации) в верхней тропосфере [33]. Большинство же вертикальных распределений характеризуются максимумом концентрации у поверхности, затем падением до некоторого уровня на высотах 2–3 км и незначительными изменениями в свободной тропосфере. Подобного типа профили наблюдались во время арктических кампаний, проводившихся европейскими и американскими исследователями в зарубежном секторе Арктики [34–36]. На рис. 1 видно почти полное отсутствие грубодисперсных частиц выше 2–3 км над всеми морями. Возможно, это связано с отсутствием конвективных потоков над морской поверхностью и быстрым осаждением крупных частиц из атмосферы, как показано в [37].

Поскольку над разными частями арктических морей счетные концентрации аэрозоля могут заметно различаться (рис. 1), для сопоставления на рис. 2 (цв. вкладка) приведены их средние значения для каждой из акваторий, полученные путем осреднения всех полученных данных в слоях тропосферы с шагом 500 м.

Рис. 2, а показывает, что для фракции ЯА характерно убывание концентрации с запада на восток. Максимальные значения концентрации в приводном слое (200 м) наблюдаются над Баренцевым и Карским морями, а минимальные — над Восточно-Сибирским и Чукотским.

Для АКМ эта закономерность частично нарушается (рис. 2, б). Наибольшая концентрация наблюдается над Карским морем, затем — над Чукотским. В ГБД (рис. 2, в), наоборот, наиболее высокие значения, достигающие $1,2\text{ см}^{-3}$, фиксируются над Чукотским морем, на втором месте — Карское море. Вероятно, такое распределение аэрозоля связано с его переносом с прибрежных территорий, поскольку над большинством акваторий зафиксирован континентальный тип вертикальных профилей (см. рис. 1).

В пользу такого вывода говорит и сопоставление счетных концентраций над прибрежными территориями (рис. 3, цв. вкладка). Особенно хорошо эта тенденция видна для фракции ЯА (рис. 3, а). В районе Карского моря подобная направленность несколько нарушается для АКМ из-за переноса этой фракции в пограничном слое вблизи населенных пунктов Нарьян-Мар и Сабетта на высоте около 1000 м (рис. 3, б). Тенденция уменьшения концентрации с запада на восток почти восстанавливается для ГБД (рис. 3, в). Исключение составляет район Сабетты, где опять же наблюдался слой с повышенной концентрацией крупных частиц.

Следует отметить, что тенденция уменьшения концентрации аэрозоля в Российском секторе Арктики с запада на восток была ранее зафиксирована в ходе многочисленных морских экспедиций [38, 39]. В настоящей работе она выявлена в период короткой летней кампании.

3. Дисперсный состав

Несмотря на существующий пробел в детектировании спектрометрами ДСА и Grimm Model 1.109 частиц в интервале размеров 0,2–0,25 мкм, распределения, получаемые с их помощью, хорошо согласуются между собой. Это видно из рис. 4 (цв. вкладка), где показано распределение частиц во всем наблюдаемом в атмосфере диапазоне размеров.

Как и в случае вертикальных профилей счетной концентрации, здесь явно заметны региональные отличия (рис. 4). Распределение частиц по размерам в западной части Российского сектора Арктики более динамично изменяется с высотой (Баренцево и Карское моря) как по концентрации, так и по интенсивности и положению основных мод. Спектры размеров здесь были заметно шире, чем в восточной части.

В восточной части существенные изменения наблюдались только в нуклеационном диапазоне размеров ($D_p < 0,007$ мкм). Погодные условия во время полетов в этом районе [26] привели к значительному вымыванию аэрозолей и очищению атмосферы, что наглядно видно по полному отсутствию в спектрах частиц ГБД. Интенсивность моды Айткена и аккумуляционной моды, составляющих основную долю общей счетной концентрации, не претерпевала значительных изменений с высотой, что и сказалось на формировании относительно равномерного вертикального распределения счетной концентрации аэрозолей над акваториями Чукотского и Восточно-Сибирского морей.

4. Химический состав

Отбор проб для анализа химического состава аэрозоля проводился во время горизонтального полета на высотах 200, 5000 и 9000 м. Последние две высоты определялись по приведенному давлению, которое соответствует 760 мм рт. ст., или 1013 гПа. Поскольку наши данные на уровне 9000 м уже опубликованы в [40], ниже остановимся только на результатах, полученных на высотах 200 и 5000 м.

4.1. Ионный состав

Общая концентрация идентифицированных ионов в составе аэрозольных частиц представлена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что максимальное содержание ионов в аэрозоле, $0,96 \text{ мкг/м}^3$, на высоте 200 м было над Восточно-Сибирским морем, минимальное — $0,63 \text{ мкг/м}^3$ — над морем Лаптевых. На высоте

5000 м, наоборот: максимальное значение зафиксировано над морем Лаптевых — $0,81 \text{ мкг/м}^3$, минимальное над Восточно-Сибирским морем — $0,13 \text{ мкг/м}^3$. Над Чукотским морем из-за наличия облаков отбор проб не проводился. Можно также отметить слабую тенденцию уменьшения содержания ионов с запада на восток на высоте 5000 м (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,075$).

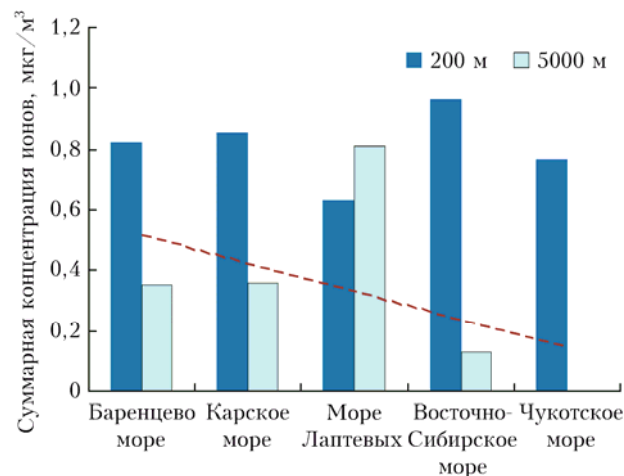


Рис. 5. Суммарная концентрация ионов в составе аэрозоля над арктическими морями России

На рис. 6 (цв. вкладка) показан вклад каждого иона в общее содержание их суммарной концентрации над арктическими морями.

Из данных рис. 6 следует, что ионы морского и континентального происхождения присутствуют в составе арктического аэрозоля на высоте как 200 м, так и 5000 м, т.е. можно с большой уверенностью говорить о достаточно хорошей перемешанности тропосферных аэрозолей [41]. Поскольку отбор проб производился на фильтры типа АФА (фильтры Петрянова), которые задерживают и эффективно накапливают частицы размером более 0,1 мкм [42], то, очевидно, это отражает многодневный процесс формирования АКМ и ГБД. По полученным ранее данным [29–31], переход частиц из нуклеационного диапазона (2–3 нм) в аккумуляционный (0,1–1,0 мкм) занимает 4–5 сут.

Основными ионами аэрозольного вещества (до 65%) над Баренцевым морем на высоте 200 м были ионы Li^+ , Na^+ и SO_4^{2-} . В заметных количествах присутствуют Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Br^- (30%). На высоте 5000 м соотношение ионов заметно изменяется и до 88% его состава определяется ионами преимущественно морского происхождения — Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- и Br^- . Возможно, это обусловлено различными траекториями поступления воздуха на эту высоту во время эксперимента.

Для Карского моря на высоте 200 м в составе частиц преобладают ионы континентального происхождения: Li^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} и NO_3^- , SO_4^{2-} . Эти соединения часто относятся к антропогенным [41]. На высоте 5000 м до 18% возрастает вклад морских ионов Na^+ и Cl^- , тем не менее ионы NH_4^+ , Ca^{2+}

и NO_3^- , SO_4^{2-} преобладают. Таким образом, ионный состав над Карским морем существенно отличается от зафиксированного над Баренцевым. Очевидно, что помимо влияния разных ситуативных источников, рассмотрению которых посвящен следующий раздел статьи, имеется постоянная физико-географическая предпосылка такой изменчивости — зональное разделение этих морей крупной грядой островов Новой Земли, усиливающих турбулентность воздушных потоков над рассматриваемым регионом.

