

## Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири

О.А. Томшин, В.С. Соловьев\*

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31*

Поступила в редакцию 21.04.2016 г.

По данным спутниковых наблюдений проведены исследования пространственно-временных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири. Анализ динамики аэрозольных полей на примере данных 1986, 2002, 2012 гг. показал, что возможно образование устойчивых крупномасштабных неоднородностей с высокими значениями аэрозольного индекса, которые могут существовать до ~5–7 дней после прекращения лесных пожаров. Пространственные масштабы подобных неоднородностей могут составлять несколько миллионов квадратных километров. Перенос выбросов от лесных пожаров в Сибири в большинстве случаев определяется доминирующим с запада на восток, переносом воздушных масс, однако в отдельных случаях наблюдался перенос в западном направлении. Сделана количественная оценка суммарных выбросов CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> и др. от лесных пожаров в Якутии.

*Ключевые слова:* лесные пожары, аэрозоль, дистанционное зондирование; forest fires, aerosols, remote sensing.

### Введение

Лесной пожар (ЛП) является одним из самых катастрофических явлений природы, наносящих огромный по масштабам ущерб окружающей среде [1, 2]. В результате ЛП на большой площади уничтожается растительный покров, гибнет фауна, нарушается органический слой почвы, выбрасывается огромное количество продуктов горения (токсичных газов, аэрозольных частиц), значительно загрязняющих атмосферу. Наибольший урон ЛП наносят лесным экосистемам с низким реабилитационным потенциалом, к которым относятся произрастающие в зоне вечной мерзлоты бореальные леса Сибири [3, 4].

Влияние ЛП на состав атмосферы особенно важно в условиях продолжающегося изменения климата, так как глобальное потепление способствует нарушению естественной частоты ЛП, что ведет к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу и дальнейшему потеплению [1].

Сильное снижение альbedo гарей нарушает температурный режим почвы, что способствует разрушению вечномерзлых грунтов криолитозоны и сопровождается выбросом большого количества содержащихся в ней парниковых газов CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и др.

Связанные с ЛП выбросы продуктов горения (смесь различных малых газовых компонент, парниковых газов, аэрозольных частиц) оказывают значительное влияние на микрофизические и опти-

ческие характеристики атмосферы, на облачный покров и, опосредованно, на температурный режим атмосферы [5–7]. Мощные конвективные потоки воздуха, развивающиеся над очагами крупномасштабных ЛП, способны выбрасывать продукты горения на большие высоты, где они разносятся ветрами на значительные расстояния [8, 9].

Исследованиям крупномасштабных лесных пожаров, атмосферных аэрозолей, их роли в радиационном балансе нижней атмосферы посвящен ряд публикаций [10–21].

В настоящей статье представлены результаты исследований по данным дистанционного зондирования Земли пространственно-временных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири.

### Данные

В работе использованы данные радиометров MODIS/Terra, Aqua и AVHRR/NOAA для детектирования очагов лесных пожаров и оценки площади гарей. Для исследования вариаций аэрозольного индекса (АИ) использовались данные приборов OMI/Aura, TOMS/Nimbus-7, Earth Probe, представленные в виде среднесуточных распределений АИ с пространственным разрешением  $1 \times 1^\circ$  и  $1 \times 1,25^\circ$  соответственно.

Выбор аэрозольного индекса обусловлен тем, что он наиболее чувствителен к сильно поглощающим УФ-излучение аэрозольям, доминирующим в выбросах от ЛП. Расчет АИ основан на методе

\* Олег Анатольевич Томшин (otomshin@ikfia.sbras.ru); Владимир Степанович Соловьев (solovyev@ikfia.sbras.ru).

спектрального контраста в УФ-области спектра на длинах волн 331 и 360 нм. Значения АИ < 1 над Сибирью характерны для незамутненной атмосферы с хорошей видимостью или облачностью. Значения АИ > 4 соответствуют условиям сильно ограниченной видимости из-за присутствия плотных дымовых шлейфов, сильно затрудняющих прохождение солнечной радиации.

Данные приборов MODIS, OMI и TOMS получены из открытых ресурсов Центра космических полетов им. Р. Годдарда NASA [22], прибора AVHRR – из архива NOAA CLASS [23].

