

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 2. Вертикальное распределение

М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, Н.Г. Воронежская², А.К. Головко²,
Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹, А.С. Козлов³, С.Б. Малышкин³, Г.С. Певнева²,
Д.В. Симоненков¹, А.В. Фофонов^{1*}

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

²Институт химии нефти СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 4

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

Поступила в редакцию 22.03.2017 г.

Исследования вертикального распределения органического компонента аэрозоля в пограничном слое и свободной атмосфере проводились путем отбора проб с борта самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик». При этом высотный диапазон был разбит на два слоя: 0,5–2,0 и 3,0–7,0 км. Показано, что вертикальное распределение органического компонента аэрозоля имеет экспоненциальный характер убывания концентрации с высотой. Падение концентрации от приземного слоя воздуха до высоты свободной тропосферы составляет 7,5 раз. Максимальная концентрация в приземном слое воздуха наблюдается для соединения $n\text{-C}_{19}\text{H}_{40}$. В пограничном слое и свободной атмосфере максимум концентрации характерен для $n\text{-C}_{17}\text{H}_{36}$. В свободной тропосфере соединения тяжелее $n\text{-C}_{22}\text{H}_{46}$ фиксируются только на уровне следовых концентраций. В течение года происходит перераспределение органического компонента аэрозоля между приземным и пограничным слоями атмосферы.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, состав, углеводороды; atmospheric aerosol, composition, hydrocarbons.

Введение

В настоящее время уже нет сомнения в том, что органические соединения присутствуют в составе аэрозолей во всей толще тропосферы [1–4]. Но сведения об их пространственном и высотном распределении достаточно ограничены. Это относится и к территории России. Можно упомянуть только несколько российских научных групп, которые проводят исследования органического аэрозоля в фоновых условиях [5–9].

Вертикальное распределение органического компонента изучено крайне недостаточно. Так, в [10]

показано, что концентрация органических соединений, содержащихся в аэрозольном веществе, сильно меняется с высотой, сохраняя общую тенденцию роста в слое от 2 до 7 км. В [11] было получено, что концентрация органического аэрозоля возрастает в 2,5 раза от поверхности земли до высоты 2 км, где затем стабилизируется. Авторы [12] установили нейтральный вертикальный ход концентрации. В ряде работ отмечается резкое уменьшение концентрации органического углерода с высотой [13–15]. Обобщение результатов 17 зарубежных летних кампаний по исследованию вертикальных профилей органического аэрозоля [16] не прояснило ситуацию. В разных кампаниях были получены профили, которые можно отнести к одному из вышеописанных типов. Ввиду сложности проблемы исследования органического компонента аэрозоля продолжают работы по усовершенствованию методик и техники проведения самолетных исследований [17].

Все сказанное послужило основанием для проведения несколькими организациями комплексного эксперимента по изучению органического компонента атмосферного аэрозоля на территории Сибири и Арктики. В настоящей работе приводятся результаты, касающиеся его вертикального распределения.

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Наталья Геннадьевна Воронежская (voronetskaya@ipc.tsc.ru); Анатолий Кузьмич Головко (golovko@ipc.tsc.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Сергей Борисович Малышкин (msb@ngs.ru); Галина Сергеевна Певнева (pevneva@ipc.tsc.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Методы и районы исследования

Вертикальное распределение органического компонента аэрозоля в пограничном слое и свободной атмосфере изучалось на основе проб воздуха, отобранных с борта самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в тропосферном слое атмосферы от 0,5 до 7 км. Пробы отбирались в ходе зондирования атмосферы над Караканским бором Новосибирской обл., осуществлявшемся ежемесячно в период с 2013 по 2016 г. Описание оборудования самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» приведено в [18]. Методические аспекты отбора проб с борта самолета, методики анализа и идентификации соединений обсуждались нами ранее в [19, 20].

Ввиду низкого содержания органического компонента в аэрозоле в ходе экспериментов был изменен подход к отбору проб. Первоначально предполагалось брать пробы во время горизонтального полета на высотах 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,5 и 7,0 км, на тех же уровнях, где производился отбор проб воздуха для анализа содержания парниковых газов. Оказалось, что концентрация вещества недостаточна для преодоления порога обнаружения многих соединений. Поэтому в дальнейшем весь высотный диапазон был разбит на два: 0,5–2,0 (пограничный слой) и 3,0–7,0 км (свободная атмосфера). Высотные диапазоны выбирались с учетом данных о распределении аэрозоля по вертикали, полученных ранее для Сибирского региона по самолетным и лидарным данным [21–23].

Результаты измерений и их обсуждение

Рассмотрим среднее многолетнее вертикальное распределение идентифицированных углеводородов (*n*-алканов) в составе аэрозольных частиц (рис. 1). Напомним, что в использованных нами базах данных представлены не все соединения, которые присутствуют в атмосфере. График был построен на основании результатов анализа 28 проб воздуха из пограничного слоя и свободной атмосферы над югом Западной Сибири и 24 проб приземного слоя воздуха из разных районов Сибири [20].

