

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.04

## Анализ недельной цикличности приземного аэрозоля и $\text{NO}_2$ на Звенигородской научной станции ИФА РАН

А.Н. Груздев, А.А. Исаков, А.С. Елохов\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 12.04.2012 г.

Приводятся результаты анализа недельной цикличности содержания двуокиси азота и массовой концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы на Звенигородской научной станции ИФА РАН. Недельные циклы аэрозоля и  $\text{NO}_2$ , которые были бы статистически значимы, не обнаружены ни в целом за 20 лет измерений, ни в отдельные сезоны или годы, за исключением недельного цикла массовой концентрации аэрозоля в 1996 г. с максимальными значениями концентрации, приходящимися на субботу, и минимальными значениями, приходящимися на среду–четверг. Для интерпретации полученных результатов привлекаются данные аэрологического зондирования в г. Долгопрудном близ Москвы.

*Ключевые слова:* аэрозоль, окислы азота,  $\text{NO}_2$ , недельный цикл; aerosol, nitrogen oxides,  $\text{NO}_2$ , weekly cycle.

### Введение

В научной литературе все чаще появляются сведения о том, что недельный ритм антропогенной активности порождает недельную цикличность концентраций аэрозоля и малых газовых примесей атмосферы в урбанизированных районах (напр., [1–6]). Предполагается, что недельные вариации аэрозоля воздействуют на облачность и тем самым на атмосферную циркуляцию [7–9]. В [10, 11] недельная цикличность была обнаружена на стратосферных высотах. Появление все новых результатов о недельной цикличности сопровождается дебатами об их достоверности [11–15]. В [10, 11] указано, в частности, что использование недостаточно адекватных методов анализа недельной цикличности и оценок ее статистической значимости может приводить к ее фиктивному обнаружению.

Москва и ее плотно заселенные окрестности служат значительным источником загрязнения атмосферы. Индикатором загрязнения могут служить окислы азота и, в частности, двуокись азота  $\text{NO}_2$ . Содержание  $\text{NO}_2$  регулярно измеряется с 1990 г. на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы РАН. Там же выполняются регулярные измерения массовой концентрации приземного аэрозоля. В [16] мы доложили о некоторых результатах анализа недельной цикличности аэрозоля и  $\text{NO}_2$  на ЗНС. Более обстоятельное изложение представлено в настоящей статье.

### Использованные данные и методы анализа

Звенигородская научная станция расположена в сельской местности на расстоянии около 40 км к западу от Московской кольцевой автодороги. Станция входит в состав Международной сети для обнаружения изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Измерения содержания  $\text{NO}_2$  выполняются по рассеянной из зенита солнечной радиации в спектральном диапазоне 435–450 нм с помощью монохроматора МДР-23. Измерения проводятся во время утренних и вечерних сумерек при зенитных углах Солнца 84–96°. По измеренным спектрам пропускания рассчитываются значения содержания  $\text{NO}_2$  в наклонном столбе атмосферы в зависимости от зенитного угла Солнца, а по ним путем решения обратной задачи определяется вертикальный профиль  $\text{NO}_2$ . Профиль представлен десятью слоями шириной 5 км и тонким пограничным (приземным) слоем. Методика подробно описана в [17, 18]. В настоящей работе используются только данные о содержании  $\text{NO}_2$  в приземном слое (рис. 1, а). Отметим, что это не концентрация  $\text{NO}_2$ , а интегральное содержание в слое. Толщина слоя априори неизвестна. Этот слой наиболее часто подвержен антропогенному загрязнению.

Массовая концентрация приземного аэрозоля на ЗНС измерялась с 1991 г. с помощью нефелометра [19], а с 2001 г. – с помощью спектрополяриметра [20]. Мы использовали суточные значения концентрации (рис. 1, б).

\* Александр Николаевич Груздев (a.n.gruzdev@mail.ru); Андрей Александрович Исаков (a.a.isakov@mail.ru); Александр Сульманович Елохов (elokhov@mail.ru).

