

УДК 511.510.3

А. В. ПАНОВ*, И. ХАЙНТЦЕНБЕРГ, В. БИРМИЛИ**, П. ЗАЙФЕРТ**,
С. ЧИ***, А. В. ТИМОХИНА*, М. О. АНДРЕА*****

*Институт леса СО РАН, г. Красноярск

**Институт тропосферных исследований им. Лейбница, г. Лейпциг, Германия

***Институт химии Макса Планка, г. Майнц, Германия

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЕВРАЗИИ В СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Посредством интеграции многолетних (более 5 лет) инструментальных наблюдений микрофизических и оптических характеристик аэрозолей атмосферы на базе обсерватории ZOTTO в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири и лагранжева траекторного моделирования переноса воздушных масс проведена оценка аэрозольного состава атмосферы, формируемого в условиях средних и высоких широт Евразии. На основе сопряженного анализа результатов с данными по антропогенным и пожарным эмиссиям выявлены существующие сигналы в его формировании с оценкой природы их происхождения.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, климат, Средняя Сибирь, бореальные леса, траекторное моделирование.

An assessment of atmospheric aerosol composition in middle and high latitudes of Eurasia has been made by integrating long-term (longer than five years) instrumental observations of microphysical and optical characteristics of atmospheric aerosols at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in the middle-taiga subzone of Yenisei Siberia and Lagrangian trajectory modeling. A correlative analysis of the findings and data for anthropogenic and forest fire emissions revealed signals existing in its formation with the assessment of the nature of their origin.

Keywords: atmosphere, aerosol, climate, Middle Siberia, boreal forests, trajectory modeling.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Важнейшим фактором регулирования планетарной климатической системы являются атмосферные аэрозоли. Изучение количественных и качественных параметров аэрозолей, формируемых в фоновых природно-климатических условиях и определяемых исключительно естественными биосферными циклами, — необходимое требование для верификации существующих климатических моделей [1–3].

Бореальные (таежные) экосистемы Евразии являются важнейшим источником формирования летучих органических соединений биогенного происхождения и атмосферных аэрозолей [4, 5]. Отсутствие оценок аэрозольной компоненты над этой обширной фоновой территорией Северного полушария послужило одной из причин создания обсерватории ZOTTO в самом центре Евразийского континента — среднетаежной подзоне Сибири, где с 2006 г. проводится круглогодичный инструментальный мониторинг газо-аэрозольного состава атмосферы. Результаты исследований наглядно продемонстрировали как естественное формирование аэрозолей в районе исследования, так и значительное влияние их трансконтинентального переноса [6, 7], что дает уникальную возможность оценить существующие сигналы в формировании аэрозольного состава атмосферы для значительной части Евразийского континента.

На основе интеграции результатов шестилетних (2006–2012 гг.) инструментальных измерений микрофизических и оптических характеристик аэрозолей атмосферы и лагранжева траекторного моделирования переноса воздушных масс нами проведена оценка пространственного распределения аэрозолей над значительной частью территории Евразии. Полученные результаты существенно дополняют представления об аэрозольном составе атмосферы, формируемом в условиях средних и высоких широт Евразии.

© 2015 Панов А. В. (alexey.v.panov@gmail.com), Хайнтценберг И. (jost@tropos.de),
Бирмили В. (birmili@tropos.de), Зайферт П. (seifert@tropos.de), Чи С. (xuguang.chi@mpic.de),
Тимохина А. В. (nastimoti@mail.ru), Андреа М. О. (m.andreae@mpic.de)

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири, в районе пос. Зотино (60° с. ш., 90° в. д.) Туруханского района Красноярского края. Климат континентальный, с суровой и снежной зимой и умеренно теплым влажным летом. Рельеф территории представлен чередованием уплощенных холмов, валов и грив. Геоморфологические, литологические и климатические особенности способствуют значительной заболоченности, характерной для 60 % территории. Структура растительного покрова в районе исследований определяется мозаикой лесоболотных биогеоценозов, приуроченных к различным элементам ландшафта [8].

