

УДК 551.510.4

Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в 2020 г.

П.Н. Зенкова, Д.Г. Чернов, В.П. Шмаргунов,
М.В. Панченко, Б.Д. Белан*

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

Поступила в редакцию 29.07.2021 г.

В сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» было проведено широкомасштабное комплексное исследование состава тропосферы над российским сектором Арктики. Исследована пространственно-временная изменчивость концентраций аэрозоля и черного углерода (BC). По данным зондирования проанализированы общие и отличительные черты пространственной изменчивости вертикальных профилей концентрации аэрозоля и BC. Получены интегральные концентрации BC в столбе атмосферы в арктических и субарктических широтах.

Ключевые слова: аэрозоль, черный углерод, сажа, вертикальное распределение, самолет-лаборатория, Арктика; aerosol, black carbon, soot, vertical profiles, aircraft laboratory, the Arctic.

Введение

Арктика — важная составляющая климатической системы Северного полушария. За последние десятилетия именно на ее территории наблюдаются значительные изменения морского льда, снежного покрова, вечной мерзлоты и циркуляции атмосферы [1, 2], которые во многом являются результатом изменения радиационного режима атмосферы и альbedo снежно-ледовой поверхности [3–5].

В настоящее время, по мнению специалистов, второй после CO₂ фактор наблюдаемых климатических изменений в Арктике — поступление в атмосферу региона поглощающего аэрозоля антропогенного происхождения. Поглощающие частицы снижают альbedo однократного рассеяния в атмосфере и, оседая на поверхность ледового и снежного покрова, уменьшают его отражающие свойства, что приводит к дополнительному повышению температуры воздуха [6, 7]. Исследования [8–11] показали, что выбросы частиц черного углерода (black carbon — BC) при неполном сгорании ископаемого топлива и биомассы в средних широтах Северного полушария, — один из основных источников загрязнения атмосферы. Продолжается уменьшение площади морского льда в Арктике, что делает этот регион все более доступным, а это приводит к потенциальному увеличению выбросов местных

промышленных (судоходство [12–14], добыча нефти и газа [15]) источников. В работах [16–26], основанных на измерениях и моделировании пространственно-временной изменчивости концентрации аэрозоля и BC, отмечается усиление загрязнения всей арктической тропосферы: в нижних слоях преобладает вклад источников Северной Евразии, а на больших высотах — Северной Америки и Азии.

Известно, что радиационный аэрозольный форсинг зависит не только от концентраций, но и от микрофизических свойств частиц [27]. Модельные расчеты [5, 28, 29] показывают, что температура поверхности в Арктике сложным образом зависит от вертикального распределения рассеивающих и поглощающих свойств аэрозоля в видимом диапазоне длин волн.

За последнее десятилетие заметно возросло число работ, посвященных исследованию свойств аэрозоля в описываемом регионе [10–15, 19–32]. В российском секторе Арктики измерения *in situ* регулярно ведутся на полярных станциях в пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) [33, 34], пгт. Тикси [35, 36], на ледовой базе «Мыс Баранова» (арх. Северная Земля) [37, 38] и в ежегодных морских экспедициях [39–43]. Также проводятся немногочисленные исследования с борта самолетов-лабораторий [44–46]. Но следует отметить, что большинство публикаций посвящено результатам наблюдений свойств аэрозоля в приземном слое или интегральных оптических характеристик по всей толще атмосферы (АОТ), а исследования вертикального распределения аэрозольных примесей над Арктическим регионом пока фрагментарны по районам и срокам.

* Полина Николаевна Зенкова (zpn@iao.ru); Дмитрий Григорьевич Чернов (chernov@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru).

Подчеркнем, что и на сегодняшний день ощущается серьезная нехватка результатов инструментальных измерений, чем обусловлена высокая неопределенность оценок влияния различных факторов на климатические изменения [7, 47, 48].

Исходя из актуальности этой проблемы, в сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» было проведено широкомасштабное комплексное исследование состава тропосферы над российским сектором Арктики. В настоящей работе обсуждаются результаты измерений вертикального распределения содержания субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества.

1. Район зондирования и аппаратура

Маршрут самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» показан на рис. 1. Большая часть полетов проходила со сменой высоты. Самолет набирал высоту до 9–10 км, затем снижался до 200 м над морем и до 500 м – над сушей. На высотах 200 м (500 м над сушей), 5 и 9 км самолет находился в горизонтальном полете в течение ~ 10 мин.

Описание самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик», аппаратуры, методики калибровки и измерений приведено в [49].

Измерения массовой концентрации поглощающего вещества M_{BC} ($\text{мкг}/\text{м}^3$) выполнены при помощи аэлометра МДА-02 разработки ИОА СО РАН,

а регистрация коэффициента направленного рассеяния «сухой основы» субмикронных частиц μ_d ($\varphi = 45^\circ$) ($\text{Мм}^{-1}\text{ср}^{-1}$) на длине волны 0,53 мкм – при помощи нефелометра ФАН-М. Эмпирическая оценка массовой концентрации субмикронного аэрозоля M_A ($\text{мкг}/\text{м}^3$) осуществлялась по формуле $M_A = 2,4\mu_d$ ($\varphi = 45^\circ$) для плотности частиц 1,5 $\text{г}/\text{см}^3$.

2. Анализ экспериментальных данных

2.1. Высотные распределения концентрации аэрозоля и поглощающего вещества

В ходе самолетной арктической кампании были зарегистрированы различные типы вертикального распределения массовой концентрации субмикронного аэрозоля M_A и поглощающего вещества M_{BC} (рис. 2).