Еще более существенные различия над морем Лаптевых. Здесь на высоте 200 м доминируют Na^+ , Cl^- (45%) и Ca^{2+} SO_4^{2-} (35%). На уровне 5000 м основной вклад (67%) вносят Na^+ , Ca^{2+} , Br^- , Cl^- , а также до 18% повышается роль ионов H^+ , свидетельствующая о недостатке катионов в составе аэрозоля.

Над Восточно-Сибирским морем, как и над морем Лаптевых, основной вклад в состав аэрозоля на высоте 200 м вносили ионы Na^+ , Cl^- (46%) и Ca^{2+} SO_4^{2-} (33%). На высоте 5000 м абсолютные концентрации ионов Na^+ и SO_4^{2-} были ниже предела обнаружения, следовательно, доминировали Ca^{2+} (41%) и Cl^- (37%), также на этом фоне повышается относительное содержание иона F^- — до 13%.

В аэрозоле над Чукотским морем на высоте 200 м преобладали морские ионы Na^+ (30%) и Cl^- (37%), значительна доля иона K^+ , как правило, индикатора лесных пожаров [41].

Таким образом, по мере перехода от западных морей к восточным в составе аэрозоля уменьшался вклад континентального и, возможно, антропогенного аэрозоля и увеличивалась доля морского.

В отличие от счетной концентрации, химический состав аэрозоля неоднократно измерялся в Российском секторе Арктики на научно-исследовательских судах. Сопоставление полученных нами данных на высоте 200 м с приводными данными [38, 43, 44] показывает, что по абсолютной величине они в 2–3 раза меньше. Это вполне естественно, так как в разд. 2 было показано убывание концентрации аэрозоля с высотой.

Наши данные близки к результатам, полученным на удаленной островной станции «Мыс Баранова», как по концентрации, так и по составу [45].

4.2. Элементный состав

В отобранных пробах помимо ионного анализировался элементный состав. В частности, определялись следующие элементы: Ag, Al, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zr. Общая сумма безуглеродной бессолевой идентифицированной части элементного состава аэрозоля представлена на рис. 7.

Рис. 7 демонстрирует, что на высоте 200 м наибольшие концентрации элементов зафиксированы над Карским морем и морем Лаптевых, на 5000 м — над Карским. Также можно отметить тенденцию уменьшения концентрации элементов с запада на восток (от Баренцева к Чукотскому морю).

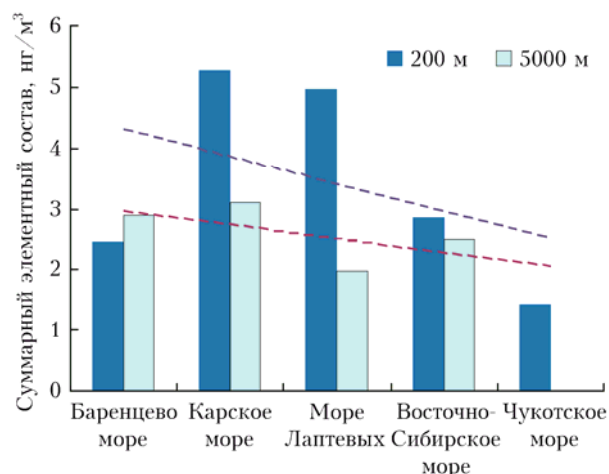


Рис. 7. Суммарный элементный состав безуглеродной бессолевой части атмосферного аэрозоля над морями Российского сектора Арктики

Из рис. 8 (цв. вкладка) видно, что практически над всеми морями в элементном составе аэрозоля доминирует Si, вклад которого достигает 85%. Обращает на себя внимание также то, что по мере продвижения с запада на восток в аэрозоле уменьшается количество идентифицируемых микроэлементов. Так, например, над Баренцевым и Карским морями на разных высотах их количество изменяется от 15 до 21, над Восточно-Сибирским и Чукотским морями — от 10 до 12. В составе аэрозоля над Баренцевым и Карским морями доминируют элементы преимущественно терригенного происхождения на высоте 200 м — Al, Cu, Fe, Si, на высоте 5000 м — Ti, Ca, Fe, Si, Al, Cu. Преобладающими элементами над восточными морями на обеих высотах были в основном Fe, Si, Cu, Al. В составе аэрозоля морей восточной части Арктики не обнаружены Pb, Co, Sn, Ni, Cd, V (особенно на высоте 5000 м), по которым можно судить о доминировании техногенного аэрозоля над морями Российской Арктики.

Сопоставление полученных нами данных с ранее выполненными исследованиями [21, 46, 47] показывает хорошее согласие как по набору идентифицированных элементов, так и по их концентрации.

5. Результаты и обсуждение

В табл. 2 перечислены доминирующие ионы и элементы, которые зафиксированы нами в ходе эксперимента в сентябре 2020 г.

Таблица 2
Доминирующие ионы и элементы на высоте 200 м

Море	Ион	Элемент
Баренцево	Na^+ , SO_4^{2-}	Fe, Si
Карское	NH_4^+ , SO_4^{2-}	Si
Лаптевых	Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}	Fe, Si
Восточно-Сибирское	Ca^{2+} , Cl^-	Fe, Cu, Al
Чукотское	Na^+ , Cl^-	Si

Данные табл. 2 указывают на то, что на формирование арктических аэрозолей оказали влияние как континентальные, так и морские источники. Наличие ионов NH_4^+ и SO_4^{2-} , возможно, отражает вклад антропогенного источника, особенно над западными морями, присутствие Na^+ и Cl^- свидетельствует о морском источнике.

Перенос аэрозоля в Арктику теоретически был предсказан достаточно давно [48, 49]. Его эффективность для исследуемого сектора рассчитана в [50, 51]. В большом цикле работ А.А. Виноградовой с соавт. [52–59] эффективность переноса аэрозоля в Арктику с континентальной части России и его схемы показаны на основании данных измерений. Перенос частиц и сажи с материка на акваторию океана был также показан в работах О.Б. Поповичевой [60, 61].

В связи с вышеизложенным рассмотрим маршруты, по которым воздух поступал на участки отбора проб аэрозоля на высотах 200 и 5000 м, представленные на рис. 9 (цв. вкладка). Учитывая уже упоминавшийся период формирования аэрозоля в атмосфере, равный 4–5 сут, обратные траектории строились для периода 6 сут. Для каждого случая отбора проб задавались три точки: начало, середина и конец площадки пробоотбора.

Из рис. 9 видно, во всех рассмотренных случаях (зарождался ли аэрозоль над континентом или морем) траектории воздуха проходили и над морем, и над сушей. В этом случае образовавшиеся частицы могли обогащаться по пути следования дополнительными ионами и элементами.

Так, воздух, из которого отбирался аэрозоль над Баренцевым морем на высоте 200 м, зародился над разными районами континента, но в завершающей фазе проходил над морем. Это хорошо видно по профилям траекторий в нижней части рис. 9. Естественно, что были идентифицированы компоненты континентального и морского аэрозоля. Воздух, поступивший на высоту 5000 м над этим же морем, — океанического происхождения. Но затем он прошел значительный путь над Скандинавией, где мог обогатиться ионами и элементами континентального происхождения.

Для отобранных проб воздуха над Карским морем на высоте 200 м наблюдается схожая траектория: зарождение над побережьем Скандинавии и затем петля над европейской территорией России (ЕТР). Причем воздух опускался глубоко вниз, где расположены промышленные регионы. И только заключительная часть траектории опять проходила над морской поверхностью. Маршруты аэрозоля на высоте 5000 м для Карского моря проходили над континентом, причем два из них — над промышленными районами Западной Европы и ЕТР. Поэтому для обоих морей в химический состав аэрозольного вещества входят ионы и элементы, которые могут относиться и к антропогенным.

