

УДК 551.521.3;551.510.42

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ФАКТОРА МУТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОГО ЛЕТА 2010 г.

© 2011 г. И. Н. Плахина, Н. В. Панкратова, Е. Л. Махоткина

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

*119017 Москва, Пыжевский пер., 3*

*E-mail: inna@ifaran.ru, E-mail: n\_pankratova@list.ru*

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова*

*194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7*

*E-mail: makhotk@main.mgo.rssi.ru*

Поступила в редакцию 25.03.2011 г., после доработки 28.04.2011 г.

Проанализированы пространственные вариации фактора мутности атмосферы  $T$ , полученные интерполяцией результатов наземных актинометрических измерений на территории ( $40^{\circ}$ – $70^{\circ}$  N;  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$  E) летом 2010 г. Аномальная жара и связанные с ней пожары лета 2010 г. изменили средние значения мутности атмосферы и характер ее пространственных вариаций. В результате в июле наблюдается “язык” повышенных значений фактора мутности в направлении с юга на север, а в августе оформляется замкнутая область аномально высокого  $T$  над территорией ( $48^{\circ}$ – $55^{\circ}$  N;  $37^{\circ}$ – $42^{\circ}$  E), находящаяся к югу от Москвы и частично захватывающая московский регион. Эта картина – результат действия блокинга, препятствовавшего проникновению воздушных масс с запада и создававшего замкнутую циркуляцию воздуха на европейской территории России (ЕТР).

**Ключевые слова:** фактор мутности, атмосферная прозрачность, пространственные вариации, пожары, блокирующий антициклон.

В статье представлены пространственные вариации фактора мутности атмосферы ( $T$ ) по данным наземных измерений на 18-ти станциях актинометрической сети на территории ( $40^{\circ}$ – $70^{\circ}$  N;  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$  E) летом 2010 г. Ранее нами было показано [1–3], что пространственное распределение аэрозольной оптической толщины (АОТ) над территорией России, усредненное за более чем 30-летний (1976–2007 гг.) период, соответствует модели глобального распределения атмосферного аэрозоля над Евразией и результатам спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ), представленным в 3-м и 4-м докладах IPCC [4, 5], и представляет собой картину уменьшения аэрозольной мутности с юго-запада на северо-восток. Очевидно, что события лета 2010 г. (аномальная жара и связанные с ней лесные и торфяные пожары) изменили как средние значения мутности атмосферы, так и характер ее пространственных вариаций. Поэтому наши оценки представляют интерес при анализе [6] ситуации лета 2010 г. на европейской территории России (ЕТР).

Интегральная прозрачность атмосферы

$$P = (S/S_0)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $S$  – прямая солнечная радиация на нормальную к лучу поверхность, приведенная к среднему расстоянию между Землей и Солнцем и к высоте Солнца  $30^{\circ}$ ;  $S_0$  – солнечная постоянная  $1.367$  кВт/м<sup>2</sup>.

Фактор мутности Линке однозначно связан с  $P$ :

$$T = \lg P / \lg P_i = \\ = (\lg S_0 - \lg S) / (\lg S_0 - \lg S_i) = -\lg P / 0.0433, \quad (2)$$

где  $S_0 = 1.367$  кВт/м<sup>2</sup>,  $S_i$  – значение прямой солнечной радиации у подстилающей поверхности в идеальной атмосфере при оптической массе атмосферы  $m = 2$  (высота Солнца  $30^{\circ}$ ). Величина  $T$  показывает, во сколько раз ослабление солнечной радиации в реальной атмосфере больше, чем в идеальной [3, 7, 8]. Очевидно, что в условиях аномальной жары лета 2010 г. и пожаров на ЕТР вариации фактора мутности атмосферы определялись преимущественно аэрозольной составляющей атмосферы, обусловленной поступлением аэрозоля от массовых торфяных и лесных пожаров.