Карты ветров на уровне 850 мбар (~1,5 км) и отклонений атмосферного давления на уровне моря ( $\Delta$ SLP) от средних многолетних значений построены по данным NCEP-реанализа [24]. Выбор высоты карты ветров обусловлен результатами модельных расчетов (см., например, [25, 26]), согласно которым средняя высота подъема аэрозольных частиц, образовавшихся вследствие ЛП, составляет 1,5–2,5 км, что соответствует высотному уровню 850 мбар в данных NCEP-реанализа. Метеоданные представлены на широтно-долготной сетке с пространственным разрешением  $2,5 \times 2,5^\circ$ .

Расчет инжестрированных в атмосферу продуктов горения от ЛП в Якутии проводился по модели Seiler–Crutzen [27]:

$$E = ABCD,$$

где  $A$  – площадь гарей,  $m^2$ ;  $B$  – плотность сгоревшей биомассы,  $kg/m^2$ ;  $C$  – доля сгоревшей биомассы, %;  $D$  – удельная масса вещества, выбрасываемая при сгорании,  $g/kg$ ;  $E$  – общая масса вещества, выбрасываемая в результате пожара,  $g$ . Значения коэффициентов  $B$ ,  $C$  и  $D$  были взяты из работы [28] с учетом особенностей растительности (тип, сомкнутость крон) исследуемого региона.

## Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены карта распределения среднесуточных значений аэрозольного индекса (*a*)

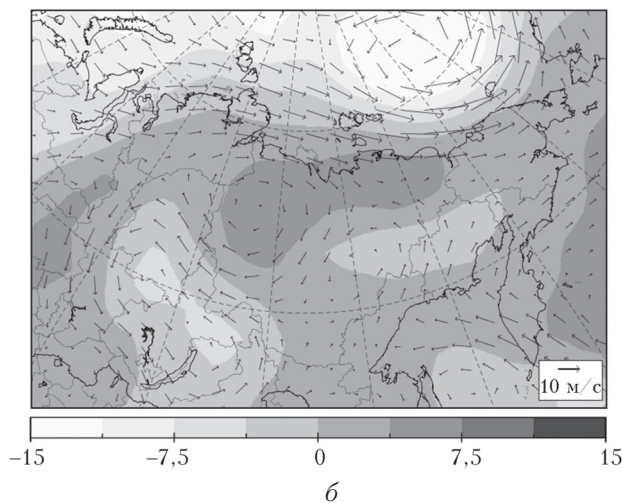
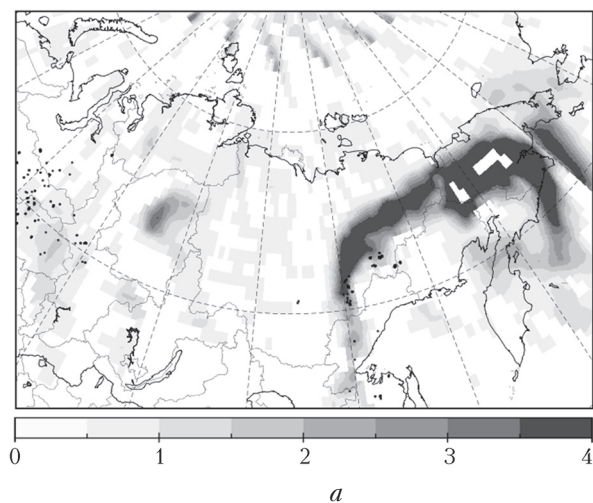


Рис. 1. Распределение среднесуточных значений АИ (*a*),  $\Delta$ SLP (*б*) и поля ветров на уровне 850 мбар 16.07.2012 г.

и отклонения среднесуточных значений давления на уровне моря от среднестатистических многолетних показателей (*б*) за 16 июля 2012 г.; в нижней части рисунка приведены шкалы значений АИ и  $\Delta$ SLP; черными точками на рис. 1, *a* отмечены очаги ЛП, векторами показано поле ветров, длина векторов пропорциональна скорости ветра (соответствующие значения имеют также обозначения на рис. 2–4). Повышенная пожарная активность на юге Якутии наблюдалась с 7 по 17 июля 2012 г., при этом поток дымовых аэрозолей устойчиво выносился в северо-восточном направлении в течение всего времени ЛП. Очевидно, что сложившаяся конфигурация барических полей и ветров (рис. 2, *б*) сформировала наблюдаемые крупные неоднородности АИ. Максимальный перенос от очагов пожаров составил несколько тысяч километров, а время жизни аэрозольного облака – около 4–5 дней после прекращения ЛП. Перенос дымовых аэрозолей восточнее  $\sim 180^\circ$  в.д. в сторону американского материка был заблокирован зоной устойчивого высокого давления, установившейся над северной акваторией Тихого океана.

