

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

**ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ
И РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ЛЕТОМ 2010 г.**

© 2013 г. С. А. Ситнов^{1*}, Г. И. Горчаков¹, М. А. Свириденков¹, В. М. Копейкин¹,
Т. Я. Пономарева², А. В. Карпов¹

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

² *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва*

* *E-mail: sitnov@ifaran.ru*

Поступила в редакцию 21.05.2012 г.

С привлечением наблюдений аэрозольной оптической толщи (АОТ) приборами MODIS (Aqua и Terra), полей объективного анализа метеорологических элементов Гидрометцентра России, NCEP/NCAR-реанализа и данных сетевого аэрологического радиозондирования проведено исследование эволюции задымления европейской территории России (ЕТР) в период массовых пожаров лесов и торфяников летом 2010 г. Выявлена связь структурных неоднородностей поля АОТ с региональной атмосферной циркуляцией. Показано, что 5–9 августа область максимального задымления совершила полный антициклонический оборот вокруг московского мегаполиса, оставаясь на расстоянии 200–650 км от столицы. Для периода экстремального задымления ЕТР получены оценки среднерегionalного коротковолнового аэрозольного радиационного форсинга (АРФ) на верхней и нижней границах атмосферы. Представлены пространственные распределения величин АРФ по территории региона, а также оценки локальных и пространственно-распределенных температурных эффектов дымового аэрозоля. Показано, что в период 5–9 августа пространственное распределение АОТ и термические эффекты дымового аэрозоля были согласованы с пространственными распределениями аномалий температуры воздуха в нижнем 1.5-км слое атмосферы. Выполнена валидация локальных наблюдений АОТ, полученных по данным MODIS наблюдениями АОТ фотометра CIMEL станции Звенигород сети AERONET в период пожаров.

Ключевые слова: природные пожары, дымовой аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, радиационные эффекты, термические эффекты дымов, MODIS, валидация наблюдений

DOI: 10.7868/S0205961413010065

ВВЕДЕНИЕ

Блокирующий антициклон рекордной продолжительности, отмечавшийся на европейской территории России (ЕТР) летом 2010 г., обусловил экстремальное повышение региональных температур, отсутствие дождей и почвенную засуху (Мохов, 2011; Шакина и др., 2011). Сложившийся режим погоды способствовал развитию многочисленных лесных и торфяных пожаров, приведших к сильному задымлению в ряде мест ЕТР (Бондур, 2011). В первой декаде августа 2010 г. в столичном регионе отмечались рекордно-высокие значения приземных концентраций аэрозольных частиц (Горчаков и др., 2011а; Звягинцев и др., 2011; van Donkelaar et al., 2011) и аэрозольной оптической толщи (АОТ) (Горчаков и др., 2011б; Ситнов, 2011а, 2011б, 2011в; Чубарова и др., 2011; Witte et al., 2011). Оценки локальных и региональных величин радиационного

форсинга дымового аэрозоля показывают, что задымление воздуха существенно изменило радиационный режим атмосферы над обширной территорией (Горчакова, Мохов, 2012; Ситнов и др., 2012; Chubarova et al., 2012). Исследования оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в период пожаров 2010 г. показали преобладание в дымах частиц субмикронного размера (Горчаков и др., 2011б; Chubarova et al., 2012), выявили высокую конденсационную активность дымового аэрозоля (Исаков и др., 2011).

В отличие от наземных данных, спутниковые наблюдения АОТ, наряду с оценками величин локального задымления и аэрозольного радиационного форсинга (АРФ), позволяют изучить эволюцию задымления во времени, получить оценки величин среднего регионального АРФ и восстановить пространственное распределение радиационных и температурных эффектов дымов.

Данная работа посвящена анализу пространственно-временной эволюции дымового аэрозоля в период массовых пожаров лесов и торфяников на ЕТР в июле–августе 2010 г. и ее связи с региональной атмосферной динамикой. Исследуются пространственное распределение коротковолнового радиационного форсинга дымов на верхней и нижней границах атмосферы и термические эффекты задымления. Под ЕТР понимается территория, ограниченная координатами 47° – 65° с.ш., 25° – 55° в.д., площадью около 3.6 млн. км². Исходным материалом для анализа служат данные АОТ спутниковых приборов MODIS.

ПРИБОРЫ И БАЗА ДАННЫХ

Приборы MODIS

MODIS (MODerate Imaging Spectroradiometer) является 36-канальным спектрометром изображения, регистрирующим отраженную солнечную и излучаемую земной поверхностью радиацию в диапазоне длин волн 0.4–14.4 мкм (Salomonson et al., 1989). Оптическая система прибора осуществляет сканирование полосы шириной 2330 км на поверхности, обеспечивая ежедневное глобальное покрытие наблюдениями области внетропических широт. Приборы MODIS установлены на спутниках Aqua и Terra, запущенных соответственно 04.05.2002 г. и 18.01.1999 г. на солнечно-синхронные орбиты высотой 700 км, наклоном 98° и периодом обращения 98 мин. Дневные наблюдения MODIS/Terra и MODIS/Aqua осуществляются соответственно на нисходящем и восходящем витке орбиты с пересечением экватора в 10:30 и 13:30 локального времени (<http://modis.gsfc.nasa.gov>)

Алгоритм восстановления АОТ и алгоритм детектирования действующих пожаров

Алгоритм восстановления АОТ (τ) над сушей основан на сравнении и минимизации различий интенсивностей отраженной солнечной радиации на длинах волн 0.47 и 0.66 мкм, измеряемых в полете прибором MODIS, и интенсивностей солнечной радиации на верхней границе атмосферы на этих же длинах волн, рассчитываемых на основе решения уравнения переноса радиации в модельной атмосфере при данной геометрии наблюдений и с учетом сезона (Levy et al., 2007). Модельные расчеты учитывают поляризационные эффекты взаимодействия излучения со средой, несферичность частиц грубодисперсного аэрозоля, спектральную зависимость отражательной способности подстилающей поверхности и высоту рельефа. Расчетная погрешность восстановления АОТ над сушей составляет $\pm 0.05 \pm 0.15\tau$ (Kaufman et al., 1997). Следует отметить, однако, что в условиях задымления ЕТР летом 2010 г. по-

грешность восстановления АОТ могла отличаться от расчетной (см. ниже).

Алгоритм детектирования действующих пожаров использует контекстный анализ яркостных температур в каналах 4 и 11 мкм в пространственных областях размером 1 км \times 1 км (Giglio et al., 2003). Степень достоверности обнаружения действующего пожара в пикселе оценивается тремя уровнями надежности (низкой, номинальной и высокой). В данной работе использованы результаты, характеризующиеся высоким уровнем надежности ($80\% \leq P \leq 100\%$). Поскольку оптические характеристики дымового аэрозоля летом 2010 г. определялись его субмикронной фракцией, влияние задымления в наибольшей степени проявлялось в УФ- и видимой областях спектра. В ИК-области влияние дымов было существенно слабее. Так, по данным фотометра CIMEL АОТ на длине волны 1.6 мкм была примерно на порядок меньше, чем в видимой области (Горчаков и др., 2011б). Вследствие быстрого убывания АОТ с ростом длины волны задымление оказывало незначительное воздействие на работу алгоритма.

Использованные данные и их источники

Использовались ежедневные данные АОТ на длине волны 0.55 мкм ($\tau_{0.55}$) 3-го уровня (L3) 5-й коллекции (V5.1). HDF файлы MOD08_D3/MYD08_D3 получены с помощью системы архивирования и распространения данных LAADS Web (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System), находящейся на <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>. Данные L3 представляют собой наблюдения АОТ, осредненные посуточно внутри ячеек $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (широта \times долгота) (Hubanks et al., 2008). На широте Москвы такая ячейка соответствует пространственным размерам 111×63 км.

Данные локальных очагов возгораний Active Fire Data Products (MOD14/MYD14) 2-го уровня 5-й коллекции (V2.4) в области 45° – 65° с.ш., 25° – 65° в.д. получены с помощью системы FIRMS (The Fire Information for Resource Management System), разработанной и обслуживаемой университетом штата Мериленд (США) при поддержке NASA (Davies et al., 2009). Данные доступны на <http://firefly.geog.umd.edu>.