Измерительная мачта (304 м), лаборатория и газоаналитический комплекс для проведения мониторинга атмосферных составляющих были установлены в период с 2004 по 2006 г. Подробная информация по обсерватории и комплексу установленного газоаналитического и аэрозольного оборудования представлена на электронном ресурсе (www.zottoproject.org), а также в работах [6, 7, 9–11].

Для исследования аэрозолей поток атмосферного воздуха (40 л/мин) поступал в лабораторию по трубопроводу от воздухозаборника, расположенного на высоте 300 м. Круглогодично в оперативном режиме проводились измерения концентрации и дисперсного состава аэрозолей в диапазоне от 10 до 835 нм, коэффициентов аэрозольного поглощения ($\sigma_{\text{пл}}$) и рассеяния света ($\sigma_{\text{рсн}}$). Далее на основе $\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{\text{рсн}}$ был произведен расчет альбеда однократного рассеяния ($\omega_{\text{арз}}$). Обратные 10-дневные 3D траектории переноса воздушных масс вычислены с использованием ПК-версии HYSPLIT — лагранжевой траекторной модели, предоставленной лабораторией ARL NOAA [12]. Расчет траекторий произведен из набора метеорологических полей Глобальной системы анализа данных (GDAS), имеющих 3-часовой период измерений, пространственное разрешение 1° и профиль уровней давления 1000, 925, 850 гПа и т. д. Данные инструментальных измерений были интегрированы с результатами траекторного анализа, согласно методике, представленной в работе [6], основанной главным образом на подходе Дорлинга, с использованием метода k -средних. Анализ дополнен показателями по антропогенным эмиссиям углеродсодержащих газов (CO) из базы данных глобального исследования атмосферы (EDGAR v.4.2) за 2008 г. и пожарным эмиссиям (массовая концентрация частиц — PM 2.5) из глобальной базы данных пожарных эмиссий (GFED 3.1) за период 2006–2011 гг. Графическое отображение результатов реализовано с использованием пакета ПО IGOR 6.2 (Wavemetrics Inc., США).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Счетные (N , см⁻³) и объемные (V , мкм³·см⁻³) концентрации атмосферных аэрозолей являются их основными интегральными микрофизическими параметрами, а дисперсный состав в значительной мере определяет характер, период и условия распространения аэрозолей в воздушной среде. Наряду с микрофизическими параметрами очень важно учитывать оптические свойства аэрозолей — рассеяние и поглощение света, дающие возможность диагностики источников их формирования. Среднестатистические характеристики микрофизических параметров аэрозолей, как интегральных, так и сезонных, и их оптических свойств представлены ранее в работах [6, 7]. Посредством интеграции результатов шестилетних (2006–2012 гг.) инструментальных измерений аэрозольных характеристик атмосферы и лагранжева траекторного моделирования переноса воздушных масс проведена оценка интегральных значений N и V (рис. 1), дисперсного состава аэрозолей в диапазоне от 10 до 835 нм, охватывающего аэрозоли нуклеационной моды (<26 нм), моды Айткена (26–80 нм), и аккумуляционной моды (80–835 нм) (рис. 2, $a-e$), и их оптических свойств (см. рис. 2, $z-e$) в атмосфере средних и высоких широт Евразии (выше 40° с. ш.).

В целом над большей частью высокоширотных районов Сибири и северо-восточной территории Евразии (выше 60° с. ш.) отмечаются сравнительно низкие значения счетной (700–1000 см⁻³) и объемной (2–4 мкм³·см⁻³) концентраций аэрозолей атмосферы. В Центральной Сибири, в районе расположения обсерватории ZOTTO, концентрация аэрозолей обусловлена в большей мере естественными биосферными циклами, влиянием чистых морских воздушных масс с акваторий Северного Ледовитого и Тихого океанов и западным переносом континентального воздуха с малозаселенных высокоширотных территорий Западной Сибири. Минимальные значения счетной (400–500 см⁻³) и объемной (1–3 мкм³·см⁻³) концентраций наблюдаются на востоке Евразийского континента, в протяженной области (90–110° в. д.), сравнительно удаленной от крупных населенных пунктов и промышленных центров и лежащей между 40 и 50° с. ш. над побережьем Дальнего Востока. Отмеченные