Из рис. 1 видно, что средняя концентрация органического компонента аэрозоля быстро убывает с высотой: в приземном слое воздуха она составляет 29 нг/м³, в пограничном 14 нг/м³, а в свободной атмосфере всего 4 нг/м³, т.е. уменьшается в 7,5 раз. Подобное резкое падение концентрации с высотой получено в работах [24, 25]. Следует отметить, что экспоненциальное убывание с высотой характерно и для счетной концентрации аэрозоля. По результатам обобщения большого количества экспериментальных данных в ряде монографий предложены универсальные функции для описания вертикального распределения аэрозоля [26–28]. Они несколько отличаются друг от друга, но в их основе лежит экс-

поненциальная зависимость. Все это свидетельствует о том, что основной источник органических соединений в атмосфере находится на поверхности земли.

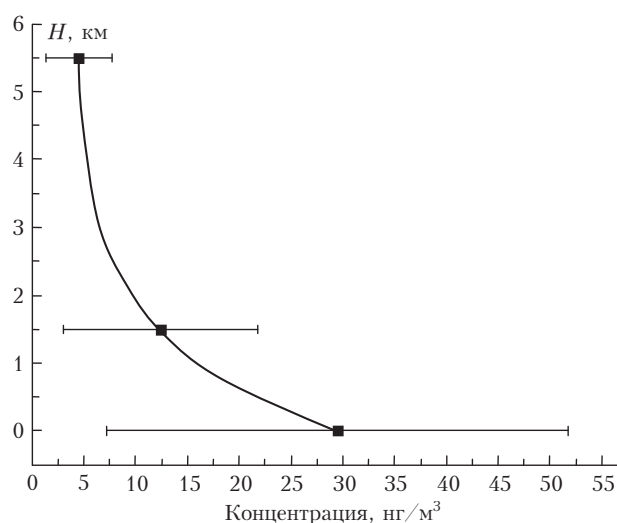


Рис. 1. Вертикальное распределение органического компонента аэрозоля над югом Западной Сибири

Значения концентрации, полученные в наших экспериментах, на порядок меньше, чем в указанных статьях. Возможно, мы идентифицировали не всю органическую составляющую или же сказывается различие в условиях проведения работ. В нашем случае это были фоновые районы, а в цитируемых публикациях — урбанизированные территории.

Рис. 2 показывает средние многолетние молекулярно-массовые распределения (ММР) *n*-алканов, входящих в состав аэрозольных частиц, на разных уровнях в атмосфере.

Несмотря на то что источник органических соединений находится у поверхности земли, наиболее широкий диапазон *n*-алканов — от *n*-C₈H₁₈ до *n*-C₃₁H₆₄ — в составе аэрозоля фиксируется в пограничном слое атмосферы, а не в приземном. В приземном слое воздуха и свободной атмосфере их гомологический ряд несколько уже, от *n*-C₉H₂₀ до *n*-C₂₉H₆₀.

На рис. 2 также можно отметить еще одну особенность. Максимальная концентрация в приземном слое воздуха наблюдается для нонадекана (*n*-C₁₉H₄₀). В пограничном слое и свободной атмосфере максимум концентрации характерен для гептадекана (*n*-C₁₇H₃₆). Может быть, это обусловлено летучестью органических соединений и изменением с высотой конденсационных свойств как самих аэрозолей, так и паров летучих органических соединений. Высокомолекулярные углеводороды, с одной стороны, не способны проникнуть на большие высоты, а с другой стороны, вероятность их конденсации на присутствующие в нижних слоях атмосферы аэрозольные частицы намного выше, чем легких низкомолекулярных соединений. Так, например, в свободной тропосфере алканы тяжелее *n*-C₂₂H₄₆ фиксируются только в следовых количествах.

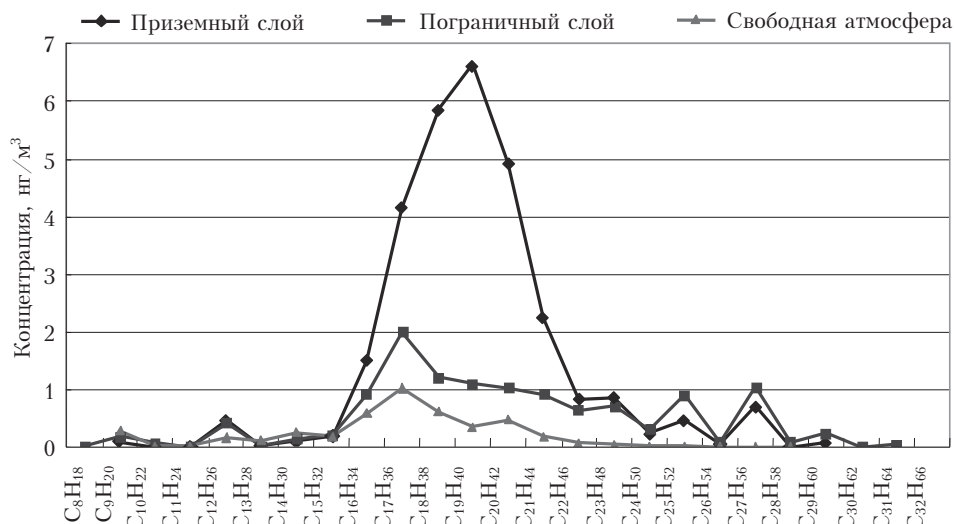


Рис. 2. Молекулярно-массовые распределения *n*-алканов в разных слоях атмосферы над югом Западной Сибири