Для валидации спутниковых наблюдений АОТ использовались измерения АОТ солнечно-небесного фотометра CIMEL CE-318 станции “Звенигород” сети AERONET (Holben et al., 1998), расположенной на территории Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН. Данные АОТ L1.5 доступны на сайте: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.

Контроль процессов переноса дымового аэрозоля осуществлялся по ветровым данным на уровне 700 мб. Этот уровень лучше других отображает

Таблица 1. Станции аэрологического радиозондирования, использованные в данной работе. Средние значения зонального (U) и меридионального (V) ветра на уровне 700 мб в первую декаду августа 2010 г.

№ п/п	№ станции ВМО	Название станции	Координаты		U , м/с	V , м/с
			с.ш.	в.д.		
1	02185	Лулео	65.6°	22.1°	3.2	5.5
2	02365	Сундсвалль	62.5°	17.5°	1.8	3.9
3	11952	Попрад-Гановце	49.0°	20.3°	2.7	6.4
4	12120	Леба	54.8°	17.5°	1.6	7.7
5	12374	Легионово	52.4°	21.0°	-0.3	7.2
6	13275	Белград	44.8°	20.4°	2.0	3.5
7	15420	Бухарест	44.5°	26.1°	-0.9	6.9
8	16622	Салоники	40.5°	23.0°	-0.5	2.3
9	22217	Кандалакша	67.2°	32.4°	10.4	7.8
10	22271	Шойна	67.9°	44.1°	14.0	1.9
11	22845	Каргополь	61.5°	38.9°	10.1	6.8
12	23205	Нарьян-Мар	67.6°	53.0°	13.8	-2.9
13	23921	Ивдель	60.7°	60.5°	6.4	-7.3
14	23804	Сыктывкар	61.7°	50.9°	7.8	-4
15	26038	Таллин*	59.4°	24.6°	3.8	11.7
16	26063	Санкт-Петербург/Воейково	60.0°	30.7°	6.3	12.5
17	26812	Смоленск	54.8°	32.1°	-0.7	12.8
18	27595	Казань	55.6°	49.3°	-0.5	-2.6
19	27612	Москва/Долгопрудная	55.9°	37.5°	1.4	6.3
20	28445	Верхнее Дуброво	56.7°	61.1°	1.5	-6.7
21	33791	Кривой Рог	48.0°	33.2°	-7.6	4.3
22	34122	Воронеж	51.7°	39.3°	-5.5	4.2
23	34172	Саратов	51.6°	46.0°	-5.3	-1.0
24	35229	Актюбинск	50.3°	57.1°	-2.9	-5.2
25	37054	Минеральные Воды	44.2°	43.1°	-4.1	1.0

* Данные ночного (00 UTC) радиозондирования.

общие закономерности атмосферной динамики региона в целом. Представленные линиями тока ежедневные поля ветра в период массовых пожаров восстановлены по архивным данным полей объективного анализа метеорологических элементов Гидрометцентра России с помощью системы анализа и визуализации GrADS (<http://www.iges.org/grads>). Векторы результирующего (среднего) ветра в период 5–9 августа 2010 г. рассчитаны на основе данных дневных (12:00 UTC) пусков радиозондов на 25 аэрологических станциях (табл. 1). Данные радиозондирования позаимствованы в архиве аэрологических наблюдений университета штата Вайоминг (<http://weather.uwyo.edu/air>). К анализу привлекались также данные NCEP/NCAR-реанализа (Kalnay et al., 1996). Пространственные распределения среднесуточной температуры над ЕТР в период 2000–2010 гг. на изобарических поверхностях 925, 850, 700, 500 и 300 мб с разрешением

$2.5^\circ \times 2.5^\circ$ получены через сервер: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Валидация данных АОТ MODIS в период пожаров

Погрешность наблюдений АОТ автоматических солнечно-зенитных фотометров CIMEL глобальной сети AERONET в видимой области солнечного спектра не превышает 0.01 (Holben et al., 1998), и наблюдения этих приборов приняты в качестве эталонных. Данные восстановления АОТ прибором MODIS ранее неоднократно сопоставлялись с данными АОТ CIMEL в условиях слабого и умеренного аэрозольного загрязнения воздуха (Ichoku et al., 2002). Экстремальное задымление ЕТР предоставило уникальную возможность валидации спутниковых наблюдений АОТ в исключи-