Воздух, поступивший на акватории моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, зарождался над морской поверхностью. Однако

во всех случаях траектории хотя бы частично проходили над континентом, что могло способствовать обогащению аэрозоля терригенными ионами и элементами.

В связи с процессами обогащения аэрозоля по пути следования уместно вспомнить явно недооцененную работу [62], в которой показано, что при механических процессах могут образовываться аэрозоли размером от 5 до 20 нм в большом количестве (до 10^{10} частиц с площади 1 см^2). Такие частицы легко и долго переносятся в атмосфере и могут служить основой для образования аэрозолей АКМ.

Выше были отмечены низкие концентрации атмосферного аэрозоля в Российском секторе Арктики, в особенности ГБД. Это обстоятельство легко объясняется периодом проведения эксперимента. В сентябре, по данным ряда исследователей [63–66], в Арктике наблюдается его минимальные концентрации.

Заключение

Проведенный за достаточно короткое время самолетный эксперимент позволил сопоставить микрофизические характеристики аэрозоля над всеми морями Российского сектора Арктики.

Были зарегистрированы различные типы вертикального распределения счетной концентрации аэрозольных частиц, характерные как для прибрежных морских, так и для полярных и даже удаленных континентальных районов. Некоторые профили концентрации имели Z-образную структуру. Большинство же вертикальных распределений были континентального типа, когда максимум концентрации находится у поверхности и затем она уменьшается с высотой. Обращает на себя внимание также почти полное отсутствие грубодисперсных частиц выше 2–3 км над всеми морями. Для фракции ядер Айткена характерно убывание концентрации с запада на восток: наибольшие значения в приводном слое (200 м) наблюдаются над западными морями (Баренцево и Карское), наименьшие — над Восточно-Сибирским и Чукотским. Вероятно, такое распределение аэрозоля связано с переносом его с прибрежных территорий, поскольку над большинством акваторий его форма соответствовала профилям концентрации, наблюдаемым над континентами.

Отмечены также региональные различия в распределении частиц по размерам. В западной части Российского сектора Арктики наиболее динамично изменяется как общая концентрация аэрозоля, так и концентрации и модальные размеры фракций. Спектры размеров здесь заметно шире, чем в восточной части, где существенные изменения наблюдались только в нуклеационном диапазоне размеров ($D_p < 0,007 \text{ мкм}$). Концентрация моды Айткена и аккумуляционной фракции, составляющих основную долю общей счетной концентрации, не претерпевала значительных изменений с высотой. Полученные в ходе арктической кампании данные можно считать уникальными, так как во всем мире в большинстве самолетных исследований измерения

аэрозольных частиц с $D_p < 0,1$ мкм проводятся со значительно худшим разрешением, а в Российском секторе Арктики подобного рода исследование было проведено впервые.

В химическом составе арктического аэрозоля на высотах 200 и 5000 м присутствуют ионы морского и континентального происхождения. Над Баренцевым морем основную долю ионов в аэрозолях на высоте 200 м (почти 65%) составляли Li^+ , Na^+ и SO_4^{2-} , на уровне 5000 м доминируют ионы Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- и Br^- (до 88%). Возможно, это обусловлено различными траекториями поступления воздуха в район эксперимента на эти высоты. Для Карского моря на обеих высотах в составе частиц преобладают ионы Li^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} и NO_3^- , SO_4^{2-} . Над морем Лаптевых на высоте 200 м — ионы Na^+ , Cl^- (45%) и Ca^{2+} , SO_4^{2-} (35%). На уровне 5000 м основной вклад (67%) вносят ионы морского происхождения Na^+ , Ca^{2+} и Br^- , Cl^- , до 18% повышается роль ионов H^+ , обусловленная недостатком катионов. В составе аэрозоля над Восточно-Сибирским морем основной вклад на высоте 200 м вносили Na^+ , Cl^- (46%) и Ca^{2+} , SO_4^{2-} (33%), на высоте 5000 м — Ca^{2+} (41%) и Cl^- (37%) на фоне предельно низких концентраций Na^+ и SO_4^{2-} . В аэрозоле над Чукотским морем на высоте 200 м преобладали морские ионы Na^+ (30%) и Cl^- (37%).

Таким образом, по мере перехода от западных морей к восточным в составе аэрозоля уменьшался вклад континентального и, возможно, антропогенного аэрозоля и увеличивалась доля морского.

В составе бессолевой безуглеродной части атмосферного аэрозоля по мере продвижения с запада на восток уменьшалось количество идентифицируемых микроэлементов. Элементы терригенного происхождения в составе аэрозоля преобладали преимущественно на высоте 200 м над Баренцевым и Карским морями (Al, Cu, Fe, Si), на высоте 5000 м над восточными морями (Ti, Ca, Fe, Si, Al, Cu, Fe, Si, Cu, Al). Кремний (Si) доминировал над Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским и Чукотским морями, его вклад 69–85%. На фоне возрастания с запада на восток морского фактора в формировании ионного и элементного состава уменьшался вклад континентального фактора. Следует также отметить, что в составе аэрозоля над морями Российского сектора Арктики, особенно на высоте 5000 м, отсутствовали элементы явно антропогенного происхождения — Pb, Co, Sn, Ni, Cd, V.

Анализ обратных траекторий показал, что во всех рассмотренных случаях траектории воздушных масс проходили и над морем, и над сушей. Важно также подчеркнуть, что в период эксперимента концентрации всех анализируемых ионов и элементов были низкими, характерными для фоновых, удаленных районов.

Финансирование. Зондирование атмосферы выполнено на УНУ самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик», созданного в рамках госзадания ИОА СО РАН. Обработка данных и анализ результатов про-

ведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» (соглашение № 075-15-2021-934).

Список литературы

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
2. Shepherd T.G. Effects of a warming Arctic // Science. 2016. V. 353, N 6303. P. 989–990.
3. Najafi M.R., Zwiers F.W., Gillett N.P. Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences // Nat. Clim. Change. 2015. N 2. 4 p.
4. Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A., Nording K., Hyvarinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Commun. Earth Environ. 2022. V. 3. Art. N 168. 10 p.
5. Thoman R., Druckenmiller M.L., Moon T. State of the climate in 2021 // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2022. V. 103, N 8. P. S257–S306.
6. Wendisch M., Brückner M., Crewell S., Ehrlich A., Notholt J., Lüpkes C., Macke A., Burrows J.P., Rinke A., Quaas J., Maturilli M., Schemann V., Shupe M.D., Akansu E.F., Barrientos-Velasco C., Bärpfuss K., Blechschmidt A.-M., Block K., Bougoudis I., Bozem H., Böckmann C., Bracher A., Bresson H., Bretschneider L., Buschmann M., Chechin D.G., Chyllik J., Dahlke S., Deneke H., Dethloff K., Donth T., Dorn W., Dupuy R., Ebell K., Egerer U., Engelmann R., Eppers O., Gerdes R., Gierens R., Gorodetskaya I.V., Gottschalk M., Griesche H., Gryanik V.M., Handorf D., Harm-Altstädter B., Hartmann J., Hartmann M., Heinold B., Herber A., Herrmann H., Heygster G., Höschel I., Hofmann Z., Hölemann J., Hünerbein A., Jafariserajehlou S., Jäkel E., Jacobi C., Janout M., Jansen F., Jourdan O., Jurányi Z., Kalesse-Los H., Kanzow T., Käthner R., Kliesch L.L., Klingebiel M., Knudsen E.M., Kovács T., Körtke W., Krampe D., Kretzschmar J., Kreyling D., Kulla B., Kunkel D., Lampert A., Lauer M., Lelli L., von Lerber A., Linke O., Löhnert U., Lonardi M., Losa S.N., Losch M., Maahn M., Mech M., Mei L., Mertes S., Metzner E., Mewes D., Michaelis J., Mioche G., Moser M., Nakoudi K., Neggers R., Neuber R., Nomokonova T., Oelker J., Papakonstantinou-Presvelou I., Pätzold F., Pefanis V., Pohl C., van Pinxteren M., Radovan A., Rhein M., Rex M., Richter A., Risse N., Ritter C., Rostosky P., Rozanov V.V., Ruiz Donoso E., Saavedra Garfias P.S., Salzmann M., Schacht J., Schäfer M., Schneider J., Schnierstein N., Seifert P., Seo S., Siebert H., Soppa M.A., Spreen G., Stachlewska I.S., Stapf J., Stratmann F., Tegen I., Viceto C., Voigt C., Vountas M., Walbröl A., Walter M., Wehner B., Wex H., Willmes S., Zannatta M., Zeppenfeld S. Atmospheric and surface processes, and feedback mechanisms determining Arctic amplification // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2023. V. 104, N 1. P. E208–E242.