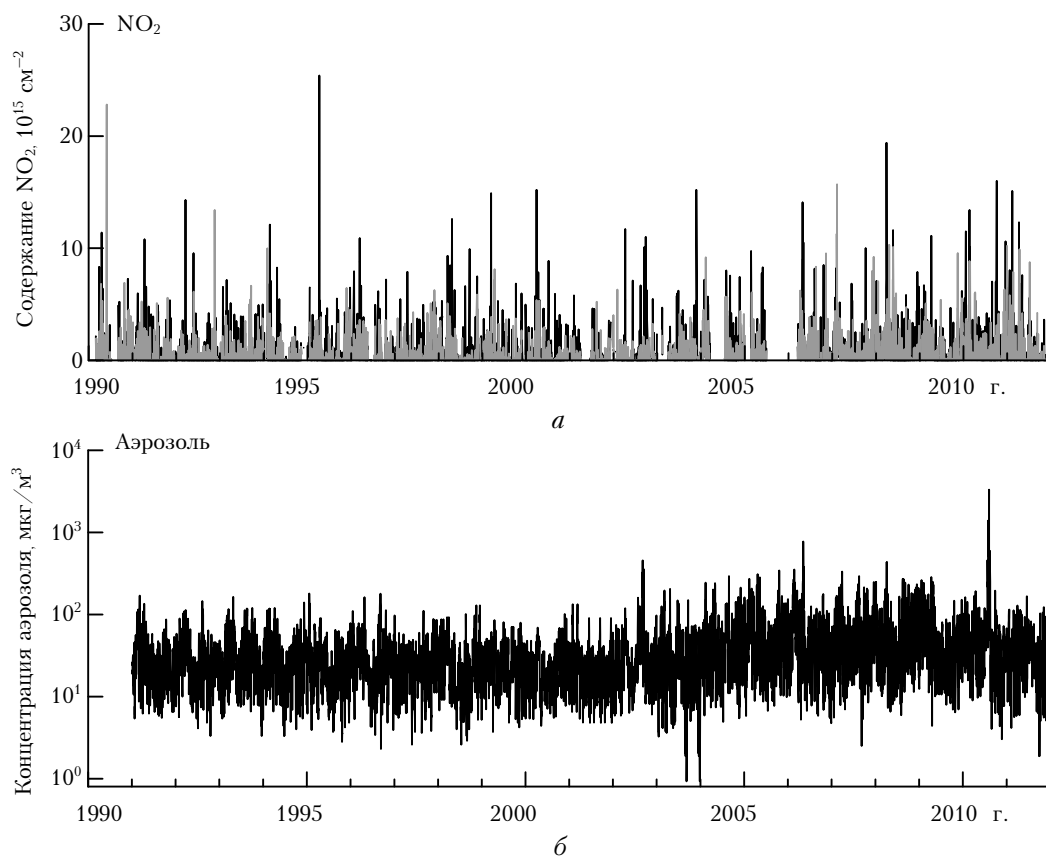


Рис. 1. Содержание  $\text{NO}_2$  в приземном слое атмосферы по результатам утренних (серые линии) и вечерних (черные) измерений (а) и среднесуточные значения массовой концентрации приземного аэрозоля (б) на Звенигородской станции

Для интерпретации результатов анализа данных измерений на ЗНС были также использованы данные стандартного аэрологического зондирования за 1990–2011 гг. в г. Долгопрудном, расположенном в северной пригородной зоне Москвы (<http://weather.uwo.edu/upperair/sounding.htm>). Из них были отбракованы выбросы по методике [10]. По этим данным были рассчитаны параметр статической устойчивости атмосферы  $N^2$  и параметр динамической устойчивости – градиентное число Ричардсона  $Ri$ . Параметр  $N^2$  в области положительных значений (устойчивая стратификация) совпадает с квадратом частоты Брента–Вайсяля.