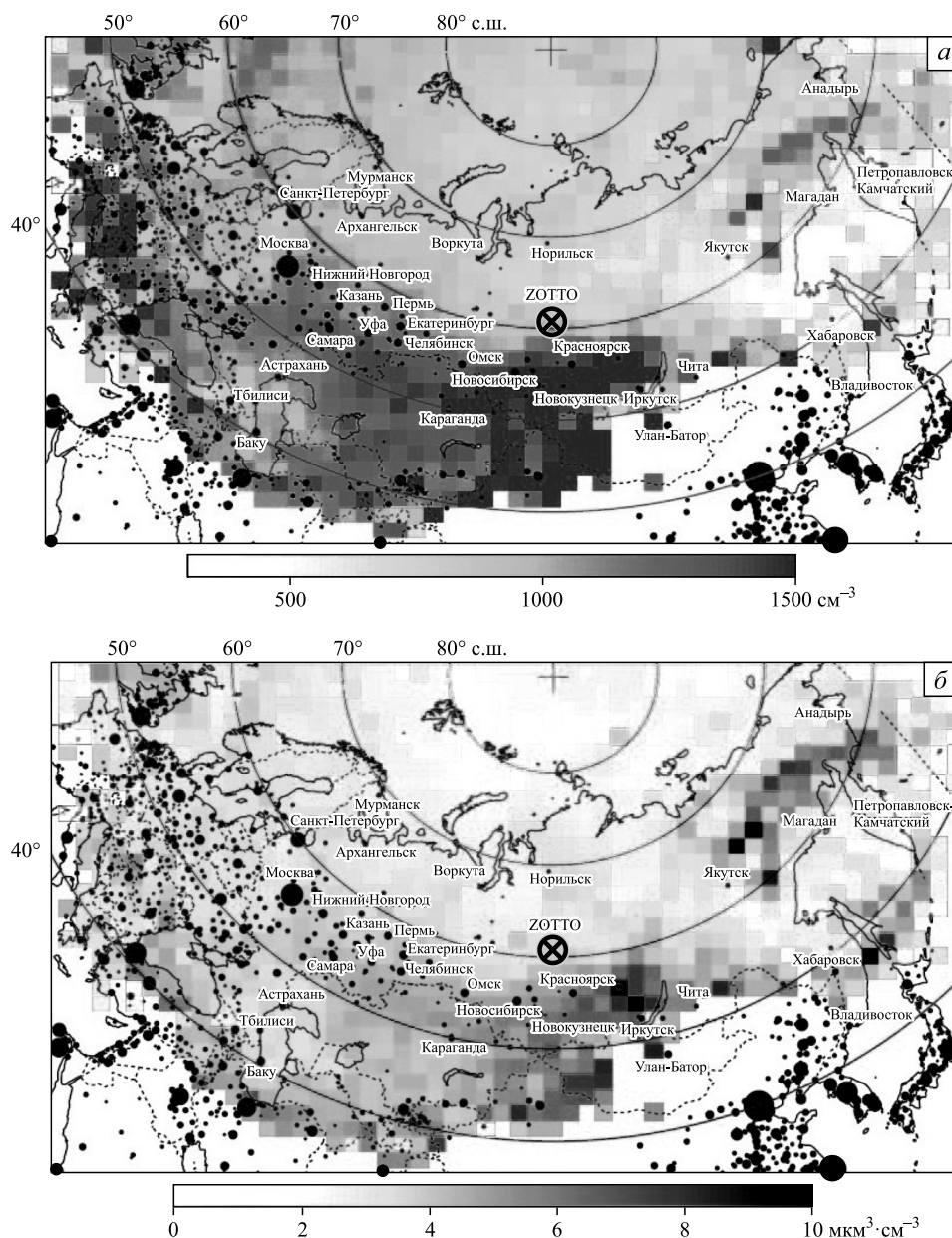


Рис. 1. Значения счетной (N) (а) и объемной (V) (б) концентраций аэрозолей атмосферы над территорией Евразии, расположенной в средних и высоких широтах (по результатам траекторного моделирования).

Кружками показана численность населения городов.

значения характеристик аэрозолей атмосферы можно рассматривать в качестве фоновых для северо-восточной территории Евразии (выше 60° с. ш.) в целом.