В [29–32] показано, что вертикальное распределение органического компонента аэрозоля сильно зависит от времени проведения измерений. В этом плане интересно рассмотреть сезонную изменчивость органического компонента аэрозоля в атмосфере. Имеющиеся 28 проб распределены по сезонам относительно равномерно: зима – 8, весна – 7, лето – 7, осень – 6. Конечно, для уверенных выводов этого количества недостаточно, но первичную оценку процессов сделать можно.

Рис. 3 доказывает, что в течение года происходит перераспределение органического компонента аэрозоля между приземным и пограничным слоями атмосферы.

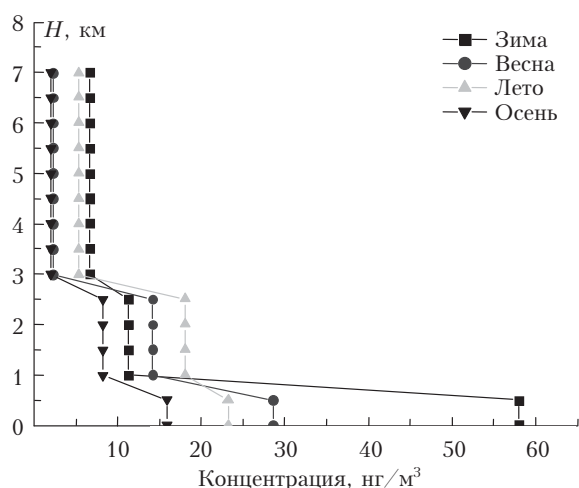


Рис. 3. Вертикальное распределение органического компонента аэрозоля по сезонам

Так, зимой концентрация органики максимальна в приземном слое и значительно ниже в пограничном слое атмосферы. Весной она сильно уменьшается в приземном слое и растет в пограничном. Ле-

том этот процесс продолжается, и концентрация органических соединений в составе аэрозоля в пограничном слое достигает максимума. Осенью во всех слоях атмосферы концентрация органической компоненты минимальна. По-видимому, это результат действия двух однонаправленных процессов. Как было показано выше, источник органических соединений расположен на поверхности земли и, как известно [33–36], в фоновых районах это продукты вегетационной деятельности растительности, которая в осенний период угасает. Следовательно, количество органического вещества, способного перейти в аэрозольную фазу, в воздухе уменьшается. С другой стороны, для территории Сибири в осенний период характерна дождливая погода [37]. В связи с тем, что основная масса органического компонента является гигроскопичной [38–41], она хорошо вымывается осадками.

Своеобразно ведет себя органический компонент аэрозоля в свободной атмосфере. Он минимален в переходные сезоны (весной и осенью), а зимой и летом возрастает. Максимальное же его содержание наблюдается в зимний период. Возможно, такая картина обусловлена режимом общей циркуляции атмосферы, которая определяет дальний перенос примесей, но это – предмет отдельного исследования.

Данные о сезонной изменчивости состава углеводородов представлены на рис. 4. Видно, что при основном максимуме вклада во все сезоны года соединений *n*-C₁₇H₃₆, зимой и летом в ММР появляются вторичные максимумы на *n*-C₁₄H₃₀ и *n*-C₂₀H₄₂. Кроме того, весной и летом можно отметить еще один пик концентрации для углеводородов *n*-C₁₂H₂₆, а весной и зимой – *n*-C₉H₂₀. Зимой гомологический ряд углеводородов сдвигается в сторону более тяжелых соединений (*n*-C₁₁H₂₄ – *n*-C₂₈H₅₈). Самое узкое молекулярно-массовое распределение (*n*-C₁₃H₂₈ – *n*-C₂₅H₅₂) наблюдается осенью.

Еще более сложный сезонный ход изменений концентрации органических соединений наблюдает-

ся в пограничном слое атмосферы, который приведен на рис. 5. Основной максимум концентрации во все сезоны года, так же как и в свободной атмосфере, приходится на гептадекан ($n\text{-C}_{17}\text{H}_{36}$). Зимой сдвиг ММР в сторону высокомолекулярных соединений увеличивается и достигает $n\text{-C}_{31}\text{H}_{64}$. Несколько расширяется диапазон ММР алканов осенью и включает соединения $n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}$ – $n\text{-C}_{27}\text{H}_{56}$.

