

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.41

## Аномальное вертикальное распределение органического аэрозоля над югом Западной Сибири в сентябре 2018 г.

М.Ю. Аршинов<sup>1</sup>, В.Г. Аршинова<sup>1</sup>, Б.Д. Белан<sup>1</sup>, Д.К. Давыдов<sup>1</sup>,  
Г.А. Ивлев<sup>1</sup>, А.С. Козлов<sup>2</sup>, Л.В. Куйбида<sup>2</sup>, Т.М. Рассказчикова<sup>1</sup>,  
Д.В. Симоненков<sup>1</sup>, Г.Н. Толмачев<sup>1</sup>, А.В. Фофонов<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

В работе по данным самолетного зондирования анализируется аномальное вертикальное распределение органического аэрозоля, зафиксированное 14 сентября 2018 г. Его аномальность заключается в том, что в отличие от многолетнего среднего профиля в этом полете наблюдался максимум концентрации в пограничном слое, который более чем на порядок превышал измеренные ранее концентрации. Сделаны оценки вклада аэрозоля различного происхождения в его общую концентрацию в разных тропосферных слоях. Анализ возможных источников поступления предшественников аэрозольных частиц выявил достаточно обширный сектор, на территории которого имеются бореальные леса — источники биогенных соединений, а также объекты промышленной инфраструктуры — эмитенты антропогенных выбросов.

*Ключевые слова:* аномалия, вертикальное распределение, органический аэрозоль, приземный слой, пограничный слой, свободная атмосфера; anomaly, vertical distribution, organic aerosol, surface layer, boundary layer, free atmosphere.

### Введение

В связи с глобальным потеплением атмосферы Земли необходимо уделять пристальное внимание изменению состава воздуха как одного из определяющих его факторов [1]. По расчетам вклада отдельных компонентов воздуха в дополнительный радиационный приток тепла, проведенным МГЭИК, наибольшей неопределенностью обладает оценка вклада атмосферного аэрозоля, в частности его органической составляющей [2].

До конца 1970-х гг. считалось, что основной вклад в химический состав аэрозольных частиц вносят сульфаты и нитраты [3]. Также в их составе в небольших количествах присутствуют различные металлы [4]. В последние годы ученые доказали более важную роль органических соединений в физике и химии атмосферы, чем предполагалось ранее [5].

В [6] показано, что органические соединения во многом определяют процесс нуклеации (зарождения) наночастиц и тем самым дают старт всему аэрозольному процессу в атмосфере. Исследования выявили значительный вклад органической составляющей в состав микродисперсной (наночастицы) и субмикронной фракций аэрозоля. В [7–9] показано, что содержание органического углерода в частицах 25–35%. Авторы [10] дают среднюю величину, которая изменяется от 40 до 65%. Близкое значение (57,3–71,2%) найдено в [11]. Более того, из экспериментов [12, 13] видно, что в микродисперсной фракции вклад органического компонента может достигать 90–92%.

В ряде работ обнаружено, что в прибрежных районах процессы образования новых частиц, включая органический компонент, могут усиливаться за счет присутствия йода [14, 15]. Выявлено, что органическая часть аэрозоля в значительной степени состоит из водорастворимых соединений [16] и степень водорастворимости аэрозоля пропорциональна содержанию в нем органического вещества [17]. Авторы [18, 19] выяснили, что в субмикронной фракции доля водорастворимой органики составляет от 56 до 61%, а в микродисперсной — до 79%. Анализ состава органических соединений в атмосфере посвящено достаточно много публикаций, перечни идентифицируемых соединений в которых зачастую не пересекаются. Так, например, в [20] в составе

\* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Леонид Васильевич Куйбида (kuibida@kinetics.nsc.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

аэрозоля выявлено 150 только аминов. Авторы [21] детектировали в разных пробах от 186 органических ионов до 494 радикалов. В состав аэрозолей входит большое количество опасных органических соединений, таких как ароматические углеводороды, хлор-, серо- и азотсодержащие вещества [22, 23]. Это определяет экологическую значимость их исследования. Изменение концентрации многих органических компонентов под влиянием человеческой деятельности может вызвать труднопредсказуемые изменения всей структуры атмосферных процессов [24]. По-видимому, перечень соединений, входящих в состав органического компонента аэрозоля, будет пополняться и в дальнейшем.