Вертикальные распределения M_A и M_{BC} над Баренцевым (рис. 2, а) и Карским (рис. 2, б) морями характеризуются уменьшением значений с высотой и отчетливо выраженным слоем перемешивания до 5 км. Коэффициент корреляции между M_A и M_{BC} K по всему массиву данных равен 0,93 для Баренцева моря и 0,67 для Карского моря. Большие значения массовой концентрации в нижних слоях атмосферы можно объяснить существованием источников аэрозоля и поглощающего вещества

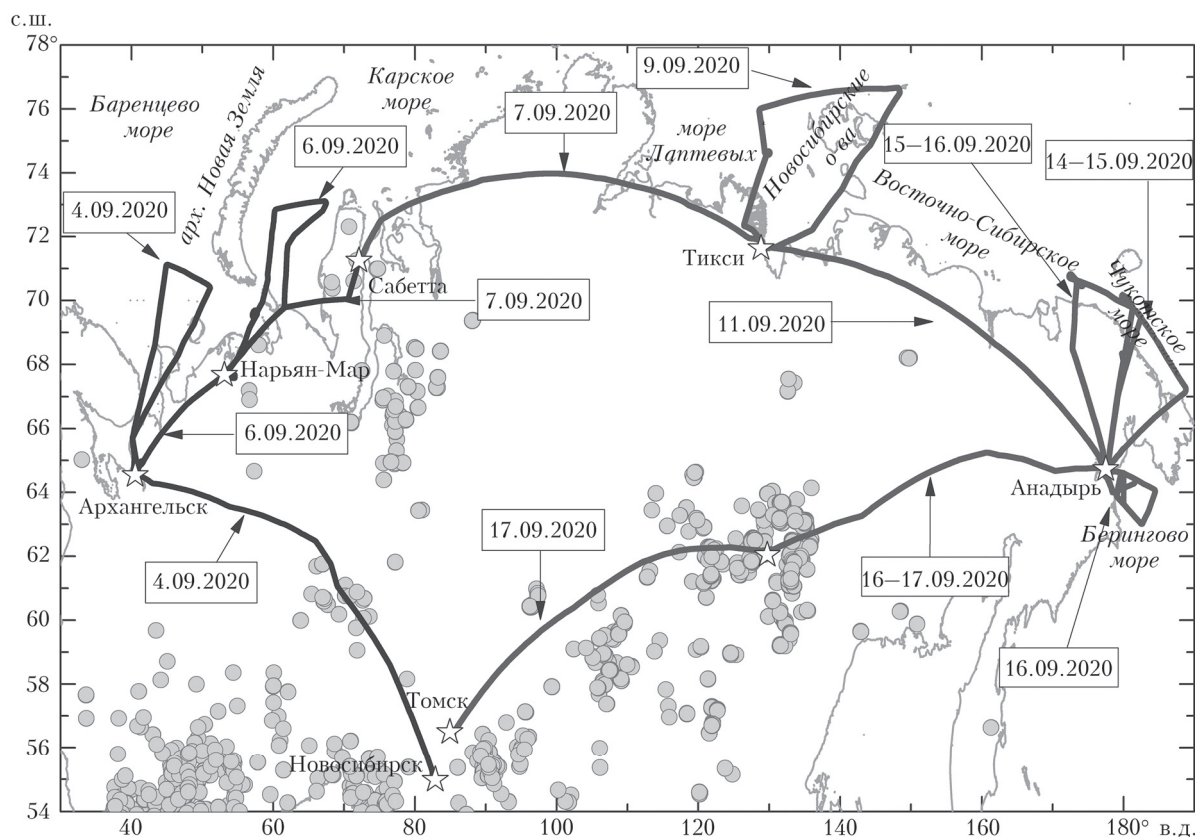


Рис. 1. Карта полетов самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в сентябре 2020 г.; очаги лесных пожаров (кружки)