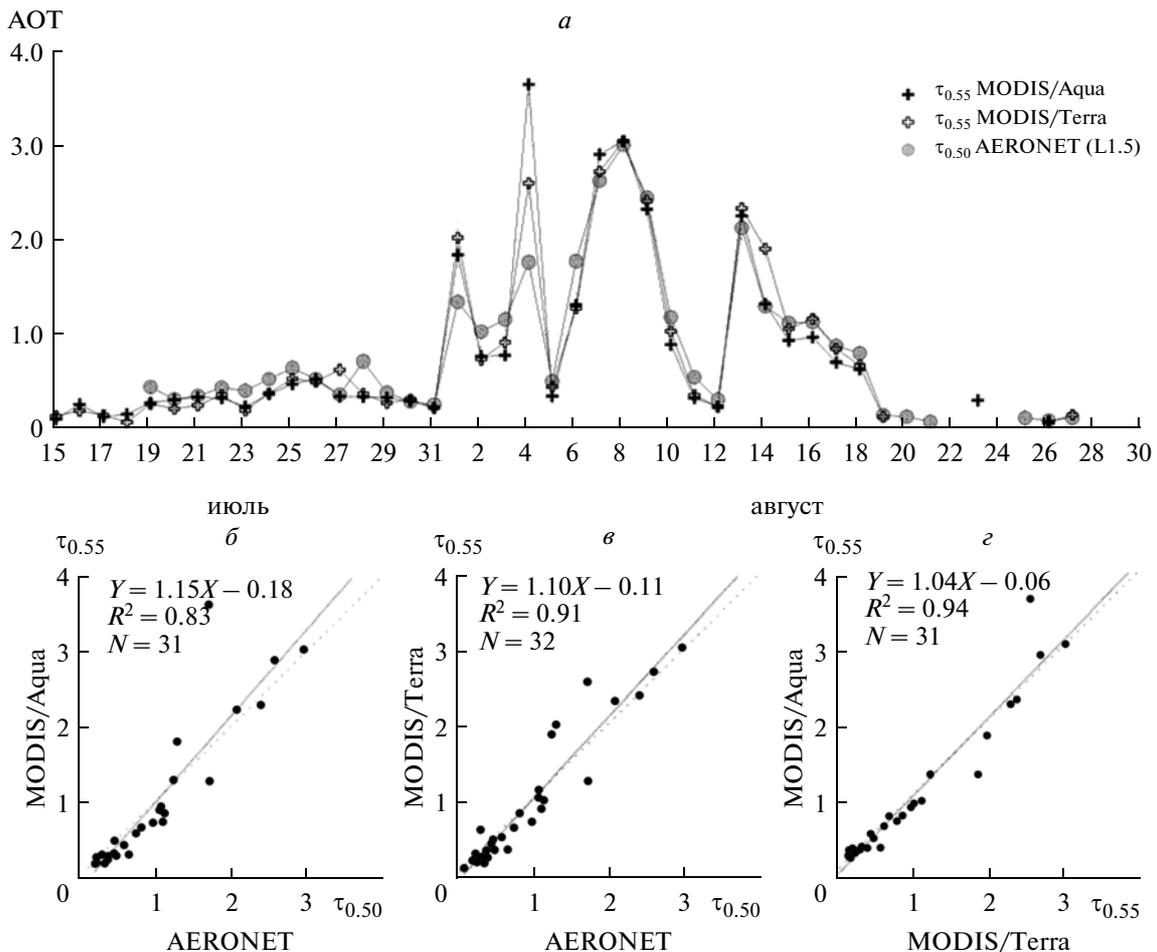
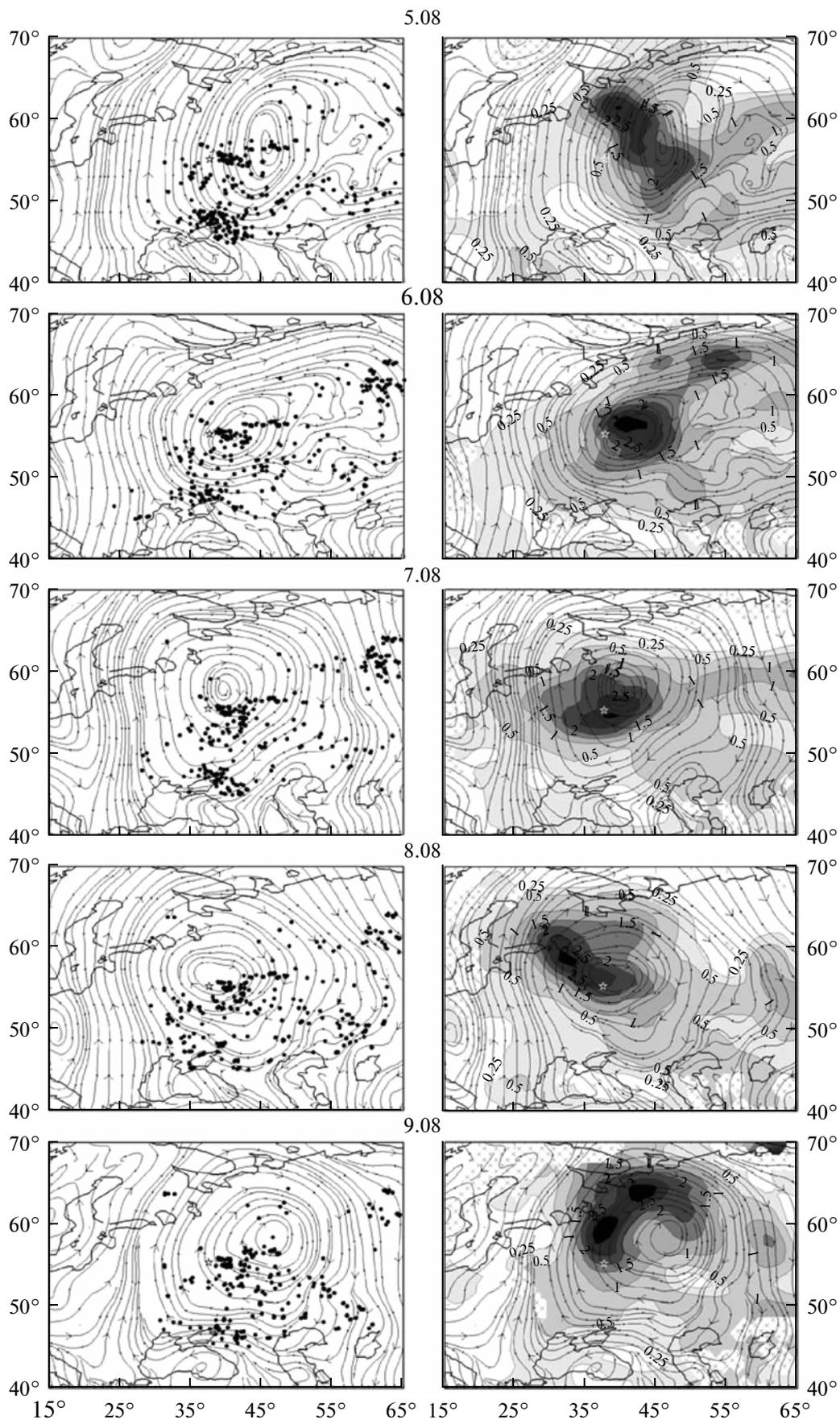


Рис. 1. *a* – Ежедневные наблюдения АОТ ($\lambda = 0.55$ мкм) приборами MODIS (Aqua/Terra) вблизи г. Звенигород и среднесуточные наблюдения АОТ ($\lambda = 0.50$ мкм) прибором CIMEL станции AERONET Звенигород в период с 15 июля по 31 августа 2010 г. Диаграммы рассеяния наблюдений АОТ приборами: *b* – MODIS/Aqua и CIMEL; *c* – MODIS/Terra и CIMEL; *d* – MODIS/Aqua и MODIS/Terra. Пунктиром показана зависимость $Y = X$.

тельно широком диапазоне изменений прозрачности атмосферы.

На рис. 1*a* показаны ежедневные значения $\tau_{0.55}$, полученные приборами MODIS/Aqua и MODIS/Terra вблизи г. Звенигорода (наземный пиксел 55° – 56° с.ш., 36° – 37° в.д.) и среднесуточные значения $\tau_{0.50}$, рассчитанные по данным фотометра CIMEL станции AERONET Звенигород (55.7° с.ш., 36.78° в.д.) в период с 15 июля по 31 августа 2010 г. Вследствие обнаруженного дополнительного ослабления в каналах приемника фотометра CIMEL в период пожаров данные его наблюдений были скорректированы с использованием критерия независимости (в среднем) АОТ от зенитного угла Солнца в период его быстрого изменения на восходе и закате (подробнее см. в работе Chubarova et al., 2012). Рисунок 1*a* свидетельствует, что в период пожаров наземные и спутниковые наблюдения АОТ характеризовались сходной временной эволюцией, а положения экстремумов временных рядов АОТ CIMEL и

АОТ MODIS (Aqua/Terra) в период с 29 июля по 18 августа 2010 г. в точности совпадали. Коэффициенты корреляции наблюдений АОТ приборами MODIS/Aqua и CIMEL (MODIS/Terra и CIMEL) в период с 15 июля по 31 августа 2010 г. составили 0.92 (0.96) соответственно. Наибольшие различия среднесуточных значений АОТ, рассчитанных по данным спутниковых и наземных наблюдений, отмечались 4 августа. Обнаруживались также и систематические различия, сходные для двух приборов MODIS. На рис. 1*b*, 1*c* приведены диаграммы рассеяния наблюдений АОТ приборами MODIS/Aqua и CIMEL и приборами MODIS/Terra и CIMEL соответственно. Рисунки свидетельствуют, что при значениях АОТ < 1.25 величины $\tau_{0.50}^{\text{CIMEL}}$ систематически превышали $\tau_{0.55}^{\text{MODIS}}$, тогда как при АОТ > 1.25 , наряду с заметным увеличением разброса наблюдений, в целом отмечалось превышение данными $\tau_{0.55}^{\text{MODIS}}$ данными $\tau_{0.50}^{\text{CIMEL}}$. Стандартное отклонение $\tau_{0.55}^{\text{MODIS}}$ от $\tau_{0.50}^{\text{CIMEL}}$ составило 0.31, при сред-



нем отклонении -0.02 . Следует отметить, что интерполяция зависимости наблюдений прибора CIMEL от длины волны в задымленной атмосфере показала, что отношение $\tau_{0.50}^{\text{CIMEL}} / \tau_{0.55}^{\text{MODIS}}$ в период пожаров не превышало 1.1.

В справочных таблицах MODIS параметры аэрозольных моделей рассчитаны для величин АОТ ≤ 5 на длине волны 0.55 мкм. В период задымления ЕТР величины локального аэрозольного загрязнения воздуха могли превышать верхний предел рабочего диапазона алгоритма (Chubarova et al., 2012). Кроме того, высотные сгущения дымового аэрозоля могли диагностироваться как облачность и, как следствие, отбраковываться (van Donkelaar et al., 2011). Два последних обстоятельства обуславливают тенденцию искусственного занижения средних величин АОТ, рассчитанных по данным MODIS в период пожаров. Вместе с тем стоит также отметить, что расхождения величин АОТ, регистрируемых спутниковой и наземной аппаратурой, в значительной степени могут объясняться совокупным эффектом пространственной неоднородности дымов и различием пространственного и временного осреднения наблюдений АОТ приборами MODIS ($1^\circ \times 1^\circ$) и CIMEL (локальные наблюдения).

