

УДК 551.510.42

# Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 1. Географические особенности и временная динамика

М.Ю. Аршинов<sup>1</sup>, Б.Д. Белан<sup>1</sup>, Н.Г. Воронцовская<sup>2</sup>, А.К. Головкин<sup>2</sup>,  
Д.К. Давыдов<sup>1</sup>, А.С. Козлов<sup>3</sup>, Г.С. Певнева<sup>2</sup>, Д.В. Симоненков<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 химии нефти СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 4

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

Поступила в редакцию 23.03.2017 г.

По данным измерений в приземном слое воздуха в различных районах Сибири и в свободной атмосфере над акваторией Карского моря исследовано изменение концентрации нормальных углеводородов. Определено их суммарное содержание в составе аэрозольных частиц, отобранных за период эксперимента (от 244,56 нг/м<sup>3</sup> в приземном слое воздуха до 0,08 нг/м<sup>3</sup> в свободной атмосфере над Карским морем). Обнаружено, что основное количество органических соединений находится в диапазоне C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>–C<sub>22</sub>H<sub>46</sub> независимо от времени года. В переходные сезоны (весной и осенью) в составе частиц присутствуют более легкие соединения, начиная с C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>. Максимум концентрации осенью приходится на C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>, летом и весной на C<sub>19</sub>H<sub>40</sub>, а зимой на C<sub>20</sub>H<sub>42</sub>.

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

## Введение

Атмосферный аэрозоль – одна из самых изменчивых компонент воздуха. Он играет важную роль во многих процессах, например рассеяние и поглощение солнечной радиации, определяющих в значительной мере тепловой баланс планеты и образование облачности, изменяющей альбедо земного шара. Эта роль зависит от размера и химического состава частиц аэрозоля. Химический состав также обуславливает его экологическую функцию – воздействие на биологические объекты и элементы окружающей среды. Длительное время считалось [1], что химический состав атмосферного аэрозоля характеризуется неорганической компонентой, а вклад органической составляющей не превышает нескольких процентов.

Исследования последних лет показали, что органические соединения играют гораздо более важ-

ную роль в физике аэрозоля, чем предполагалось ранее [2]. В [3–5] показано, что органические соединения во многом определяют процесс нуклеации (зарождения) наночастиц, тем самым давая старт всему аэрозольному процессу в атмосфере. Не случайно выполненными ранее исследованиями выявили значительный вклад органической составляющей в состав микродисперсной (наночастицы) и субмикронной фракций аэрозоля. В работах [6, 7] показано, что содержание органического углерода в составе частиц может составлять 25–35%. Авторы [8] приводят среднюю величину от 40 до 65%. Близкие значения найдены в [9]: 57,3–71,2%. Более того, эксперименты доказали, что вклад органической компоненты в микродисперсную фракцию может достигать 90–92% [10, 11].

Согласно оценкам [12] суммарная масса образующегося в атмосфере органического аэрозоля составляет 70 Тг/год. Это достаточно большая величина, соизмеримая с неорганической компонентой [13]. Следует также отметить большую устойчивость органических соединений и их распространенность. Так, в последнее время органические соединения обнаружены на Марсе, в составе кометы Чурюмова–Герасименко [14, 15].

Перечисленные выше данные доказывают важность роли органической компоненты аэрозоля в атмосфере и подтверждают актуальность ее изучения.

\* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Наталья Геннадьевна Воронцовская (voronovskaya@ipc.tsc.ru); Анатолий Кузьмич Головкин (golovko@ipc.tsc.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Галина Сергеевна Певнева (pevneva@ipc.tsc.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Такие работы очень широко проводятся нашими зарубежными коллегами. В отечественной практике можно выделить несколько групп, которые исследуют органический аэрозоль в фоновых условиях [16–20]. Настоящая работа поэтому посвящена географическим особенностям органической компоненты аэрозоля и ее сезонной динамике.