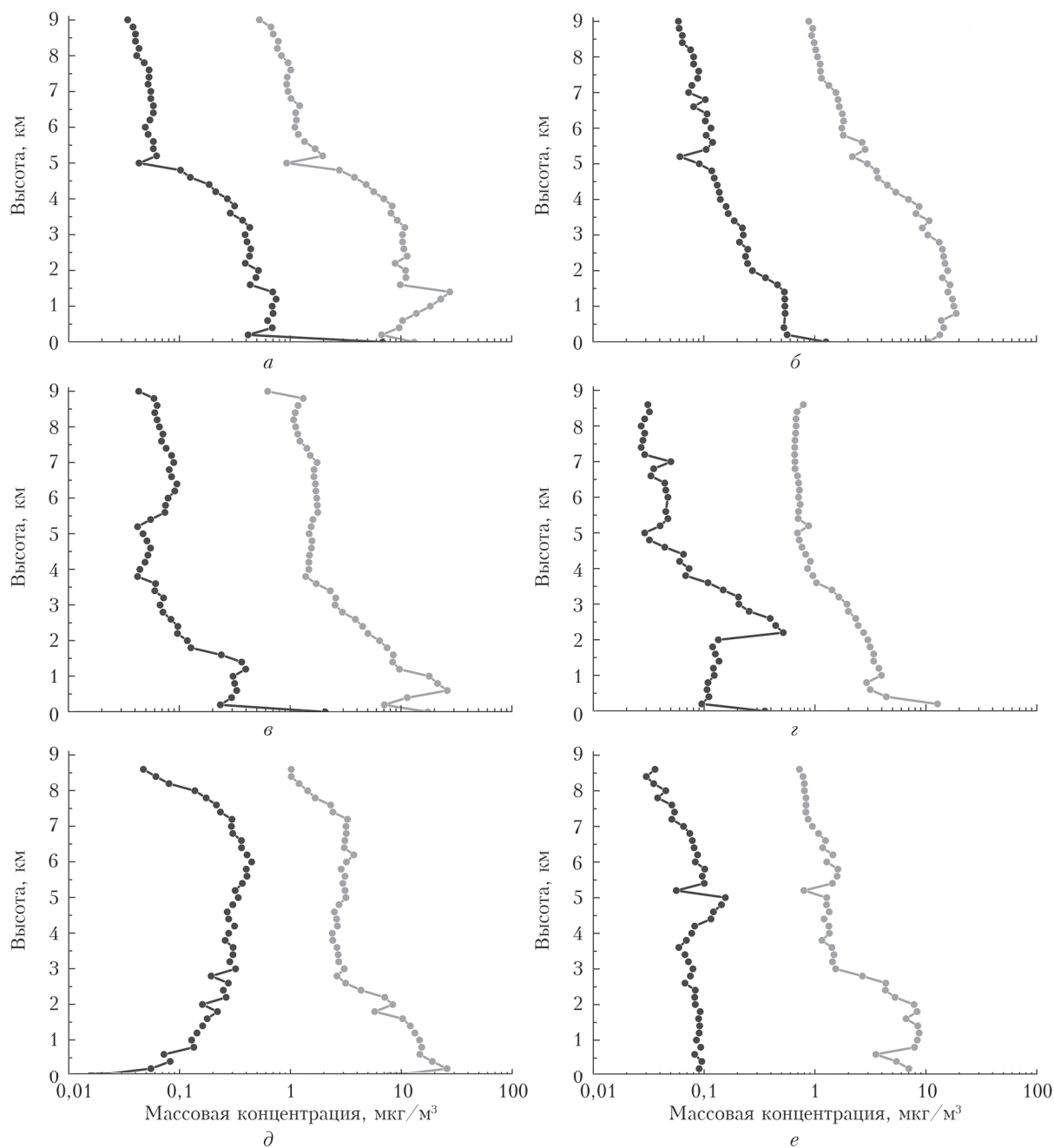


Рис. 2. Вертикальные профили массовых концентраций субмикронного аэрозоля (серый) и поглощающего вещества (черный) над морями: *a* – Баренцевым; *б* – Карским; *в* – Лаптевых; *г* – Восточно-Сибирским; *д* – Чукотским; *е* – Беринговым

на поверхности земли. Анализ обратных траекторий, полученных с использованием модели HYSPLIT (<https://ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>), показал, что воздушные массы во время полетов в этот район поступали с европейской части континента (рис. 3, *a*). Высокие значения коэффициентов корреляции, по-видимому, свидетельствуют о том, что измерения проводились в ранее сформированной единой воздушной массе, пришедшей в регион исследования.

Вертикальные распределения M_A и M_{BC} над морем Лаптевых (рис. 2, *в*) характеризуются уменьшением значений с высотой и слабым слоем переме-

шивания до 2 км; $K = 0,57$ по всему массиву данных для моря Лаптевых.

Над Восточно-Сибирским морем (рис. 2, *г*) вертикальное распределение M_A имеет слабо выраженный слой перемешивания до 2 км с низкими концентрациями 13 мкг/м^3 в приземном слое и с быстрым спадом до 3 мкг/м^3 на 2 км. Массовая концентрация поглощающего вещества в нижних слоях атмосферы (0,5–2 км) характеризуется низкими значениями, $\sim 0,1 \text{ мкг/м}^3$, на высотах от 2 до 3,5 км наблюдается повышение M_{BC} до $0,5 \text{ мкг/м}^3$.

Зарегистрированные вертикальные распределения субмикронного аэрозоля и «сажи» неоднородны

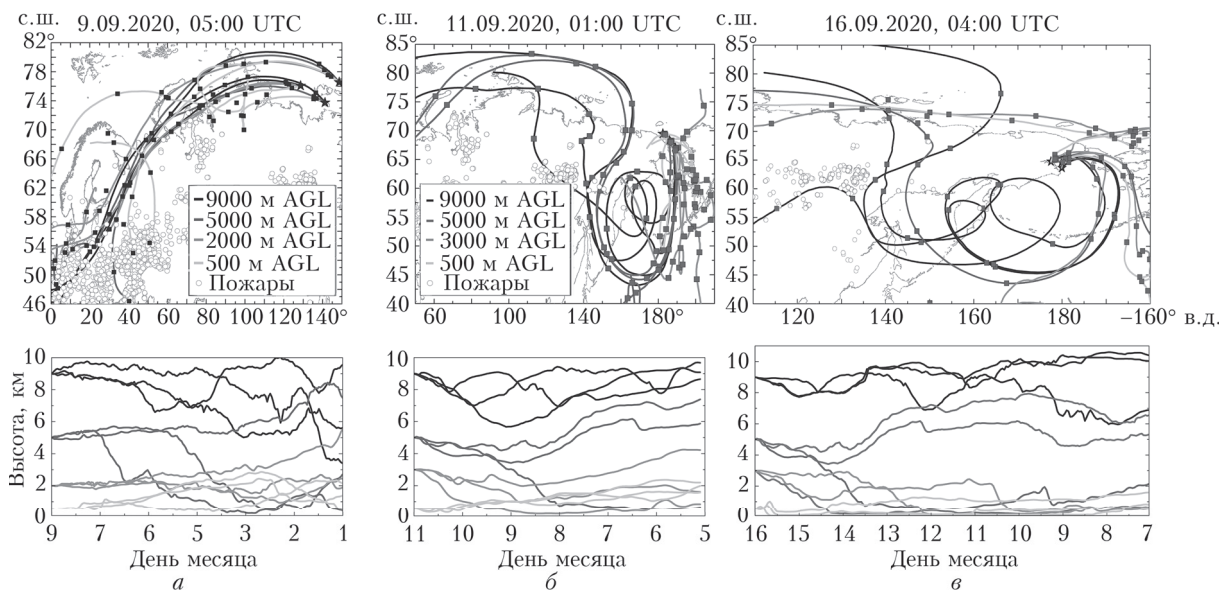


Рис. 3. Обратные 7-суточные траектории движения воздушных масс и очаги температурных аномалий (кружки), принесенных на высоты 0,5; 2; 3; 5; 9 км над акваторией морей: а – Лаптевых; б – Чукотского; в – Берингова

и на разных высотах сформированы разными воздушными массами. Это вполне понятный результат, поскольку по мере перемещения воздушной массы над территориями, где в поверхностном слое отсутствуют постоянно действующие мощные источники сажи, формирование общего состава субмикронного аэрозоля определяется природными процессами, а основная масса поглощающих частиц поступает в регион в результате переноса из удаленных промышленных районов.