Несмотря на отмеченные расхождения данных MODIS и CIMEL и их возможные причины, результаты сравнительного анализа свидетельствуют об удовлетворительном согласии спутниковых и наземных наблюдений АОТ в период пожаров. Диаграмма рассеяния данных наблюдений АОТ приборами MODIS/Aqua и MODIS/Terra вблизи ЗНС (рис. 1з), свидетельствует о согласованности наблюдений двух приборов MODIS.

Пространственно-временная динамика дымового аэрозоля при массовых пожарах 2010 г.

Летом 2010 г. пожары отмечались в различных местах ЕТР, однако очаги горения распределялись по территории региона неравномерно. Охваченные массовыми пожарами территории характеризовались разным типом растительности и, как следствие, различным составом дымового аэрозоля. Кроме того, в различных частях ЕТР интенсификация пожаров отмечалась в различные временные периоды (Ситнов, 2011). С 24 июля по 16 августа в общей массе очагов горения, отмечавшихся на ЕТР, доминировали пожары в широтно-ориентированной области, протянувшейся от столичного региона до Среднего Прикамья (далее

центр ЕТР). В этот период на территории, ограниченной координатами $54^\circ\text{--}57^\circ$ с.ш., $38^\circ\text{--}48^\circ$ в.д., занимающей 6% площади ЕТР, количество пожаров составило более 60% общего количества пожаров, отмечавшихся на ЕТР.

На рис. 2 показаны ежедневные пространственные распределения АОТ, местоположения действующих пожаров и поля ветра в период экстремального задымления ЕТР — с 5 по 9 августа 2010 г. Распределения АОТ сглажены скользящим матричным средним $3^\circ \times 5^\circ$ (широта \times долгота), что уменьшает в среднем на 28% значения локальных максимумов АОТ, но делает более наглядным общие закономерности распределений. На рисунке выделяются три кластера пожаров — в центре, в Приазовье и на Северном Урале. В центре ЕТР в этот период количество пожаров отличалось относительным постоянством, в Приазовье отмечалось уменьшение количества пожаров, а на северном Урале их количество росло 5–7 августа и убывало 7–9 августа, достигнув таким образом максимума 7 августа.

Сравнение картин распределений АОТ и действующих пожаров на рис. 2 показывает, что пространственное распределение дыма над ЕТР в целом обнаруживало мало сходства с пространственным распределением источников дыма, а его временные изменения не отражали изменений интенсивности горения в отмеченных выше кластерах. Некоторым исключением явилось 6 августа, когда максимум АОТ действительно отмечался над областью пожаров, а пространственное распределение АОТ, следуя географии очагов горения, было ориентировано в направлении ЮЗ–СВ. Совместный анализ АОТ и полей ветра показывает, что пространственно-временная эволюция АОТ 5–9 августа была тесно связана с особенностями региональной атмосферной циркуляции, обусловленной блокирующим антициклоном. Ключевую роль в формировании картин распределений АОТ над территорией региона играли процессы переноса дымового аэрозоля из областей массовых пожаров ветром. Ветровыми потоками дым вовлекался в антициклоническую циркуляцию, со слабыми ветрами в центре антициклона и сильными ветрами на его периферии, распространяясь, таким образом, по территории региона. Вихревая структура поля дымового аэрозоля отчетливо проявилась в распределении АОТ 9 августа.

Несмотря на распространенность пожаров, по всей территории региона в полях АОТ изо дня в день отмечалась локализованная область высоких

Рис. 2. Слева — очаги действующих пожаров (степень надежности диагностирования — 80%), справа — распределения АОТ, сглаженные скользящим матричным средним $3^\circ \times 5^\circ$ (широта \times долгота) в период 5–9 августа 2010 г. Данные приборов MODIS (Aqua/Terra). Линиями со стрелками показаны поля ветра (линии тока) на уровне 700 мб. Крестики — отсутствие данных АОТ.

Таблица 2. Максимальное значение АОТ ($\lambda = 0.55$ мкм) над ЕТР ($\tau_{\text{Макс}}$) и его координаты, значения АОТ над Москвой ($\tau_{\text{Мос}}$) и Звенигородом ($\tau_{\text{Звен}}$), средняя по ЕТР оптическая толщина ($\tau_{\text{ЕТР}}$), а также соответствующие $\tau_{\text{Макс}}$ и $\tau_{\text{ЕТР}}$ значения радиационного форсинга на верхней границе атмосферы (R_1) и разность радиационных форсингов на верхней и нижней границах атмосферы ($R_1 - R_2$)

Дата	$\tau_{\text{Макс}}$	Координаты, град		$\tau_{\text{Мос}}$	$\tau_{\text{Звен}}$	$\tau_{\text{ЕТР}}$	$R_1^{\text{Макс}}/R_1^{\text{ЕТР}}$, Вт м ⁻²	$(R_1 - R_2)^{\text{Макс}}/(R_1 - R_2)^{\text{ЕТР}}$, Вт м ⁻²
		с.ш.	в.д.					
05.08.2010	4.29	61.5°	37.5°	0.63	0.42	0.98	-145/-58	202/44
06.08.2010	4.80	55.5°	40.5°	1.61	1.30	1.03	-150/-60	230/46
07.08.2010	4.86	53.5°	37.5°	3.14	2.82	0.99	-151/-58	234/44
08.08.2010	4.17	58.5°	32.5°	2.92	3.05	1.05	-143/-61	195/47
09.08.2010	4.39	59.5°	37.5°	2.61	2.37	1.16	-146/-66	207/51

значений АОТ ($\tau_{0.55} > 1.5$), характеризовавшаяся большей связностью изменений по сравнению с остальными частями распределений АОТ. Анализ пространственно-временной эволюции АОТ показывает, что область $\tau_{0.55} > 1.5$ и более мелкие неоднородности пространственного распределения АОТ обнаруживали элементы антициклонического вращения. Прослеживание во времени положения области значений $\tau_{0.55} > 3$ свидетельствует, что область максимального задымления в дни с 5 по 9 августа совершила полный оборот вокруг московского мегаполиса, оставаясь на расстоянии 200–650 км от него.

В табл. 2 представлены отмечавшиеся над ЕТР максимальные значения $\tau_{0.55}$ при разрешении $1^\circ \times 1^\circ$, координаты их наблюдений, а также значения $\tau_{0.55}$ в пикселах, содержащих г. Москву ($55^\circ - 56^\circ$ с.ш., $37^\circ - 38^\circ$ в.д.), г. Звенигород ($55^\circ - 56^\circ$ с.ш., $36^\circ - 37^\circ$ в.д.), и средние по ЕТР значения $\tau_{0.55}$. Наибольшее среднесуточное значение $\tau_{0.55} = 4.86$ отмечалось 7 июля примерно в 250 км к югу от Москвы. Существенно, что г. Москва избежала максимально возможного уровня задымления. Из таблицы следует, что в дни с 5 по 9 августа экстремальные среднесуточные значения $\tau_{0.55}$ над ЕТР в 1.5–3 раза превышали среднесуточные значения АОТ, наблюдавшиеся над московским мегаполисом. Миграция дымового пятна на территорию столичного региона привела бы к заметно более тяжелым последствиям для здоровья населения. Вместе с тем столичный регион, долгое время находившийся вблизи центра антициклона (характеризующегося слабыми ветрами) и вблизи очагов массовых пожаров, был подвержен более продолжительному задымлению по сравнению с каким-либо периферийным регионом ЕТР, где задымление хоть и могло быть сильным, но было более кратковременным. Распределение АОТ 6 августа объясняется, очевидно, тем, что в этот день центр антициклонического вращения отмечался над центральным кластером пожаров. Вследствие ослабления процессов пере-

носа дымовой аэрозоль накапливался вблизи источников дыма, поэтому абсолютный максимум АОТ 6 августа отмечался непосредственно над областью массовых пожаров.