7. Sand M., Berntsen T.K., von Salzen K., Flanner M.G., Langner J., Victor D.G. Response of Arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // *Nat. Clim. Change*. 2015. N 11. 4 p.
8. Nomura D., Granskog M.A., Fransson A., Chierici M., Silyakova A., Ohshima K.I., Cohen L., Delille B., Hudson S.R., Dieckmann G.S. CO₂ flux over young and snow-covered Arctic pack ice in winter and spring // *Biogeosci.* 2018. V. 15, N 11. P. 3331–3343.
9. Willis M.D., Leaitch R.W., Abbatt J.P.D. Processes controlling the composition and abundance of Arctic aerosol // *Rev. Geophys.* 2018. V. 56, N 4. P. 621–671.
10. Schmale J., Zieger P., Ekman A.M.L. Aerosols in current and future Arctic climate // *Nat. Clim. Change*. 2021. V. 11, N 11. P. 95–105.
11. Voosen P. Cleaner air is adding to global warming // *Science*. 2022. V. 377, N 6604. P. 353–354.
12. Persad G.G., Samset B.H., Wilcox L.J. Aerosols must be part of climate risk assessments // *Nature*. 2022. V. 611, N 7937. P. 662–664.
13. Yu L., Leng G., Tang Q. Varying contributions of greenhouse gases, aerosols and natural forcings to Arctic land surface air temperature changes // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17, N 12. P. 124004.
14. Bellouin N., Quaas J., Gryspeerdt E., Kinne S., Stier P., Watson-Parris D., Boucher O., Carslaw K.S., Christensen M., Daniaou A.-L., Dufresne J.-L., Feingold G., Fiedler S., Forster P., Gettelman A., Haywood J.M., Lohmann U., Malavelle F., Mauritsen T., McCoy D.T., Myhre G., Mulmenstidt J., Neubauer D., Possner A., Rugenstein M., Sato Y., Schulz M., Schwartz S.E., Sourdeval O., Storelmo T., Toll V., Winker D., Stevens B. Bounding global aerosol radiative forcing of climate change // *Rev. Geophys.* 2020. V. 58, N 1. P. e2019RG000660.
15. AMAP Assessment 2015: Black Carbon and Ozone as Arctic Climate Forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 2015. 116 p.
16. Qi L., Wang S. Sources of black carbon in the atmosphere and in snow in the Arctic // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 691. P. 442–454.
17. Kylling A., Groot Zwaaftink C.D., Stohl A. Mineral dust instantaneous radiative forcing in the Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, N 9. P. 4290–4298.
18. Zhou H., Yue X., Lei Y., Tian C., Ma Y., Cao Y. Aerosol radiative and climatic effects on ecosystem productivity and evapotranspiration // *Environ. Sci. Health*. 2021. V. 19. P. 100218.
19. Reddington C.L., Carslaw K.S., Stier P., Schutgens N., Coe H., Liu D., Allan J., Browse J., Pringle K.J., Lee L.A., Yoshioka M., Johnson J.S., Regayre L.A., Spracklen D.V., Mann G.W., Clarke A., Hermann M., Henning S., Wex H., Kristensen T.B., Leaitch W.R., Pöschl U., Rose D., Andreae M.O., Schmale J., Kondo Y., Oshima N., Schwarz J.P., Nenes A., Anderson B., Roberts G.C., Snider J.R., Leck C., Quinn P.K., Chi X., Ding A., Jimenez J.L., Zhang Q. The global aerosol synthesis and science project (GASSP) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98, N 9. P. 1857–1877.
20. Клепиков А.В., Данилов А.И. Полярная метеорология. (Результаты Российских исследований в 2015–2018 гг.) // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана*. 2021. Т. 57, № 3. С. 263–277.
21. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики — результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–573.
22. Manousakas M., Popovicheva O., Evangelidou N., Diapoulis E., Sitnikov N., Shonija N., Eleftheriadis K. Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2020. V. 72, N 1. P. 1–14.
23. Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Кобелев В.О., Касимов Н.С. Региональные источники загрязнения атмосферы Арктики черным углеродом по данным измерений на острове Белый // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 12. С. 1043–1050; Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Кобелев В.О., Касимов Н.С. Black carbon seasonal trends and regional sources on Bely Island (Arctic) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 2. P. 176–184.
24. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshinas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 3. P. 1271–1287.
25. Radionov V.F., Sidorova O.R., Golobokova L.P., Khuriganova O.I., Khodzher T.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Chernov D.G., Kozlov V.S., Panchenko M.V. Aerosol component of the atmosphere in Barentsburg // The current state of the natural environment on Spitzbergen archipelago / L.M. Savatyugin (ed.). St. Petersburg, 2021. P. 268–302. DOI: 10.30758/978-5-98364-101-3.
26. Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotelnikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhailchishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 13. P. 3941–3967.
27. Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Вертикальное распределение n-алканов в атмосферном аэрозоле российского сектора Арктики в сентябре 2020 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 12. С. 941–947; Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N. Vertical distribution of alkanes in atmospheric aerosol in the Russian Arctic in September 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 6. P. 577–585.
28. Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Пanchenko 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.

29. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 352 с.
30. Розенберг Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля — кинетически обусловленные параметры // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1983. Т. 19, № 1. С. 21–35.
31. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere — Theory, Experiments and Applications. Academic Press, 2000. 496 p.
32. Jaenicke R. Tropospheric aerosols // Aerosol-Cloud-Climate Interactions / P.V. Hobs (ed.). San Diego, CA: Academic Press, 1993. P. 1–31.
33. Schröder F., Kärcher B., Fiebig M., Petzold A. Aerosol states in the free troposphere at northern midlatitudes // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N D21. P. 8126–8133.
34. Kupiszewski P., Leck C., Tjernström M., Sjogren S., Sedlar J., Graus M., Müller M., Brooks B., Swietlicki E., Norris S., Hansel A. Vertical profiling of aerosol particles and trace gases over the central Arctic Ocean during summer // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 12405–12431.
35. Ferrero L., Cappelletti D., Busetto M., Mazzola M., Lupi A., Lanconelli C., Becagli S., Traversi R., Caiazzo L., Giardi F., Moroni B., Crocchianti S., Fierz M., Mocnik G., Sangiorgi G., Perrone M.G., Maturilli M., Vitale V., Udisti R., Bolzacchini E. Vertical profiles of aerosol and black carbon in the Arctic: a seasonal phenomenology along 2 years (2011–2012) of field campaigns // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 19. P. 12601–12629.
36. Price R., Baccarini A., Schmale J., Zieger P., Brooks I.M., Field P., Carslaw K.S. Late summer transition from a free-tropospheric to boundary layer source of Aitken mode aerosol in the high Arctic // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 5. P. 12601–12629.
37. Hayden K., Li S.-M., Makar P., Liggio J., Moussa S.G., Akingunola A., McLaren R., Staebler R.M., Darlington A., O'Brien J., Zhang J., Wolde M., Zhang L. New methodology shows short atmospheric lifetimes of oxidized sulfur and nitrogen due to dry deposition // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 11. P. 8377–8392.
38. 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.В., 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; Sakerin S.M., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Lisitsin 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.
39. Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 421–429; Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochyufarov A.O., Khuriganova O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitsin A.P., Shevchenko V.P. Chemical composition of atmospheric aerosol in the Arctic region and adjoining seas along the routes of marine expeditions in 2018–2019 // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 5. P. 480–489.
40. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлёв Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Отмахов В.И., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Изменение состава воздуха при переходе из тропосферы в стратосферу // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 874–881; Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Golobokova L.P., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov A.S., Otmakhov V.I., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Change in the air composition upon the transition from the troposphere to the stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 6. P. 567–576.
41. Ивлёв Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1982. 365 с.
42. Петрянов-Соколов И.В. Избранные труды. Законы фильтрации аэрозолей. М.: Наука, 2007. 458 с.
43. 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 атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 5. С. 391–402; Terpugova S.A., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Golobokova L.P., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Lisitsin 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.
44. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г. Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних арктических районах // Оптика атмосфер. 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.
45. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова 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 научно-исследовательском стационаре «Ледовая база “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.
46. Turetta C., Feltracco M., Barbaro E., Spolaor A., Barbante C., Gambaro A. A Year-round measurement of