## Методы и районы исследования

Для выявления географических особенностей в распределении органической компоненты аэрозоля в приземном слое воздуха отбирались пробы частиц в разных областях Западной Сибири, на высоте 2 м, в период технического обслуживания сети вышек JR-STATION, расположенных в удаленных от промышленных районов, т.е. в экологически чистых (фоновых), зонах: Ваганово (Челябинская обл.), Демьянское (Тюменская обл.), Ноябрьск (Ямало-Ненецкий АО), обсерватория «Фоновая» (Томская обл.) и оз. Байкал (Большие Коты, Иркутская обл.). Кроме того, отбор проб производился с борта самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в тропосферном слое атмосферы на высоте от 500 до 8500 м в ходе трех летних кампаний по проекту YAK-AEROSIB в 2012, 2013 и 2014 гг. Описание оборудования самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» приведено в [21]. Методические вопросы отбора проб с борта самолета обсуждались ранее в [22]. В 2012 и 2013 гг. полеты выполнялись по маршруту Новосибирск – Мирный – Якутск – Братск – Новосибирск в 2014 г. – по маршруту Новосибирск – Салехард – Карское море – Салехард – Новосибирск.

Пробы отбирались на тефлоновые аналитические мембраны Grimm 1.113A с эффективным диаметром пор 1,2 мкм. Отобранные пробы однократно экстрагировались ацетоном, концентрировались до 30 мкл с последующим анализом на хромато-масс-спектрометре Agilent 6890N при повышении темпе-

ратуры анализа от 50 до 250 °C со скоростью нагрева 5 °C/мин. Изотермы при начальной и конечной температурах составляли 3 и 45 мин соответственно. Идентификация углеводородов проводилась с использованием библиотечных баз данных масс-спектров NIST, а также путем сравнения времен удерживания индивидуальных *n*-алканов в эталонной смеси (Alkane Standard Solutions C<sub>8</sub>–C<sub>20</sub> и C<sub>21</sub>–C<sub>40</sub> by SIGMA–ALDRICH).

## Результаты измерений и их обсуждение

Суммарное содержание нормальных углеводородов в составе аэрозольных частиц, отобранных за период выполнения проекта, изменялось от 244,56 нг/м<sup>3</sup> в приземном слое воздуха до 0,08 нг/м<sup>3</sup> в свободной атмосфере над Карским морем. Это почти 5 порядков величины. При этом вклад (идентифицированной) органической компоненты в общую аэрозольную по данным 38 проб изменялся от 0,005 до 1,247%, составляя в среднем 0,3%.

Состав соединений, идентифицированных в пробах приземного слоя воздуха, представлен на рис. 1, который демонстрирует существенные географические особенности в содержании тех или иных органических соединений в аэрозоле. Так, в северных районах (Демьянское и Ноябрьск) основной максимум приходится на C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>, при широком распределении от C<sub>12</sub>H<sub>26</sub> до C<sub>29</sub>H<sub>60</sub>. На западе территории (Ваганово) в составе частиц преобладают более тяжелые углеводороды, с нечетным количеством атомов углерода C<sub>25</sub>H<sub>52</sub>, C<sub>28</sub>H<sub>58</sub> и C<sub>29</sub>H<sub>60</sub>. Соединений, легче чем C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>, в частицах не обнаружено. Подобную тенденции выявляет и проба, отобранная в котловине оз. Байкал. Обсерватория «Фоновая» является промежуточной по отношению к другим регионам. Здесь фиксируется четкий максимум при C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>

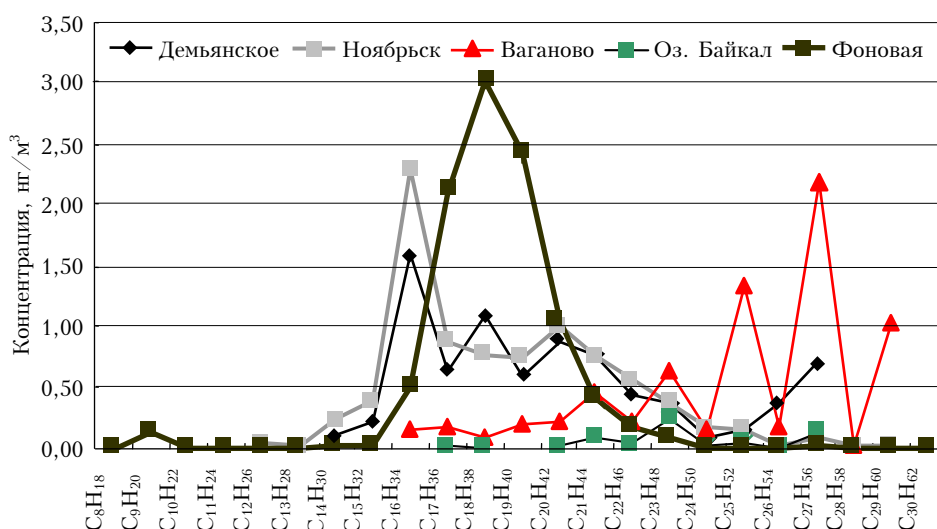


Рис. 1. Концентрация органических соединений (*n*-алканов) в составе аэрозоля в приземном слое воздуха в разных районах Сибири