Над Чукотским морем (рис. 2, д) было зарегистрировано возрастание M_{BC} с высотой. На высотах от 2 до 7 км $M_{BC} = 0,2–0,5$ мкг/м³. В вертикальном профиле M_A над Чукотским морем наблюдается уменьшение значений с высотой, с ярко выраженным слоем перемешивания до 2,5 км. Отметим, что на высотах от 2,5 до 7,5 км над Чукотским морем $M_A \approx 2,9 \pm 0,4$ мкг/м³, что выше, чем над морем Лаптевых в 1,8 раз ($M_A = 1,6 \pm 0,1$ мкг/м³), над Восточно-Сибирским морем в 4 раза ($M_A = 0,7 \pm 0,05$ мкг/м³) и над Беринговым морем в 2,3 раза ($M_A = 1,3 \pm 0,2$ мкг/м³).

Аналогичные профили концентрации ВС были получены в рамках программы POLARCAT в 2008 г. во время полетов в районе исследовательской станции Барроу на Аляске [50, 51], а также вдоль прибрежной зоны моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей [46]. Вероятно, отсутствие источников аэрозоля у поверхности земли и процессы дальнего переноса загрязнений повлияли на формирование инверсионного распределения концентраций поглощающего аэрозоля. Отметим, что анализ обратных траекторий и спутниковых карт очагов температурных аномалий (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) (см. рис. 1) показывает, что воздушные массы поступали в основном с европейской части

континента и проходили вне зон природных пожаров, следовательно, частицы ВС имеют в основном антропогенное происхождение.

Высотное распределение M_A над Беринговым морем (рис. 2, е) характеризуется уменьшением значений с высотой и ярко выраженным слоем перемешивания до 3 км. Тогда как для вертикального распределения M_{BC} слой перемешивания отсутствует, и до 3 км M_{BC} варьируется в диапазоне 0,08–0,1 мкг/м³. Коэффициент корреляции M_A и M_{BC} по всему массиву данных для Берингова моря (рис. 2, е) составляет 0,27, а анализ обратных траекторий (рис. 3, в) показал, что вертикальные профили M_A и M_{BC} были сформированы на разных высотах различными воздушными массами.

2.2. Пространственное распределение массовой концентрации аэрозоля и сажи

Длительные перелеты между населенными пунктами (например, Тикси – Анадырь, Якутск – Томск) проходили на высотах 9–10 км вплоть до захода на посадку (рис. 4).

Рассмотрим результаты для четырех трасс: 1) Нарьян-Мар – Сабетта; 2) Тикси – Анадырь; 3) Новосибирск – Архангельск; 4) Якутск – Томск.

Перелет Нарьян-Мар – Сабетта (рис. 4, а) состоялся 7 сентября 2020 г. После набора высоты до 8–10 км полет проходил в единой воздушной массе ($K = 0,8$) с повышенным содержанием поглощающего субмикронного аэрозоля.

В течение горизонтального полета на высоте выше 8 км $M_A = 0,4 \pm 0,12$ мкг/м³, а $M_{BC} = 0,14 \pm 0,09$ мкг/м³. По мере передвижения на восток, в направлении Сабетты, содержание «сажи» и аэрозоля снижалось. На наш взгляд, участок Нарьян-Мар – Сабетта является ярким примером переноса вещества от антропогенных источников с запада.

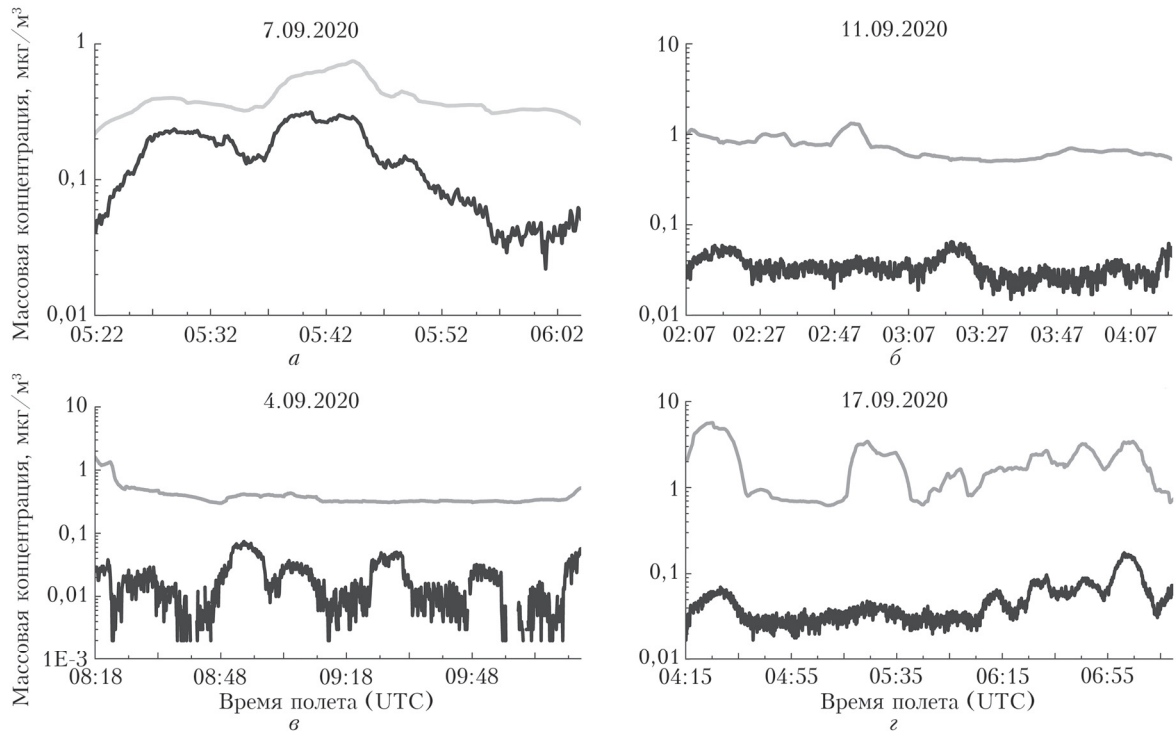


Рис. 4. Горизонтальные распределения массовых концентраций поглощающего вещества (черная кривая) и аэрозоля (серая кривая) на трассах: *а* – Нарьян-Мар – Сабетга; *б* – Тикси – Анадырь; *в* – Новосибирск – Архангельск; *г* – Якутск – Томск