В свою очередь определены три области с повышенной концентрацией аэрозолей в атмосфере: индустриальные районы Европы (до 1500 cm^{-3}), территория Центральной Азии ($1300\text{--}1500 \text{ cm}^{-3}$) и область на северо-востоке Сибири ($1200\text{--}1500 \text{ cm}^{-3}$) (см. рис. 1, а), что подтверждается дисперсным составом аэрозолей (см. рис. 2, а–в) и их оптическими свойствами (см. рис. 2, г–е). При этом коэффициенты рассеяния ($\sigma_{\text{рсс}}$) достигают в этих районах $40\text{--}50 \text{ mm}^{-1}$, тогда как коэффициенты поглощения ($\sigma_{\text{плг}}$) не всегда высоки, что свидетельствует о различной природе формирования обнаруженных аэрозольных максимумов. Так, первый максимум наблюдается над территорией Европы, и далее, с запада на восток, формируются два основных пояса повышенных концентраций аэрозолей (см.

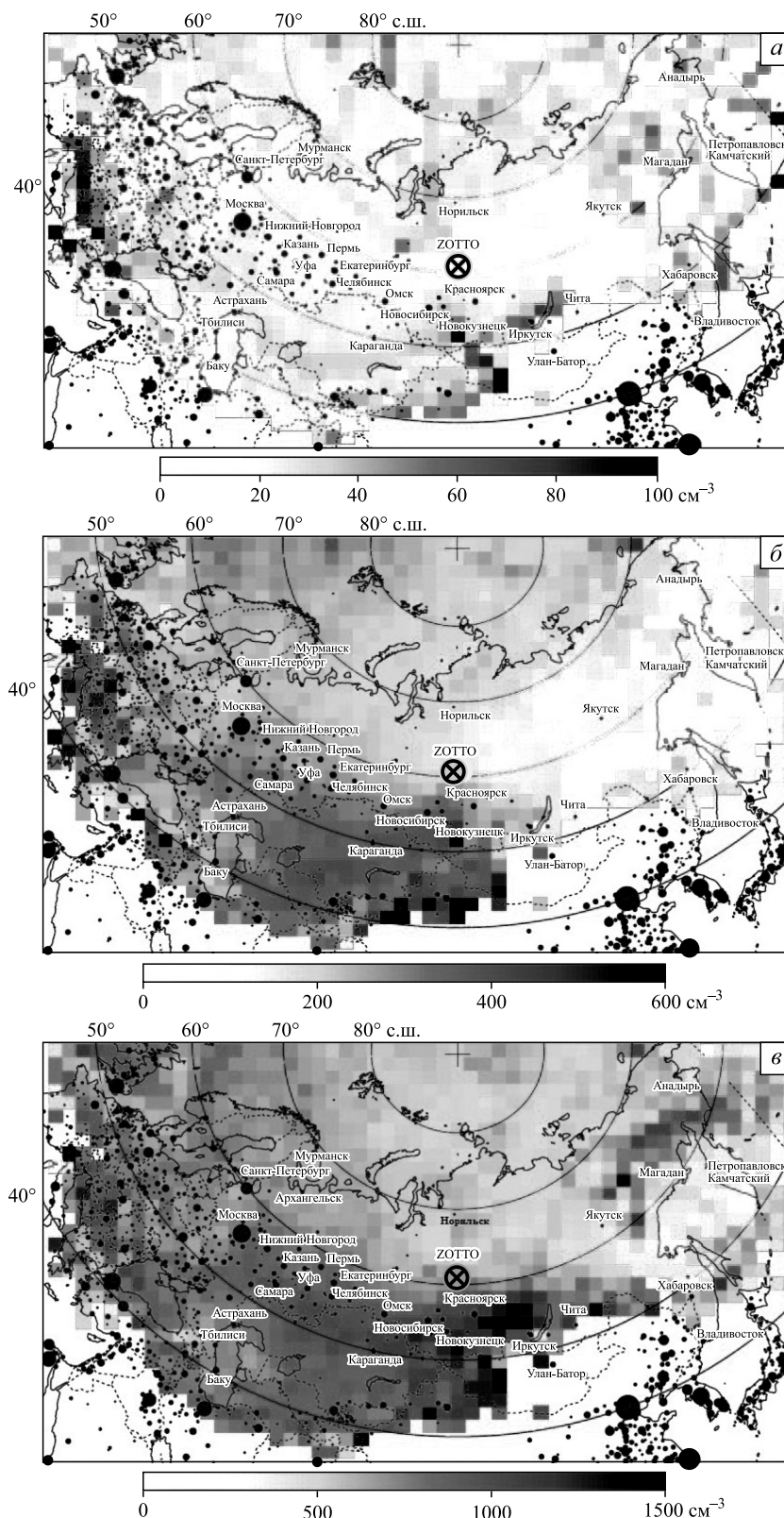


Рис. 2 (начало). Значения концентрации аэрозолей нуклеационной моды (а), моды Айткена (б), аккумуляционной моды (в), коэффициентов аэрозольного рассеяния (г) и поглощения (д) света и альбеда однократного рассеяния (е) над территорией Евразии, расположенной в средних и высоких широтах (по результатам траекторного моделирования). Кружками показана численность населения городов.