Основное различие, которое видно из рис. 5, заключается в появлении пиков концентраций соединений $n\text{-C}_{21}\text{H}_{44}$, $n\text{-C}_{23}\text{H}_{48}$, $n\text{-C}_{25}\text{H}_{52}$ и $n\text{-C}_{27}\text{H}_{56}$ в летний период. Причем последний пик превышает основной многолетний максимум $n\text{-C}_{17}\text{H}_{36}$. Дополнительный анализ данных для отдельных годов показывает, что всплески перечисленных соединений наблюдались в 2014, 2015 и 2016 гг. Пока сложно объяснить появление этих углеводородов летом. По-видимому, они выделяются какими-то растениями, которые растут только в летний период. Однако

для окончательного вывода необходимы натурные измерения состава летучих органических соединений, находящихся в атмосфере в газовой фазе, которые пока не проводились.

В октябре 2014 г. был выполнен исследовательский полет по маршруту Новосибирск – Салехард – Карское море – Салехард – Новосибирск для определения широтного распределения малых газовых составляющих и аэрозолей в тропосфере Западной Сибири. В ходе полета также отбирались пробы аэрозоля для исследования органической составляющей. Поскольку полет осуществлялся осенью, когда концентрация органической составляющей минимальна, и проходил над теми районами, где содержание примесей заметно ниже, чем в других фоновых районах Сибири, то отбор проб производился без разделения на высотные поддиапазоны во всем слое от 0,5 до 8 км. Полученные результаты приведены в таблице и на рис. 6.

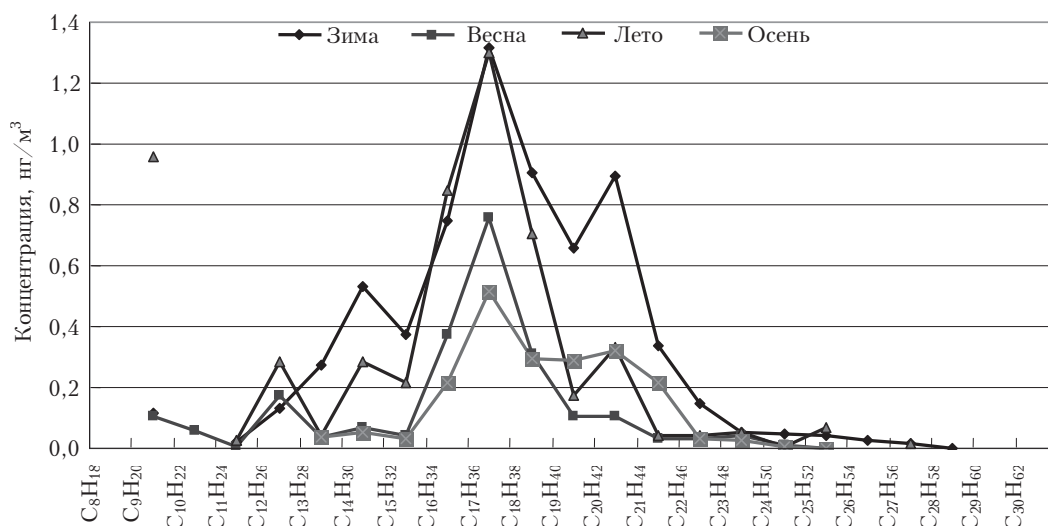


Рис. 4. Сезонная динамика изменения состава n -алканов в свободной атмосфере над югом Западной Сибири

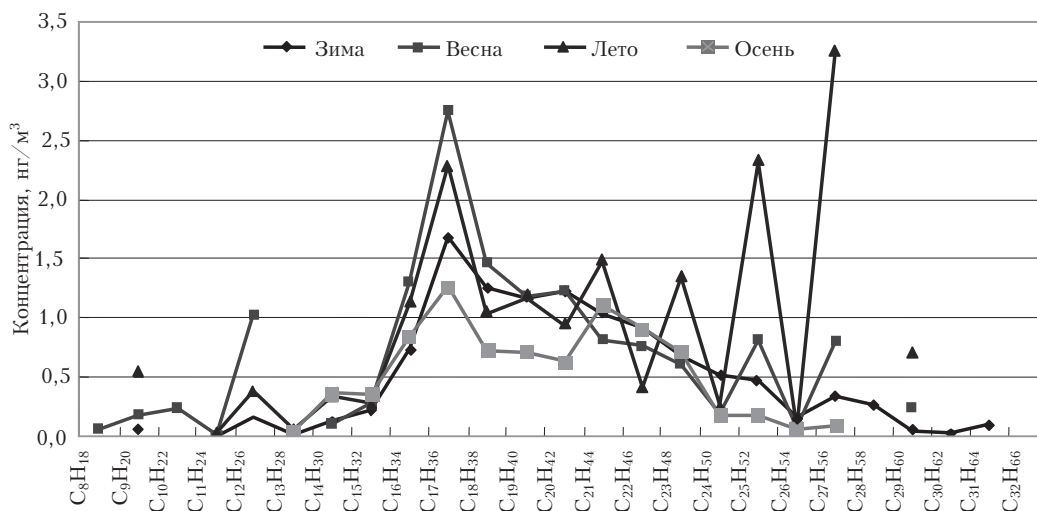


Рис. 5. Сезонная динамика изменения состава n -алканов в пограничном слое атмосферы над югом Западной Сибири

