

Исследование вариаций характеристик атмосферного аэрозоля, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Центральной Якутии (2002 г.)

О.А. Томшин, В.С. Соловьёв*

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

Поступила в редакцию 14.02.2014 г.

По данным спутниковых наблюдений (ИСЗ NOAA, Terra, Earth Probe) проведены исследования вариаций аэрозольной оптической толщи атмосферы и аэрозольного индекса, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Центральной Якутии в период май–сентябрь 2002 г. С помощью модельного приближения и данных дистанционного зондирования Земли о площадях гарей сделана количественная оценка суммарных выбросов CO_2 , CO, CH_4 и др. Сопоставлены выбросы продуктов горения от лесных пожаров в Центральной Якутии с общемировыми выбросами от пожаров во всех типах экосистем и среднегодовыми выбросами от вулканической деятельности. Рассмотрены случаи дальнего переноса аэрозольных полей на фазах максимальной активизации лесных пожаров.

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

Введение

Лесные пожары (ЛП) – важный природный фактор, оказывающий существенное влияние на состояние, биоразнообразие и ресурсный потенциал лесных экосистем [1–3]. Значительная часть ЛП в России приходится на малонаселенные обширные районы Сибири и Дальнего Востока, где основные причины возникновения ЛП – грозовая активность и человеческий фактор. Рост техногенного воздействия на окружающую среду (экстенсивное развитие промышленности, расширение транспортной инфраструктуры, интенсификация сельскохозяйственной активности и др.) создают угрозу нарушения естественного баланса жизненных циклов лесов вследствие «антропогенного» усиления пирогенного фактора.

Лесные пожары наносят существенный ущерб лесным экосистемам и загрязняют атмосферу продуктами горения (смесью различных газов, аэрозольных и сажевых частиц), оказывающими влияние на физические и химические процессы в атмосфере [4–6]. Мощные конвективные потоки воздуха, развивающиеся над очагами крупномасштабных ЛП, способны выбрасывать продукты горения на большие высоты, где они разносятся ветрами на значительные расстояния [7–9].

Исследованиям оптических характеристик атмосферных аэрозолей, их роли в химических процессах и радиационном балансе нижней атмосферы и др. посвящен ряд публикаций [10–13].

Целью работы являются исследования воздействия крупномасштабных лесных пожаров в Центральной Якутии 2002 г. на пространственно-временные вариации характеристик атмосферного аэрозоля.

Исследуемый участок

Климат Якутии – резко континентальный (амплитуда годовых колебаний температуры иногда превышает 100°C) с жарким засушливым летом, сумма осадков за июнь–август составляет примерно 110–120 мм, температура воздуха в июле нередко поднимается выше 30°C . В силу этих особенностей и наличия обширных лесных массивов Якутия относится к числу наиболее пожароопасных регионов России. Сезон лесных пожаров начинается с мая и длится по сентябрь, максимум лесопожарной активности наблюдается в июле–августе.

Лето 2002 г. в Якутии выдалось крайне пожароопасным: по данным спутникового мониторинга общая площадь, пройденная огнем, составила $\sim 1,5 \cdot 10^6$ га, причем подавляющее число пожаров пришлось на территорию Лено-Вилуйского междуречья. На рис. 1 координаты выбранного участка $60\text{--}64^\circ$ с.ш. и $120\text{--}132^\circ$ в.д. Изолиниями показан рельеф местности.

* Олег Анатольевич Томшин (otomshin@ikfia.sbras.ru); Владимир Степанович Соловьёв (solo@ikfia.ysn.ru).

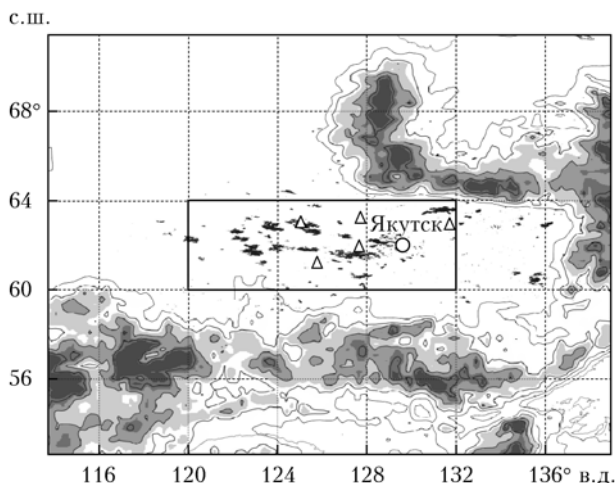


Рис. 1. Сводная карта распределения выгоревших площадей (скопления черных точек), обнаруженных в 2002 г. по данным спутниковых наблюдений на территории Центральной Якутии. Прямоугольник — исследуемый участок, кружочек — положение г. Якутска, треугольники — метеостанции