Вертикальное распределение наночастиц изучено значительно меньше. В пограничном слое атмосферы оно фиксируется как над сушей [25, 26], так и над теплыми [26, 27] и холодными [28, 29] океанами. Уровень образования новых частиц находится под инверсией или внутри пограничного слоя, куда поднимаются аэрозолеобразующие соединения [30, 31]. В [32] описан особый случай поступления наночастиц в пограничный слой из свободной атмосферы. Однако это явление было обусловлено ливнем. Проводимые в различных регионах земного шара исследования вертикального распределения углеродсодержащих соединений, входящих в состав атмосферного аэрозоля, также пока не позволили выявить каких-либо системных закономерностей в формировании общей картины высотной стратификации этих соединений. В [33] показано, что концентрация органического аэрозоля возрастает в 2,5 раза от поверхности земли до высоты 2 км, где затем стабилизируется. Авторы [34] получили нейтральный вертикальный ход концентрации с высотой. В ряде работ отмечается резкое уменьшение концентрации органического углерода с высотой [35–37]. Обобщение результатов 17 зарубежных самолетных кампаний по исследованию вертикальных профилей органического аэрозоля, выполненное в [38], не прояснило ситуации. В разных кампаниях были получены профили, которые можно отнести к одному из вышеописанных типов. Обобщенные нами данные о вертикальном распределении органической составляющей аэрозоля показали, что ее концентрация убывает с высотой по экспоненте [39].

Несмотря на множество проведенных исследований, состояние сведений о пространственно-временной изменчивости органического аэрозоля еще не удовлетворяет практическим требованиям [40, 41].

Настоящая работа продолжает цикл проведенных ранее исследований [39, 42–45] и посвящена изучению аномального распределения органической составляющей аэрозоля по высоте.

## Условия проведения эксперимента и используемые методы

Органический компонент аэрозоля исследовался в слое атмосферы от 500 до 2000 м путем отбора проб с борта самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик»

в ходе летного эксперимента, который проходил 14 сентября 2018 г. над южной частью Большого Васюганского болота, называемой также Бакчарским болотом (координаты средней точки маршрута зондирования: 56,25° с.ш., 82,49° в.д.). Оборудование самолета-лаборатории и методики отбора описаны в [46].

В приземном слое пробы атмосферного аэрозоля отбирались на тефлоновую аналитическую фильтровальную мембрану Grimm 1.113A в тот же день на территории обсерватории ИОА СО РАН «Фоновая» (координаты: 56,26° с.ш., 84,04° в.д.). С борта самолета-лаборатории на эшелоне 500–2000 м временной интервал пробоотбора составил 34 мин (13:42–14:16 по местному времени) с объемом аспирации пробы 5,04 м<sup>3</sup>. В свободной атмосфере в слое 3000–7000 м период отбора составил 13:07–13:40 (33 мин), объем прокаченного воздуха – 4,0 м<sup>3</sup>. У земли, на территории обсерватории ИОА СО РАН «Фоновая», расположенной по ветру в западном направлении, на правом берегу р. Оби в районе пос. Киреевска, продолжительность пробоотбора составила 4 ч 15 мин (10:05–14:20), а объем аспирации пробы – 28,45 м<sup>3</sup>.

Синоптическая обстановка в период эксперимента показана на рис. 1 (цв. вкладка). Видно, что отбор проб аэрозоля осуществлялся в одной воздушной массе в теплом секторе обширного циклона вблизи Салехарда.

Пробы аэрозоля обрабатывались следующим образом: органическая часть с фильтра экстрагировалась хроматографическим ацетоном (1,5 мл) в ультразвуковой бане, затем концентрировалась в вакууме до 10 мкл с последующим анализом на хромато-масс-спектрометре Agilent 6890N (ИХКГ СО РАН).

Хроматографическое разделение экстрагированной органической части атмосферного аэрозоля происходило в капиллярной колонке универсального типа (DB-1MS) длиной 30 м с внутренним диаметром 0,25 мм при линейном повышении температуры термостата колонки в ходе анализа от 50 до 250 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин. Изотерма при начальной и конечной температуре составляла 3 и 45 мин соответственно.

Идентификацию углеводов проводили с помощью библиотечных баз данных масс-спектров NIST 14, а также путем сравнения времен удерживания эталонных соединений в модельных смесях с аналитическими стандартами: на *n*-алканы C<sub>8</sub>–C<sub>40</sub> (Fluka: Alcane standard solution C<sub>8</sub>–C<sub>20</sub>, Alcane standard solution C<sub>21</sub>–C<sub>40</sub>); полиароматические, включая некоторые полихлорированные, углеводороды (Supelco: EPA PAH 525 MixB, PAH 525 semivolatile).