Для анализа недельной цикличности использованы спектральный анализ по методу максимальной энтропии и метод группирования данных по дням недели. Средние значения в группах данных, соответствующих дням недели, составляют средний недельный ход. Его достоверность оценивалась с помощью критериев, применимых для определения различий между несколькими группами данных [11]. Распределение содержания  $\text{NO}_2$  в приземном слое сильно отличается от нормального распределения (рис. 1, а), поэтому для этого параметра применялся односторонний критерий Краскала–Уоллиса (Kruskal–Wallis), предназначенный для проверки равенства медиан нескольких выборок [21].

Массовая концентрация аэрозоля в целом удовлетворяет логнормальному распределению (рис. 1, б).

С целью подавления низкочастотной изменчивости и создания, таким образом, благоприятных условий для анализа недельной цикличности методом группировки данных по дням недели из прологарифмированных аэрозольных данных вычитались значения, полученные сглаживанием временного ряда с помощью окна Кайзера–Бесселя [11, 22]. Удалялись компоненты изменчивости с масштабами, превышающими 8 сут. Для оценки достоверности недельного цикла аэрозоля использован односторонний дисперсионный анализ с  $F$ -критерием статистической значимости Фишера–Снедекора. Число степеней свободы оценивалось с учетом автокорреляционной функции по методу [11].

## Результаты анализа

На рис. 2, а представлены спектры мощности флуктуаций содержания  $\text{NO}_2$  и аэрозоля. Спектральный пик с периодом 1 сут в спектре  $\text{NO}_2$  вызван различиями между утренними и вечерними значениями  $\text{NO}_2$ , обусловленными суточным ходом. В целом спектр  $\text{NO}_2$  и аэрозольный спектр по своему характеру напоминают спектр красного шума. В них можно выделить слабые спектральные максимумы. Более детальный, вейвлетный и спектрально-временной анализ показывает, что некоторые из этих максимумов отражают вариации, проявившиеся в течение ограниченных временных интервалов [23, 24].