- water-soluble trace and rare earth elements in Arctic aerosol: Possible inorganic tracers of specific events // Atmosphere. 2021. V. 12, N 6. P. 694.
47. *Kawai K., Matsui H., Tobo Y.* Dominant role of Arctic dust with high ice nucleating ability in the Arctic lower troposphere // Geophys. Res. Lett. 2023. V. 50, N 8. P. e2022GL102470.
 48. *Rahn K.A.* Relative importances of North America and Eurasia as sources of Arctic aerosol // Atmos. Environ. 1981. V. 15, N 8. P. 1447–1455.
 49. *Pacyna J.M.* Chemical tracers of the origins of arctic air pollution // Pollution of the Arctic Atmosphere / W.T. Sturges (ed.). London, New York: Elsevier, 1991. P. 97–122.
 50. *Макоско А.А., Матешева А.В.* К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 1. С. 34–45.
 51. *Макоско А.А., Матешева А.В.* Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы Арктической зоны России в 1980–2050 гг. с учетом сценариев изменения климата // Арктика: экология и экономика. 2020. № 1. С. 45–52.
 52. *Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Очищение арктической атмосферы путем выноса загрязнений в средние широты // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14, № 6–7. С. 505–509.
 53. *Виноградова А.А., Шевченко В.П., Пономарева Т.Я., Ключиткин А.А.* Вклад атмосферных аэрозолей в загрязнение вод моря Лаптевых // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 5–6. С. 435–440.
 54. *Виноградова А.А., Шевченко В.П., Пономарева Т.Я., Ключиткин А.А.* Тренды 15-летних изменений в процессах переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в районе м. Лаптевых // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 5–6. С. 426–431.
 55. *Виноградова А.А., Шевченко В.П.* Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении Северного Ледовитого океана и его морей // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 387–394.
 56. *Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 471–480.
 57. *Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483; *Vinogradova A.A., Romanova T.Ya.* Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian Arctic (1986–2010) // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.
 58. *Виноградова А.А., Васильев А.В., Иванова Ю.А.* Загрязнение воздуха черным углеродом в районе о-ва Врангеля: сравнение источников и вкладов территорий Евразии и Северной Америки // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 907–912; *Vinogradova A.A., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A.* Air pollution by black carbon in the region of Wrangel Island: Comparison of Eurasian and American sources and their contributions // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 2. P. 97–103.
 59. *Виноградова А.А., Иванова Ю.А.* Атмосферный перенос черного углерода в Российскую Арктику от различных источников (зима и лето 2000–2016 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 6. С. 425–432; *Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A.* Atmospheric transport of black carbon to the Russian Arctic from different sources: Winter and summer 2000–2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 6. P. 758–766.
 60. *Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Ковач Р.Г., Касимов Н.С., Кобелев В.О., Ситицкий А.И.* Лесные пожары как источник черного углерода в Арктике летом 2022 г. // Арктика: Экология и экономика. 2023. Т. 13, № 2. С. 257–270.
 61. *Popovicheva O.B., Evangelidou N., Koblelev V.O., Chichayeva M.A., Eleftheriadis K., Gregorič A., Kasimov N.S.* Siberian Arctic black carbon: Gas flaring and wildfire impact // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, N 19. P. 5983–6000.
 62. *Козлов А.С., Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Власенко А.Л., Еременко С.И., Малышкин С.Б.* Исследование механических процессов образования субмикронного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 664–666.
 63. *Broese J., Carslaw K.S., Arnold S.R., Pringle K., Boucher O.* The scavenging processes controlling the seasonal cycle in Arctic sulphate and black carbon aerosol // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 15. P. 6775–6798.
 64. *Willis M.D., Leaith W.R., Abbatt J.P.D.* Processes controlling the composition and abundance of arctic aerosol // Rev. Geophys. 2018. V. 56, N 1. P. 1–51.
 65. *Schmale J., Sharma S., Decesari S., Pervov J., Masling A., Hansson H.-C., von Salzen K., Skov H., Andrews E., Quinn P.K., Upchurch L.M., Eleftheriadis K., Traversi R., Gilardoni S., Mazzola M., Laing J., Hopke P.* Pan-Arctic seasonal cycles and long-term trends of aerosol properties from 10 observatories // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, N 5. P. 3067–3096.
 66. *Boyer M., Aliaga D., Pervov J.B., Angot H., Quéléver L.L.J., Dada L., Heutte B., Dall'Osto M., Beddows D.C.S., Brasseur Z., Beck I., Bucci S., Duetzsch M., Stohl A., Laurila T., Asmi E., Massling A., Thomas D.C., Nøjgaard J.K., Chan T., Sharma S., Tunved P., Radovan Krejci R., Hansson H.C., Bianchi F., Lehtipalo K., Wiedensohler A., Weinhold K., Kulmala M., Petäjä T., Sipilä M., Schmale J., Jokinen T.* A full year of aerosol size distribution data from the central Arctic under an extreme positive Arctic Oscillation: Insights from the Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC) expedition // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 1. P. 389–415.
 67. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K.S., Рассказчикова Т.М., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 1. Метан // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 2. С. 100–110; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Gurulev E.V., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Law K., Nédélec Ph., Rasskazchikova T.M., Paris J.-D., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Air Composition over the Russian Arctic: 1 – Methane // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 5. P. 470–489.
 68. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ancellet G., Белан Б.Д., Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K.S., Nédélec Ph., Рассказчикова Т.М., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Состав

воздуха над Российским сектором Арктики. 2. Углекислый газ // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 4. С. 280–288; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Gurulev E.V., Davydov D.K., Ivlev G.A.,*

Kozlov A.V., Law K., Nédélec Ph., Rasskazchikova T.M., Paris J.-D., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Air composition over the Russian Arctic: 2 – Carbon Dioxide // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 5. P. 490–500.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, O.I. Berdashkinova, L.P. Golobokova, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, N.A. Onischuk, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov, T.V. Khodzher. **Air composition over the Russian Arctic. 4. Atmospheric aerosols.**

This work presents the analysis of the spatial distribution of number concentrations, size distribution, and chemical composition of aerosol particles measured for the first time over the seas of the Russian Arctic. Various types of vertical distribution of the number concentration were recorded, characteristic of both coastal marine and continental areas. Most of them turned out to be of the continental type. Attention is also drawn to the almost complete absence of coarse particles above 2–3 km over all seas. The chemical composition of the Arctic aerosol at altitudes of 200 m 5000 m contains ions that can be attributed to both marine and continental. The identifiable non-carbon elemental part of the aerosol (without ions) over the Arctic is 3–4 times larger than of ions. Over all seas and at both altitudes, the Arctic aerosols mainly contain elements of terrigenous origin – Al, Cu, Fe, Si. Over almost all seas, except the Barents Sea, Si dominates in the elemental composition of the aerosol, its contribution over the Chukchi Sea reaching 85%. The analysis of backward trajectories showed that in all cases considered, whether the aerosol was formed over the continent or sea, air trajectories passed both over sea and over land. In this case, the formed particles could be enriched with additional ions and elements along the way.