## Результаты эксперимента и их обсуждение

Общее содержание нормальных углеводов в пробах, полученных с борта самолета-лаборатории для эшелонов 500–2000 и 3000–7000 м, составило 248,0 и 15,2 нг/м<sup>3</sup>, а их концентрация в приземном слое воздуха – 36,8 нг/м<sup>3</sup>.

На рис. 2 показано наложение этих данных на результаты среднего многолетнего вертикального распределения органической составляющей аэрозоля, полученного ранее для этого же района в [39]. Подобная зависимость была получена затем над территорией США и Бразилии [47, 48].

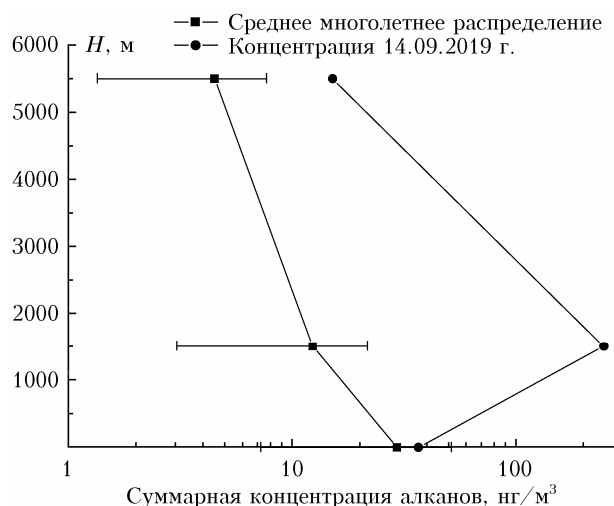


Рис. 2. Вертикальное распределение суммарной концентрации алканов над Западной Сибирью

Видно, что профиль концентрации алканов, полученный 14 сентября 2018 г., кардинально отличается от среднего многолетнего. Во-первых, содержание этих органических соединений во всей толще атмосферы значительно больше, чем зафиксированное ранее. Оно превышает даже коридор среднеквадратического отклонения, показанный на рис. 2 горизонтальными линиями, что привело к необходимости использования логарифмической шкалы. Во-вторых, у профиля совершенно другой характер изменения концентрации с высотой. Если многолетний ход характеризуется нелинейным уменьшением от приземного слоя к пограничному и далее в свободной атмосфере, то сентябрьский демонстрирует явный максимум в пограничном слое.

За счет каких соединений это происходит, видно из рис. 3, который демонстрирует, что наибольшие концентрации в приземном и пограничном слоях наблюдаются для алканов  $C_{23}$ ,  $C_{25}$ ,  $C_{27}$  и  $C_{29}$ . Не разделяя атмосферу по слоям, на рисунке можно выделить три моды:  $C_9$ – $C_{14}$ ,  $C_{15}$ – $C_{22}$ ,  $C_{23}$ – $C_{29}$ . Согласно ранее проведенным исследованиям  $C_{15}$ – $C_{22}$  можно отнести к аэрозолям антропогенного происхождения:  $C_{21}$  и  $C_{22}$  – автомобильные выхлопы,  $C_{19}$  – смазочное масло и дизельное топливо [49, 50],  $C_{23}$ – $C_{29}$  имеют в основном естественное биологическое происхождение [51, 52],  $C_9$ – $C_{14}$  также можно отнести к естественным биологическим продуктам: газы, спирты, кислоты, выделяемые растительностью [53–55]. Такое деление относительно условно, так как все эти соединения могут присутствовать, например, в составе нефтепродуктов [22]. Деление опирается на преобладающие в каждой моде органические соединения.