Будучи квазистационарным, барическое образование испытывало определенные изменения. Анализ полей ветра на рис. 2 свидетельствует, что 5–7 августа отмечалась миграция центра антициклона с востока на запад, а 8–9 августа – с запада на восток; она сопровождалась соответствующей миграцией областей высоких значений АОТ. Циркуляция в области блокирующего антициклона характеризовалась заметной асимметрией. Над юго-западной и западной частями региона отмечалась конвергенция воздушных потоков. Как следствие, скорость ветрового потока в тыловой части антициклона возрастала с юга на север. В передней части антициклона в целом отмечалась обратная ситуация, и здесь скорость потока убывала с севера на юг. Скорость результирующего ветра над северной периферией ЕТР достигала 14 м/с и более чем в 3 раза превосходила скорость ветра над южной периферией ЕТР (см. также рис. 4а). Поле ветра претерпевало заметные изменения от дня ко дню. 5–6 августа над восточной частью ЕТР динамическая картина была размытой, тогда как дни 7, 8 и 9 августа характеризовались резким усилением ветра в передней части антициклона и формированием над ЕТР замкнутой антициклонической ячейки. Уменьшение выноса дыма за пределы региона привело к росту среднего регионального значения АОТ и достижению им 9 августа абсолютного максимума, составившего 1.16.

Радиационные эффекты дымового аэрозоля

Помимо негативного экологического воздействия, присутствие в воздухе дымового аэрозоля меняет радиационный и тепловой баланс атмосферы и подстилающей поверхности. Для решения многих задач теории климата большой интерес представляют региональные и пространственно-

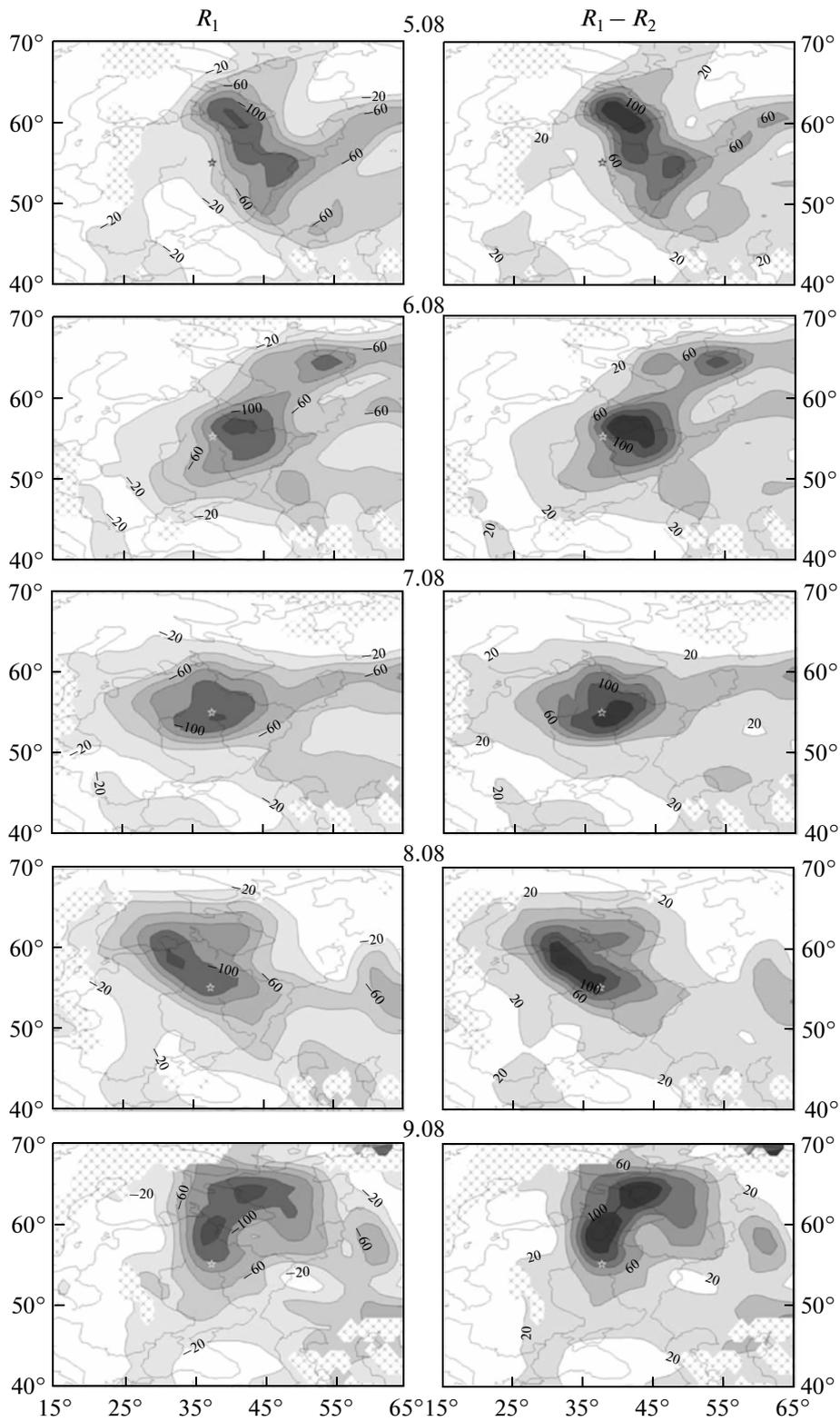


Рис. 3. Слева – АРФ дымового аэрозоля на верхней границе атмосферы; справа – разность АРФ на верхней и на нижней границах атмосферы. Распределения сглажены скользящим матричным средним $3^\circ \times 5^\circ$. Единицы измерения $\text{Вт}/\text{м}^2$. Сверху вниз показаны дни с 5 по 9 августа 2010 г.