В табл. 1 указано расположение станций актинометрической сети ЕТР [9], данные которых ис-

**Таблица 1.** Координаты актинометрических станций

Широта	Долгота	Название
67.0	51.2	Коткино
66.7	34.3	Умба
64.6	40.5	Архангельск
64.4	55.2	Ираэль
62.2	50.4	Усть-Вымь
61.5	39.0	Каргополь
60.3	30.3	Санкт-Петербург
58.8	56.2	Чермоз
58.0	33.3	Валдай
57.6	44.9	Нолинск
51.9	43.7	Ростоши
51.6	38.4	Нижедевицк
51.4	48.3	Ершов
51.1	40.7	Каменная Степь
47.7	42.1	Цимлянск
46.5	41.3	Гигант
45.1	39.0	Краснодар
43.5	39.8	Сочи

пользованы в работе. Средние многолетние (за “поствулканический” период 1994–2009 гг.) месячные величины  $T_{\text{post}}$  для летних месяцев и соответствующие месячные значения  $T_{2010}$  для 2010 г. представлены в табл. 2. Там же приведены максимальные среднемесячные значения  $T$  для летних месяцев а также относительная разница (%)  $D =$

$= (T_{2010} - T_{\text{post}})/T_{\text{post}}$ . Как видно, средние июньские и средние июльские  $T$  для 2010 г. и для “поствулканического” периода различаются соответственно на  $-6\%$  и на  $+4\%$  (для конкретных станций расхождения  $D$  варьируют от  $-28\%$  до  $+11\%$  от среднего значения для данной станции в июне и от  $-22\%$  до  $+25\%$  – в июле). Для августа  $D = (T_{2010} - T_{\text{post}})/T_{\text{post}}$  составляет  $14\%$  (для региона), а для отдельных станций изменяется от  $-11\%$  до  $+48\%$ .

Для летних месяцев 2010 г. также проведено осреднение значений  $T$  по декадам (10-ти дневным временным отрезкам) и выполнено сопоставление с многолетними среднемесячными (1994–2009 гг.) величинами  $T$ . Результаты сопоставления представлены в табл. 3 как для средних по региону, так и для максимумов. Из табл. 3 видно, что максимальные эффекты замутнения наблюдались в 3-й декаде июля и 1-й и 2-й декадах августа, что вполне соответствует уже представленной в печати и доложенной на совещании информации [6, 10, 11, 14]. Аномалии газового состава и аэрозольной оптической толщины атмосферы (по приземным измерениям и по данным спутникового мониторинга для лета 2010 г.) показывают, что с середины июня по середину августа центральная часть ЕТР находилась в условиях устойчивого блокирующего антициклона, который благоприятствовал накоплению газовых и аэрозольных компонентов в атмосфере, достигших своего максимального проявления в 1-й декаде августа.

Пространственные вариации  $T$  приведены на картах-схемах рис. 1. Для интерполяции данных станций (табл. 1) на весь рассматриваемый регион использованы возможности пакета MATLAB: оп-

**Таблица 2.** Средние многолетние (1994–2009 гг.) месячные значения фактора мутности  $T$  и соответствующие величины для лета 2010 г., а также максимальные (по региону) значения средних величин  $T$ 

Период	Месяц	Среднее значение (максимальное значение)	Превышение $D = (T_{2010} - T_{\text{post}})/T_{\text{post}}$	Стандартное отклонение в рядах среднемесячных значений для разных станций
1994–2009 гг.	июнь	3.0 (3.9)		13%
	июль	3.2 (4.2)		13%
	август	3.2 (4.3)		14%
2010 г.	июнь (165)	2.95 (4)	$-6\%$	18%
	июль (250)	3.42 (4.1)	$+4\%$	19%
	август (125)	3.73 (5.3)	$14\%$	21%

Примечание. В скобках 2-го столбца таблицы указано количество среднедневных значений  $T$ , использованных при осреднении.

**Таблица 3.** Превышение средних и максимальных (по региону) 10-ти дневных значений  $T$  для лета 2010 г. над многолетними значениями для “поствулканического” интервала 1994–2009 гг.:  $D_{\text{дек}} = (T_{\text{дек}} - T_{\text{мес}})/T_{\text{мес}}$  на ЕТР

Период	Числа месяца	$D_{\text{дек}} = (T_{\text{дек}} - T_{\text{мес}})/T_{\text{мес}}$ для средних значений по ЕТР	$D_{\text{дек}} = (T_{\text{дек}} - T_{\text{мес}})/T_{\text{мес}}$ для максимальных значений по ЕТР
2010 г., июнь	1–10	–8%	0%
	11–20	–6%	+14%
	21–30	–6%	+6%
2010 г., июль	1–10	–1%	–3%
	11–20	–5%	4%
	21–31	+17%	+27%
2010 г., август	1–10	+29%	+50%
	11–20	+16%	+121%
	21–31	–14%	–17%

ция создания равномерной сетки для рассматриваемого региона ЕТР, опция выполнения билинейной интерполяции (по горизонтали и вертикали) данных 18-ти станций на территорию ( $40^{\circ}$ – $70^{\circ}$  N;  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$  E), проектирование на сетку данных функции  $T = F(\varphi, \lambda)$ , где  $\varphi$  и  $\lambda$  – соответственно широта и долгота для каждой из точек наблюдения.