С севера (частично), востока и юга исследуемый участок окружен горными массивами Верхоянского и Станового хребтов. В древесной растительности выбранного участка доминируют светлохвойные лиственничные леса.

Исходные данные

Были использованы результаты лесопожарного мониторинга, проводимого ежегодно на территории Якутии по данным спутников NOAA на приемном комплексе Сканор (г. Якутск) [12–18]. Оценка уровня активности лесных пожаров в 2002 г. на исследуемом участке определялась суточным количеством «пожарных» пикселей ($N_{\text{пож}}$), обнаруженных по данным прибора MODIS (ИСЗ Terra). Площадь гарей на участке оценивалась также по данным ИСЗ Terra.

Среднесуточные распределения значений аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы (550 нм) получены по данным радиометра MODIS с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$. Среднее по участку значение АОТ рассчитывалось простым усреднением значений АОТ в отдельных пикселях ($1 \times 1^\circ$) исследуемого участка. Учитывая частые пробелы в данных, обусловленные ограничениями методики восстановления значений АОТ в условиях высоких значений альbedo подстилающей поверхности (плотная облачность, сильная задымленность, зеркальное отражение от водной поверхности и др.), средние по участку значения АОТ рассчитывались только за те дни, когда имелись данные, по крайней мере, не менее чем на половину участка. Естественно, в таких случаях среднее по участку АОТ оказывается заведомо заниженным. Среднесуточные распределения аэрозольного индекса (АИ) получены по данным прибора TOMS (ИСЗ Earth Probe), пространственное разрешение среднесуточных данных $1 \times 1,25^\circ$.

Использованные нами данные приборов MODIS (АОТ) и TOMS (АИ) взяты из открытых источни-

ков Центра космических полетов им. Р. Годдарда NASA [19].

Значения средних по участку температур приземного слоя воздуха рассчитывались по данным ATOVS (ИСЗ NOAA 15, 16), полученным на приемном комплексе Сканор. Уровень осадков и относительная влажность воздуха оценивались по данным метеостанций Росгидромета, взятым из открытых источников в сети Интернет.

Для периода май–сентябрь 2002 г. были проведены расчеты отклонений среднесуточных значений температуры ΔT и относительной влажности воздуха ΔRH от средних значений этих параметров в годы с низким уровнем пожарной активности (2004–2011).

Расчет инжестрированных в атмосферу продуктов горения лесной биомассы проводился по модели Seiler–Crutzen [20]:

$$E = ABCD, \quad (1)$$

где A — площадь, пройденная пожаром, м^2 ; B — плотность сгоревшей биомассы, $\text{кг}/\text{м}^2$; C — доля сгоревшей биомассы, %; D — удельная масса вещества, выбрасываемая при сгорании, $\text{г}/\text{кг}$; E — общая масса вещества, выбрасываемая в результате пожара, г. Значения коэффициентов B , C и D были взяты из работы [21] с учетом особенностей растительности (тип, сомкнутость крон) исследуемого участка.

Траектории движения воздушных масс рассчитывались по модели Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT NOAA) [22].

Обсуждение результатов

На рис. 2, а представлены суточные вариации количества «пожарных» пикселей $N_{\text{пож}}$, отклонений температур ΔT , относительной влажности ΔRH и количества осадков на исследуемом участке в мае–сентябре 2002 г. В вариациях $N_{\text{пож}}$ можно выделить два основных периода повышенной лесопожарной активности: 18–24 июля и 14–24 августа.