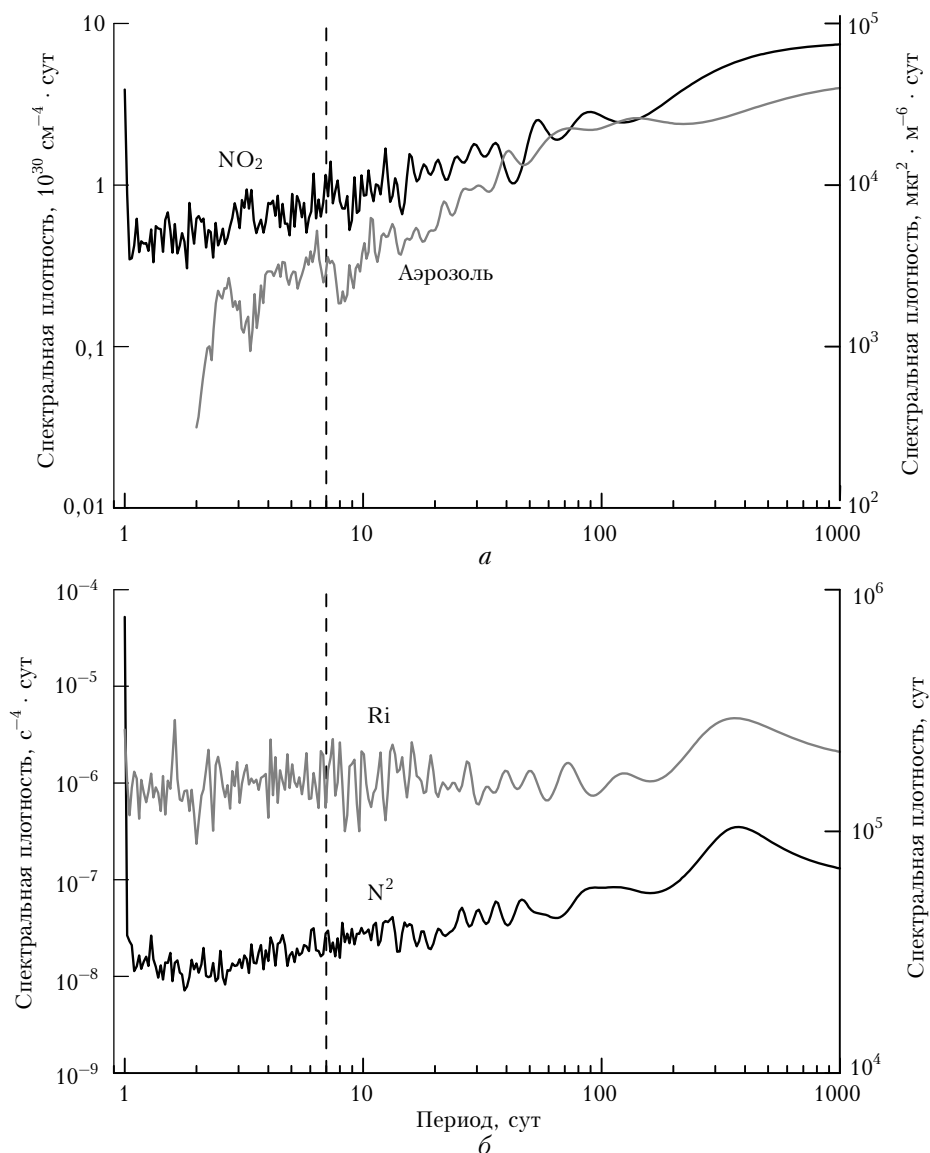


Рис. 2. Спектры мощности флуктуаций содержания  $\text{NO}_2$  в приземном слое атмосферы (левая вертикальная ось) и массовой концентрации приземного аэрозоля (правая вертикальная ось) на Звенигородской станции (*а*); спектры мощности флуктуаций параметра статической устойчивости  $N^2$  (левая вертикальная ось) и градиентного числа Ричардсона  $Ri$  (правая вертикальная ось) в слое от поверхности земли до уровня изобарической поверхности 950 гПа по результатам аэрологического зондирования в Долгопрудном (*б*). Вертикальные штриховые линии соответствуют недельному периоду

Недельным циклам на рис. 2, *а* соответствуют ничем не примечательные спектральные максимумы в окрестности недельного периода. Приведенные на рис. 3, *а, б* скользящие спектры  $\text{NO}_2$  и аэрозоля, рассчитанные по скользящему полугодовому интервалу, показывают наличие вариаций квазинедельного масштаба в отдельные годы. Наряду с недельными вариациями в скользящих спектрах, как и в общих спектрах, присутствуют и вариации с периодами около 6 и 8 сут. Вариации содержания  $\text{NO}_2$  с периодом около 7 сут можно отметить в 1995, 1998, 2006 гг., а аналогичные вариации концентрации аэрозоля — в 1992–1993, 1996–1998, 2001 гг. Попутно заметим, что пожары 2002 и 2010 гг. в Подмосковье отразились в высоких значениях спектральной плотности концентрации аэрозоля в эти годы (рис. 3, *б*).

Напомним, что спектры мощности не содержат информацию о фазе колебаний, поэтому наличие недельных вариаций не означает, что вариации в разные годы согласованы по фазе. Вполне возможно, что они имеют естественное происхождение. Разумно предположить, что квазинедельные вариации природного происхождения в различные годы не должны быть согласованы по фазе. С другой стороны, наличие такой согласованности могло бы быть индикатором влияния недельного ритма в деятельности человека на атмосферу [10, 11]. Если синхронизации с календарным недельным циклом нет, то можно ожидать, что средний за много лет недельный цикл, полученный группированием данных по дням недели, будет статистически незначим.