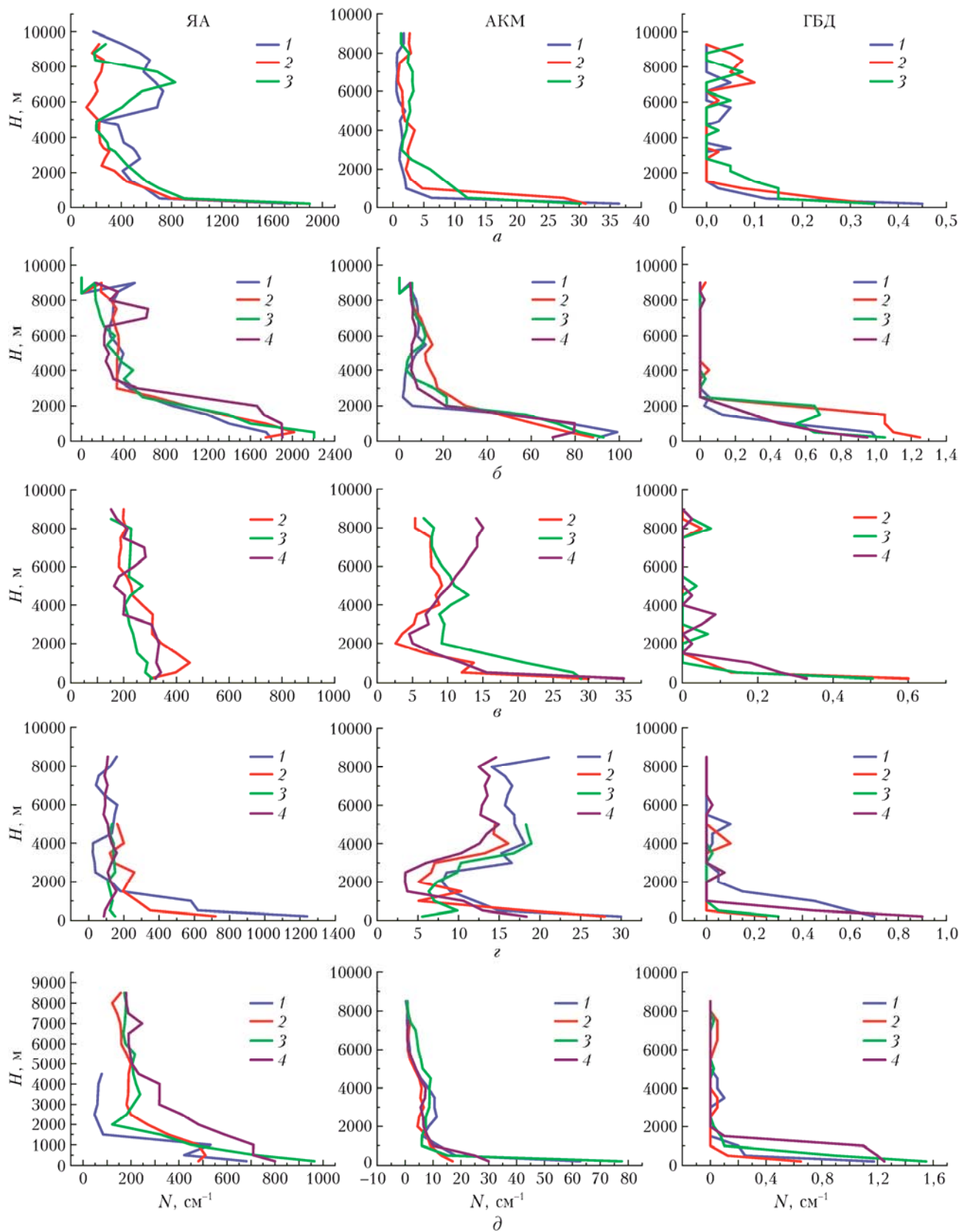


Рис. 1. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля (N) над морями Российского сектора Арктики в сентябре 2020 г.: a – Баренцево море, 04.09.2020, 13:30 (1), 14:22 (2), 14:52 (3); b – Карское море, 06.09.2020, 11:25 (1), 12:13 (2), 12:42 (3), 13:29 (4); v – море Лаптевых, 09.09.2020, 04:21 (2), 04:50 (3), 05:31 (4); z – Восточно-Сибирское море, 15.09.2020–16.09.2020, 23:08 (1); 23:40 (2), 23:51 (3), 00:22 (4); d – Чукотское море, 14.09.2020–15.09.2020, 00:13 (1); 00:50 (2), 01:18 (3), 01:50 (4)

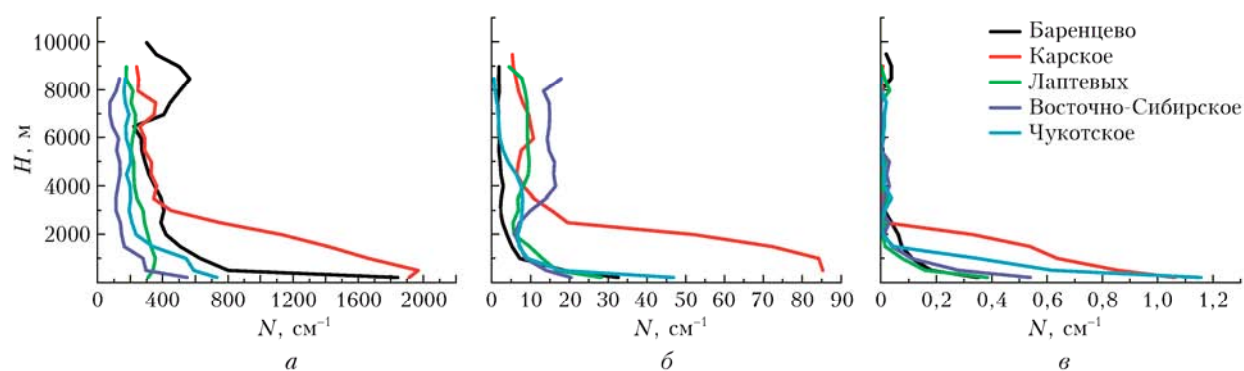


Рис. 2. Средние счетные концентрации аэрозоля над морями Российского сектора Арктики в сентябре 2020 г.: *а* – ЯА; *б* – АКМ; *в* – ГБД

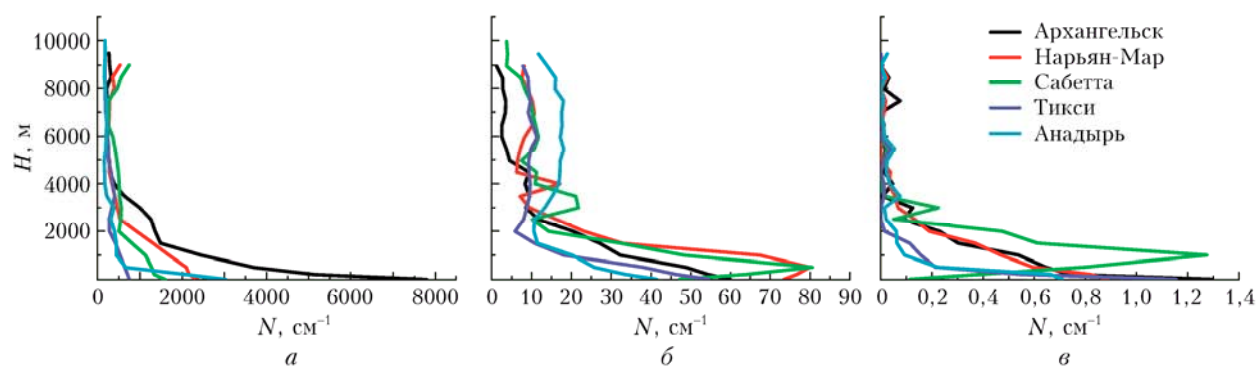


Рис. 3. Средние счетные концентрации аэрозоля над прибрежными районами Российского сектора Арктики в сентябре 2020 г.: *а* – ЯА; *б* – АКМ; *в* – ГБД