и самый широкий диапазон соединений от  $C_9H_{20}$  до  $C_{29}H_{60}$ . Следует подчеркнуть, что данные на рис. 1 получены из проб, отобранных в течение одного месяца, поэтому они сопоставимы по времени. В другие периоды, как будет показано ниже для обсерватории «Фоновой», концентрации соединений могут быть значительно выше. Различия в составе соединений в разных географических районах, относящихся к фоновым, скорее всего, объясняются различием видового состава растительности в каждой из этих природных зон.

Проведенная идентификация соединений, обнаруженных в атмосферном аэрозоле над югом Западной Сибири, во многом совпадает с данными, полученными для других регионов [23–29]. Это свидетельствует об универсальности образования частиц в атмосфере.

Географические особенности района наблюдений, по-видимому, оказывают большое влияние на образование органической компоненты атмосферного аэрозоля. Так, в работах [30–32] приводятся величина концентрации органической компоненты, на порядок превышающая наши значения. Это характерно и для районов, в которых имеются антропогенные источники органической компоненты аэрозоля [33, 34]. Близкие же к представленным в данном проекте значения концентраций получены в [23, 35, 36].

Географические различия в органической компоненте аэрозоля в пограничном слое и в свободной атмосфере были рассмотрены нами ранее [37], поэтому повторять эти результаты здесь не будем. Остановимся только на одном моменте. На рис. 2 приведены данные для двух участков полета — от Новосибирска до Салехарда и над Карским морем — в октябре. В первом случае полет выполнялся над континентом, во втором — над океаном.

Над континентом зафиксирована суммарная концентрация нормальных углеводородов  $1,42 \text{ нг/м}^3$ , над океаном —  $0,084 \text{ нг/м}^3$ . Несмотря на очень низ-

кое содержание органических соединений над океаном, в составе частиц обнаружены углеводороды достаточно широкого диапазона — от  $C_{11}H_{24}$  до  $C_{25}H_{52}$ , что согласуется с исследованиями других авторов, выполненными в приземном слое воздуха в Арктике [38–40]. Концентрация органических соединений, полученная нами, значительно ниже, чем в [38–40]. Скорее всего, это связано с различием в высоте отбора проб: в нашем случае это свободная атмосфера (3–8 км), а в цитируемых работах — приземный слой воздуха.

В [41] мы приводили годовой ход концентрации органических соединений. Накопленный материал позволяет вернуться к этому вопросу. Уточненный годовой ход концентрации органического аэрозоля (суммарного содержания) в приземном слое воздуха показан на рис. 3. Здесь отражен тот факт, что основной источник органических соединений, которые затем переходят в аэрозольное состояние, по-видимому, находится у поверхности земли. Так, наибольшее содержание органической компоненты в течение всего года фиксируется в приземном слое воздуха. Максимум концентрации наблюдается в зимнее время, когда имеется приземная инверсия и происходит накопление примесей в приземном слое. Весной и летом, когда высота пограничного слоя атмосферы возрастает, при постоянстве источника или росте его мощности рассеяние аэрозольных частиц происходит в большем объеме, что и отражается в снижении концентрации органических соединений в составе аэрозоля. Минимум, который приходится на осень, обусловлен двумя механизмами. Первый заключается в угасании вегетативной активности растительности, что ведет к уменьшению мощности источника аэрозолеобразующих веществ и, следовательно, меньшему образованию частиц органического происхождения. Второй механизм обусловлен вымывающим действием осадков, так как большинство