Анализ методом группирования по дням недели за полный период измерений не выявил недельный

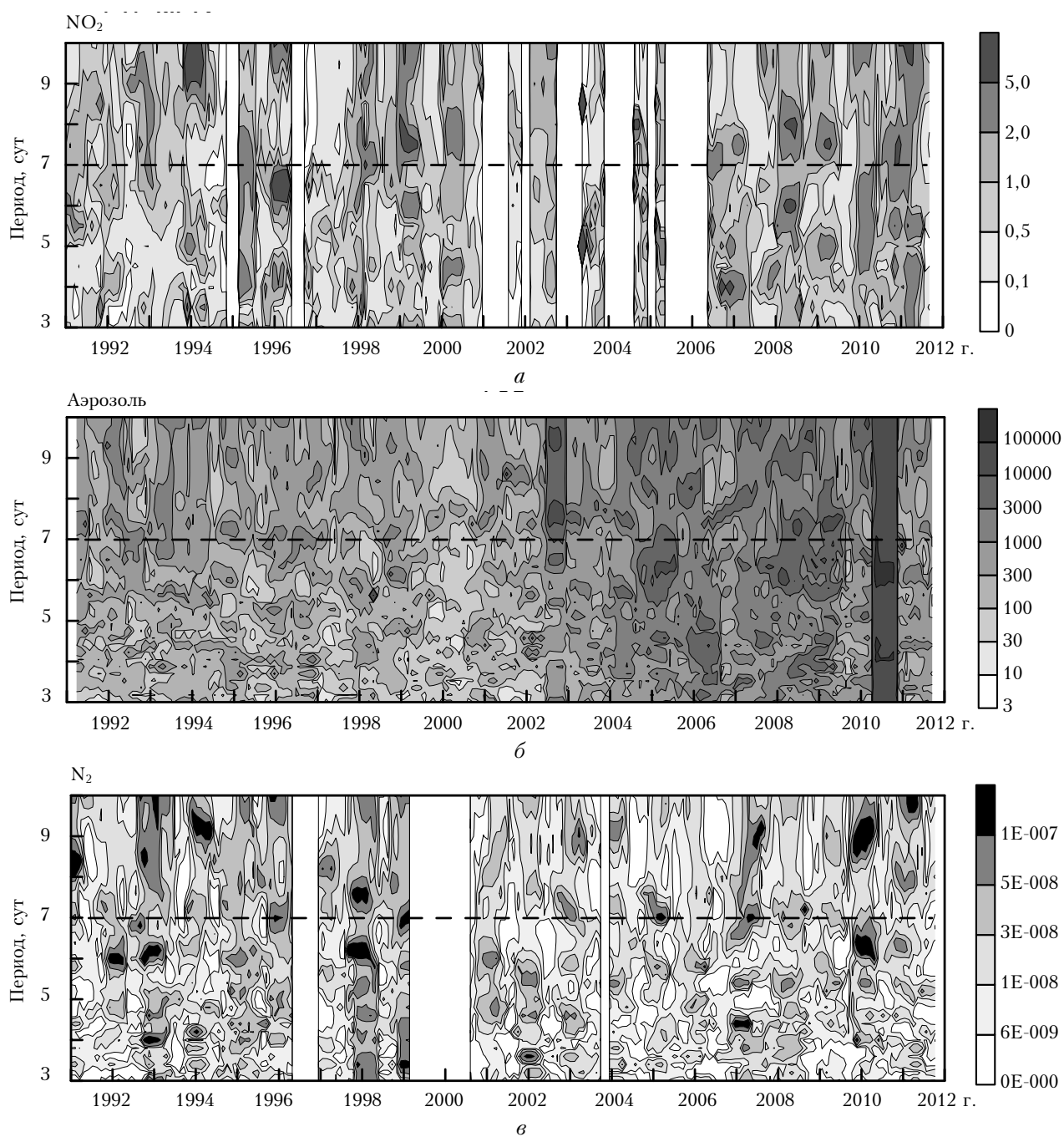


Рис. 3. Скользящие спектры содержания  $\text{NO}_2$  в приземном слое атмосферы (*a*), массовой концентрации приземного аэрозоля (*б*) на Звенигородской станции и параметра статической устойчивости приземного слоя атмосферы  $N^2$  в Долгопрудном (*в*). Горизонтальные штриховые линии соответствуют недельному периоду. Единицы те же, что и на рис. 2. Разрывы в спектрах вызваны разрывами в данных