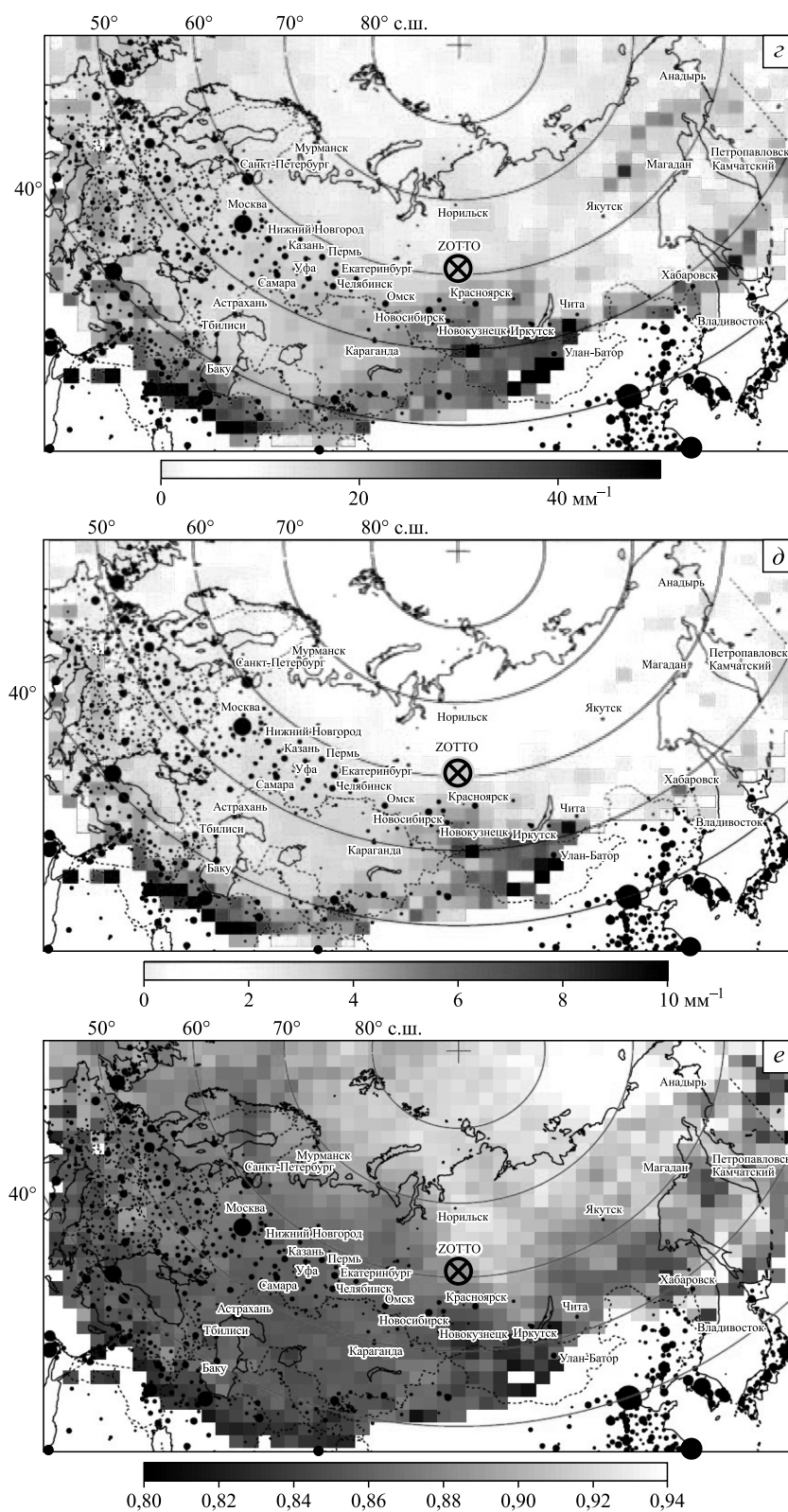


Рис. 2 (окончание).

рис. 1, а, б) над районами крупных населенных пунктов и промышленных центров Европы, Ближнего Востока и Центральной Азии, что в значительной мере указывает на антропогенную природу их происхождения. Это подтверждается шлейфами высоких $\sigma_{\text{плл}}$ ($6-8 \text{ мм}^{-1}$) (см. рис. 2, д), сопутствующих поясам повышенных концентраций аэрозолей, и говорит о преобладании антропогенных источников сжигания горючих ископаемых, приводящих к высокому содержанию черного углерода в атмосфере [13]. Самый протяженный пояс простирается от Европы до территории Юго-Западной Азии вдоль 40° с. ш., со значениями N $1000-1500 \text{ см}^{-3}$ и V до $6 \text{ мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$. Второй пояс расположен выше 50° с. ш. и более выражен (до 1500 см^{-3}) в его восточной части, в частности над территорией Центральной Сибири.

Дисперсный состав аэрозольных поясов также подтверждает антропогенный характер их формирования и свидетельствует о доминировании мелкодисперсной фракции, представленной модой Айткена (N_a) и аккумуляционной модой ($N_{\text{ак}}$) со значениями $300-500 \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 2, б) и $800-1000 \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 2, в) соответственно. На востоке оба пояса сходятся у западной границы горных систем Центральной Азии, меняющих траектории движения воздушных масс и, очевидно, формирующих между 40 и 60° с. ш. и 90 и 110° в. д. обширную область накопления аэрозолей, представляющую собой второй и наибольший максимум на территории Евразии со значениями N и V до 1500 см^{-3} и $8-10 \text{ мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$ соответственно. В свою очередь область повышенной концентрации ($80-100 \text{ см}^{-3}$) аэрозолей нуклеационной моды (N_n) говорит и о формировании микродисперсных частиц в этом районе (см. рис. 2, а). В силу литологической (рельеф территории) и метеорологической причин результаты траекторного анализа не покрывают восточных (горных) территорий Центральной Азии и расположенного восточнее Китая.

Третья по величине область повышенных концентраций аэрозолей ($1200-1500 \text{ см}^{-3}$) над территорией Евразийского континента наблюдается в Северо-Восточной Сибири (выше 60° с. ш.). Отсутствие в этом районе крупных промышленных центров исключает антропогенный характер генезиса и позволяет рассматривать в качестве причины формирования повышенных концентраций атмосферных аэрозолей лесные пожары. Для данной территории в дисперсном составе отмечено доминирование аэрозолей аккумуляционной моды ($N_{\text{ак}}$) (до 1500 см^{-3}), что указывает на высокое содержание сажи в атмосфере. Об этом также свидетельствуют высокие коэффициенты рассеяния ($\sigma_{\text{рсн}}$) (см. рис. 2, е) и отсутствие повышенных значений $\sigma_{\text{плл}}$ и $\omega_{\text{арз}}$ (см. рис. 2, д, е). Именно лесные пожары в Сибири приводят к выделению аэрозолей с низким $\sigma_{\text{плл}}$, но высоким $\sigma_{\text{рсн}}$ [14]. Роль пожаров подтверждается и данными GFED, причем особо выделяется этот район Северо-Восточной Сибири ($90-160^\circ$ в. д., $60-70^\circ$ с. ш.) при расчетах величин и частоты пожарных эмиссий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, интеграция результатов многолетних наблюдений на базе обсерватории ZOTTO в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири и лагранжева траекторного моделирования переноса воздушных масс позволила оценить существующие сигналы в формировании аэрозольного состава атмосферы над территорией средних и высоких широт Евразии.