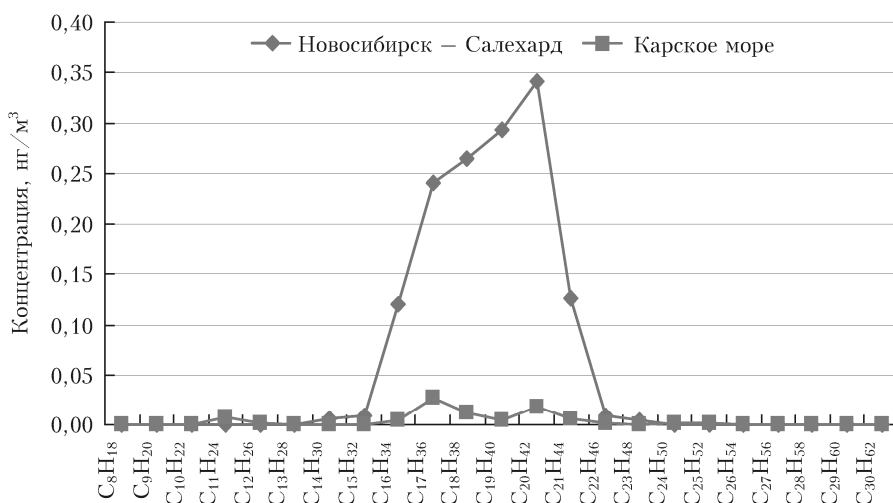


Рис. 2. Концентрация органических соединений (*n*-алканов) в составе аэрозоля в свободной атмосфере над разными районами Сибири (континент) и Карским морем (океан)

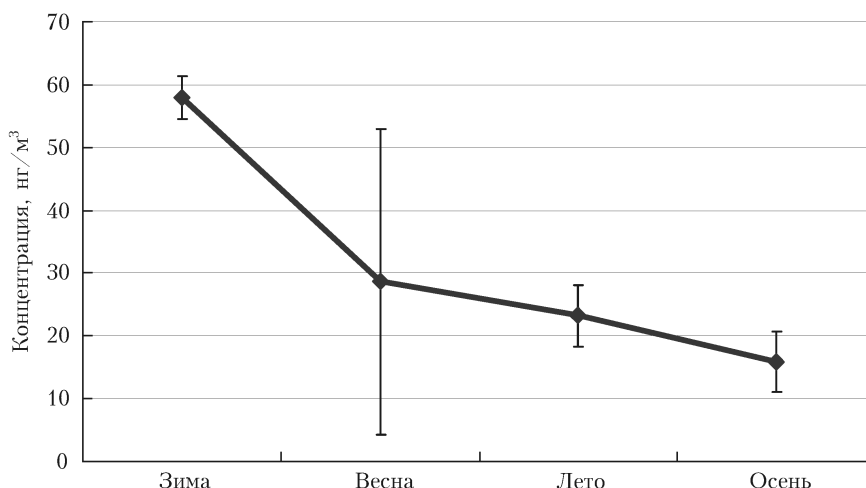


Рис. 3. Годовой ход суммарной концентрации органической компоненты аэрозоля в приземном слое атмосферы в районе обсерватории «Фоновая»

органических соединений относится к водорастворимой фракции [45–48].

Сезонные вариации содержания органических соединений в составе атмосферного аэрозоля приведены на рис. 4.

Видно, что основное количество органических соединений находится в диапазоне  $C_{15}H_{32}$ – $C_{22}H_{46}$  независимо от времени года. В переходные сезоны – весной и осенью – в составе частиц обнаруживаются более легкие соединения, начиная с  $C_9H_{20}$ . При этом максимум концентрации осенью приходится на  $C_{18}H_{38}$ , летом и весной на  $C_{19}H_{40}$ , а зимой на  $C_{20}H_{42}$ . Возможно, это обусловлено первичным составом аэрозолеобразующих веществ. Но для однозначного вывода необходим контроль первичных, газообразных соединений.

### Заключение

В ходе исследований получена обширная по времени и географическому охвату база данных хро-

мато-масс-спектрометрического анализа проб атмосферного аэрозоля, содержащая следы всех экстрагируемых соединений. Она позволяет проводить ретроспективный анализ индивидуальных веществ.

Анализ полученных данных показал следующее.

Содержание нормальных углеводородов в составе аэрозольных частиц изменяется от 244,56 нг/м<sup>3</sup> в приземном слое воздуха до 0,08 нг/м<sup>3</sup> в свободной атмосфере. Вклад органической (идентифицированной) компоненты в общую концентрацию аэрозольных частиц изменяется от 0,005 до 1,247%, составляя в среднем 0,3%.

Имеются существенные различия в составе органических соединений в зависимости от места отбора проб воздуха. Эти различия, по-видимому, объясняются различием видового состава растительности в каждой из этих природных зон.