На рис. 2 показано распределение среднесуточных значений АИ и  $\Delta$ SLP за 2 августа 2012 г. Источниками аэрозольных частиц послужили ЛП на Среднесибирском плоскогорье, в Якутии и Приморье. Наблюдаемая конфигурация ветрового поля привела к объединению выбросов от трех групп ЛП и формированию масштабной АИ-неоднородности, протянувшейся от Западной Сибири до побережья Охотского моря.

На рис. 3, *a* представлена карта распределения АИ и  $\Delta$ SLP за 22 августа 2002 г. Лето 2002 г. в Якутии выдалось крайне пожароопасным: по данным спутникового мониторинга общая площадь, пройденная огнем, составила  $\sim 15$  тыс.  $km^2$ , причем подавляющее число пожаров пришлось на территорию Лено-Вилуйского междуречья. Во время событий 22 августа вынос продуктов горения происходил преимущественно в западном, северо-западном направлениях, что нехарактерно для данного региона.

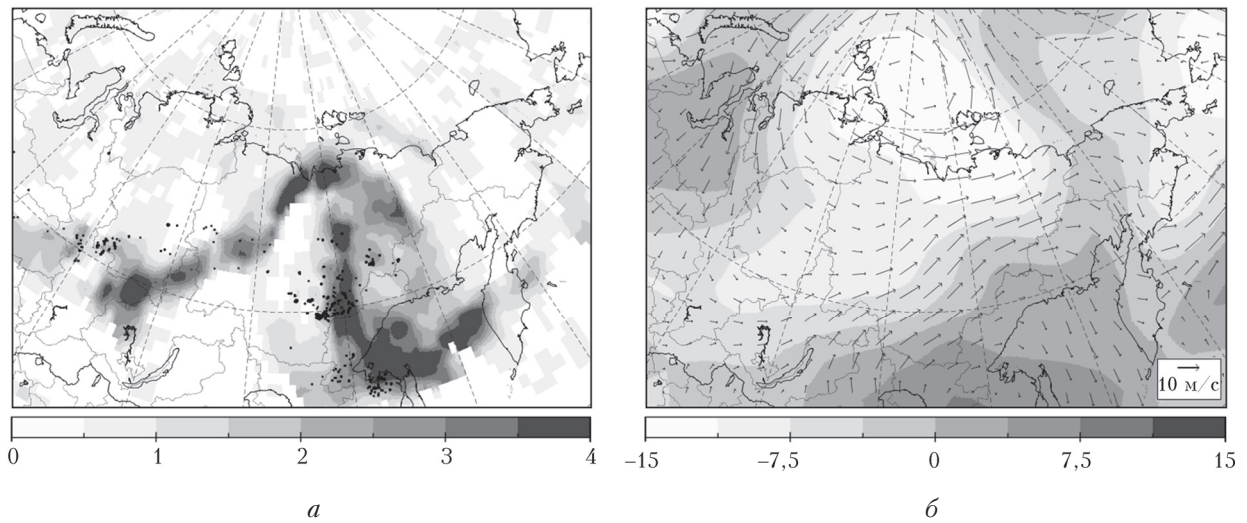


Рис. 2. Распределение среднесуточных значений АИ (а),  $\Delta$ SLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 02.08.2012 г.