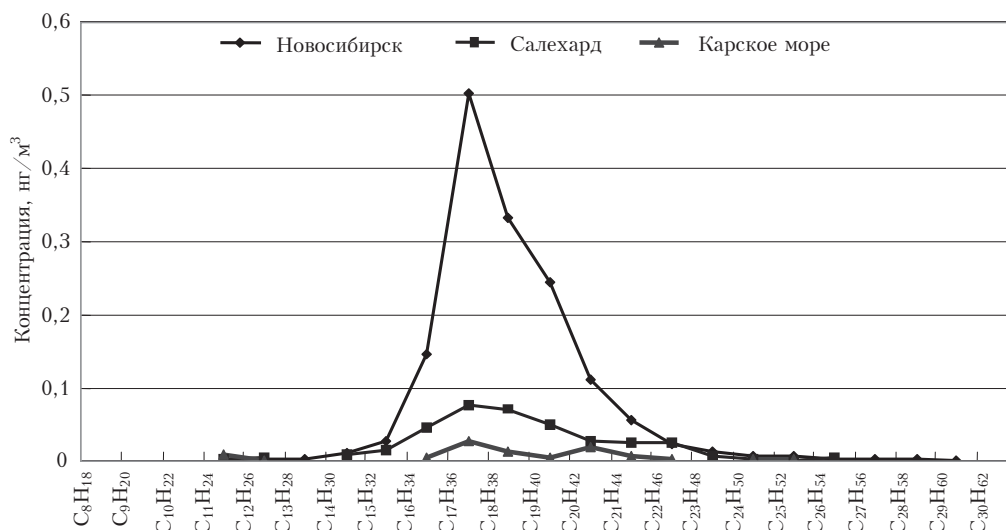


Рис. 6. Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов на маршруте Новосибирск – Карское море

Концентрация органической составляющей (нг/м³) на маршруте Новосибирск – Салехард – Карское море

	Новосибирск	Салехард	Карское море
ΣУВ	1,488	0,358	0,076

Из данных таблицы следует, что суммарная концентрация органической составляющей аэрозоля в период эксперимента над фоновыми районами Западной Сибири была в 4 раза выше, чем над прибрежными (Салехард) и почти в 20 раз выше, чем над Карским морем. Зафиксированная нами концентрация органических соединений над Карским морем значительно ниже, чем показано в [42–44]. Скорее всего, это связано с различием в высоте пробоотбора: в нашем случае это свободная атмосфера (3–8 км), в цитируемых работах – приземный слой воздуха.

Несмотря на очень низкое содержание органических соединений над океаном, в составе частиц обнаружен достаточно широкий диапазон углеводородов – от C₁₁H₂₄ до C₂₅H₅₂. Разрывы в кривой объясняются недостаточным количеством отобранного вещества, в результате чего концентрация пропущенных соединений оказалась ниже порога обнаружения. По диапазону идентифицированных органических соединений, входящих в состав частиц, наши данные согласуются с данными других авторов, полученными в приземном слое воздуха Арктики [41–43].

Заключение

Проведенное обобщение полученных данных показывает, что вертикальное распределение органического компонента аэрозоля характеризуется экспоненциальным убыванием концентрации с высотой; концентрации от приземного слоя воздуха до высоты свободной тропосферы уменьшается в 7,5 раз.

Максимальная концентрация в приземном слое воздуха наблюдается для соединения *n*-C₁₉H₄₀; в пограничном слое и свободной атмосфере – для *n*-C₁₇H₃₆. В свободной тропосфере соединения тяжелее *n*-C₂₂H₄₆ фиксируются только на уровне следовых концентраций.

В течение года происходит перераспределение органического компонента аэрозоля между приземным и пограничным слоями атмосферы. Зимой концентрация органики максимальна в приземном слое и значительно ниже в пограничном слое атмосферы. Весной она сильно уменьшается в приземном слое и растет в пограничном. Летом концентрация органических соединений в составе аэрозоля в пограничном слое достигает максимума. Осенью во всех слоях атмосферы концентрация органического компонента наименьшая. Его доля в составе аэрозоля в свободной атмосфере минимальна в переходные сезоны (весной и осенью), а зимой и летом она увеличивается.

Концентрация органической составляющей аэрозоля над фоновыми районами Западной Сибири в 4 раза выше, чем над прибрежными районами, (Салехард) и почти в 20 раз выше, чем над Карским морем.

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН «Интеграция и развитие» на 2017 г., проектов IX.135-6 «Исследование изменений компонент воздуха Сибирского региона, определяющих динамику радиационно значимых характеристик атмосферы» и IX.135-9 «Наночастицы: условия образования в атмосфере», а также гранта РФФИ № 14-05-00526.