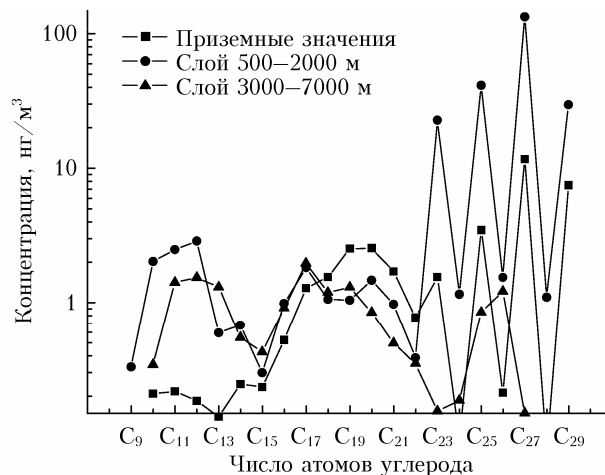


Рис. 3. Концентрация нормальных углеводородов в приземном слое, в слоях 500–2000 и 3000–7000 м над Западной Сибирью

Вклад каждой моды в общее содержание органического компонента зависит от высоты. Это хорошо показано на рис. 4.

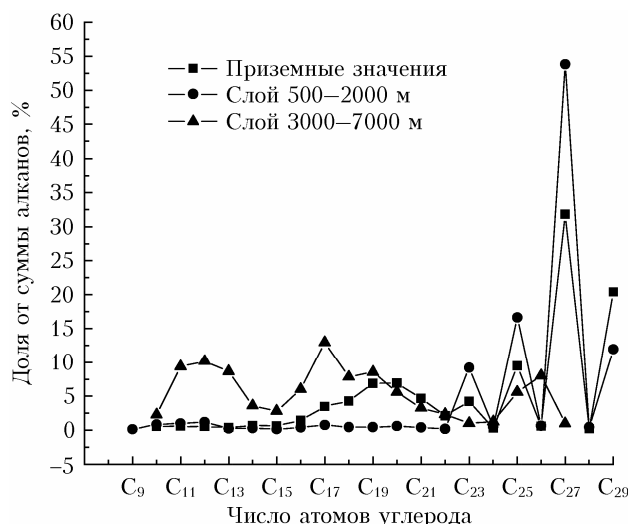


Рис. 4. Относительный вклад различных соединений в общую концентрацию органического компонента

В приземном и пограничном слоях основной вклад в органическую составляющую вносят аэрозоли естественного биологического происхождения. В свободной атмосфере содержимое легколетучих ( $C_9$ – $C_{14}$ ), антропогенных ( $C_{15}$ – $C_{22}$ ) и биогенных ( $C_{23}$ – $C_{29}$ ) мод приблизительно одинаково.

Для удобства оценки роли каждой моды в таблице суммирован вклад входящих в них соединений.

Из данных таблицы следует, что в приземном слое вклад моды легколетучих соединений в период эксперимента был небольшим (2,7%). Высоким (30,3%) оказался вклад антропогенной моды. Это вызывает некоторое удивление, так как обсерватория «Фоновая» получила свое название из-за отсутствия вблизи нее (радиус 60 км) каких-либо антропогенных источников. Почти 70% в составе органического

компонента — это частицы аэрозоля биогенного происхождения.

**Вклад легколетучей, антропогенной и биогенной мод в органический аэрозоль**

Слой атмосферы	C <sub>9</sub> –C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub> –C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub> –C <sub>29</sub>	Итого
Приземный	2,71	30,33	66,96	100
Пограничный (500–2000 м)	3,63	3,25	93,12	100
Свободная атмосфера (3000–7000 м)	33,93	49,25	16,82	100

В пограничном слое в период эксперимента основной вклад (93,12%) в состав частиц принадлежал аэрозолю естественного происхождения. И только по 3% относилось к легколетучей и антропогенной модам.

Свободная атмосфера по соотношению концентраций органических соединений в различных модах кардинально отличается от приземного и пограничного слоев. В этом слое содержание легколетучих соединений достигает ~34%, антропогенных — 49,25%, а биогенных — всего 16,8%.

Возможно, что такое расслоение органических соединений по высоте связано с дальним переносом соединений-прекурсоров [56] либо с их трансформацией по мере подъема в свободную атмосферу [57]. Рассмотрим, с какой территории могли поступать соединения-прекурсоры (рис. 5, цв. вкладка).

Приведенный на рисунке сектор охватывает зону бореальных лесов, которые являются мощным источником биогенных аэрозолей, а также значительный участок Транссибирских авто- и железнодорожных магистралей с сопутствующими элементами инфраструктуры. Выбросы от транспорта и обеспечивающих его объектов могут стать мощным источником предшественников аэрозольных частиц. В реальности продукты от обоих источников в атмосфере смешиваются. Однако для разделения вклада природных и антропогенных факторов требуется отдельный специально поставленный эксперимент.