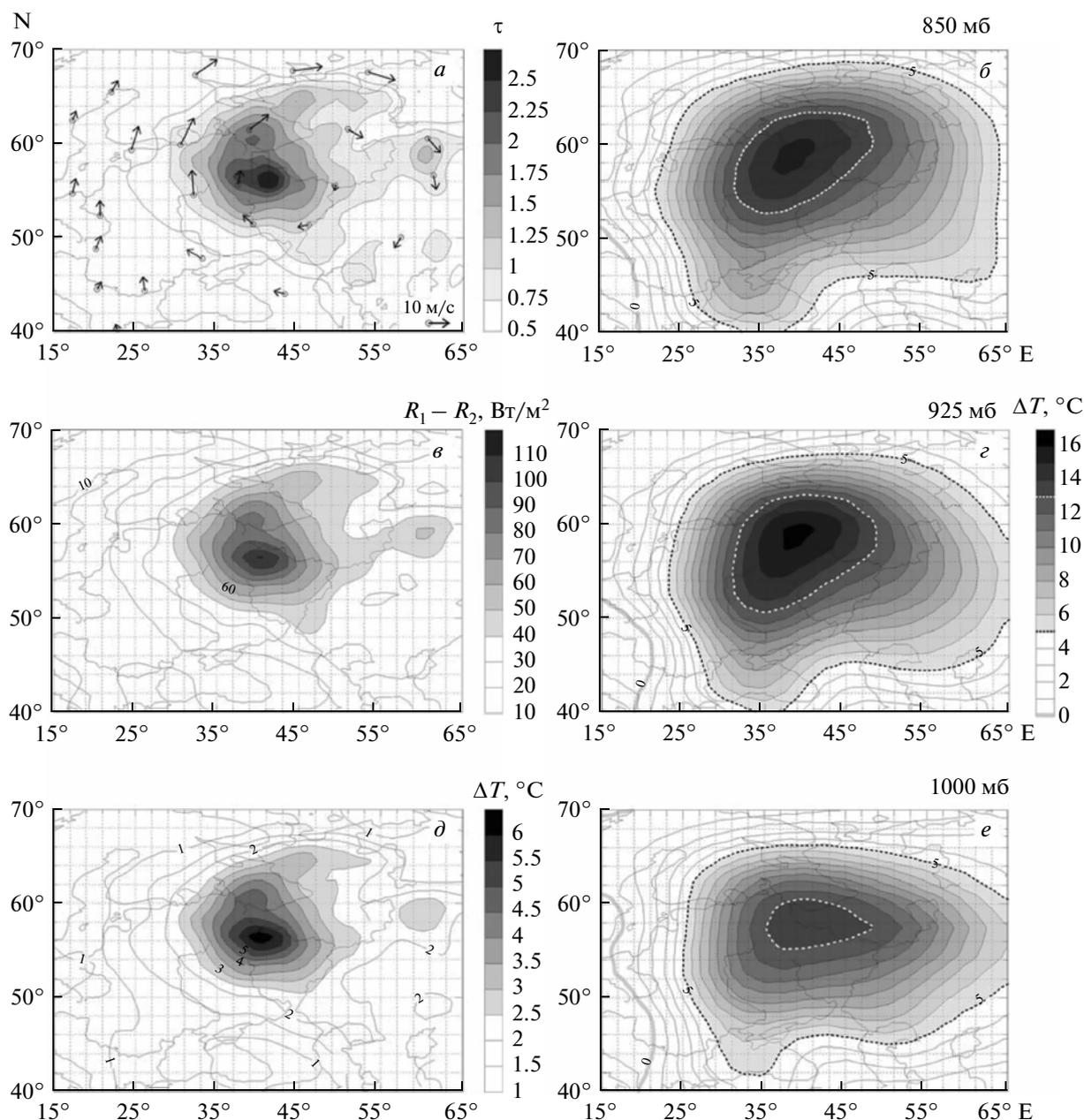


Рис. 4. Слева – пространственные распределения: *a* – осредненных в период 5–9 августа 2010 г. значений АОТ (стрелками показаны векторы результирующего ветра на уровне 700 мб); *б* – разностей АРФ на верхней и на нижней границах атмосферы; *д* – изменений температуры воздуха за 10 ч вследствие нагрева коротковолновой солнечной радиацией 500-м слоя дымового аэрозоля, пространственное распределение АОТ которого соответствует рис. 4а. Справа – *б*, *г*, *е* – аномалии температуры воздуха на уровнях (сверху вниз) 850, 925 и 1000 мб в период 5–9 августа 2010.

распределенные радиационные эффекты дымов. Следует отметить, что вследствие незначительности облачного покрытия небосвода в период массовых пожаров 2010 г. косвенные радиационные эффекты дымов были несущественными по сравнению с их прямыми радиационными эффектами. Очевидно также, что изменения АОТ в период пожаров отражали главным образом изменение концентрации в воздухе частиц дымового аэрозоля.

Влияние аэрозоля на радиационный режим атмосферы оценивается по величине АРФ на верхней (R_1) и нижней (R_2) границах атмосферы. Величины АРФ зависят от зенитного угла Солнца, аэрозольных оптических характеристик (главным образом от АОТ и вероятности выживания кванта), а также от содержания водяного пара и отражательных свойств подстилающей поверхности. Мерой АРФ является изменение радиационного

баланса при наличии в воздухе частиц аэрозоля и в их отсутствие. Радиационный баланс определяется как разность потоков приходящей (к слою) и уходящей (из слоя) радиации. Из-за относительно слабого влияния дымового аэрозоля на потоки длинноволновой радиации ниже приводятся оценки только коротковолнового АРФ. Расчеты АРФ основаны на решении уравнения переноса радиации в плоско-параллельной атмосфере с учетом рассеяния и поглощения солнечной радиации аэрозолями, молекулярного рассеяния, а также поглощения радиации атмосферными газами (H_2O , CO_2 , O_2 , O_3). Оптические характеристики аэрозоля в толще атмосферы задаются спектрально зависимыми величинами АОТ, альбедо однократного рассеяния и индикатрисы рассеяния. Используются также данные наблюдений оптических характеристик аэрозоля в приземном слое воздуха и разнородная аэрологическая информация.

В работе (Горчакова, Мохов, 2012) приведены численные оценки R_1 и R_2 в период пожаров 2010 г. Для расчетов АРФ использовались наблюдения радиационных и оптических характеристик аэрозоля на ЗНС летом 2010 г. Согласно результатам этой работы, зависимость R_2 от $\tau_{0.55}$ в безоблачной атмосфере можно аппроксимировать степенной функцией вида

$$R_2 = R_0 \tau^{0.83}, \quad (1)$$

где $\ln R_0 = 4.64$. Локальные оценки коротковолнового АРФ на верхней границе атмосферы в период пожаров 2010 г. приведены в работе (Chubarova et al., 2012). Там же представлены графики зависимостей R_1 от $\tau_{0.50}$ в июле и августе в годы массовых пожаров (2002 и 2010) и в годы их отсутствия (2001, 2003–2009). Зависимости R_1 от $\tau_{0.50}$ достаточно точно могут быть аппроксимированы функцией

$$R_1 = -0.748\tau_{0.50}^3 + 11.54\tau_{0.50}^2 - 69.47\tau. \quad (2)$$

Погрешность аппроксимации (2) определяется главным образом разбросом данных R_1 при фиксированном τ , который не превышает ± 15 Вт/м². Поскольку в задымленной атмосфере столичного региона летом 2010 г. значения $\tau_{0.55}^{MODIS}$ были близки к значениям $\tau_{0.50}^{CIMEL}$ (рис. 1а, 1б), в качестве τ в (2) могут быть использованы данные $\tau_{0.55}^{MODIS}$. Применение соотношений (1) и (2) к данным аэрокосмического мониторинга АОТ позволяет восстановить картину распределения радиационных эффектов дымового аэрозоля над ЕТР в период пожаров 2010 г.

Пространственные распределения R_1 в период экстремального задымления ЕТР (с 5 по 9 августа) представлены на рис. 4 слева. Справа на рис. 4 показаны распределения разностей $R_1 - R_2$. Величины различий АРФ на верхней и нижней границах

атмосферы характеризуют интенсивность нагрева атмосферы. Из сопоставления соответствующих распределений R_1 и $R_1 - R_2$ следует, что величины R_2 (как и величины R_1) были отрицательными, однако существенно превосходили R_1 (по модулю). Таким образом, в коротковолновой части солнечного спектра присутствие в воздухе дымового аэрозоля приводило к выхолаживанию земной поверхности и системы земная поверхность–атмосфера. Распределения R_1 и $R_1 - R_2$ на рис. 4 качественно подобны соответствующим распределениям АОТ и характеризуются значительными пространственными неоднородностями. Расчеты показывают, что 7 августа локальные меридиональные градиенты R_1 ($R_1 - R_2$) на севере и на юге ЕТР достигали соответственно величин 39 и -50 (-30 и 50) Вт м⁻²/100 км, тогда как 9 августа локальные зональные градиенты R_1 и $R_1 - R_2$ достигали величин -108 и 127 Вт м⁻²/100 км соответственно.

Выделяя общие закономерности пространственных распределений, матричное сглаживание данных на рис. 4 уменьшает величины локальных максимумов R_1 ($R_1 - R_2$) на 11–15 (27–40)% соответственно. Величины R_1 и $R_1 - R_2$ для экстремальных значений АОТ, наблюдавшихся над ЕТР в период с 5–9 августа (в пространственном разрешении $1^\circ \times 1^\circ$), а также величины R_1 и $R_1 - R_2$ для средних региональных значений АОТ, рассчитанных для этих же дней, приведены в табл. 2.