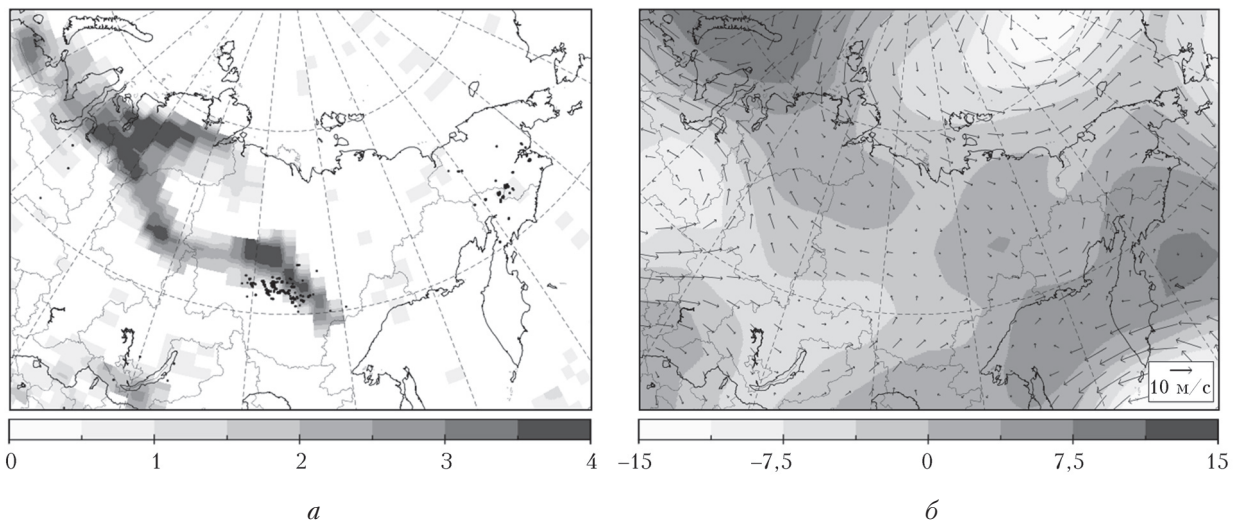


Рис. 3. Распределение среднесуточных значений АИ (а),  $\Delta$ SLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 22.08.2002 г.

Как видно из рис. 3, б, аэрозольные облака перемещались в струйных течениях между зонами повышенного и пониженного давления вплоть до побережья Баренцева моря, дальность переноса составила  $\sim 3000$  км. Существенные неоднородности в распределении АИ отчетливо прослеживались на значительном удалении от очагов в течение нескольких дней после прекращения ЛП.

Распределения АИ и  $\Delta$ SLP за 21 июля 1986 г. представлены на рис. 4. Черными точками отмечены положения очагов ЛП, детектированных по данным AVHRR/NOAA-9. Огромная неоднородность в распределении АИ расположилась над центром и югом Восточной Сибири, заняв площадь  $\sim 1,7$  млн км<sup>2</sup>. Причиной формирования данного аэрозольного облака стали массовые ЛП на юге Якутии. Зона повышенного давления, расположенная над Верхоянским хребтом, вытесняет аэрозольные частицы на запад, в сторону Среднесибирского плоскогорья. Аэрозольное облако вытянуто между

областями повышенного и пониженного давления вдоль области с близкими к нулю значениями  $\Delta$ SLP.

Как было отмечено выше, наравне с выбросами аэрозольных частиц в ходе лесных пожаров в атмосферу попадает огромное количество различных газов, опасных для здоровья человека. Одним из наиболее пожароопасных регионов России является Якутия. В качестве примера был произведен количественный расчет выбросов продуктов горения от ЛП в Якутии в период 2001–2015 гг. Из указанного периода выделены годы (2002, 2012–2014 гг.) с высоким уровнем пирогенной активности, когда площадь гарей составляла в среднем 16 тыс. км<sup>2</sup> за пожароопасный сезон, и низким уровнем пирогенной активности (2001, 2003–2011, 2015 гг.), когда средняя площадь гарей за сезон составила  $\sim 3$  тыс. км<sup>2</sup>.

Расчет выбросов, представленных в таблице, показал, что в течении пожароопасных годов в атмосферу в среднем выбрасывается  $\sim 4,5$  Тг CO,  $\sim 79$  Тг CO<sub>2</sub>,  $\sim 0,23$  Тг CH<sub>4</sub>,  $\sim 0,63$  и  $\sim 0,57$  Тг