Как следует из рис. 2, с начала мая до середины июля значения среднесуточных температур были несколько выше аналогичных за 2004–2011 гг., в то время как относительная влажность имела низкие показатели. Эти обстоятельства обусловили высокий уровень пожароопасности лесов Центральной Якутии, что привело к возникновению 18–24 июля большого числа ЛП ($N_{\text{пож}} > 2000$). Последовавшие с конца июля до середины августа осадки и понижение ΔT способствовали снижению активности лесных пожаров.

После 15 августа осадки прекратились, что на фоне аномально высоких температур и низкой относительной влажности благоприятствовало возникновению 14–24 августа второго периода активизации ЛП ($N_{\text{пож}} > 3000$). С конца августа начались осенние дожди, и число ЛП сократилось до минимума. Лишь небольшая вспышка пирогенной активности наблюдалась 14–15 сентября, совпавшая с ростом температуры воздуха и снижением уровня относительной влажности.

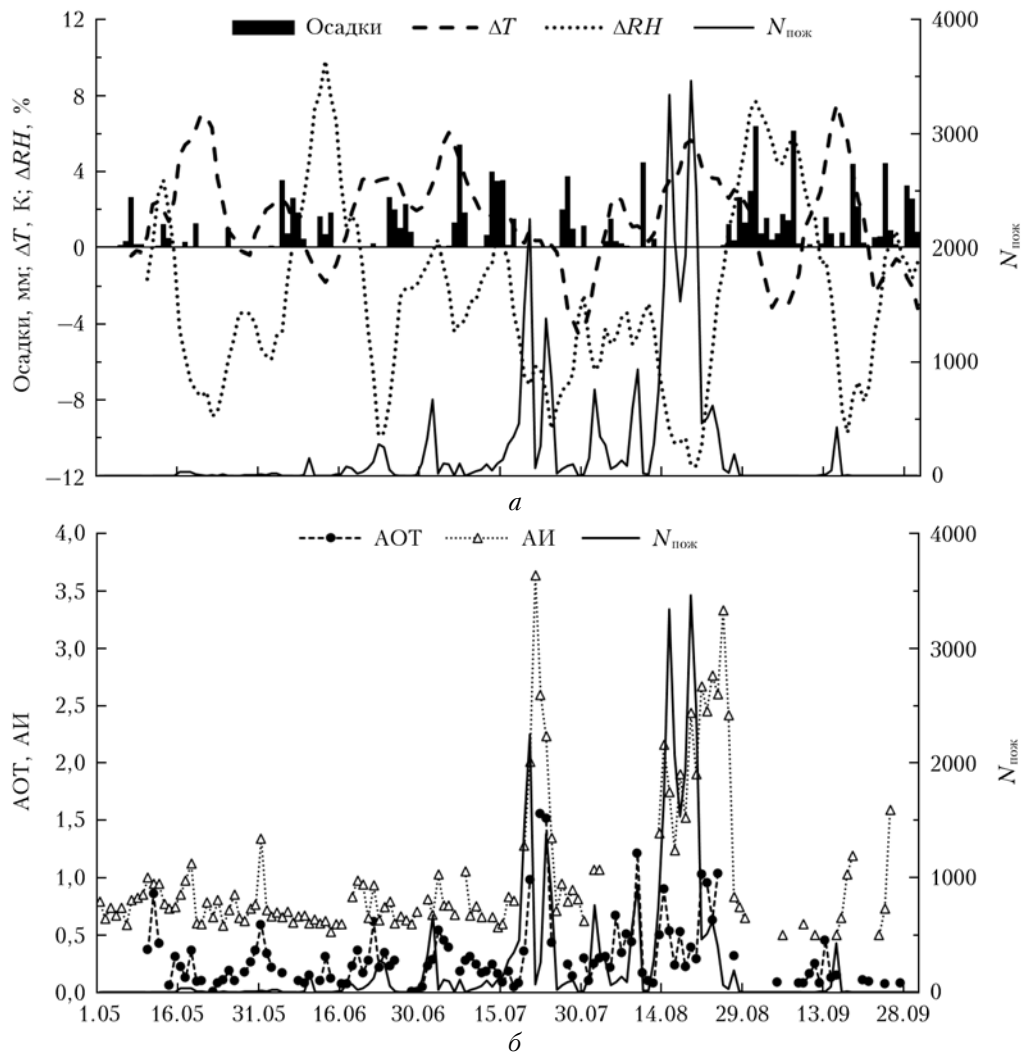


Рис. 2. Вариации среднесуточных значений «пожарных» пикселей: а – количества осадков, разницы температур и относительной влажности; б – аэрозольной оптической толщины и аэрозольного индекса в период май–сентябрь 2002 г.