Оценки температурных эффектов задымления

Большие положительные величины разностей АРФ на нижней и верхней границах атмосферы свидетельствуют о нагреве слоя дымового аэрозоля коротковолновой солнечной радиацией. Дополнительный приток тепла в столбе задымленной атмосферы с площадью сечения S за время Δt равен

$$\Delta Q = (R_1 - R_2)S\Delta t. \quad (3)$$

Практически весь приток тепла расходуется на нагрев объема воздуха $V = SH$ в слое задымления толщиной H . Приобретенное слоем воздуха тепло связано с изменением температуры воздуха соотношением

$$\Delta Q = \rho C_p V \Delta T, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха (1.25 кг/м³); C_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении (1005 Дж кг/град); ΔT – прирост температуры воздуха за время Δt . Приравнявая правые части (1) и (2), можно получить соотношение для оценки температурных эффектов задымления

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{R_1 - R_2}{\rho C_p H}. \quad (5)$$

Средние региональные значения АОТ в период с 5 по 9 августа 2010 г. варьировали в пределах 0.98–1.16. При $\tau_{0.55} = 1$ разность $R_1 - R_2$ составляет примерно 45 Вт/м², а скорость роста температуры $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ за счет поглощения коротковолновой солнечной радиации в задымленном слое толщиной 500 (1000) м составляет около 0.26 (0.13)°С/час. Максимальные величины $\tau_{0.55}$ (в пространственном разрешении 1° × 1°) в период экстремального задымления превышали 4.0 (табл. 2). Скорость роста температуры в таких условиях достигает 1.1°С/час.

На рис. 4а представлено пространственное распределение средних величин АОТ в период с 5 по 9 августа 2010 г. На этом же рисунке показаны векторы среднего (результатирующего) ветра в первую декаду августа на уровне 700 мб в местах расположения 25 аэрологических станций (см. также табл. 1). Из рисунка видно, что область максимальных значений АОТ располагалась вблизи центра антициклонического вращения (на уровне 700 мб). Следует отметить, что эта особенность распределения АОТ объясняется не только более интенсивным задымлением воздуха вблизи располагавшегося неподалеку центрального кластера пожаров, но и осреднением во времени пространственных неоднородностей поля АОТ, характеризовавшихся вращательной динамикой. Рисунок 4а свидетельствует, что среднее пространственное распределение АОТ над ЕТР в период экстремального задымления определялось главным образом полем ветра блокирующего антициклона. На рис. 4в показано пространственное распределение $R_1 - R_2$, соответствующее среднему пространственному распределению АОТ, а на рис. 4д – изменение в течение 10-часового светового дня температуры дымового слоя толщиной 500 м, соответствующее данному распределению $R_1 - R_2$. Из рисунка видно, что термическое воздействие задымления, отражая распределение АОТ и $R_1 - R_2$, характеризуется существенной пространственной неоднородностью. Максимальные величины нагрева (более 6°С/10 час) отмечаются в центральной части ЕТР, тогда как на периферии ЕТР величины температурных эффектов уменьшаются в 3–4 раза. Очевидно, что пространственные неоднородности термического воздействия задымления могли приводить к формированию соответствующих пространственных неоднородностей температуры воздуха.

На рис. 4б, 4г, 4е показаны рассчитанные на основании данных реанализа средние аномалии среднесуточной температуры воздуха (ΔT) на уровнях 1000, 925 и 850 мб в эти дни. Аномалии рассчитывались как отклонения средних значений локальных температур в период с 5 по 9 августа 2010 г. от средних значений локальных температур в соответствующие периоды 2000–2009 гг.

На всех рассматриваемых уровнях в пространственных распределениях аномалий температуры отмечаются области высоких значений аномалий, центрированных вблизи максимумов пространственных распределений АОТ, $R_1 - R_2$ и $\frac{\Delta T}{\Delta t}$.

Своей максимальной величины (16.2°С) температурные аномалии достигают на уровне 925 мб (~800 м), тогда как на уровнях 1000, 850 и 700 мб их значения не превышают 13.8, 15.2 и 8.2°С соответственно. Сравнительный анализ рис. 4б, 4г, 4е свидетельствует, что в области сильных аномалий ($\Delta T \geq 9^\circ\text{C}$) изолинии одинакового номинала оконтуривают наибольшую площадь именно на уровне 925 мб, тогда как в области умеренных аномалий ($0 \leq \Delta T < 9^\circ\text{C}$) – на уровне 850 мб. Расчеты, в частности, показывают, что площади областей, охватываемых аномалиями температуры, превышающими 13°С на уровнях 1000, 925 и 850 мб, составляют соответственно 0.31, 1.03 и 0.83 млн. км². Таким образом, высотная зависимость аномалий температуры (а также их пространственная структура) согласуется с тем фактом, что присутствие в воздухе дымового аэрозоля приводит к понижению температуры воздуха приземного слоя и разогреву вышележащих слоев атмосферы.

Отмеченные выше особенности пространственных распределений величин $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ и ΔT позволяют предположить, что температурные аномалии воздуха пограничного слоя атмосферы в период 5–9 августа 2010 г. могли быть частично обусловлены радиационными эффектами дымового аэрозоля. Вместе с тем сравнение рис. 4б, 4г, 4е с рис. 4д свидетельствует, что величины аномалий температуры воздуха были значительно больше величин изменений температуры, которые в данном месте могли быть обусловлены радиационным нагревом задымленного воздуха. Пространственное распределение температурных аномалий характеризуется определенным сходством с полем горизонтального ветра, в частности, максимумы аномалий отмечаются вблизи центра антициклонического вращения, тогда как высотная протяженность барического образования свидетельствует о развитости в его системе вертикальных движений воздуха. Сильные положительные аномалии температуры в пограничном слое атмосферы 5–9 августа 2010 г. могли быть связаны с усилением вертикальных (нисходящих) движений воздуха внутри блокирующего антициклона в этот период. Адиабатическое опускание воздушной массы на 1 км связано с повышением ее температуры на 6–10°С.

Совместный анализ профилей результирующего ветра и пространственного распределения аномалий температуры показывает, что положи-

тельный меридиональный градиент аномалий температуры в пограничном слое атмосферы над югом ЕТР сопровождался усилением с высотой восточного ветра, тогда как отрицательный меридиональный градиент аномалий температуры над северной частью ЕТР — усилением с высотой западного ветра. Подобная связь температуры и ветра характерна для механизма термического ветра (Хргиан, 1969). В соответствии с уравнениями термического ветра развитие положительной (отрицательной) аномалии температуры в центре антициклона должно сопровождаться соответственно усилением (ослаблением) антициклонической циркуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С привлечением данных наблюдений АОТ ($\lambda = 0.55$ мкм) спутниковыми приборами MODIS (Aqua и Terra), полей объективного анализа метеорологических элементов Гидрометцентра России, NCEP/NCAR-реанализа и данных сетевого аэрологического радиозондирования проведено исследование эволюции задымления ЕТР в период массовых пожаров лесов и торфяников летом 2010 г.

Полученные результаты показывают, что в период сильного задымления центральной части ЕТР пространственно-временная изменчивость АОТ была тесно связана с особенностями региональной атмосферной циркуляции, обусловленной блокирующим антициклоном. Несмотря на распространенность пожаров по всей территории региона, в распределениях АОТ изо дня в день отмечалась локализованная область высоких значений АОТ, которая обнаруживала элементы антициклонического вращения. В период с 5 по 9 августа (за четыре дня) область задымления, характеризующаяся средненебными значениями $\tau_{0.55} \geq 3$, совершила полный антициклонический оборот вокруг г. Москвы, оставаясь на расстоянии 200–650 км от него. Московскому мегаполису, таким образом, удалось избежать экстремального задымления и его последствий. В случае миграции этой области на территорию столичного региона средненебные значения АОТ могли быть в 1.5–3 раза выше отмечавшихся в этот период над мегаполисом.

С использованием аналитических аппроксимаций зависимостей коротковолнового АРФ от АОТ сделаны оценки величин среднего регионального радиационного форсинга дымового аэрозоля на верхней и нижней границах атмосферы. Присутствие в воздухе дымового аэрозоля приводило к заметному охлаждению приповерхностного слоя атмосферы и нагреву толщи атмосферного воздуха над обширной территорией. Результаты расчетов показали, что в период 5–9 августа величины среднего регионального АРФ на верхней (нижней) границе атмосферы варьировали в пределах от –66 до

–58 (от –117 до –102) Вт/м², достигнув максимума 9 августа. Максимальные величины локального АРФ отмечались 7 августа на юге Тульской области (наземный пиксел 53°–54° с.ш. и 37°–38° в.д.) и составили –151 Вт/м² и –385 Вт/м² на верхней и нижней границах атмосферы соответственно. Распределения АРФ на верхней и на нижней границах атмосферы по территории региона характеризовались значительными пространственными неоднородностями.