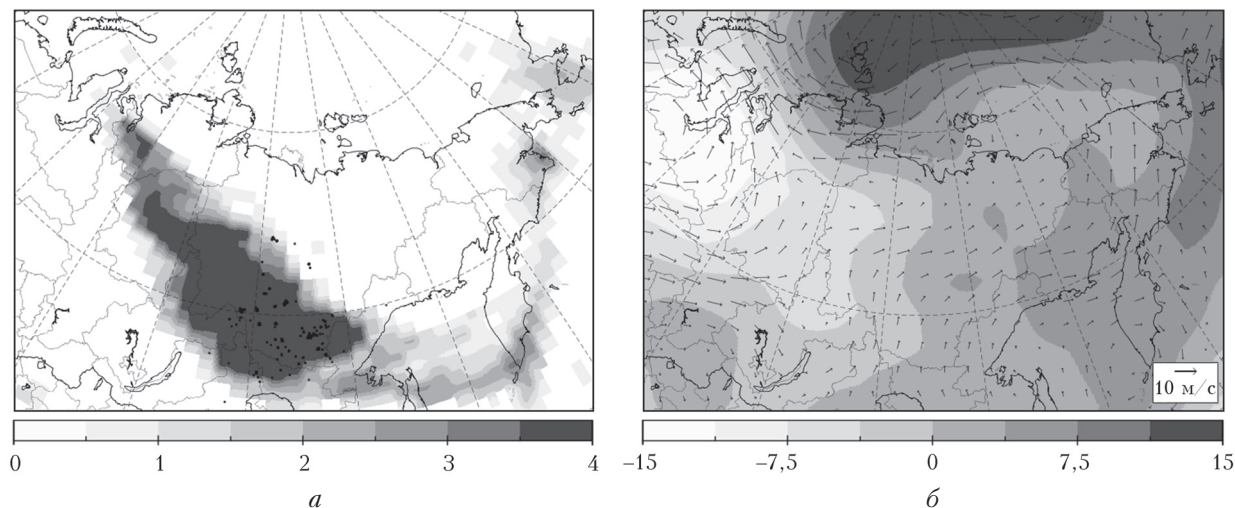


Рис. 4. Распределение среднесуточных значений АИ (а),  $\Delta$ SLP (б) и поля ветров на уровне 850 мбар 21.07.1986 г.

аэрозольных частиц размерами 10 и 2,5 мкм соответственно, что составляет ~1% от общемировых выбросов от природных пожаров [29]. В годы минимума пожарной активности среднее количество выбросов примерно в 8 раз меньше и составляет ~0,2% от общемировых.

**Суммарные выбросы продуктов горения от ЛП в Якутии**

Продукт горения	В среднем за непожароопасный год (2001, 2003–2011, 2015), Тг	В среднем за пожароопасный год (2002, 2012–2014), Тг
CO <sub>2</sub>	10,6	79,2
CO	0,58	4,5
PM <sub>10</sub>	0,077	0,63
PM <sub>2,5</sub>	0,07	0,57
NO <sub>x</sub>	0,018	0,129
NH <sub>3</sub>	0,0055	0,044
SO <sub>2</sub>	0,0048	0,039
CH <sub>4</sub>	0,029	0,23

**Заключение**

Анализ динамики аэрозольных полей на примере спутниковых данных 1986, 2002, 2012 гг. показал, что при определенных метеорологических условиях возможно образование устойчивых крупномасштабных неоднородностей с высокими значениями АИ, которые могут существовать до ~5–7 дней после прекращения ЛП. Пространственные масштабы подобных неоднородностей могут составлять несколько миллионов квадратных километров.

В целом направление переноса выбросов от ЛП в Сибири определяется доминирующим западным переносом воздушных масс, при этом нередки случаи трансконтинентального переноса «лесопожарных» аэрозолей, вплоть до берегов североамериканского континента.

В 1986 и 2002 гг. были зарегистрированы случаи противоположного, а именно восточного переноса аэрозольных частиц от очагов крупномасштаб-

ных пожаров на территории Восточной Сибири до побережья Баренцева моря. При этом аэрозольные неоднородности «не расплывались», сохраняя относительную компактность и высокие значения АИ на значительном удалении от источников.

В годы с высокой лесопожарной активностью (2002, 2012–2014 гг.) выбросы продуктов горения (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, аэрозольные частицы PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> и др.) от лесных пожаров в Якутии составили ~1% от общемировых выбросов от природных пожаров. Тогда как в годы с низкой лесопожарной активностью (2001, 2003–2011, 2015 гг.) количество выбросов было примерно в 8 раз меньше.

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 279–292.
2. Швиденко А.З., Щепищенко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. АН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.
3. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А., Михалева В.М., Чугунова Р.В., Яковлев А.П., Аверенский А.И., Короходкина В.Г. Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. 226 с.
4. Лыткина Л.П., Миронова С.И. Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. № 3. С. 168–173.
5. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. ж. 2008. Т. LII, № 5. С. 112–119.
6. Cofer W.E., Winstead E.L., Stocks B.J., Overbay L.W., Goldammer J.G., Cahoon D.R., Levine J.S. Emissions from boreal forest fires: Are the atmospheric impacts underestimated? // Biomass Burning and Global Change. Cambridge: MIT Press, 1996. P. 834–839.
7. Kaufman Y.J., Fraser R.S. The Effect of Smoke Particles on Clouds and Climate Forcing // Science. 1997. V. 277, № 5332. P. 1636–1639.
8. Sofiev M., Vankevich R., Ermakova T., Hakkarainen J. Global mapping of maximum emission heights