## Заключение

Проведенный 14 сентября 2018 г. эксперимент по определению вертикального распределения органического аэрозоля выявил аномальное отклонение от среднего многолетнего профиля, установленного для района исследований. Оно заключается в повышении концентрации почти на порядок величины и наличием максимума в пограничном слое.

Выявлены существенные различия в составе органических соединений в приземном и пограничном слоях, с одной стороны, и в свободной атмосфере — с другой. В составе соединений на всех уровнях выделяются три моды: C<sub>9</sub>–C<sub>14</sub> — легколетучие, C<sub>15</sub>–C<sub>22</sub> — антропогенные, C<sub>23</sub>–C<sub>29</sub> — биогенные.

Вклад каждой моды послойно различается. В приземном слое основное количество аэрозоля имеет антропогенную (30%) и биогенную (67%) природу. В пограничном слое почти все частицы биогенные (93%). В свободной атмосфере в составе аэрозоля

преобладают легколетучие (34%) и антропогенные (49%) соединения.

Анализ возможных источников поступления предшественников аэрозольных частиц выявил достаточно обширный сектор, на территории которого имеются бореальные леса — источники биогенных соединений, а также объекты промышленной инфраструктуры — эмитенты антропогенных выбросов. Разделить их пока нет возможности.

Самолетное зондирование выполнено в рамках государственного задания (проект № АААА-А17-117021310142-5) на УНУ самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик», входящего в ЦКП «Атмосфера». Исследование аномального распределения органического аэрозоля проведено при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 18-45-700020 и 19-05-50024).

1. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group 1 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. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1552 p.
2. *Peräkylä O., Riva M., Heikkinen L., Quéléver L., Roldin P., Ehn M.* Experimental investigation into the volatilities of highly oxygenated organic molecules (HOMs) // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 2. P. 649–669.
3. *Yu F., Luo G., Bates T.S., Anderson B., Clarke A., Kapustin V., Yantosca R.M., Wang Y., Wu S.* Spatial distributions of particle number concentrations in the global troposphere: Simulations, observations, and implications for nucleation mechanisms // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, N D17205. DOI: 10.1029/2009JD013473.
4. *Sanderson P., Delgado-Saborit J.M., Harrison R.M.* A review of chemical and physical characterisation of atmospheric metallic nanoparticles // *Atmos. Environ.* 2014. V. 94. P. 353–365.
5. *Vehkamäki H.* Classical Nucleation Theory in Multi-component Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 176 p.
6. *Tröstl J., Wayne W.K., Gordon H., Heinritzi M., Chao Yan, Molteni U., Ahlm L., Frege C., Bianchi F., Wagner R., Simon M., Lehtipalo K., Williamson Ch., Craven J.S., Duplissy J., Adamov A., Almeida J., Bernhammer A.-K., Breitenlechner M., Brilke S., Dias A., Ehrhart S., Flagan R.C., Franchin A., Fuchs C., Guida R., Gysel M., Hansel A., Hoyle Ch.R., Jokinen T., Junninen H., Kangasluoma J., Keskinen H., Kim J., Krapf M., Kürten A., Laaksonen A., Lawler M., Leiminger M., Mathot S., Möhler O., Nieminen T., Onnela A., Petäjä T., Piel F.M., Miettinen P., Rissanen M.P., Rondo L., Sarnela N., Schobesberger S., Sengupta K., Sipilä M., Smith J.N., Steiner G., Tomé A., Virtanen A., Wagner A.C., Weingartner E., Wimmer D., Winkler P.M., Ye P., Carslaw K.S., Curtius J., Dommen J., Kirkby J., Kulmala M., Riipinen I., Worsnop D.R., Donahue N.M., Baltensperger U.* The role of low-volatility organic compounds in initial particle growth in the atmosphere // *Nature.* 2016. V. 533, N 7604. P. 527–531.
7. *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. 7 p.
8. *Elsasser M., Crippa M., Orasche J., DeCarlo P.F., Oster M., Pitz M., Cyrus J., Gustafson T.L., Petters*