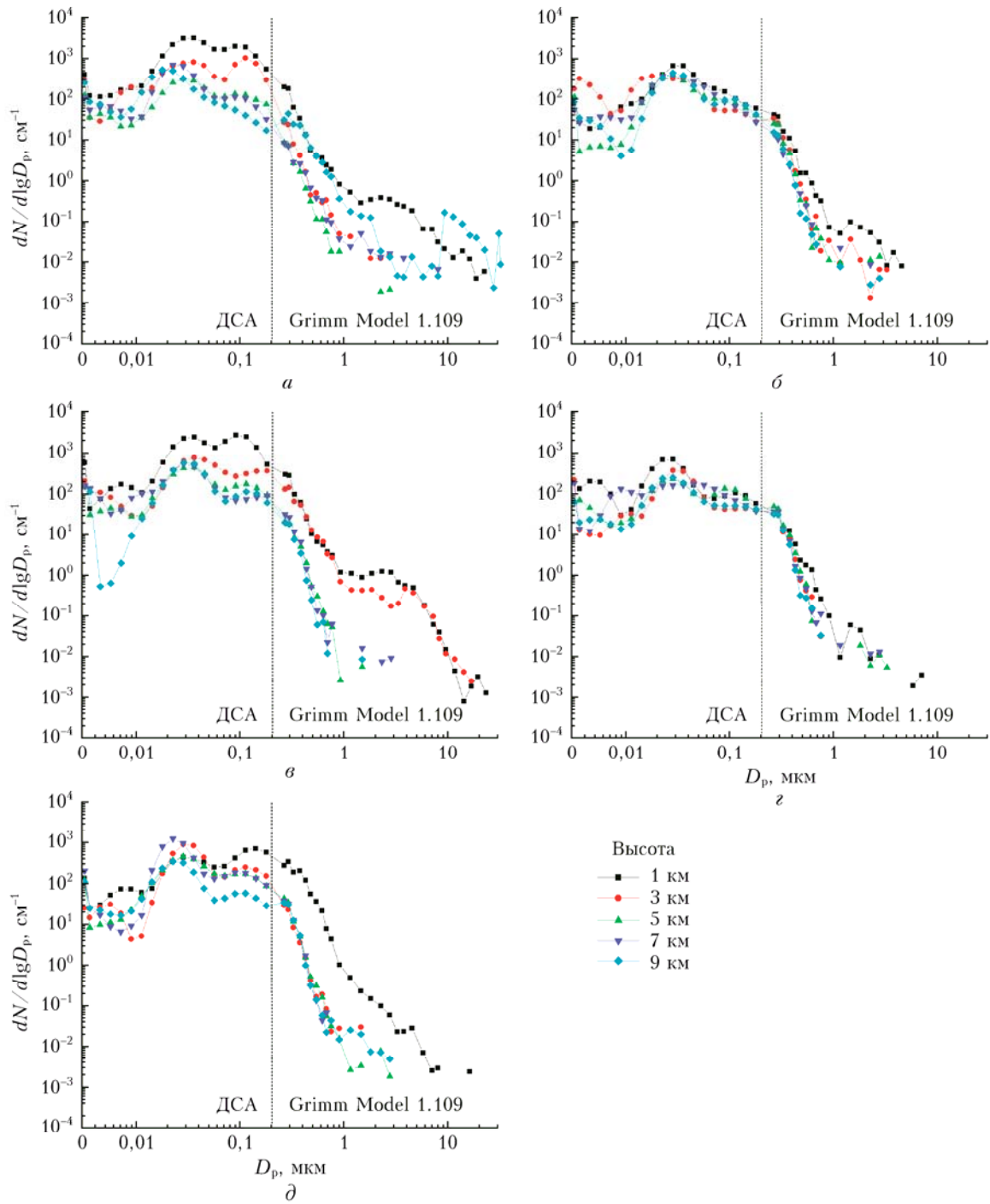


Рис. 4. Распределение частиц по размерам над морями Российского сектора Арктики: Баренцево море (а); Чукотское море (б); Карское море (в); Восточно-Сибирское море (г); море Лаптевых (д)

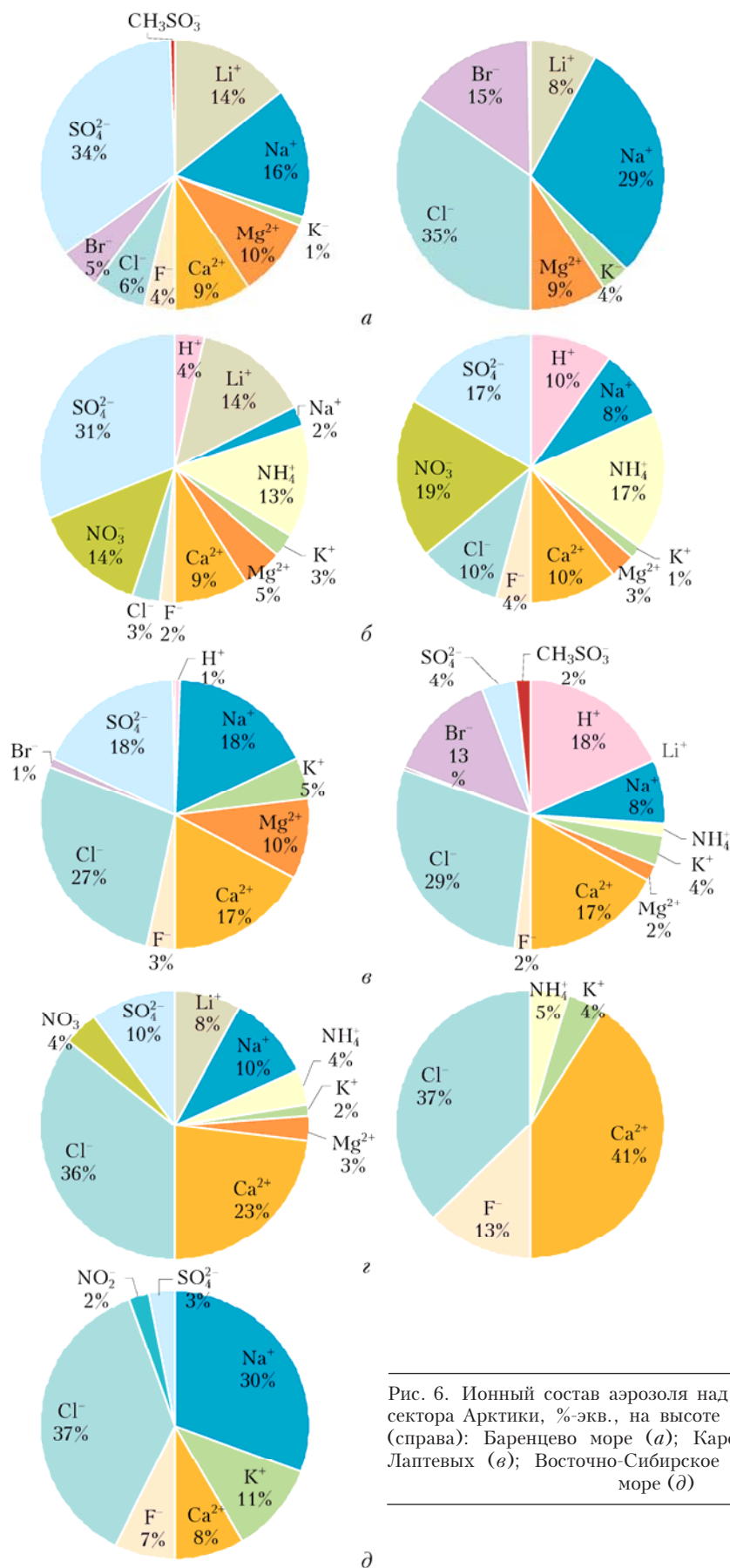


Рис. 6. Ионный состав аэрозоля над морями Российского сектора Арктики, %-экв., на высоте 200 (слева) и 5000 м (справа): Баренцево море (а); Карское море (б); море Лаптевых (в); Восточно-Сибирское море (з); Чукотское море (д)