Вариации количества «пожарных» пикселей, аэрозольной оптической толщины и аэрозольного индекса представлены на рис. 2, б. Пробел в графике кривой АИ 3–12 августа вызван отсутствием данных TOMS за эти дни.

В течение первой активизации лесных пожаров максимальные значения АОТ и АИ достигли ~1,5 и 3,6 соответственно. Высокие показатели аэрозольного индекса свидетельствуют о присутствии в атмосфере большого количества сильно поглощающих УФ-излучение аэрозолей, инжектированных в атмосферу из очагов лесных пожаров.

Показатели АИ в течение второй активизации ЛП достигли максимальных значений (~3,3). Однако значения АОТ при этом не превысили единицу. Невысокие показатели среднего по участку значения АОТ в сравнении с первым периодом активизации обусловлены априорным занижением этого параметра вследствие крайне высокой плотности дымовых шлейфов (соответственно критически высоких для методики расчета АОТ значений альбедо), экранирующих исследуемый участок.

Как видно на рис. 2, б, значения АИ после 23 июля падают одновременно со снижением лесопожарной активности, тогда как во втором случае (вторая активизация ЛП) высокие показатели АИ сохраняются вплоть до 27 августа. Это обстоятельство обусловлено разной динамикой выноса продуктов горения ветрами в обоих эпизодах. Как показал анализ распределения полей ветров, построенных по модели NCEP [23] на уровне 850 мбар, в течение первого периода активизации ЛП происходил интенсивный вынос продуктов горения за границы рассматриваемого участка, поэтому со снижением лесопожарной активности одновременно падают значения АИ. Во втором случае (второй период активизации ЛП) над исследуемым участком образовалась застойная область, что привело к накоплению инжектированных в атмосферу дымовых частиц, так и длительному (более 3 сут после окончания ЛП) поддержанию высоких значений АИ.

Наблюдавшийся 23–25 сентября заметный всплеск значений АИ, как показали расчетные траектории, во многом объясняется переносом аэрозольных частиц

с юга Западной Сибири, где в это время наблюдались крупные лесные пожары.

В таблице приведены результаты расчетов суммарных выбросов продуктов горения лесных пожаров с исследуемого участка в 2002 г.

В целом можно отметить, что вклад лесных пожаров на исследуемом участке в 2002 г. в общемировые выбросы от пожаров во всех типах экосистем [24] составил ~ 1%.

На рис. 3, *а* представлены среднесуточное распределение аэрозольного индекса 20.07.2002 (слева) и модельные траектории переноса воздушных масс 19–22.07.2002 (справа); на рис. 3, *б* аналогично представлены распределения АИ за 22.08.2002 и траектории переноса за 21–24.08.2002. Расчет траекторий

переноса воздушных масс из исследуемого участка проводился для 21 точки на высоте 2,5 км. Хорошее согласие картины распределений АИ и траекторий воздушных масс свидетельствует о том, что источником возмущений аэрозольных показателей в Восточной Сибири и Дальневосточном регионе в рассматриваемый период времени явились лесные пожары в Центральной Якутии.

В течение 19–22 июля дымовые частицы в основном выносило в Охотское море. Дальность переноса составила ~ 1000 км. Во второй период активизации ЛП (21–24 августа) вынос продуктов горения происходил преимущественно в западном, северо-западном направлениях. Аэрозольные шлейфы распространились вплоть до побережья Баренцева моря,

Суммарные выбросы продуктов горения, доля от общемировых выбросов от пожаров всех типов в 2002 г.