Пространственное распределение средних (для июня, июля, августа)  $T_{\text{post}}$  за “поствулканический” период соответствует результатам, полученным ранее [1] для средних многолетних значений АОТ. В этот период наблюдалось квазимонотонное убывание  $T_{\text{post}}$  с юго-запада на северо-восток, области локализации региональных тропосферных источников аэрозоля не видны, кроме Архангельска. На станции Архангельск средние значения  $T$  в июне–июле “поствулканического” промежутка времени повышены: наблюдается локальный (и/или региональный) источник аэрозольного поступления в атмосферу. Источник этот может быть обусловлен как частыми природными летними пожарами, так и антропогенным промышленным фактором в этой области РФ.

Для 2010 г. картина существенно иная. В июне пространственные изменения  $T$  близки к распределениям  $T_{\text{post}}$  с некоторым сдвигом областей максимальной прозрачности ( $T = 2$ – $2.5$ ) к северу при уменьшении средних для июня (табл. 2) по всему региону по сравнению с “поствулканическим” периодом. В июле происходит очевидное нарушение монотонности в убывании мутности в северо-восточном направлении, наблюдается “язык” повышенных значений фактора мутности в направлении с юга на север ( $T = 3.5$ – $4.0$ ). Нако-

нец, в августе оформляется очаг (замкнутая область) аномальной мутности атмосферы ( $T = 4.5$ – $5.5$ ) в области  $48^{\circ}$ – $55^{\circ}$  N и  $37^{\circ}$ – $42^{\circ}$  E, находящийся южнее Москвы и захватывающий московский регион своей периферией ( $T = 4.0$ – $4.5$ ). Эта картина – результат действия высокого блокирующего антициклона, который препятствовал проникновению воздушных масс с запада, обеспечивал замкнутую циркуляцию воздуха на ЕТР, способствуя росту температуры над ЕТР и быстрому увеличению площади лесных пожаров. Все это время аэрозоли, поступавшие в воздух от пожаров, накапливались в толще атмосферы. Этот процесс достиг своего максимального проявления в 1-й декаде августа. Картина пространственного распределения  $T$  для августа 2010 г., полученная нами по наземным измерениям потока прямой солнечной радиации, хорошо соответствует карте распределения АОТ на ЕТР (в области  $50^{\circ}$ – $65^{\circ}$  N;  $30^{\circ}$ – $55^{\circ}$  E,) для 1-й декады августа, представленной в [11].

Более детальная эволюция пространственных вариаций  $T$  для июня–июля 2010 г. (по 10-ти дневным периодам) приведена на рис. 2. Для августа месяца, когда мутность атмосферы была максимальной, построение таких пространственных распределений затрудняется неполнотой данных по сравнению с июнем и июлем. Однако из табл. 3 видно, как изменяются во времени аномалии средних  $T$  по сравнению многолетними данными, резко возрастая в 3-й декаде июля (с  $-5\%$  до  $+17\%$ ) и достигая максимального значения в 1-й декаде августа (29%). А в 3-й декаде августа наблюдается более резкий спад (с 16% до  $-14\%$ ).