1. *Gelencser A.* Carbonaceous Aerosol. Dordrecht: Springer, 2004. 350 p.
2. *Bialek J., Dall'Osto M., Monahan C., Beddows D., O'Dowd C.* On the contribution of organics to the North East Atlantic aerosol number concentration // *Environ. Res. Lett.* 2012. V. 7. 044013. 7 p.
3. *Ge X., Wexler A.S., Clegg S.L.* Atmospheric amines – Part 1. A review // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 3. P. 524–545.
4. *Virtanen A., Joutsensaari J., Koop T., Kannosto J., Yli-Pirilä P., Leskinen J., Mäkelä J.M., Holopainen J.K., Pöschl U., Kulmala M., Worsnop D.R., Laaksonen A.* An amorphous solid state of biogenic secondary organic aerosol particles // *Nature (Gr. Brit.)* 2010. V. 467, N 7317. P. 824–827.

5. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 42–52; Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Pol'shin V.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I. Spatiotemporal variations in aerosol characteristics along the route of the Indian-Atlantic expedition onboard the research vessel akademik Nikolaj Strakhov // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 4. P. 349–359.
6. Поддубный В.А., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Дубинкина Е.С., Хуриганова О.И. Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 2. Характеристики аэрозоля в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1011–1022.
7. Польшкин В.В., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Голобокова Л.П. Результаты сравнительных исследований оптических, микрофизических характеристик и химического состава аэрозоля над акваторией Каспийского моря в 29-м и 41-м рейсах НИС «Рифт» // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 628–635; Pol'shin V.V., Kabanov D.M., Sakerin S.M., Golobokova L.P. Comparative studies of optical and microphysical characteristics and chemical composition of aerosol over water basin of Caspian Sea in the 29th and 41st cruises of RV Rift // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 1. P. 16–23.
8. Михайлов Е.Ф., Миронова С.Ю., Макарова М.В., Власенко С.С., Рышкевич Т.И., Панов А.В., Андреае М.О. Исследование сезонной изменчивости углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля Центральной Сибири // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 4. С. 484–492.
9. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Попова С.А., Сивонен В.В., Сивонен В.П. Элементарный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалашского залива Белого моря // Докл. АН. 2015. Т. 461, № 1. С. 70–74.
10. Le Breton M., Vacak A., Muller J.B.A., O'Shea S.J., Xiao P., Ashfold M.N.R., Cooke M.C., Batt R., Shallcross D.E., Oram D.E., Forster G., Bauguitte S.J.-B., Percival C.J. Airborne hydrogen cyanide measurements using a chemical ionisation mass spectrometer for the plume identification of biomass burning forest fires // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 18. P. 9217–9232.
11. Novakov T., Hegg D.A., Hobbs P.V. Airborne measurement of carbonaceous aerosols on the East Coast of the United States // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 25. P. 30023–30030.
12. Asa-Awuku A., Moore R.H., Nenes A., Bahreini R., Holzway J.S., Brock Ch.A., Middlebrook A.M., Ryerson T.B., Jimenez J.L., DeCarlo P.F., Hecobian A., Weber R.J., Stickel R., Tanner D.J., Huey L.G. Airborne cloud condensation nuclei measurements during the 2006 Texas Air Quality Study // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D11201. DOI: 10.1029/2010JD014874.
13. Duong H.T., Sorooshian A., Craven J.S., Hersey S.P., Metcalf A.R., Zhang X., Weber R.J., Jonsson H., Flanagan R.C., Seinfeld J.H. Water-soluble organic aerosol in the Los Angeles Basin and outflow regions: Airborne and ground measurements during the 2010 CalNex field campaign // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D00V04. DOI: 10.1029/2011JD016674.
14. Moore R.H., Cerully K., Bahreini R., Brock C.A., Middlebrook A.M., Nenes A. Hygroscopicity and composition of California CCN during summer 2010 // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. D00V12. DOI: 10.1029/2011JD017352.
15. Liu K., Quan J., Mu Y., Zhang Q., Liu J., Gao Y., Chen P., Zhao D., Tian H. Aircraft measurements of BTEX compounds around Beijing city // Atmos. Environ. 2013. V. 73. P. 11–15.
16. Heald C.L., Coe H., Jimenez J.L., Weber R.J., Bahreini R., Middlebrook A.M., Russell L.M., Jolleys M., Fu T.-M., Allan J.D., Bower K.N., Capes G., Crosier J., Morgan W.T., Robinson N.H., Williams P.I., Cubison M.J., DeCarlo P.F., Dunlea E.J. Exploring the vertical profile of atmospheric organic aerosol: Comparing 17 aircraft field campaigns with a global model // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 24. P. 12673–12696.
17. Lerner B.M., Gilman J.B., Aikin K.C., Atlas E.L., Goldan P.D., Graus M., Hendershot R., Isaacman-VanWertz G.A., Koss A., Kuster W.C., Lueb R.A., McLaughlin R.J., Peischl J., Sueper D., Ryerson T.B., Tokarek T.W., Warneke C., Bin Yuan, de Gouw J.A. An improved, automated whole air sampler and gas chromatography mass spectrometry analysis system for volatile organic compounds in the atmosphere // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10, N 1. P. 291–313.
18. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук 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., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Симицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филитов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманов В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
19. Воронцовская Н.Г., Певнева Г.С., Головки А.К., Козлов А.С., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Углеводородный состав тропосферного аэрозоля юга Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 496–505; Voronetskaia N.G., Pevneva G.S. Golovko A.K., Kozlov A.S., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N. Hydrocarbon composition of tropospheric aerosol in the south of Western Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 547–557.
20. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 1. Географические особенности и временная динамика // Оптика атмосфер. и океана. 2017. V. 30, № 8. С. 716–722.
21. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
22. Балин Ю.С., Ершов А.Д. Вертикальная структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным лазерного зондирования // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 7. С. 616–623.
23. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. Вертикальное распределение наночастиц в тропосфере континентального района // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 7. С. 547–557.
24. Hossaini R., Mantle H., Chipperfield M.P., Montzka S.A., Hamer P., Ziska F., Quack B., Krüger K., Tegtmeier S., Atlas E., Sala S., Engel A., Bönsch H., Keber T., Oram D., Mills G., Ordycey C., Saiz-Lopez A., Warwick N., Liang Q., Feng W., Moore F., Miller B.R., Maréca V., Richards N.A.D., Dorf M., Pfeilsticker K. Evaluating global emission inventories of biogenic bromocarbons // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 23. P. 11819–11838.
25. Hodzic A., Kasibhatla P.S., Jo D.S., Cappa Ch.D., Jimenez J.L., Madronich S., Park R.J. Rethinking the global secondary organic aerosol (SOA) budget: Stronger