В годовом ходе максимум концентрации наблюдается в зимнее время. Весной и летом концентрация органических соединений снижается. Минимум приходится на осень.

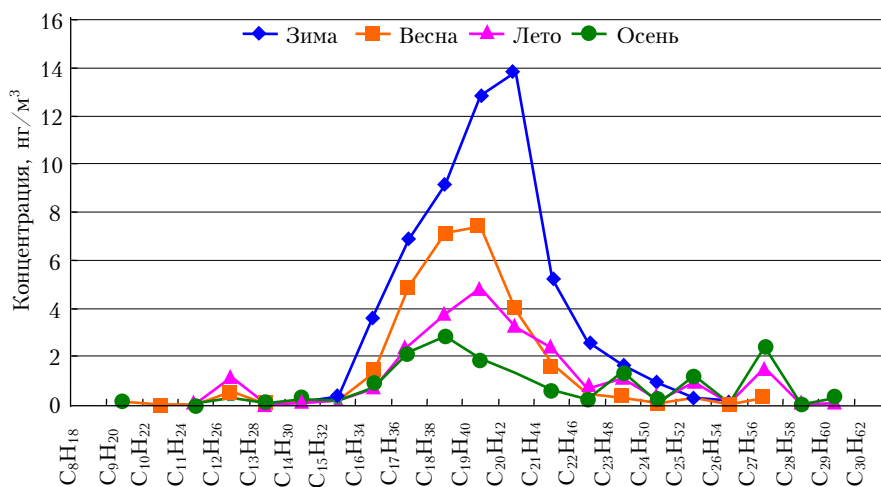


Рис. 4. Годовой ход органических соединений в составе аэрозоля в приземном слое на юге Западной Сибири

Основное количество органических соединений находится в диапазоне  $C_{15}H_{32}$ – $C_{22}H_{46}$  независимо от времени года. В переходные сезоны (весной и осенью) в составе частиц обнаруживаются более легкие соединения, начиная с  $C_9H_{20}$ . При этом максимум концентрации осенью приходится на  $C_{18}H_{38}$ , летом и весной на  $C_{19}H_{40}$ , а зимой на  $C_{20}H_{42}$ .

Работа выполнена при поддержке Комплексной программы фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН № П.2П «Интеграция и развитие» на 2017 г., проекта IX.135-6 «Исследование изменений компонент воздуха Сибирского региона, определяющих динамику радиационно значимых характеристик атмосферы», гранта РФФИ № 14-05-00526.