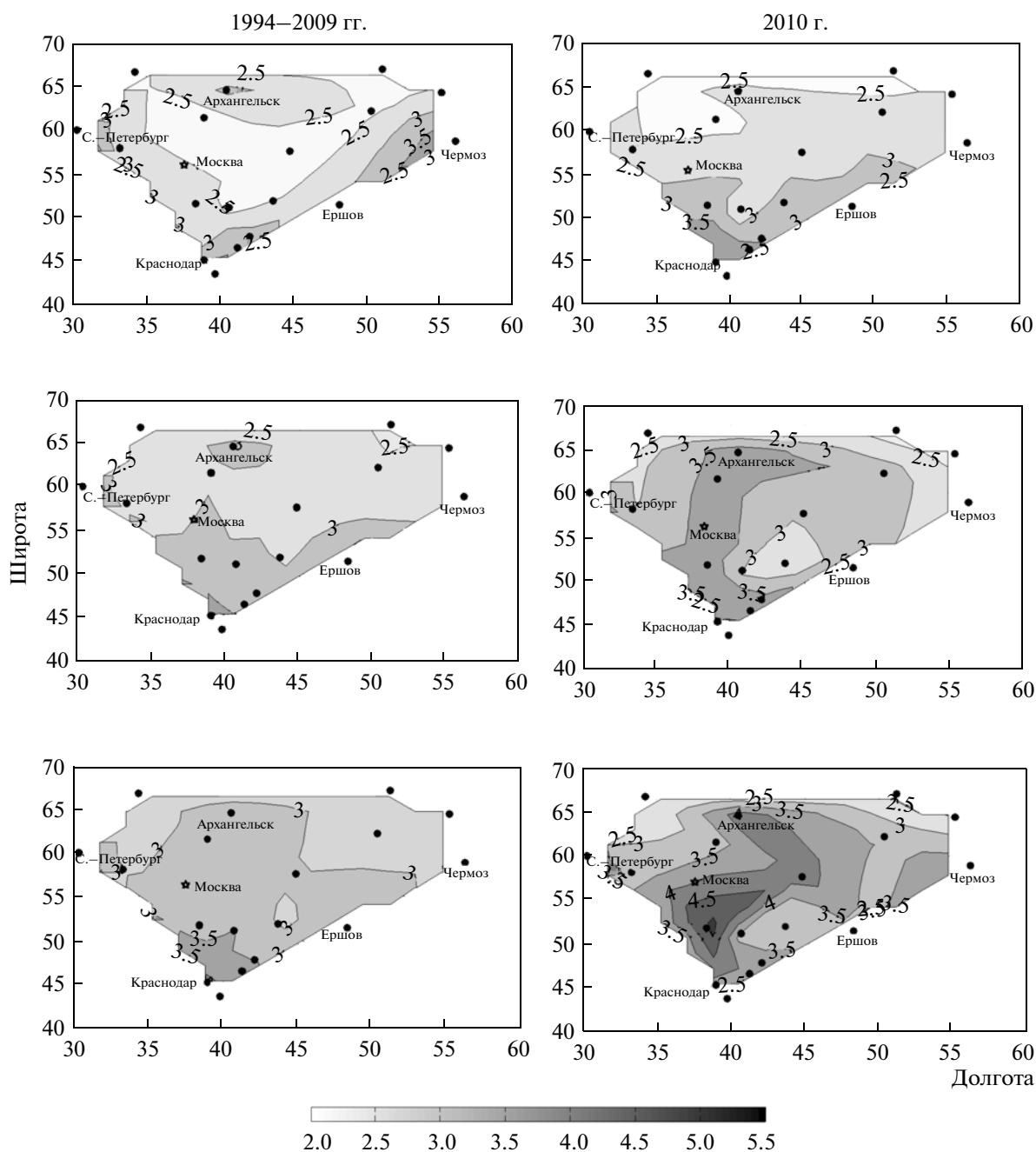