На трассе Тикси – Анадырь (рис. 4, *б*) на высоте более 8 км $M_A = 0,72 \pm 0,19$ мкг/м³, а $M_{BC} = 0,03 \pm 0,01$ мкг/м³. На этом участке практически отсутствует корреляция между M_A и M_{BC} ($K = 0,15$). По мере приближения к Анадырю содержание субмикронного аэрозоля уменьшилось.

Несмотря на то, что полет Томск – Архангельск (рис. 4, *в*), состоявшийся 4 сентября 2020 г., проходил над промышленными регионами и очагами пожаров (см. рис. 1), здесь были зарегистрированы низкие массовые концентрации $M_A = 0,4 \pm 0,19$ мкг/м³ и $M_{BC} = 0,02 \pm 0,02$ мкг/м³ и отсутствие корреляции между ними ($K = 0,1$).

Полет из Якутска в Томск (рис. 4, *г*) проходил над очагами лесных пожаров (см. рис. 1). На этом участке $M_A = 1,91 \pm 1,21$ мкг/м³ – выше, чем на трех других участках; $M_{BC} = 0,05 \pm 0,03$ мкг/м³. По мере приближения к Томску содержание субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества увеличивалось.

2.3. Суммарное содержание ВС в столбе атмосферы 0,2–9 км

Пространственное распределение суммарного содержания поглощающего вещества $M_{BC}(col)$ в столбе атмосферы до 9 км приведено на рис. 5. Над сушей $M_{BC}(col)$ рассчитывалось по измерениям, регистрируемым при взлетах и посадках в населенных пунктах. Над Архангельском $M_{BC}(col) = 0,6–6,9$ мг/м², над Нарьян-Маром – 0,4–6,5 мг/м², над Сабетгой – 1,4–2,5 мг/м², над Тикси – 0,3–1,3 мг/м², над Анадырем – 0,5–1,3 мг/м², над

Якутском – 0,9–1,0 мг/м². По мере передвижения с запада на восток $M_{BC}(col)$ над населенными пунктами уменьшается и разброс значений становится меньше.

Суммарное содержание поглощающего вещества в столбе атмосферы над акваториями морей Российской Арктики было определено по данным, регистрируемым при снижениях с 9 км до 200 м и подъемах самолета с 200 м до 9 км. Над Баренцевым морем $M_{BC}(col)$ изменялось от 0,36 до 1,75 мг/м², над Карским морем – от 1,12 до 2,54 мг/м², над морем Лаптевых – от 0,41 до 1,5 мг/м², над Восточно-Сибирским морем – от 0,27 до 1,67 мг/м², над Чукотским морем – от 0,21 до 0,88 мг/м², над Беринговым морем – от 0,52 до 0,6 мг/м².

Отметим заметную пространственную неоднородность распределения «сажи» и субмикронного аэрозоля над Чукотским морем. Сравним средние значения M_{BC} и M_A , измеренные на горизонтальных участках на высоте 200 м в двух разных районах. На первом участке протяженностью 83 км (173,43° з.д., 68,04° с.ш. – 174,85° з.д., 68,57° с.ш.) $M_{BC} = 0,14 \pm 0,18$ мкг/м³, $M_A = 11,04 \pm 5,6$ мкг/м³, $K = 0,84$. На втором отрезке длиной 91 км (178,96° з.д., 69,85° с.ш. – 177,62° з.д., 69,52° с.ш.) $M_{BC} = 0,07 \pm 0,07$ мкг/м³, $M_A = 46,64 \pm 33,57$ мкг/м³, $K = -0,2$.

Единичное аномально высокое значение $M_{BC}(col) = 8,48$ мг/м² было зарегистрировано в Чукотском море около о-ва Колючин (174,38° з.д., 67,4° с.ш.). Именно над этой акваторией нами был отмечен инверсионный характер вертикального