Получены количественные оценки локальных, а также пространственно-распределенных температурных эффектов дымового аэрозоля. Скорость роста температуры в слое задымленного воздуха 5–9 августа 2010 г. составляла в среднем по ЕТР 0.13–0.26°С/час, а в местах экстремального задымления достигала 1.1°С/час. Среднее для указанного выше периода термическое воздействие задымления характеризовалось существенной пространственной неоднородностью. Максимальные величины нагрева (более 6°С/10 час) отмечались над центральной частью ЕТР. На периферии региона величины температурных эффектов уменьшались в 3–4 раза.

Анализ полей температуры по данным NCEP/NCAR-реанализа показал, что в области блокирующего антициклона аномалии температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в период с 5 по 9 августа 2010 г. достигали 16°С, значительно превышая величины типичных летних аномалий. Высотная зависимость температурных аномалий свидетельствует об относительном охлаждении приповерхностного слоя воздуха и разогреве воздуха лежащих выше слоев нижней тропосферы в период экстремального задымления ЕТР, а пространственные распределения аномалий температуры согласуются с пространственным распределением приращения температуры в пограничном слое атмосферы, обусловленным радиационным нагревом задымленного воздуха и распределением АОТ в этот период. Эти факты говорят о том, что аномалии температуры воздуха в период задымления могли быть частично обусловлены радиационными эффектами дымового аэрозоля. Вместе с тем расчеты термических эффектов дымового аэрозоля показывают, что величины аномалий температуры воздуха были значительно больше величин изменений температуры, которые в данном месте могли быть обусловлены радиационным нагревом задымленного воздуха. Очевидно, что в период с 5 по 9 августа 2010 г. средние пространственные распределения АОТ, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ и аномалий температуры отражали главным образом действие одного и того же динамического механизма и были связаны с системой горизонтальных и вертикальных движений воздуха блокирующего антициклона.

Проведена валидация данных наблюдений АОТ, полученных с MODIS данными АОТ высокоточного солнечно-небесного фотометра CIMEL станции Звенигород сети AERONET. Результаты сравнения показали, что в период массовых пожаров на ЕТР в июле–августе 2010 г. наблюдаемые приборами MODIS и CIMEL локальные величины АОТ были согласованы между собой.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 11-05-00704, № 11-05-01144 и № 10-05-01019.

Авторы благодарят И.И. Мохова и И.А. Горчакову за обсуждение работы и полезные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Пономарева Т.Я., Соколов А.В.* Московская дымная мгла 2010 г. Экстремальное аэрозольное и газовое загрязнение воздушного бассейна Московского региона // Оптика атмосферы и океана. 2011а. Т. 24. № 6. С. 452–458.
- Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г., Чубарова Н.Е., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Лезина Е.А., Задорожная О.С.* Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля задымленной атмосферы московского региона в 2010 году // Докл. РАН. 2011б. Т. 437. № 5. С. 686–690.
- Горчакова И.А., Мохов И.И.* Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 558–565.
- Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Милев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю.* Загрязнение воздуха на европейской части России и Украине в условиях жаркого лета 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 757–766.
- Исаков А.А., Аникин П.П., Елохов А.С., Курбатов Г.А.* О характеристиках дымов лесных и торфяных пожаров в Центральной России летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 478–482.
- Мохов И.И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих измерений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 709–716.
- Ситнов С.А.* Спутниковый мониторинг содержаний газовых примесей атмосферы и оптических характеристик атмосферного аэрозоля над европейской территорией России в апреле–сентябре 2010 года // Докл. РАН. 2011а. Т. 437. № 1. С. 102–107.
- Ситнов С.А.* Оптическая толща аэрозоля и общее содержание оксида углерода над европейской территорией России в период массовых пожаров лета 2010 г.: взаимосвязь изменчивости загрязнений и метеорологических величин // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011б. Т. 47. № 6. С. 774–789.
- Ситнов С.А.* Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 года // Оптика атмосферы и океана. 2011в. Т. 24. № 7. С. 572–581.
- Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Карпов А.В.* Эволюция и радиационные эффекты экстремального задымления европейской России летом 2010 года // Докл. РАН. 2012. Т. 446. № 5. С. 561–567.
- Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 648 с.
- Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А.* Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмоскovie // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 774–789.
- Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е.Н.* Блокирование: условия лета 2010 года в контексте современных знаний. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. М.: Триада, 2010. С. 6–21.
- Chubarova N., Nezval' Y., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I.* Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 557–568.
- Davies D.K., Ilavajhala S., Wong M.M., Justice C.O.* Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2009. V. 47. № 1. P. 72–79.
- Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Rem. Sens. Env. 2003. V. 87. P. 273–282.
- Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima N., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Env. 1998. V. 66. P. 1–16.
- Hubanks P.A., King M.D., Platnick S., Pincus R.* MODIS Atmosphere L3 Gridded Product // Algorithm Theoretical Basis Doc. № ATBD-MOD-30. 2008.
- Ichoku C., Chu D.A., Mattoo S., Kaufman Y.J., Remer L.A., Tanré D., Slutsker I., Holben B.N.* A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 12. doi:10.1029/2001GL013206.
- Kalnay E.T., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
- Kaufman Y.J., Tanré D., Gordon H.R., Vermote E.F., Chu A., Holben B.N.* Operational remote sensing of aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D14. P. 17051–17067.

Levy R.C., Remer L.A., Mattoo S., Vermote E.F, Kaufman Y.J. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № D13211.

Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H. MODIS, advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1989. V. 27. P. 145–153.

van Donkelaar A., Martin R.V., Levy R.C., da Silva M.A., Krzyzanowski M., Chubarova N.E., Semutnikova E.G., Cohen A.J. Satellite-based estimates of ground-level fine particle matter during extreme events: A case study of the Moscow fires in 2010 // *Atmos. Environ.* 2011. V. 45. P. 6225–6232.

Witte J.C., Douglass A.R., da Silva A., Torres O., Levy R., Duncan B.N. NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. № 15. P. 9287–9301.

An Influence of Atmospheric Circulation on the Evolution and Radiative Forcing of Smoke During Wildfires over European Russia in Summer 2010

S. A. Sitnov¹, G. I. Gorchakov¹, M. A. Sviridenkov¹, V. M. Kopeikin¹,
T. Ya. Ponomareva², A. V. Karpov¹

¹ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Hydrometeorological Centre of Russia, Moscow*

Using observations of aerosol optical depth (AOD) from MODIS instruments (Aqua and Terra satellites), the objective analysis of meteorological fields, NCEP/NCAR reanalysis and aerological data, the study of smoke plume evolution over European Russia (ER) during the forest and peat bog fires in the summer of 2010 is presented. The relation of structural inhomogeneities of AOD field with the regional atmospheric circulation is found. It is shown that in the period from 5 to 9 of August, the maximum of smoke pollution did complete turn around Moscow, while remaining at a distance of 200–650 km from the megacity. We present estimations of regionally averaged shortwave aerosol radiative forcing (ARF) at the top and the bottom of the atmosphere in the period of an extreme smoke event. Also we in the first time present the spatial distribution of ARF as well as estimates of local and spatially distributed thermal effects of smoke aerosol during the wildfires of 2010 in ER. It is shown that in the period August 5–9, the spatial distribution of AOD as well as thermal effects of smoke aerosols have been agreed with the spatial distributions of temperature anomalies which manifest themselves in the atmospheric boundary layer in this period. During the wildfires the validation of AOD obtained by MODIS instrument with AOD obtained by the CIMEL sun photometer operated at the Zvenigorod AERONET station was performed.

Keywords: wildfires, aerosol optical depth, smoke plume, aerosol radiative effects, aerosol thermal effects, MODIS, validation