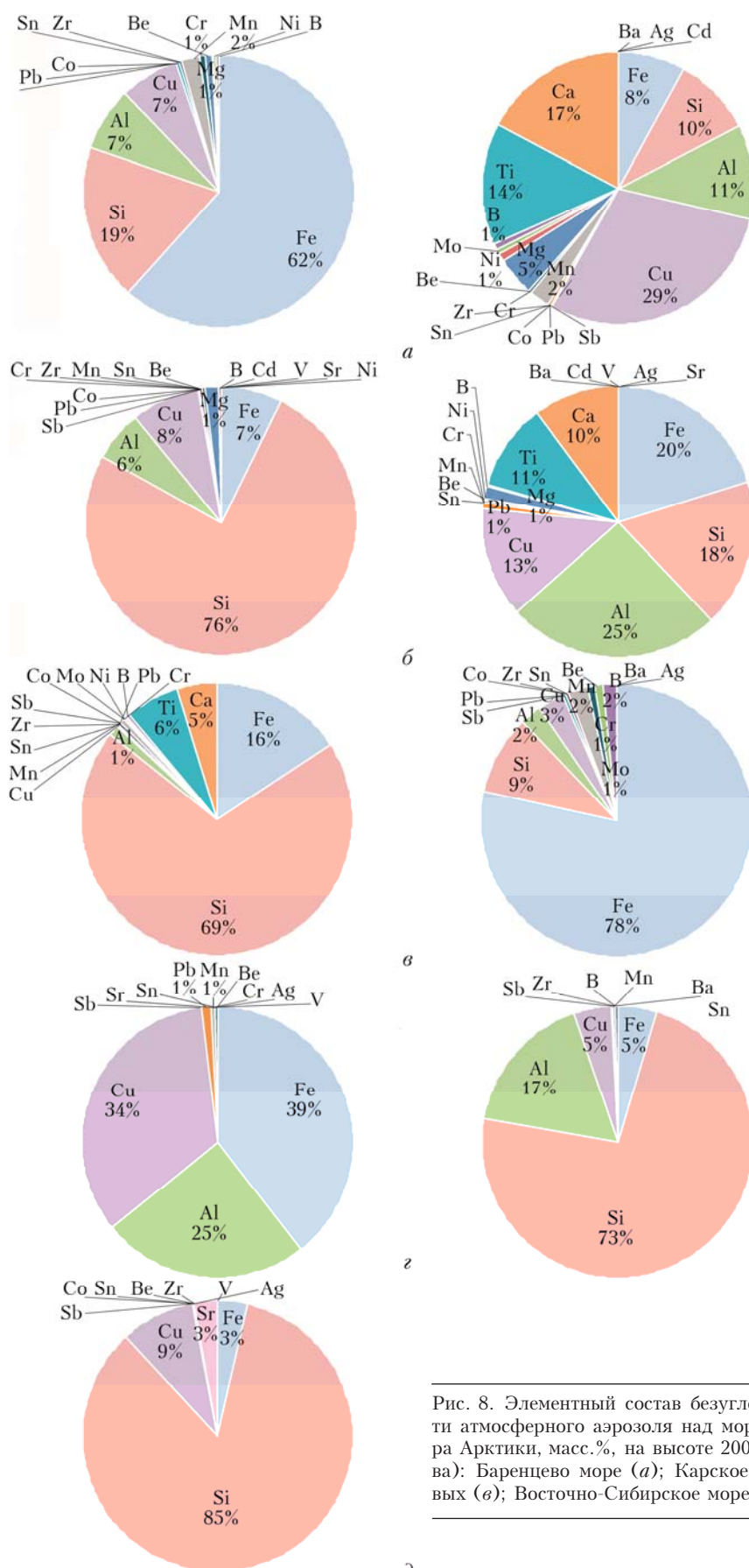


Рис. 8. Элементный состав безуглеродной бессолевой части атмосферного аэрозоля над морями Российского сектора Арктики, масс.%, на высоте 200 (слева) и 5000 м (справа): Баренцево море (а); Карское море (б); море Лаптевых (в); Восточно-Сибирское море (г); Чукотское море (д)

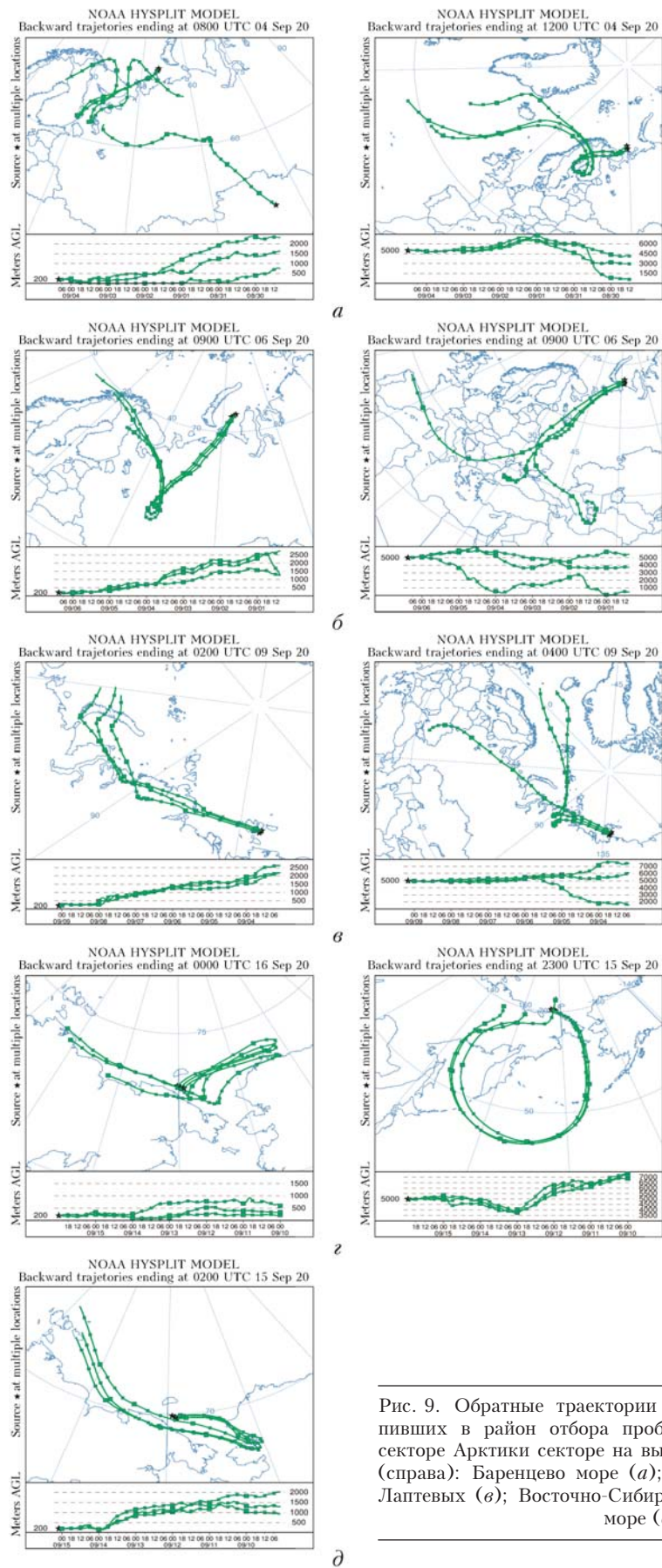


Рис. 9. Обратные траектории воздушных масс, поступивших в район отбора проб аэрозоля в Российском секторе Арктики на высоте 200 (слева) и 5000 м (справа): Баренцево море (*a*); Карское море (*б*); море Лаптевых (*в*); Восточно-Сибирское море (*г*); Чукотское море (*д*)