Продукт горения	Эмиссия, Тг	Эмиссия, Тг		Процент от общемировых выбросов
		1-й период	2-й период	
CO ₂	68–171	16–40	7,5–18	0,9–2,4
CO	3,5–9,7	0,8–2,3	0,38–1,10	0,9–2,5
CH ₄	0,13–0,52	0,03–0,12	0,014–0,057	0,6–2,4
NH ₃	0,02–0,10	0,005–0,020	0,003–0,010	0,3–1,4
SO ₂	0,02–0,09	0,004–0,020	0,002–0,010	0,8–3,5
PM _{2,5}	0,23–1,32	0,05–0,33	0,025–0,145	0,7–4,0
PM ₁₀	0,29–1,43	0,06–0,31	0,03–0,15	0,6–3,0

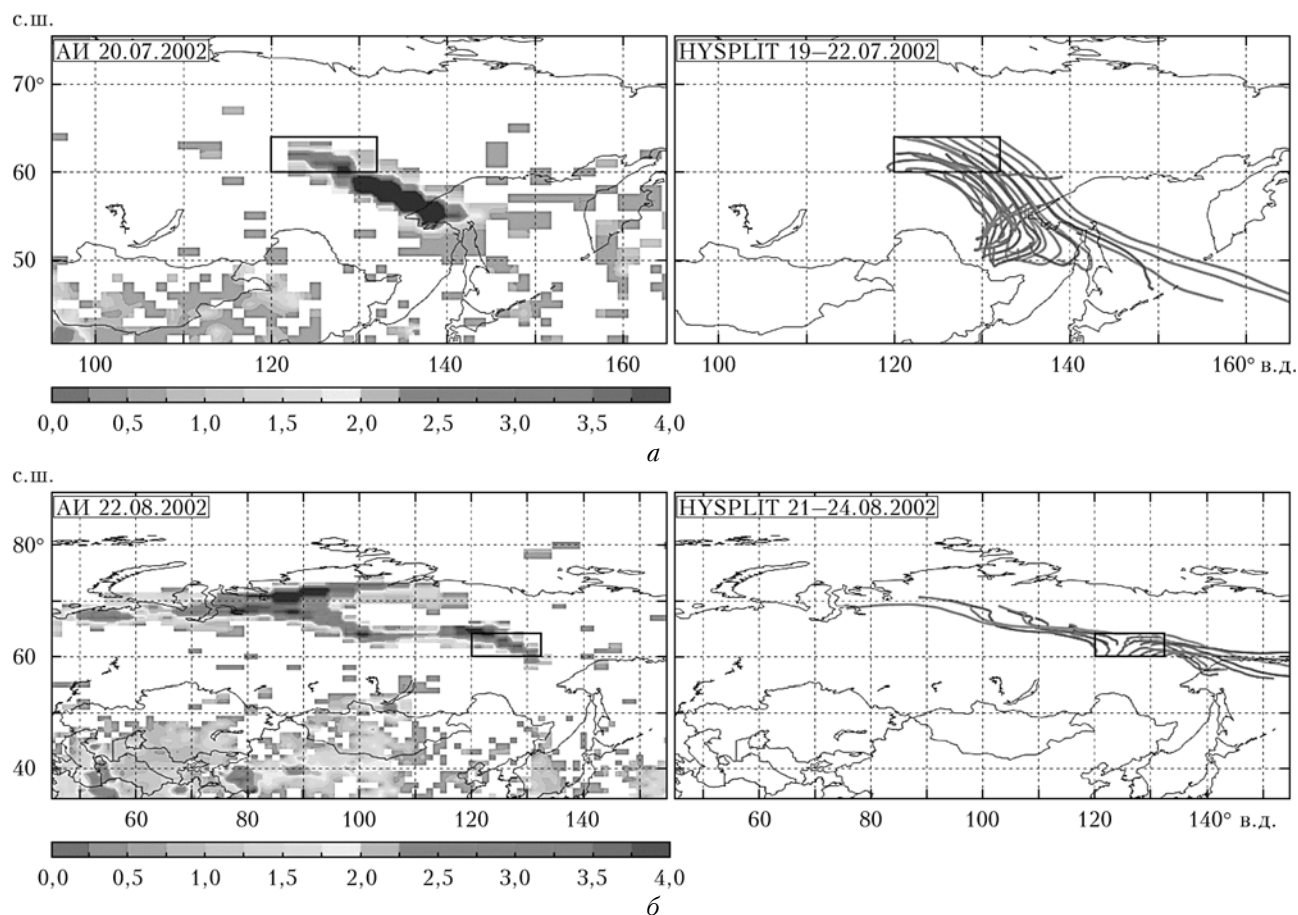


Рис. 3. Пространственное распределение аэрозольного индекса (*а*) и модельные траектории переноса воздушных масс (*б*)

дальность переноса составила ~ 3000 км. Во всех рассмотренных эпизодах аэрозольные облака перемещались достаточно компактно, сохраняя высокие значения АИ.