- son J.B.C., Schnelle-Kreis J., Prevot A.S.H., Zimmermann R. Organic molecular markers and signature from wood combustion particles in winter ambient aerosols: aerosol mass spectrometer (AMS) and high time-resolved GC-MS measurements in Augsburg, Germany // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 14. P. 6113–6128.
9. Markovic M.Z., VandenBoer T.C., Baker K.R., Kelly J.T., Murphy J.G. Measurements and modeling of the inorganic chemical composition of fine particulate matter and associated precursor gases in California's San Joaquin Valley during CalNex 2010 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. V. 119, N 11. P. 6853–6866.
  10. Ge X., Wexler A.S., Clegg S.L. Atmospheric amines – Part 1. A review // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 3. P. 524–545.
  11. Wang Z., Wang T., Guo J., Gao R., Xue L., Zhang J., Zhou Y., Zhou X., Zhang Q., Wang W. Formation of secondary organic carbon and cloud impact on carbonaceous aerosols at Mount Tai, North China // *Atmos. Environ.* 2012. V. 46, N 1. P. 516–527.
  12. Shakya K.M., Place P.F. Jr., Griffin R.J., Talbot R.W. Carbonaceous content and water-soluble organic functionality of atmospheric aerosols at a semi-rural New England location // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, N D03301. DOI: 10.1029/2011JD016113.
  13. Kim K.H., Sekiguchi K., Kudo S., Kinoshita M., Sakamoto K. Carbonaceous and ionic components in ultra fine and fine particles at four sampling sites in the vicinity of roadway intersection // *Atmos. Environ.* 2013. V. 74. P. 83–92.
  14. Mahajan A.S., Sorribas M., Martin J.C.M., MacDonald S.M., Gil M., Plane J.M.C., Saiz-Lopez A. Concurrent observations of atomic iodine, molecular iodine and ultrafine particles in a coastal environment // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 6. P. 2545–2555.
  15. Allan J.D., Williams P.I., Najera J., Whitehead J.D., Flynn M.J., Taylor J.W., Liu D., Darbyshire E., Carpenter L.J., Chance R., Andrews S.J., Hackenberg S.C., McFiggans G. Iodine observed in new particle formation events in the Arctic atmosphere during ACCACIA // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 10. P. 5599–5609.
  16. Taylor N.F., Collins D.R., Lowenthal D.H., McCubbin I.B., Hallar A.G., Samburova V., Zielinska B., Kumar N., Lynn R., Mazzoleni L.R. Hygroscopic growth of water soluble organic carbon isolated from atmospheric aerosol collected at US national parks and Storm Peak Laboratory // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 4. P. 2555–2571.
  17. Zhang X., Liu J., Parker E.T., Hayes P.L., Jimenez J.L., de Gouw J.A., Flynn J.H., Grossberg N., Lefter B.L., Weber R.J. On the gas-particle partitioning of soluble organic aerosol in two urban atmospheres with contrasting emissions: 1. Bulk water-soluble organic carbon // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117, N D00V16. DOI: 10.1029/2012JD017908.
  18. Zhang X., Liu Z., Hecobian A., Zheng M., Frank N.H., Edgerton E.S., Weber R.J. Spatial and seasonal variations of fine particle water-soluble organic carbon (WSOC) over the southeastern United States: implications for secondary organic aerosol formation // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 14. P. 6593–6607.
  19. Ziemba L.D., Griffi R.J., Whitlow S., Talbot R.W. Characterization of water-soluble organic aerosol in coastal New England: Implications of variations in size distribution // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 39. P. 7310–7329.
  20. Lee D.Y., Wexler A.S. Atmospheric amines – Part III: Photochemistry and toxicity // *Atmos. Environ.* 2013. V. 71. P. 95–103.
  21. Park J.-H., Goldstein A.H., Timkovsky J., Fares S., Weber R., Karlik J., Holzinger R. Active atmosphere-ecosystem exchange of the vast majority of detected volatile organic compounds // *Science*. 2013. V. 341, N 6146. P. 643–647.
  22. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. СПб.: Химия, 2001. 352 с.
  23. Ravindra K., Sokhi R., Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 13. P. 2895–2921.
  24. Gilardoni S. Advances in organic aerosol characterization: From complex to simple // *Aer. Air Qual. Res.* 2017. V. 17, N 6. P. 1347–1351.
  25. Leino K., Lampilahti J., Poutanen P., Väinänen R., Manninen A., Mazon S.B., Dada L., Franck A., Wimmer D., Aalto P.P., Ahonen L.R., Enroth J., Kangasluoma J., Keronen P., Korhonen F., Laakso H., Matilainen T., Siivola E., Manninen H.E., Lehtipalo K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kulmala M. Vertical profiles of sub-3 nm particles over the boreal forest // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 6. P. 4127–4138.
  26. Heintzenberg H., Birmili W., Wiedensohler A., Nowak A., Tuch T. Structure, variability and persistence of the submicrometre marine aerosol // *Tellus B.* 2004. V. 56, N 4. P. 357–367.
  27. Nair V.S., Moorthy K.K., Babu S.S. Influence of continental outflow and ocean biogeochemistry on the distribution of fine and ultrafine particles in the marine atmospheric boundary layer over Arabian Sea and Bay of Bengal // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 13. P. 7321–7331.
  28. Karl M., Leck C., Gross A., Pirjola L. A study of new particle formation in the marine boundary layer over the central Arctic Ocean using a flexible multicomponent aerosol dynamic model // *Tellus B.* 2012. V. 64. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.17158.
  29. Burkart J., Willis M.D., Bozem H., Thomas J.L., Law K., Hoor P., Alibadi A.A., Köllner F., Schneider J., Herber A., Abbatt J.P.D., Leitch W.R. Summertime observations of elevated levels of ultrafine particles in the high Arctic marine boundary layer // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 8. P. 5515–5535.
  30. Altstädter B., Platis A., Wehner B., Scholtz A., Wildmann N., Hermann M., Käthner R., Baars H., Bange J., Lampert A. ALADINA – an unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8, N 4. P. 1627–1639.