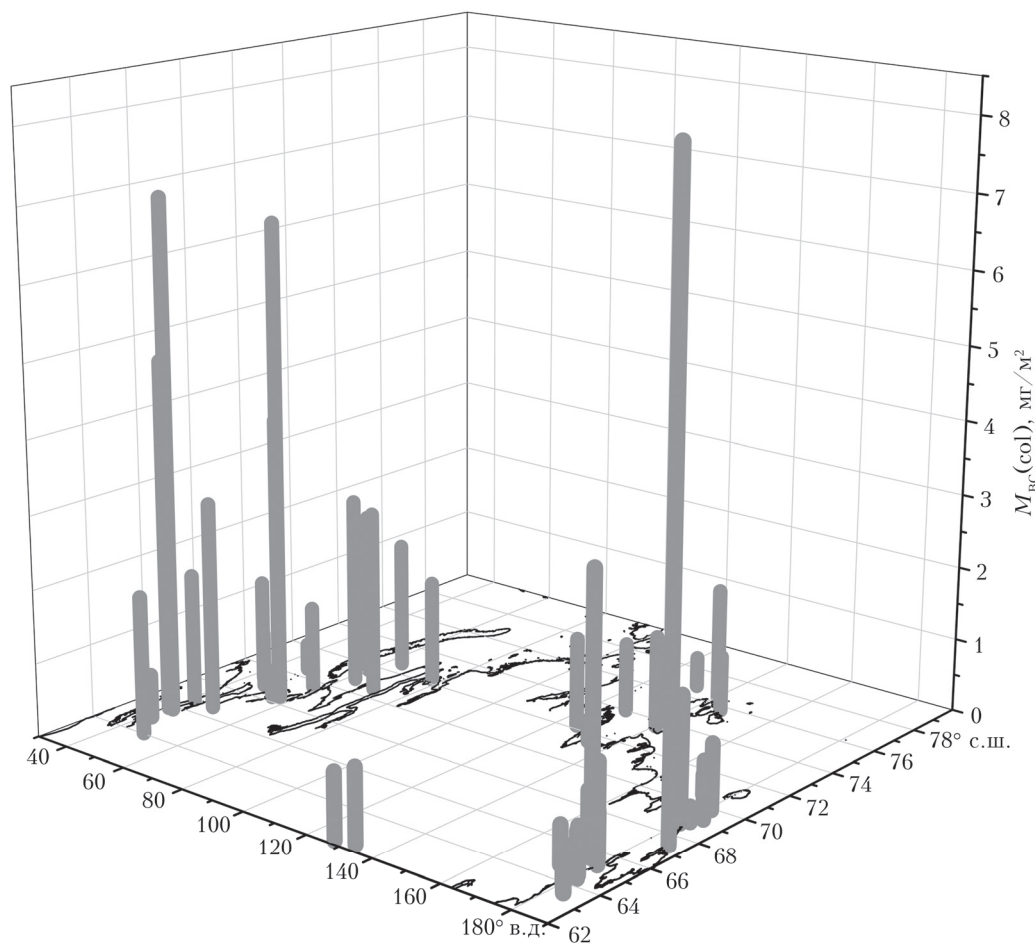


Рис. 5. Пространственное распределение суммарного содержания поглощающего вещества в столбе атмосферы до 9 км

профиля M_{BC} (рис. 2, *д*) и сделан вывод, что он был сформирован разными воздушными массами, пришедшими с северо-восточной части Тихого океана, Аляски и Якутии (рис. 3, *б*).

Обобщая результаты проведенных измерений, отметим, что значения суммарного содержания поглощающего вещества в столбе атмосферы в азиатской части Арктики вполне сопоставимы с данными, полученными в ходе летной компании POLARCAT-2008 по маршруту Новосибирск – Салехард – Хатанга – Чокурдах – Певек – Чокурдах – Якутск – Мирный – Новосибирск [46].

Заклучение

По данным самолетного зондирования тропосферы, полученным в ходе комплексного эксперимента по исследованию состава тропосферы российского сектора Арктики в сентябре 2020 г. над Баренцевым, Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями определены вертикальные профили массовой концентрации субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества.

Показано, что высотные распределения содержания аэрозоля и поглощающего вещества над Баренцевым и Карским морями имеют схожий характер: у поверхности наблюдаются максимальные значения, которые уменьшаются с высотой.

В очередной раз над Чукотским морем было зарегистрировано инверсионное распределение «сажи» по высоте. Выяснено, что в период проведения наблюдений над этой акваторией вертикальное распределение аэрозольных характеристик формировалось различными воздушными массами, поступающими с северо-восточной части Тихого океана, Аляски и Якутии, северо-западной части Евразии.

Отметим, что анализ корреляционных связей между концентрациями субмикронного аэрозоля и «сажи» в атмосфере над разными акваториями выявил существенные различия. Показано, что над Баренцевым и Карским морем наблюдалась тесная связь между вариациями этих величин. Как показал анализ обратных траекторий, здесь измерения были проведены в относительно устойчивых воздушных массах. В восточном секторе арктических полетов, наоборот, корреляционная связь между M_{BC} и M_A была очень слабой по всему вертикальному профилю. Этот факт указывает на то, что в период наблюдений структура вертикального распределения аэрозольного состава была сформирована воздушными потоками, поступающими с разных территорий, что вполне согласуется с данными траекторного анализа.

Предположение о том, что регистрируемые практически во всех полетах в сентябре 2020 г.

в атмосфере над арктическими морями частицы ВС имеют в основном антропогенное происхождение, сделано на основе оценки соотношения M_A и M_{BC} . Проведенный анализ спутниковых снимков и перемещения воздушных масс, траектории которых проходили в основном вне зон природных пожаров, позволяет полагать, что шлейфы дымов от пожаров вряд ли могли сильно повлиять на увеличение концентраций поглощающего вещества во всем диапазоне высот до 9 км.

Эти аргументы позволяют обоснованно заключить, что частицы поглощающего вещества поступают в тропосферу над акваторией арктических морей при дальнем переносе промышленных загрязнений с континента.

Работы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2021-661).