1. *Geleencser A.* Carbonaceous Aerosol. Dordrecht: Springer, 2004. 350 p.
2. *Vehkamäki H.* Classical Nucleation Theory in Multicomponent Systems. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. 176 p.
3. *Cappa C.* Unexpected player in particle formation // *Nature (Gr. Brit.)*. 2016. V. 533, N 7604. P. 478–429.
4. *Kirkby J., Duplissy J., Sengupta K., Frege C., Gordon H., Williamson Ch., Heinritzi M., Simon M., Chao Yan, Almeida J., Tröstl J., Nieminen T., Ortega I.K., Wagner R., Adamov A., Amorim A.A., Bernhammer A.K., Bianchi F., Breitenlechner M., Brilke S., Chen X., Craven J., Dias A., Ehrhart S., Flagan R.C., Franchin A., Fuchs C., Guida R., Hakala J., Hoyle C.R., Jokinen T., Junninen H., Kangasluoma J., Kim J., Krapf M., Kürten A., Laaksonen A., Lehtipalo K., Makhmutov V., Mathot S., Molteni U., Onnela A., Peräkylä O., Piel F., Petäjä T., Praplan A.P., Pringle K., Rap A., Richards N.A.D., Riipinen I., Rissanen M.P., Rondo L., Sarnela N., Schobesberger S., Scott C.E., Seinfeld J.H., Sipilä M., Steiner G., Stozhkov Yu., Stratmann F., Tomé A., Virtanen A., Vogel A.L., Wagner A.C., Wagner P.E., Weingartner E., Wimmer D., Winkler P.M., Ye P., Zhang X., Hansel A., Dommen J., Donahue N.M., Worsnop D.R., Baltensperger U., Kulmala M., Carslaw K.S., Curtius J.* Ion-induced nucleation of pure biogenic particles // *Nature (Gr. Brit.)*. 2016. V. 533, N 7604. P. 521–526.
5. *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 (Gr. Brit.)*. 2016. V. 533, N 7604. P. 527–531.
6. *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. P. 044013 (7 p.).
7. *Elsasser M., Crippa M., Orasche J., DeCarlo P.F., Oster M., Pitz M., Cyrys J., Gustafson T.L., Pettersson 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.
8. *Ge X., Wexler A.S., Clegg S.L.* Atmospheric amines – Part 1. A review // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45, N 3. P. 524–545.
9. *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.
10. *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. D03301. DOI: 10.1029/2011JD016113.
11. *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.
12. *Virtanen A., Joutsensaari J., Koop T., Kannosto J., Yli-Pirilä P., Leskinen J., Makela J.M., Holopainen J.K., Poschl 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.
13. *Кондратьев К.Я.* Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15, № 4. С. 301–320.
14. *Fray N., Bardyn A., Cottin H., Altwegg K., Baklouti D., Briois Ch., Colangeli L., Engrand C., Fischer H., Glas-machers A., Grün E., Haerendel G., Henkel H., Höfner H., Hornung K., Jessberger E.K., Koch A., Krüger H., Langevin Y., Lehto H., Lehto K., Le Roy L., Merouane S., Modica P., Orthous-Daunay F.R., Paquette J., Raulin F., Rynö J., Schulz R., Silén J., Siljeström S., Steiger W., Stenzel O., Stephan T., Thirkell L., Thomas R., Tor-kar K., Varmuza K., Wanczek K.-P., Zaprudin B., Kissel J., Hilchenbach M.* High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P Churyumov–Gerasimenko // *Nature (Gr. Brit.)*. 2016. V. 538, N 7623. P. 72–75.
15. *Hand E.* Mars rover finds long-chain organic compounds // *Science*. 2015. V. 347, N 6229. P. 1402–1403.
16. *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 атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 1. С. 42–52.
17. *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 атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 12. С. 1011–1022.
18. *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 атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 8. С. 628–635.

19. Михайлов Е.Ф., Миронова С.Ю., Макарова М.В., Власенко С.С., Рышкевич Т.И., Панов А.В., Андреев М.О. Исследование сезонной изменчивости углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля Центральной Сибири // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 4. С. 484–492.
20. 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.
21. 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., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филитов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманов В.С., Шмарунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
22. 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.
23. 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. 2013. V. 118, N 16. P. 9233–9257. DOI: 10.1002/jgrd.50530.
24. Yee L.D., Craven J.S., Loza C.L., Schilling K.A., Ng N.L., Canagaratna M.R., Ziemann P.J., Flagan R.C., Seinfeld J.H. Effect of chemical structure on secondary organic aerosol formation from C<sub>12</sub> alkanes // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 21. P. 11121–11140.
25. 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., Pye 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 SO<sub>2</sub> emission controls // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 3. P. 1603–1618.
26. Kärten A., Bergen A., Heinritzi M., Leiminger M., Lorenz V., Piel F., Simon M., Sitals R., Wagner A.C., Curtius J. Observation of new particle formation and measurement of sulfuric acid, ammonia, amines and highly oxidized organic molecules at a rural site in central Germany // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 19. P. 12793–12813.
27. 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.
28. Kourchev I., Fuller S.J., Giorio C., Healy R.M., Wilson E., O'Connor I., Wenger J.C., McLeod M., Aalto J., Ruuskanen T.M., Maenhaut W., Jones R., Venables D.S., Sodeau J.R., Kulmala M., Kalberer M. Molecular composition of biogenic secondary organic aerosols using ultrahigh-resolution mass spectrometry: Comparing laboratory and field studies // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 4. P. 2155–2167.
29. Jokinen T., Kausiala O., Garmash O., Peräkylä O., Junninen H., Schobesberger S., Chao Yan, Sipilä M., Risvanen 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.
30. Crippa M., Canonaco F., Slowik J.G., Haddad I.EI, DeCarlo P.F., Mohr C., Heringa M.F., Chirico R., Marchand N., Temime-Roussel B., Abidi E., Poulain L., Wiedensohler A., Baltensperger U., Prevot A.S.H. Primary and secondary organic aerosol origin by combined gas-particle phase source apportionment // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 16. P. 8411–8426.
31. Han Y., Iwamoto Y., Nakayama T., Kawamura K., Mochida M. Formation and evolution of biogenic secondary organic aerosol over a forest site in Japan // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. P. 259–273. DOI: 10.1002/2013JD020390.
32. Querol X., Alastuey A., Viana M., Moreno T., Reche C., Minguillón M.C., Ripoll A., Pandolfi M., Amato F., Karanasiou A., Perez N., Pey J., Cusack M., Vazquez R., Plana F., Dall'Osto M., de la Rosa J., de la Campa Sanchez A., Fernandez-Camacho R., Rodriguez S., Pio C., Alados-Arboledas L., Titos G., Artinano B., Salvador P., Dos Santos Garcia S., Patier R.F. Variability of carbonaceous aerosols in remote, rural, urban and industrial environments in Spain: Implications for air quality policy // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, N 13. P. 6185–6206.
33. Kawana K., Nakayama T., Mochida M. Hygroscopicity and CCN activity of atmospheric aerosol particles and their relation to organics: Characteristics of urban aerosols in Nagoya, Japan // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. V. 121, N 8. P. 4100–4121. DOI: 10.1002/2015JD023213.
34. Yuan G.-L., Wu M.-Z., Sun Y., Li J., Li J.-C., Gen-Hou Wang G.-H. One century of air deposition of hydrocarbons recorded in travertine in North Tibetan Plateau, China: Sources and evolution // Sci. Total Environ. 2016. V. 560–561. P. 212–217.
35. Brito J., Rizzo L.V., Morgan W.T., Coe H., Johnson B., Haywood J., Longo K., Freitas S., Andreae M.O., Artaxo P. Ground-based aerosol characterization during the South American Biomass Burning Analysis (SAMBBA) field experiment // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 22. P. 12069–12083.
36. Bikkina S., Kawamura K., Miyazaki Y., Fu P. High abundances of oxalic, azelaic, and glyoxylic acids and methylglyoxal in the open ocean with high biological activity: Implication for secondary OA formation from isoprene // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 10. P. 3649–3657. DOI: 10.1002/2014GL059913.
37. Воронцовская Н.Г., Певнева Г.С., Головки 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 атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 825–829.
38. Chang R.Y.-W., Leck C., Graus M., Müller M., Paatero J., Burkhardt J.F., Stohl A., Orr L.H., Hayden K., Li S.-M., Hansel A., Tjernstrom M., Leaitch 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.