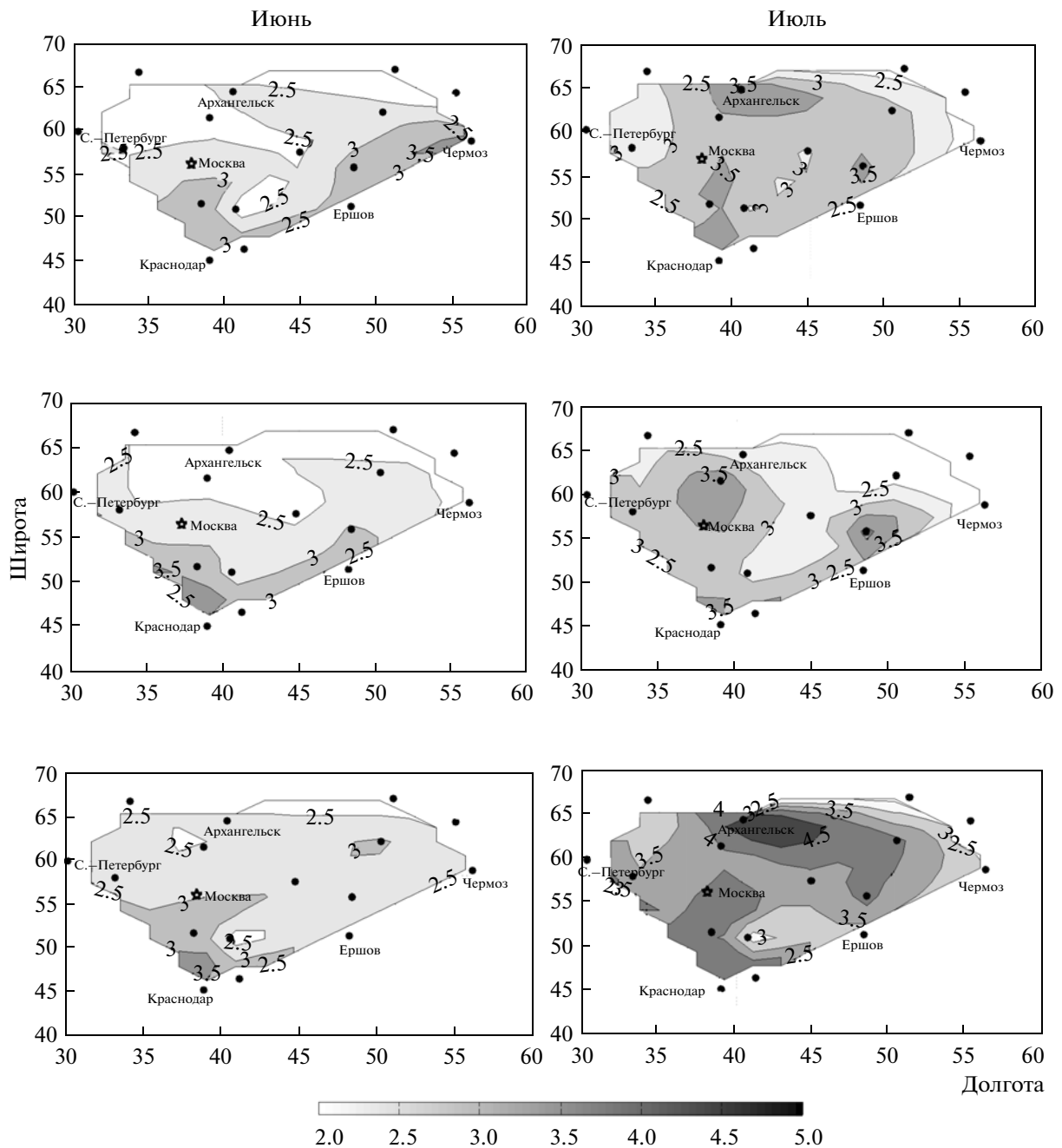