- Lindsay R.W., Zhang J., Schweiger A., Steele M., Stern H. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend. // *J. Climate*. 2009. V. 22. P. 165–176.
- Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S.K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X.Y. Clouds and aerosols. // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 571–657. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.016.
- Screen J.A., Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification // *Nature*. 2010. V. 464. P. 1334–1337.
- Pithan F., Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 181–184.
- Виноградова А.А., Туткова Т.Б. Черный углерод в атмосфере и альbedo подстилающей поверхности в Российской Арктике весной // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 1. С. 61–67; Vinogradova A.A., Titkova T.B. Atmospheric black carbon and surface albedo in the Russian Arctic during spring // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 260–266.
- Shindell D., Faluvegi G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century // *Nat. Geosci.* 2009. V. 2. P. 294–300.
- AMAP: Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. AMAP, 2015.
- Koch D., Hansen J. Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. D04204. DOI: 10.1029/2004JD005296.
- Stohl A. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. D11306.
- Sharma S., Ishizawa M., Chan D., Lavoué D., Andrews E., Eleftheriadis K., Maksyutov S. 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 943–964.
- Arnold S., Law K., Brock C., Thomas J., Starkweather S., von Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M., Flanner M., Petäjä T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J., Melamed M., Johnson N., Fidel M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S., Browse J., Bozem H. Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade // *Elem. Sci. Anthr.* 2016. V. 4. P. 000104. DOI: 10.12952/journal.elementa.000104.
- Eckhardt S., Hermansen O., Grythe H., Fiebig M., Stebel K., Cassiani M., Baecklund A., Stohl A. The influence of 25 cruise ship emissions on air pollution in Svalbard – a harbinger of a more polluted Arctic? // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 8401–8409.
- Corbett J.J., Lack D.A., Winebrake J.J., Harder S., Silberman J.A., Gold M. Arctic shipping emissions inventories and future scenarios // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 9689–9704.
- Melia N., Haines K., Hawkins E. Sea ice decline and 21st century trans-Arctic shipping routes // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 9720–9728.
- Peters G.P., Nilsson T.B., Lindholt L., Eide M.S., Glomsrød S., Eide L.I., Fuglestad J.S. Future emissions from shipping and petroleum activities in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 5305–5320.
- Sharma S., Andrews E., Barrie L.A., Ogren J.A., Lavoué D. Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989–2003 // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. D14208. DOI: 10.1029/2005JD006581
- Shindell D.T., Chin M., Dentener F., Doherty R.M., Faluvegi G., Fiore A.M., Hess P., Koch D.M., McKenzie I.A., Sanderson M.G., Schultz M.G., Schulz M., Stevenson D.S., Teich H., Textor C., Wild O., Bergmann D.J., Bey I., Bian H., Cuvelier C., Duncan B.N., Folberth G., Horowitz L.W., Jonson J., Kaminski J.W., Marmer E., Park R., Pringle K.J., Schroeder S., Szopa S., Takemura T., Zeng G., Keating T.J., Zuber A. A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 5353–5372.
- Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhart J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strom J., Stohl A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 669–693.
- Hecobian A., Liu Z., Hennigan C.J., Huey L.G., Jimenez J.L., Cubison M.J., Vay S., Diskin G.S., Sachse G.W., Wisthaler A., Mikoviny T., Weinheimer A.J., Liao J., Knapp D.J., Wennberg P.O., Kürten A., Crouse J.D., Clair J.St., Wang Y., Weber R.J. Comparison of chemical characteristics of 495 biomass burning plumes intercepted by the NASA DC-8 aircraft during the ARCTAS/CARB-2008 field campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 13325–13337.
- Brock C.A., Cozic J., Bahreini R., Froyd K.D., Middlebrook A.M., McComiskey A., Brioude J., Cooper O.R., Stohl A., Aikin K.C., de Gouw J.A., Fahey D.W., Ferrare R.A., Gao R.-S., Gore W., Holloway J.S., Hübler G., Jefferson A., Lack D.A., Lance S., Moore R.H., Murphy D.M., Nenes A., Novelli P.C., Nowak J.B., Ogren J.A., Peischl J., Pierce R.B., Pilewskie P., Quinn P.K., Ryerson T.B., Schmidt K.S., Schwarz J.P., Sodemann H., Spackman J.R., Stark H., Thomson D.S., Thornberry T., Veres P., Watts L.A., Warneke C., Wollny A.G. Characteristics, sources, and transport of aerosols measured in spring 2008 during the aerosol, radiation, and cloud

- processes affecting Arctic Climate (ARCPAC) Project // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 2423–2453.
21. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 627–637.
 22. Schmale J., Schneider J., Ancellet G., Quennehen B., Stohl A., Sodemann H., Burkhardt J.F., Hamburger T., Arnold S.R., Schwarzenboeck A., Borrmann S., Law K.S. Source identification and airborne chemical characterisation of aerosol pollution from long-range transport over Greenland during POLARCAT summer campaign 2008 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 10097–10123.
 23. Sodemann H., Pommier M., Arnold S.R., Monks S.A., Stebel K., Burkhardt J.F., Hair J.W., Diskin G.S., Clerbaux C., Coheur P.-F., Hurtmans D., Schlager H., Blechschmidt A.-M., Kristjánsson J.E., Stohl A. Episodes of cross-polar transport in the Arctic troposphere during July 2008 as seen from models, satellite, and aircraft observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 3631–3651.
 24. Monks S.A., Arnold S.R., Emmons L.K., Law K.S., Turquety S., Duncan B.N., Flemming J., Huijnen V., Tilmes S., Langner J., Mao J., Long Y., Thomas J.L., Steenrod S.D., Raut J.C., Wilson C., Chipperfield M.P., Diskin G.S., Weinheimer A., Schlager H., Ancellet G. Multi-model study of chemical and physical controls on transport of anthropogenic and biomass burning pollution to the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 3575–3603.
 25. Law K.S., Stohl A., Quinn P.K., Brock C.A., Burkhardt J.F., Paris J.-D., Ancellet G., Singh H.B., Roiger A., Schlager H., Dibb J., Jacob D.J., Arnold S.R., Pelon J., Thomas J.L. Arctic air pollution: New insights from POLARCAT-IPY // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2014. V. 95. P. 1873–1895.
 26. 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.
 27. Kodros J.K., Hanna S.J., Bertram A.K., Leitch W.R., Schulz H., Herber A.B., Zannata M., Burkart J., Willis M.D., Abbatt J.P.D., Pierc J.R. Size-resolved mixing state of black carbon in the Canadian high Arctic and implications for simulated direct radiative effect // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 11345–11361.
 28. Samse B.H., Myhr G., Schul M., Balkanski Y., Bauer S., Berntsen T.K., Bian H., Bellouin N., Diehl T., Easter R.C., Ghan S.J., Iversen T., Kirkeveg A., Lamarque J.-F., Lin G., Liu X., Penner J.E., Seland Ø., Skeie R.B., Stier P., Takemura T., Tsigaridis K., Zhang K. Black carbon vertical profiles strongly affect its radiative forcing uncertainty // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 2423–2434.
 29. Flanner M.G. Arctic climate sensitivity to local black carbon // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 1840–1851.
 30. Tomasi C., Kokhanovskiy A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrl C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagnener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Sci. Rev.* 2015. V. 140. P. 108–157.
 31. Abbatt J.P.D., Leitch W.R., Aliabadi A.A., Bertram A.K., Blanchet J.-P., Boivin-Rioux A., Bozem H., Burkart J., Chang R.Y.W., Charette J., Chaudhary J.P., Christensen R.J., Cirisan A., Collins D.B., Croft B., Dionne J., Evans G.J., Fletcher C.G., Gali M., Ghahremaninezhad R., Girard E., Gong W., Gosselin M., Gourdal M., Hanna S.J., Hayashida H., Herber A.B., Hesaraki S., Hoor P., Huang L., Husherr R., Irish V.E., Keita S.A., Kodros J.K., Köllner F., Kolonjari F., Kunkel D., Ladino L.A., Law K., Lévasseur M., Libois Q., Liggio J., Lizotte M., Macdonald K.M., Mahmood R., Martin R.V., Mason R.H., Miller L.A., Moravek A., Mortenson E., Mungall E.L., Murphy J.G., Namazi M., Norman A.-L., O'Neill N.T., Pierce J.R., Russell L.M., Schneider J., Schulz H., Sharma S., Si M., Staebler R.M., Steiner N.S., Thomas J.L., von Salzen K., Wentzell J.J.B., Willis M.D., Wentworth G.R., Xu J.-W., Yakobi-Hancock J.D. Overview paper: New insights into aerosol and climate in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 2527–2560.
 32. Watson-Parris D., Schutgens N., Reddington C., Pringle K.J., Liu D., Allan J.D., Coe H., Carslaw K.S., Stier P. In situ constraints on the vertical distribution of global aerosol // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 11765–11790.
 33. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н. Обобщение результатов измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 948–955; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Radionov V.F., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Lubo-Lesnichenko K.E., Prakhov A.N. Generalization of results of atmospheric aerosol optical depth measurements on Spitsbergen archipelago in 2011–2016 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 163–170.
 34. Savatyugin L.M. The current state of the natural environment on Spitzbergen archipelago multi-authored monograph. Saint-Petersburg: AART, 2021. DOI: 10.30758/978-5-98364-101-3.
 35. Макумас А.П., Уттал Т. Начало совместных Российско-американских атмосферных наблюдений в Тикси // *Рос. поляр. исслед.* 2010. № 2. С. 35–38.
 36. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshatas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 1271–1287.
 37. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макумас 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 атмосф. 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., Makshatas 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.