цикл ни в содержании  $\text{NO}_2$ , ни в концентрации аэрозоля. Недельный цикл содержания  $\text{NO}_2$  не выявлен и в отдельные годы. Мы привели на рис. 4, *a* средние по дням недели значения содержания  $\text{NO}_2$  в 1998 и 2006 гг., когда в скользящем спектре проявились вариации с периодом около недели. Однако представленные этими кривыми недельные ходы  $\text{NO}_2$  статистически недостоверны.

Недельный цикл массовой концентрации аэрозоля отмечен только в 1996 г. (уровень значимости

лучше 1%). Для него характерны субботний максимум и минимум, приходящийся на среду и четверг (рис. 4, *б*), а разность максимального и минимального значений составляет около  $13 \text{ мкг/м}^3$ . Анализ по сезонам показал, что этот цикл в основном обусловлен квазинедельными вариациями весной (уровень значимости 4%) и в какой-то степени летом (уровень значимости только 17%). Размах колебаний весеннего цикла  $22 \text{ мкг/м}^3$ , летнего — около  $13 \text{ мкг/м}^3$  при значениях концентрации аэрозоля

примерно на  $20 \text{ мкг/м}^3$  меньше, чем весной. Осенью и зимой 1996 г. недельный цикл аэрозоля не выявлен. Для сравнения на рис. 4, б приведены также значения концентрации аэрозоля, осредненные по дням недели в 1992–1993 гг. Однако недельный ход этих значений недостоверен.

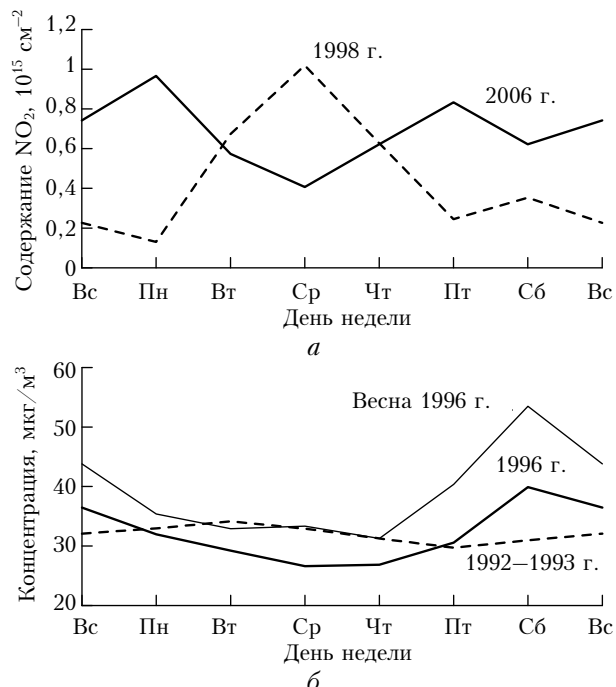


Рис. 4. Недельный ход содержания  $\text{NO}_2$  в приземном слое атмосферы в 1998 и 2006 гг. (а) и массовой концентрации приземного аэрозоля в 1992–1993 и 1996 гг. (б) на Звенигородской станции

Рассмотрим возможные механизмы недельной цикличности содержания  $\text{NO}_2$  и аэрозоля в приземном слое атмосферы.

Недельная цикличность  $\text{NO}_2$  может быть обусловлена недельными вариациями интенсивности местных источников окислов азота, а в западном Подмоскowie это, по-видимому, в основном автомобильный транспорт. Однако в отличие от Москвы движение по автодорогам в Подмоскowie не ослабевает и в выходные дни из-за поездок жителей Москвы на подмосковные дачи.