Заключение

Анализ спутниковых данных за период май–сентябрь 2002 г. показал, что значения АОТ в дни с наиболее высоким уровнем пирогенной активности (18–24 июля, 14–24 августа) в несколько раз превышали невозмущенные фоновые значения (~ 0,13), достигая ~ 1,5. Максимальные значения аэрозольного индекса составили ~ 3,6.

Перенос дымовых частиц от очагов ЛП наблюдался преимущественно в юго-восточном и северо-западном направлениях, дальность переноса аэрозольных частиц составила примерно 1000 и 3000 км соответственно, при этом значения АИ на максимальном удалении незначительно отличались от аналогичных показателей в районе исследуемого участка.

Общие выбросы продуктов горения от лесных пожаров в Центральной Якутии составили около 1% годовых выбросов от общемировых пожаров всех типов. Эмиссия продуктов горения в течение первого периода активизации ЛП составила 23%, в течение второго – 11% от общего количества выбросов с исследуемого участка за 2002 г.

Масштабы выбросов CO₂ в результате лесных пожаров на сравнительно небольшом по площади исследуемом участке оказались сопоставимы со средне-годовыми выбросами от глобальной вулканической деятельности [25].

1. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А., Михалева В.М., Чугунова Р.В., Яковлев А.П., Аверенский А.И., Королухина В.Г. Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. 226 с.
2. Лыткина Л.П., Миронова С.И. Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. № 3. С. 168–173.
3. Швиденко А.З., Щеняченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакуда И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.
4. Crutzen P.J., Andreae M.O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles // Science. 1990. V. 250, N 4988. P. 1669–1678.
5. 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.
6. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. ж. 2008. Т. LI, № 5. С. 112–119.
7. Fromm M., Serreanckx T. Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 10. P. 1542.
8. Bertschi I.T., Jaffe D.A. Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific tropo-

sphere during the summer of 2003: observations of smoke plumes from Asian boreal fires // J. Geophys. Res. D. 2005. V. 110, N 5. P. D05303.

9. 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.
10. 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.
11. Аршинов М.Ю., [Афонин С.В.], Белан Б.Д., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Machida T., Nedelec Ph., Paris J.-D., Фофанов А.В. Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над Югом Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 9. С. 773–782.
12. Соловьев В.С., Будищев А.А. Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 626–629.
13. 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.
14. 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.
15. Соловьев В.С., Козлов В.И., Смирнов И.Ф. Пространственно-временная динамика лесных пожаров в Якутии // Наука и образование. 2005. № 1. С. 67–73.
16. Соловьев В.С. Недельные вариации лесных пожаров в Якутии // Наука и образование. 2009. № 1. С. 66–70.
17. Соловьев В.С., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2009. 108 с.
18. 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.
19. Acker J.G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // EOS, Transactions AGU. 2007. V. 88, N 2. P. 14–17.
20. 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.
21. 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, N 19. P. 3419–3432.
22. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT 4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Austral. Meteorol. Mag. 1998. V. 47, N 4. P. 295–308.
23. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen 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.
24. 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.

25. Gerlach T. Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide // EOS, Transactions AGU. 2011. V. 92, N 24. P. 201–202.

O.A. Tomshin, V.S. Solovyev. Studying of variations of atmospheric aerosol properties caused by large-scale forest fires in Central Yakutia (2002).

Aerosol optical thickness and aerosol index variations caused by large-scale forest fires in Central Yakutia in 2002 were studied by remote sensing data (NOAA, Terra, Earth Probe). Total emissions of CO₂, CO, CH₄ etc. were calculated using modeling approach and MODIS/Terra burned area data. A comparison of total emissions from forest fires in Central Yakutia with global fire and volcanic emissions are made. Long-range transport events of aerosol particles during maximum activity of forest fires are examined.