38. *Макитас А.П., Соколов В.Т.* Научно-исследовательский стационар «Ледовая база «Мыс Баранова»» – летний полевой сезон 2014 г. // Рос. поляр. исслед. 2014. Т. 17, № 3. С. 10–12.
39. *Popovicheva O.B., Evangeliou N., Eleftheriadis K., Kalogridis A.C., Sitnikov N., Eckhard S., Stohl A.* Black carbon sources constrained by observations in the Russian high Arctic // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51, N 7. P. 3871–3879.
40. *Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Pol'kin Vas.V., Pol'kin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F.* On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along the Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 12413–12443.
41. *Терпугова С.А., Зенкова П.Н., Кabanov Д.М., Полькин В.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Политова Н.В., Козлов В.С., Ходжер Т.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г.* Результаты исследований характеристик аэрозоля в атмосфере Карского и Баренцева морей в летне-осенний период 2016 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 5. С. 391–402; *Терпугова С.А., Зенкова П.Н., Кabanov Д.М., Pol'kin V.V., Golobokova L.P., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Politova N.V., Kozlov V.S., Khodzher T.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G.* Results of the study of aerosol characteristics in the atmosphere of the Kara and Barents Seas in summer and autumn 2016 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 507–518.
42. *Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Полькин 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 атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 6. С. 421–429; *Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochufarov A.O., Khuriganova O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitzin 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.
43. *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. P. 1170.
44. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева 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., Iulev G.A., Kozlov A.V., Nedelec P., Paris J.-D., Rasskazhikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya 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. DOI: 10.15372/AOO20171207.
45. *Кузьмичев А.С., Бабухина Т.И., Ганьшин А.В., Лукьянов А.Н., Марков Р.М., Романовский А.М., Хаттатов В.У., Курин Д.В., Малинина Е.П.* Измерения содержания аэрозолей в тропосфере Арктического региона дистанционными и контактными методами с борта самолета лаборатории Як-42Д «Росгидромет» // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 5. С. 88–97.
46. *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Yausheva E.P., Pol'kin V.V., Terpuгова S.A.* Long-term investigations of the spatiotemporal variability of black carbon and aerosol concentrations in the troposphere of West Siberia and Russian Subarctic // *Chem. Sustainable Dev.* 2016. V. 24, N 4. P. 423–440.
47. *Yang Q., Bitz C.M., Doherty S.J.* Offsetting effects of aerosols on Arctic and global climate in the late 20th century // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 3969–3975.
48. *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. V. 6. P. 1–5.
49. *Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсуков В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сицков Г.П., Симоненков Д.В., Сисицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
50. *Spackman J.R., Gao R.S., Neff W.D., Schwarz J.P., Watts L.A., Fahey D.W., Holloway J.S., Ryerson T.B., Peischl J., Brock C.A.* Aircraft observations of enhancement and depletion of black carbon mass in the springtime Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 9667–9680.
51. *Liu J., Fan S., Horowitz L.W., Levy H. II.* Evaluation of factors controlling long-range transport of black carbon to the Arctic // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. D04307.

P.N. Zenkova, D.G. Chernov, V.P. Shmargunov, M.V. Panchenko, B.D. Belan. **Submicron aerosol and absorbing substance in the troposphere of the Russian Arctic according to measurements of the TU-134 “Optic” aircraft laboratory in 2020.**

A large-scale comprehensive study of the composition of the troposphere of the Russian Arctic was carried out in September 2020 onboard the TU 134 “Optic” aircraft laboratory. The results of the study of the spatiotemporal variability of aerosol and black carbon (BC) concentrations are considered. The airborne sensing data were used for the analysis of general and particular features of the spatial variability of vertical profiles of aerosol and BC concentrations. The columnar BC concentrations in the arctic and subarctic latitudes were obtained.