  31. Platis A., Altstädter B., Wehner B., Wildmann N., Lampert A., Hermann M., Birmili W., Bange J. An observational case study on the influence of atmospheric boundary-layer dynamics on new particle formation // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2016. V. 158, N 1. P. 67–92.
  32. Wang J., Krejci R., Giangrande S., Kuang C., Barbosa H.M.J., Brito J., Carbone S., Chi X., Comstock J., Ditas F., Lavric J., Manninen H.E., Mei F., Moran-Zuloaga D., Pöhlker C., Pöhlker M.L., Saturno J., Schmid B., Souza R.A.F., Springston S.R., Tomlinson J.M., Toto T., Walter D., Wimmer D., Smith J.N., Kulmala M., Machado L.A.T., Artaxo P., Andreae M.O., Petäjä T., Martin S.T. Amazon boundary layer aerosol concentration sustained by vertical transport during rainfall // *Nature*. 2016. V. 539, N 7629. P. 416–419.
  33. Novakov T., Hegg D.A., Hobbs P.V. Airborne measurement of carbonaceous aerosols on the East Coast of the United States // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, N D25. P. 30023–30030.
  34. Asa-Awuku A., Moore R.H., Nenes A., Bahreini R., Holzway J.S., Brock C.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, N D11201. DOI: 10.1029/2010JD014874.
35. *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.* D. 2011. V. 116. DOI: 10.1029/2011JD016674.
36. *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.* D. 2012. V. 117. DOI: 10.1029/2011JD017352.
37. *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.
38. *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.
39. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронцовская Н.Г., Головкин А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Мальшикин С.Б., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В.* Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 2. Вертикальное распределение // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 9. С. 733–739.
40. *Власенко С.С., Волкова К.А., Ионов Д.В., Рышкевич Т.И., Иванова О.А., Михайлов Е.Ф.* Изменчивость углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2019. Т. 55, № 6. С. 147–156.
41. *Немировская И.А.* Органические соединения в экосистеме прибрежных районов Антарктики // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 2. С. 78–93.
42. *Воронцовская Н.Г., Певнева Г.С., Головкин 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 атмосф. 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 4. P. 547–557.
43. *Воронцовская Н.Г., Певнева Г.С., Головкин А.К., Козлов А.С., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н.* Пространственная изменчивость органической компоненты аэрозоля в приземном слое и свободной атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 9. С. 825–829.
44. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головкин 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 атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 716–722.
45. *Анохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронцовская Н.Г., Головкин А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Мальшикин С.Б., Певнева Г.С., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 3. Продукты лесных пожаров // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 9. С. 740–749.
46. *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 атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
47. *Schroder J.C., Campuzano-Jost P., Day D.A., Shah V., Larson K., Sommers J.M., Sullivan A.P., Campos T., Reeves J.M., Hills A., Hornbrook R.S., Blake N.J., Scheuer E., Guo H., Fibiger D.L., Mc Duffie E.E., Hayes P.L., Weber R.J., Dibb J.E., Apel E.C., Jaeglé L., Brown S.S., Thornton J.A., Jimenez J.L.* Sources and secondary production of organic aerosols in the northeastern United States during WINTER // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123, N 14. P. 7771–7796.
48. *Schulz C., Schneider J., Holanda B.A., Appel O., Costa A., de Sá S.S., Dreiling V., Fütterer D., Jurkat-Witschas T., Klimach T., Knöche C., Krämer M., Martin S.T., Mertes S., Pöhlker M.L., Sauer D., Voigt C., Walser A., Weinzierl B., Ziereis H., Zöger M., Andreae M.O., Artaxo P., Machado L.A.T., Pöschl U., Wendisch M., Stephan Borrmann S.* Aircraft-based observations of isoprene-epoxydiol-derived secondary organic aerosol (IEPOX-SOA) in the tropical upper troposphere over the Amazon region // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 20. P. 14979–15001.
49. *Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T.* Sources of fine organic aerosol. 5. Natural gas home appliances // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27, N 13. P. 2736–2744.
50. *Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T.* Sources of fine organic aerosol. 2. Non-catalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27, N 4. P. 636–651.
51. *Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T.* Interpretation of high-resolution gas chromatography and high-resolution gas chromatography/mass spectrometry data acquired from atmospheric organic aerosol samples // *Aerosol Sci. Technol.* 1989. V. 10. P. 408–420.
52. *Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T.* Sources of fine organic aerosol. 4. Particulate abrasion products from leaf surfaces of urban plants // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27, N 13. P. 2700–2711.
53. *Boreddy S.K.R., Haque M.M., Kawamura K., Fu P., Kim Y.* Homologous series of *n*-alkanes (C<sub>19</sub>–C<sub>35</sub>), fatty acids (C<sub>12</sub>–C<sub>32</sub>) and *n*-alcohols (C<sub>8</sub>–C<sub>30</sub>) in atmospheric aerosols from central Alaska: Molecular distributions, seasonality and source indices // *Atmos. Environ.* 2018. V. 184. P. 87–97.
54. *Chen Z., Millet D.B., Singh H.B., Wisthaler A., Apel E.C., Atlas E.L., Blake D.R., Bourgeois I., Brown S.S., Crouse J.D., de Gouw J.A., Flocke F.M., Fried A., Heikes B.G., Hornbrook R.S., Mikoviny T., Min K.-E., Müller M., Neuman J.A., O'Sullivan D.W., Peischl J., Pfister G.G., Richter D., Roberts J.M., Ryerson T.B., Shertz S.R., Thompson C.R., Treadaway V., Veres P.R., Walega J., Warneke C., Washenfelder R.A., Weibring P., Yuan B.* On the sources and sinks of atmospheric VOCs: An integrated analysis of recent aircraft campaigns over