Причиной недельной цикличности может служить непосредственное влияние Москвы. Высокие концентрации  $\text{NO}_2$  в приземном слое на ЗНС обычно обусловлены заносом, особенно в зимнее время. Поскольку, согласно розе ветров, ЗНС чаще всего находится в наветренной от Москвы зоне, то недельную цикличность могла бы вызвать недельная модуляция переноса окислов азота и антропогенного аэрозоля из Москвы и ее плотно заселенных окрестностей. Однако недельный цикл направления ветра в пограничном слое атмосферы по данным аэрологического зондирования не выявлен [11].

Третьей причиной могла бы быть недельная модуляция вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы. Спектры  $N^2$  и  $R_i$ , приведенные на рис. 2, б, показывают возможность не-

дельных вариаций этих параметров в пограничном слое атмосферы в Долгопрудном. Согласно скользящему спектру  $N^2$ , вариации недельного масштаба были возможны в отдельные годы, в том числе в 1996 г., когда отмечен недельный цикл концентрации аэрозоля на ЗНС (см. рис. 3, в). Тем не менее группирование по дням недели не дало положительного результата: недельные циклы  $N^2$  и  $R_i$  не выявлены ни за полный срок, ни в отдельные годы, ни в среднем по сезонам, ни по сезонам 1996 г. Однако вполне вероятно, что на масштабах недели и менее режимы изменчивости вертикального перемешивания в пограничном слое атмосферы на ЗНС и в Долгопрудном различаются.

Мы видим, что ни один из указанных механизмов не реализуется на ЗНС, и это может служить объяснением отсутствия в целом недельной цикличности приземного аэрозоля и  $\text{NO}_2$ , которая была бы определенным образом синхронизована с календарной рабочей неделей. Однако остается непонятным наличие недельной цикличности аэрозоля в 1996 г.

## Заключение

На основе собственных данных измерений за 20 лет мы исследовали недельную цикличность содержания двуокси азота и массовой концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы на Звенигородской научной станции ИФА РАН. Спектральный и спектрально-временной анализ указывают на возможность вариаций содержания аэрозоля и  $\text{NO}_2$  недельного масштаба, наряду с вариациями с периодами около 6 и 8 сут, в течение ограниченных временных интервалов. Амплитуды и периоды этих вариаций изменчивы во времени. Однако мы не обнаружили недельные циклы аэрозоля и  $\text{NO}_2$ , которые были бы статистически значимы (на уровне 5 или 10%), ни в целом за 20 лет, ни в отдельные сезоны или годы, за исключением недельного цикла массовой концентрации аэрозоля в 1996 г. с максимумом концентрации в субботу и минимумом, приходящимся на среду и четверг.

1. Beirle S., Platt U., Wenig M., Wagner T. Weekly cycle of  $\text{NO}_2$  by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3, N 6. P. 2225–2232.
2. Stephens S., Madronich S., Wu F., Olson J.B., Ramos R., Retama A., Mucoz R. Weekly patterns of Mexico City's surface concentrations of  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{O}_3$  during 1986–2007 // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 17. P. 5313–5325.
3. Millsteina D.E., Harleya R.A., Hering S.V. Weekly cycles in fine particulate nitrate // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 4. P. 632–641.
4. Kaynak B., Hu Y., Martin R.V., Sioris C.E., Russell A.G. Comparison of weekly cycle of  $\text{NO}_2$  satellite retrievals and  $\text{NO}_x$  emission inventories for the continental United States // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D05302, doi:10.1029/2008JD010714.
5. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карнов А.В., Колесникова А.Б., Байкова Е.С., Задорожная О.С. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики ста-