Установлено, что для большей части высокоширотных районов Сибири и северо-восточной территории Евразии в целом (выше 60° с. ш.) характерны сравнительно низкие концентрации аэрозолей в атмосфере, но вместе с тем на территории Северо-Восточной Сибири присутствует область повышенных концентраций аэрозолей, причиной формирования которой служат лесные пожары. В средних широтах прослеживаются два основных пояса повышенных концентраций аэрозолей антропогенного происхождения, соответствующих расположению крупных населенных пунктов и промышленных центров. Первый пояс простирается от Европы до территории Юго-Западной Азии вдоль 40° с. ш., а второй находится выше 50° с. ш. и более выражен в его восточной части, в частности на территории Центральной Сибири. Оба пояса сходятся у западной границы горных систем Центральной Азии, препятствующих продвижению воздушных масс, и формируют между 40 и 60° с. ш. и 90 и 110° в. д. обширную область накопления аэрозолей. Оптические свойства аэрозолей (рассеяние и поглощение света) послужили дополнительным инструментом для диагностики природы формирования аэрозольных источников.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта МНТЦ (№ 2757), Российского фонда фундаментальных исследований (13-05-98053), Российского научного фонда (14-24-00113) и гранта Президентской Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1691.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аэрозоли Сибири** / Ред. К. П. Куценогий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. — 548 с.
2. **Куценогий К. П.** Мониторинг атмосферных аэрозолей в Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. — 1996. — Т. 9, № 6. — С. 704–711.
3. **Куценогий К. П., Куценогий П. К.** Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // *Сиб. экол. журн.* — 2000. — Т. 7, № 1. — С. 11–20.
4. **Tunved P., Hansson H. C., Kerminen V.-M. et al.** High natural aerosol loading over Boreal forests // *Science*. — 2006. — Vol. 312, N 5771. — P. 261–263.
5. **Dal Maso M., Sogacheva L., Anisimov M. P. et al.** Aerosol particle formation events at two Siberian stations inside the Boreal forest // *Boreal Environ. Res.* — 2008. — N 13. — P. 81–92.
6. **Панов А. В., Хайнтценберг И., Бирмили В. и др.** Источники, сезонная изменчивость и траектории переноса атмосферных аэрозолей над лесными экосистемами Средней Сибири // *Докл. РАН*. — 2011. — Т. 441, № 5. — С. 689–693.
7. **Heintzenberg J., Birmili W., Otto R. et al.** Aerosol particle number size distributions and particulate light absorption at the ZOTTO tall tower (Siberia), 2006–2009 // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — Vol. 11, N 1. — P. 8703–8719.
8. **Белов А. В.** Растительность Западной Сибири и ее картографирование. — М.: Наука, 1984. — 121 с.
9. **Winderlich J., Chen H., Gerbig C. et al.** Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // *Atmos. Meas. Tech.* — 2010. — Vol. 3, N 4. — P. 1113–1128.
10. **Birmili W., Stopfkuchen K., Hermann M. et al.** Particle penetration through a 300 m inlet pipe for sampling atmospheric aerosols from a tall meteorological tower // *Aerosol Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 41, N 9. — P. 811–817.
11. **Heintzenberg J., Birmili W., Theiss D. et al.** The atmospheric aerosol over Siberia, as seen from the 300 meter ZOTTO tower // *Tellus B*. — 2008. — Vol. 60, N 1. — P. 276–285.
12. **Draxler R., Rolph G.** HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY // NOAA Air Resources Laboratory [Электронный ресурс]. — <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения 07.09.2012).
13. **Bond T. C., Bergstrom R. W.** Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review // *Aerosol Sci. Technol.* — 2006. — Vol. 40, N 1. — P. 27–67.
14. **Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S. et al.** Optical properties of Boreal region biomass burning aerosols in central Alaska and seasonal variation of aerosol optical depth at an Arctic coastal site // *Journ. Geophys. Res.* — 2009. — Vol. 114, N 11. — P. 2156–2202.

Поступила в редакцию 27 мая 2014 г.