- North America // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 14. P. 9097–9123.
55. *Alwe H.D., Millet D.B., Chen X., Raff J.D., Payne Z.C., Fledderman K.* Oxidation of volatile organic compounds as the major source of formic acid in a mixed forest canopy // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46, N 5. P. 2940–2948.
56. *Gomez M.C., Durana N., Garcia J.A., de Blas M., de Camara E.S., Garcia-Ruiz E., Gangoiti G., Torre-Pascual E., Iza J.* Long-term measurement of biogenic volatile organic compounds in a rural background area: Contribution to ozone formation // *Atmos. Environ.* 2020. V. 224, N 117315.
57. *Ovadnevaite J., Zuend A., Laaksonen A., Sanchez K.J., Roberts G., Ceburnis D., Decesari S., Rinaldi M., Hodas N., Facchini M.C., Seinfeld J.H., O'Dowd C.* Surface tension prevails over solute effect in organic-influenced cloud droplet activation // *Nature.* 2017. V. 546, N 7660. P. 637–641.

*M.Yu. Arshinov, V.G. Arshinova, B.D. Belan, D.K. Davydov, G.A. Iolev, A.S. Kozlov, L.V. Kuibida, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov.* **Abnormal vertical distribution of organic aerosol over the south of Western Siberia in September 2018.**

The abnormal vertical distribution of organic aerosol recorded on September 14, 2018, is analyzed on the basis of aircraft sounding data. The anomaly is that, unlike the long-term average profile, this flight has shown a maximal concentration in the boundary layer, which is more than an order of magnitude higher than the previously measured concentrations. The analysis of possible sources of aerosol particle precursors revealed a fairly large sector, in the territory of which there are boreal forests, which are sources of biogenic compounds, and objects of industrial infrastructure, which emit anthropogenic compounds.