- production, faster removal, shorter lifetime // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 12. P. 7917–7941.
26. *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 268 с.
 27. *Jaenicke R.* Tropospheric aerosols, in *Aerosol-Cloud-Climate Interactions* / P.V. Hobs (ed.). San Diego: Academic Press, 1993. P. 1–31.
 28. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. New York: John Wiley & Sons, 1998. 1327 p.
 29. *Jones B.T., Muller J.B.A., O'Shea S.J., Bacak A., Le Breton M., Bannan T.J., Leather K.E., Booth A.M., Illingworth S., Bower K., Gallagher M.W., Allen G., Shallcross D.E., Bauguitte S.J.B., Pyle J.A., Percival C.J.* Airborne measurements of HC(O)OH in the European Arctic: A winter summer comparison // *Atmos. Environ.* 2014. V. 99. P. 556–567.
 30. *Brown S.S., Dubi W.P., Bahreini R., Middlebrook A.M., Brock C.A., Warneke C., de Gouw J.A., Washenfelder R.A., Atlas E., Peischl J., Ryerson T.B., Holloway J.S., Schwarz J.P., Spackman R., Trainer M., Parrish D.D., Fehsenfeld F.C., Ravishankara A.R.* Biogenic VOC oxidation and organic aerosol formation in an urban nocturnal boundary layer: Aircraft vertical profiles in Houston, TX // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 22. P. 11317–11337.
 31. *Williams J.E., Le Bras G., Kukui A., Ziereis H., Brenninkmeijer C.A.M.* The impact of the chemical production of methyl nitrate from the NO + CH₃O₂ reaction on the global distributions of alkyl nitrates, nitrogen oxides and tropospheric ozone: A global modelling study // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 5. P. 2363–2382.
 32. *Li J., Mao J., Min K.-E., Washenfelder R.A., Brown S.S., Kaiser J., Keutsch F.N., Volkamer R., Wolfe G.M., Hanisco T.F., Pollack I.B., Ryerson T.B., Graus M., Gilman J.B., Lerner B.M., Warneke C., de Gouw J.A., Middlebrook A.M., Liao J., Welti A., Henderson B.H., McNeill V.F., Hall S.R., Ullmann K., Donner L.J., Paulot F., Horowitz L.W.* Observational constraints on glyoxal production from isoprene oxidation and its contribution to organic aerosol over the Southeast United States // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 16. P. 9849–9861.
 33. *Hayes P.L., Ortega A.M., Cubison M.J., Froyd K.D., Zhao Y., Cliff S.S., Hu W.W., Toohey D.W., Flynn J.H., Lefer B.L., Grossberg N., Alvarez S., Rappenglück B., Taylor J.W., Allan J.D., Holloway J.S., Gilman J.B., Kuster W.C., de Gouw J.A., Massoli P., Zhang X., Liu J., Weber R.J., Corrigan A.L., Russell L.M., Isaacman G., Worton D.R., Kreisberg N.M., Goldstein A.H., Thalman R., Waxman E.M., Volkamer R., Lin Y.H., Surratt J.D., Kleindienst T.E., Offenberg J.H., Dusanter S., Griffith S., Stevens P.S., Brioude J., Angevine W.M., Jimenez J.L.* Organic aerosol composition and sources in Pasadena, California, during the 2010 CalNex campaign // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 16. P. 9233–9257. DOI: 10.1002/jgrd.50530.
 34. *Marais E.A., Jacob D.J., Jimenez J.L., Campuzano-Jost P., Day D.A., Hu W., Krechmer J., Zhu L., Kim P.S., Miller C.C., Fisher J.A., Travis K., Yu K., Hanisco T.F., Wolfe G.M., Arkinson H.L., Pje H.O.T., Froyd K.D., Liao J., McNeill V.F.* Aqueous-phase mechanism for secondary organic aerosol formation from isoprene: Application to the southeast United States and co-benefit of SO₂ emission controls // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 3. P. 1603–1618.
 35. *Ehn M., Kleist E., Junninen H., Petaja T., Lonn G., Schobesberger S., Dal Maso M., Trimborn A., Kulmala M., Worsnop D.R., Wahner A., Wildt J., Mentel Th.F.* Gas phase formation of extremely oxidized pinene reaction products in chamber and ambient air // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 11. P. 5113–5127.