39. Schmale J., Schneider J., Nemitz E., Tang Y.S., Dracosits 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.
40. Fu P.Q., Kawamura K., Chen J., Charriere B., Semper 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.
41. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Мальшикин С.Б., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Годовая динамика органической составляющей аэрозоля в свободной атмосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 10. С. 879–882.
42. 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.
43. 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.
44. Pöhlker Ch., Wiedemann K.T., Sinha B., Shiraiwa M., Gunthe S.S., Smith M., Su H., Artaxo P., Chen Q., Cheng Y., Elbert W., Gilles M.K., Kilcoyne A.L.D., Moffet R.C., Weigand M., Martin S.T., Pöschl U., Andreae M.O. Biogenic potassium salt particles as seeds for secondary organic aerosol in the Amazon // *Science*. 2012. V. 337, N 6098. P. 1075–1078.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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  $\beta$ -caryophyllene: Laboratory and field measurements // *Boreal Environ. Res.* 2016. V. 21, N 3–4. P. 262–273.

*M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, N.G. Voronetskaya, A.K. Golovko, D.K. Davydov, A.S. Kozlov, G.S. Pevneva, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov. Organic aerosol in air of Siberia and the Arctic. Part 1. Geographic features and temporal dynamics.*

The concentrations of normal hydrocarbons are studied on the basis of measurements in the surface air layer in different Siberian regions and in the free atmosphere over the Kara Sea water area. The total content of normal hydrocarbons in the aerosol composition is found to change from 244.56 ng/m<sup>3</sup> in the surface air layer to 0.08 ng/m<sup>3</sup> in the free atmosphere over the Kara Sea. Most organic compounds are from the C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>–C<sub>22</sub>H<sub>46</sub> range independently of the season; lighter compounds beginning from C<sub>9</sub>H<sub>20</sub> are detected in the mid-seasons (spring and autumn); C<sub>18</sub>H<sub>38</sub> concentration is maximal in autumn; C<sub>19</sub>H<sub>40</sub>, in spring and summer, and C<sub>20</sub>H<sub>42</sub>, in winter.