- and resulting vertical profiles of wildfire emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 14. P. 7039–7052.
9. *Bertschi I.T., Jaffe D.A.* Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific troposphere during the summer of 2003: Observations of smoke plumes from Asian boreal fires // *J. Geophys. Res. D.* 2005. V. 110, N 5. P. D05303.
  10. *Arola A., Lindfors A., Natunen A., Lehtinen K.E.J.* A case study on biomass burning aerosols: Effects on aerosol optical properties and surface radiation levels // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 16. P. 4257–4266.
  11. *Кондратьев К.Я.* Аэрозоль и климат: Современное состояние и перспективы разработок. 1. Образование, свойства аэрозоля и их трансформация // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 1. С. 5–22.
  12. *Афонин С.В., Белов В.В., Панченко М.В., Саке-рин С.М., Энгель М.В.* Корреляционный анализ пространственных полей аэрозольной оптической толщи на основе спутниковых данных MODIS // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 6. С. 510–515.
  13. *Саке-рин С.М., Андреев С.Ю., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М.* Особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщи атмосферы в азиатской части // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 6. С. 484–490.
  14. *Tomshin O.A., Solovyev V.S.* The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5742–5749.
  15. *Соловьев В.С., Будищев А.А.* Возмущения аэрозольной оптической толщи атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 7. С. 626–629; *Solovyev V.S., Budishchev A.A.* Disturbances of aerosol optical thickness of the atmosphere caused by forest fires in Yakutia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 6. P. 538–541.
  16. *Томшин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С.* Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 9, № 1. С. 145–150.
  17. *Соловьев В.С., Козлов В.И.* Исследование пространственно-временной динамики лесных пожаров и облачности в Северо-Азиатском регионе по данным спутников NOAA // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 1–2. С. 146–149.
  18. *Соловьев В.С., Козлов В.И., Смирнов И.Ф.* Пространственно-временная динамика лесных пожаров в Якутии // *Наука и образование.* 2005. № 1. С. 67–73.
  19. *Соловьев В.С.* Недельные вариации лесных пожаров в Якутии // *Наука и образование.* 2009. № 1. С. 66–70.
  20. *Томшин О.А., Соловьев В.С.* Исследование вариаций характеристик атмосферного аэрозоля, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Центральной Якутии (2002 г.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 7. С. 634–639; *Tomshin O.A., Solovyev V.S.* Study of variations in parameters of atmospheric aerosol due to large-scale forest fires in Central Yakutia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 95–99.
  21. *Соловьев В.С., Козлов В.И., Каримов Р.Р., Васильев М.С.* Комплексный мониторинг грозовой активности и лесных пожаров по данным наземных и спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2010. Т. 7, № 4. С. 218–224.
  22. *Acker J.G., Leptoukh G.* Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // *Eos, Transactions AGU.* 2007. V. 88, № 2. P. 14–17.
  23. NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS). URL: <http://www.class.ncdc.noaa.gov/>
  24. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1996. N 77. P. 437–470.
  25. *Шлычков В.А., Мальбахов В.М.* Расчет высоты подъема дымового аэрозоля, вовлекаемого в облачные системы в зоне лесного пожара // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 5–6. С. 453–456.
  26. *Gonzi S., Palmer P.I., Paugam R., Wooster M., Deeter M.N.* Quantifying pyroconvective injection heights using observations of fire energy: Sensitivity of spaceborne observations of carbon monoxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 8. P. 4339–4355.
  27. *Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change.* 1980. V. 2, N 3. P. 207–247.
  28. *Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C., Belote A., McKenzie D., Zhang X., O'Neill S., Wynne K.K.* Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // *Atmos. Environ.* 2006. V. 40. P. 3419–3432.
  29. *Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 23. P. 11707–11735.

**O.A. Tomshin, V.S. Solovyev. Study of large-scale inhomogeneities of aerosol fields caused by forest fires in Siberia.**

Large-scale inhomogeneities of aerosol fields caused by forest fires in Siberia were studied on remote sensing data. Analysis of aerosol fields dynamics for the data on 1986, 2002, 2012 shows that formation of large-scale inhomogeneities with high AI values and lifetime of ~5–7 days after forest fires cessation is possible. The spatial scales of these inhomogeneities can be several millions sq. km. Transport of emissions from forest fires in Siberia in most cases is determined by the dominant western transfer of air masses, but in some cases there was a shift in an easterly direction. Total emissions of CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, etc. from forest fires in Yakutia were calculated.