Рис. 1. Пространственное распределение средних значений фактора мутности  $T$  для июня, июля, августа (сверху вниз) за период 1994–2009 г. (слева) и для лета 2010 г. (справа).

Еще более очевидны процессы роста замутненности и ее последующего уменьшения в регионе по изменениям максимальных значений  $T$  для региона.

Для нескольких станций анализировалась взаимная согласованность наземных (фактор мутности  $T$ ) и спутниковых (АОТ) оценок среднесуточных значений в условиях высоких перепадов аэрозольной замутненности атмосферы аномальным

летом 2010 г. При анализе и оценке АОТ по данным спутника MODIS были использованы данные 3-го уровня для ячеек  $111 \times 63$  км [12–14]. Результаты согласования временных изменений двух сигналов приведены на рис. 3 для станции Нижнедевицк (с 03.06.2010 по 27.09.2010 г.). Получена вполне удовлетворительная корреляция  $R^2 = 0.8$ , при других сопоставлениях корреляция меньше. Причины расхождений очевидны: иска-



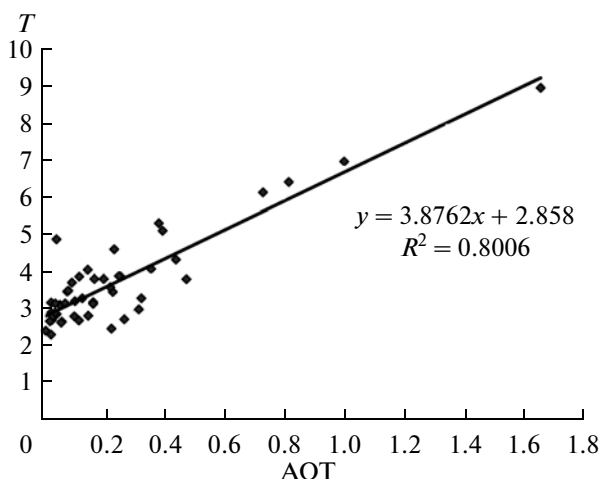
**Рис. 2.** Пространственное распределение средних 10-ти дневных величин фактора мутности  $T$  для летних месяцев (июнь, июль) 2010 г. Сверху вниз: 1–10, 11–21, 21–30 числа месяца.

жение наземного сигнала за счет попадания рассеянного света в приемник, искажение как спутникового, так и наземного сигнала за счет тонких облаков верхнего яруса.

Таким образом, в нашей работе выявлены особенности пространственных изменений фактора мутности атмосферы летом 2010 г. по сравнению с многолетними средними пространственными вариациями, проявившимися как в характере рас-

пределения, так и в величине эффекта аномалий фактора мутности.

В заключение авторы выражают благодарность С.А. Ситнову за помощь при сопоставлении данных спутникового и наземного определения параметров мутности атмосферы, а также А.А. Карпенко за составление программы по инвертированию цвета.



**Рис. 3.** Сравнение среднедневных величин АОТ, оцененных по спутниковым данным MODIS [11–13], и наземных измерений значений фактора мутности  $T$  для станции Нижнедевицк в период с 03.06.2010 по 27.09.2010 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-05- 01086).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плахина И.Н., Панкратова Н.В., Махоткина Е.Л. Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976–2006 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 489–500.
2. Плахина И.Н., Махоткина Е.Л., Панкратова Н.В. Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в последние 30 лет: сезонные изменения и многолетний ход // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 19–29.
3. Махоткина Е.Л., Плахина И.Н., Лукин А.Б. Некоторые особенности изменения мутности атмосферы на территории России в последней четверти 20 века // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 28–36.
4. IPCC Climate Change. Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Third Assessment Report Climate Change: The Physical Science Basis. [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/166.html](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/166.html) или Cambridge University Press, UK and New York. USA. 2001. 540 p.
5. IPCC. Climate Change Working Group I. Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report of Climate Change: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, UK and New York. USA. Ch. 2. 2007. P. 130–234.
6. Всероссийское совещание по проблеме состояния воздушного бассейна г. Москвы и Европейской территории России в экстремальных погодных условиях лета 2010, <http://www.ifaran.ru/messaging/forum/>.
7. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В. Прозрачность атмосферы за последние 50 лет и ее изменения на территории России. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 188 с.
8. Справочник эколого-климатических характеристик Москвы / Под ред. А.А. Исаева. Т. 2. М.: Изд-во географического факультета МГУ, 2006. 400 с.
9. Луцко Л.В., Махоткина Е.Л., Клеванцова В.А. Развитие наземных актинометрических наблюдений // Современные исследования Главной Геофизической обсерватории. Юбилейный сборник. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. С. 184–202.
10. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б. и др. Газовый состав атмосферного воздуха в г. Москве в экстремальных условиях лета 2010 г. // ДАН. 2011. В печати.
11. Ситнов С.А. Результаты спутникового мониторинга содержания газовых примесей атмосферы и оптических характеристик аэрозоля над европейской территорией России в апреле–сентябре 2010 года // Всероссийское совещание по проблеме состояния воздушного бассейна г. Москвы и европейской территории России в экстремальных погодных условиях лета 2010. С. 26–27. <http://www.ifaran.ru/messaging/forum/>.
12. Remer L.A., Kaufman Y.J., Tendre D. et al. MODIS aerosol algorithm, products, and validation // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62. № 4. P. 947–973.
13. Hubanks P.A., King M.D., Platnick S. et al. MODIS Atmosphere L3 Gridded Products // Algorithm Theoretical Basis Document № ATBD-MODIS-30m 2008.
14. Ситнов С.А. Спутниковый мониторинг содержания газовых примесей атмосферы и оптических характеристик атмосферного аэрозоля над европейской территорией России в апреле–сентябре 2010 г. // ДАН. 2011. Т. 437. № 1. С. 102–107.