- тистического прогноза концентраций примесей // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 784–792.
6. *Georgoulas A.K., Kourtidis K.A.* On the aerosol weekly cycle spatiotemporal variability over Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 10. P. 4611–4632.
  7. *Gong D.-Y., Ho C.-H., Chen D., Quan Y., Choi Y.-S., Kim Y.* Weekly cycle of aerosol-meteorology interaction over China // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, N 22. D22202, doi:10.1029/JD008888.
  8. *Sanchez-Lorenzo A., Calby J., Martin-Vide J. et al.* Winter “weekend effect” in southern Europe and its connections with periodicities in atmospheric dynamics // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, N 15. L15711, doi:10.1029/2008GL034160.
  9. *Ho C.-H., Choi Y.-S., Hur S.-K.* Long-term changes in summer weekend effect over northeastern China and the connection with regional warming // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N 15. L15706, doi:10.1029/2009GL039509.
  10. *Груздев А.Н.* О недельной цикличности в атмосфере // Докл. РАН (<http://www.maik.ru/cgi-bin/list.pl?page=dan>). 2011. Т. 439, № 3. С. 407–412.
  11. *Груздев А.Н.* Анализ недельной цикличности в атмосфере ближнего Подмосковья // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2012. (в печати).
  12. *Schultz D.M., Mikkonen S., Laaksonen A., Richman M.B.* Weekly precipitation cycles? Lack of evidence from United States surface stations // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, N 22. L22815, doi:10.1029/2007GL031889.
  13. *Hendrick Franssen H.J.* Comment on “An unexpected pattern of distinct weekly periodicities in climatological variables in Germany” by Dominique Bäumer and Bernhard Vogel // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, N 5. L05802, doi:10.1029/2007GL031279.
  14. *Hendrick Franssen H.J., Kuster T., Barmet P., Lohmann U.* Comment on “Winter ‘weekend effect’ in southern Europe and its connection with periodicities in atmospheric dynamics” by A. Sanchez-Lorenzo et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N 13. L13706, doi:10.1029/2008GL036774.
  15. *Barmet P., Kuster T., Muhlbauer A., Lohmann U.* Weekly cycle in particulate matter versus weekly cycle in precipitation over Switzerland // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N 5. D05206, doi:10.1029/2008JD011192.
  16. *Груздев А.Н., Исаков А.А., Елохов А.С.* Анализ недельной цикличности приземного аэрозоля и NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции // Аэрозоли Сибири. XVIII рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. С. 66.
  17. *Елохов А.С., Груздев А.Н.* Измерения общего содержания и вертикального распределения NO<sub>2</sub> на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2000. Т. 36, № 6. С. 831–846.
  18. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Валидация результатов измерений содержания NO<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы с помощью прибора ОМІ с борта спутника EOS-Ауга по данным наземных измерений на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2009. Т. 45, № 4. С. 477–488.
  19. *Сидоров В.Н.* Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое // Труды конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М., 1999. С. 356–367.
  20. *Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В.* О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 393–399.
  21. *Kruskal W.H., Wallis W.A.* Use of ranks in one-criterion variance analysis // *J. Amer. Stat. Assoc.* 1952. V. 47, N 260. P. 583–621.
  22. *Хэррис Ф.Дж.* Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. Т. 66, № 1. С. 60–96.
  23. *Исаков А.А., Груздев А.Н.* Долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2009. Т. 44, № 2. С. 245–254.
  24. *Gruzdev A.N., Elokhov A.S.* Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // *Int. J. of Remote Sensing.* 2011. V. 32, N 11. P. 3115–3127.

**A.N. Gruzdev, A.A. Isakov, A.S. Elokhov. Analysis of weekly cycles in surface aerosol and NO<sub>2</sub> at Zvenigorod Scientific Station, IAP RAS.**

Results of analysis of weekly cycles in the nitrogen dioxide content and aerosol mass concentration in the surface atmospheric layer at Zvenigorod Scientific Station of the IAP RAS are given. Weekly cycles in aerosol and NO<sub>2</sub>, which would be statistically significant, have not been revealed either for the whole 20-year period of measurements or for seasons and specific years except for the weekly cycle in aerosol mass concentration in 1996 with maximum values on Saturday and minimum values occurring on Wednesday–Thursday. Data of aerologic sounding at Dolgoprudnyi near Moscow are used for interpretation of the results obtained.