 36. *Jokinen T., Kausiala O., Garmash O., Perdkyla O., Junninen H., Schobesberger S., Chao Yan, Sipilä M., Rissanen M.P.* Production of highly oxidized organic compounds from ozonolysis of β-caryophyllene: Laboratory and field measurements // *Boreal Environ. Res.* 2016. V. 21, N 3–4. P. 262–273.
 37. *Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К.* Синоптический режим Томска за 1993–2004 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 10. С. 887–892.
 38. *Park J., Lee S., Kang M., Cho H.-J., Lee K., Park K.* Seasonal characteristics of submicrometer organic aerosols in urban Gwangju, Korea using an aerosol mass spectrometer // *Atmos. Environ.* 2013. V. 80. P. 445–454.
 39. *Vestenius M., Hellén H., Levula J., Kuronen P., Helminen K.J., Nieminen T., Kulmala M., Hakola H.* Acidic reaction products of monoterpenes and sesquiterpenes in atmospheric fine particles in a boreal forest // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 15. P. 7883–7893.
 40. *Nieminen T., Asmi A., Dal Maso M., Aalto P.P., Keronen P., Petäjä T., Kulmala M., Kerminen V.-M.* Trends in atmospheric new-particle formation: 16 years of observations in a boreal-forest environment // *Boreal Environ. Res.* 2014. V. 19, suppl. B. P. 191–214.
 41. *Jokinen T., Kausiala O., Garmash O., Peräkylä O., Junninen H., Schobesberger S., Chao Yan, Sipilä M., Rissanen M.P.* Production of highly oxidized organic compounds from ozonolysis of β-caryophyllene: Laboratory and field measurements // *Boreal Environ. Res.* 2016. V. 21, N 3–4. P. 262–273.
 42. *Chang R.Y.-W., Leck C., Graus M., Muller M., Paatero J., Burkhardt J.F., Stohl A., Orr L.H., Hayden K., Li S.-M., Hansel A., Tjernstrom M., Leitch W.R., Abbatt J.P.D.* Aerosol composition and sources in the central Arctic Ocean during ASCOS // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 20. P. 10619–10636.
 43. *Schmale J., Schneider J., Nemitz E., Tang Y.S., Dragosits U., Blackall T.D., Trathan P.N., Phillips G.J., Sutton M., Braban C.F.* Sub-Antarctic marine aerosol: Dominant contributions from biogenic sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 17. P. 8669–8694.
 44. *Fu P.Q., Kawamura K., Chen J., Charriere B., Sempere R.* Organic molecular composition of marine aerosols over the Arctic Ocean in summer: Contributions of primary emission and secondary aerosol formation // *Biogeosciences.* 2013. V. 10, N 2. P. 653–667.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, N.G. Voronetskaya, A.K. Golovko, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.S. Kozlov, S.B. Malyshekin, G.S. Pevneva, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov. **Organic aerosol in air of Siberia and the Arctic. Part 2. Vertical distribution**

The vertical distribution of the organic component of aerosol in the boundary air layer and free atmosphere was studied on the basis of sampling from a board of Tu-134 "Optic" airborne-laboratory. The altitude range was divided into two layers: 0.5–2.0 and 3.0–7.0 km. It is shown that the aerosol organic component concentration exponentially decreases with altitude. The drop of the concentration makes 7.5 times from the surface air layer to the free troposphere. The maximal concentration in the surface air layer is observed for *n*-C₁₉H₄₀; in the boundary layer and free atmosphere, for *n*-C₁₇H₃₄. In the free troposphere, compounds heavier than *n*-C₂₂H₄₆ are fixed only at the trace concentration level. Redistribution of the organic component of aerosol between the surface and boundary air layers occurs during the year.