

## Синхронные вариации массовой концентрации приземного аэрозоля, окислов азота и озона в Подмоскowie

А.А. Исаков<sup>1</sup>, А.С. Елохов<sup>1</sup>, Е.А. Лезина<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

<sup>2</sup> *Мосэкомониторинг, 117331, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11*

Поступила в редакцию 27.01.2009 г.

В Подмоскowie в 2007–2008 гг. выполнен цикл комплексных наблюдений ряда газовых и аэрозольного компонентов атмосферы. С привлечением данных обратнотраекторного анализа очерчен круг атмосферных ситуаций, когда резкие изменения содержания этих величин связаны с дальним переносом в атмосфере. В первую очередь это прохождение через Подмоскowie теплых атмосферных фронтов окклюзии атлантических и средиземноморских циклонов. В таких ситуациях наблюдается одновременный рост содержания NO<sub>2</sub>, NO, массовой концентрации аэрозоля, концентрация озона падает. Это сопровождается заметным уменьшением показателя преломления вещества частиц. Реакция параметра конденсационной активности аэрозоля не является однозначной.

*Ключевые слова:* атмосферный аэрозоль, окислы азота, озон, воздушные массы, атмосферные фронты.

### Введение

Влияние окислов азота на химический состав и микрофизические свойства аэрозоля — это один из малоизученных аспектов формирования аэрозоля в нижней тропосфере. Наличие азотной кислоты в пробах аэрозоля отмечалось в [1]. По данным [2], азотнокислотный компонент в составе аэрозоля присутствует (проявляется) в пробах, собранных при больших концентрациях в приземном воздухе окислов азота.

В настоящей статье представлены результаты совместного анализа данных, полученных на Звенигородской научной станции (ЗНС) в 2007–2008 гг. с помощью комплекса приборов ИФА РАН. Кроме того, использованы данные измерений на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха ГПУ Мосэкомониторинга.

Наблюдения включали определение массовой концентрации приземного аэрозоля и его оптико-микрофизических параметров — показателя преломления вещества частиц и параметра конденсационной активности, содержания двуокси азота в нижней тропосфере (приборы ИФА), приземной концентрации ряда газовых компонентов атмосферы — озона, окислов азота и т.д. (приборы Мосэкомониторинга). Для анализа привлекались данные по обратным траекториям.

Массовую концентрацию аэрозоля и его оптико-микрофизические параметры определяли по данным спектрополяриметра и нефелометра. При

земная концентрация озона и окислов азота регистрировалась приборами стационарного поста Мосэкомониторинга, расположенного на территории станции, тропосферное содержание NO<sub>2</sub> оценивалось спектроскопическим методом. Обратные траектории рассчитывались по NOAA HYSPLIT MODEL.

Основная цель работы заключалась в изучении дальнего переноса основных активных компонентов атмосферы и взаимосвязи вариаций указанных выше компонентов в случаях, когда одновременно наблюдалось повышенное содержание последних, в несколько раз превышающее средний уровень.

### Методика и аппаратура

Комплекс приборов включал в себя приборы, которые по своим особенностям регистрации можно разбить на две группы. Первая — спектрополяриметр и спектрофотометр. Их обычный режим работы — утренние и вечерние сумеречные измерения спектрофотометром и чаще всего утренние наблюдения на спектрополяриметре (около 1 ч наблюдений). Вторая группа — приборы поста Мосэкомониторинга и нефелометр ФАН. Их режим работы — непрерывные измерения с интервалом 1 мин у ФАН и 20 мин у приборов поста. Данные измерений этих приборов позволили проследить ряд быстрых процессов, связанных с прохождением атмосферных фронтов.

Сектрополяриметр измеряет поляризационные компоненты коэффициента направленного светорассеяния в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,4\div 0,75$  мкм на трех углах рассеяния  $\phi = 45, 90, 135^\circ$ . Этой информации достаточно [3], чтобы с помощью решения обратной задачи получить распределение частиц

\* Андрей Александрович Исаков (A.A.Isakov@mail.ru); Александр Сульманович Елохов; Елена Александровна Лезина.

аэрозоля по размерам и оценить действительную и мнимую части показателя преломления вещества частиц.

Прибор оборудован низкотемпературным нагревателем для оценки параметра конденсационной активности аэрозоля. Под конденсационной активностью аэрозоля мы понимаем оптический отклик аэрозоля на уменьшение относительной влажности воздуха при его нагреве, обработанный по формуле Хенела:

$$D(\varphi = 45^\circ, \lambda, Rh) = D(\varphi = 45^\circ, \lambda, Rh = 0)(1 - Rh)^{-\chi},$$

где  $D$  — коэффициент направленного светорассеяния;  $Rh$  — относительная влажность воздуха;  $\chi$  — параметр конденсационной активности (параметр Хенела).

Нефелометр ФАН непрерывно с частотой выборки раз в минуту регистрировал значения коэффициента направленного светорассеяния  $D$  на длине волны  $\lambda = 0,52$  мкм и угле рассеяния  $\varphi = 45^\circ$  осушенного аэрозоля. Знание  $D$  позволяет оценить массовую концентрацию субмикронного аэрозоля  $M$  по формуле  $M = 3000 D$ , где  $M$  в  $\text{мкг}/\text{м}^3$ ,  $D$  — в  $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

Содержание двуокиси азота определялось спектроскопическим методом по рассеянному из зенита солнечному излучению с помощью спектрофотометра, созданного на базе монохроматора МДР-23. Дважды в сутки по сериям сумеречных наблюдений (при зенитных углах Солнца  $84-96^\circ$ ) с помощью решения обратной задачи восстанавливалось вертикальное распределение  $\text{NO}_2$ , в том числе оценивалось интегральное содержание  $\text{NO}_2$  в нижней тропосфере и отдельно в ее приземном слое [2].

С помощью стандартного оборудования поста Мосэкомониторинга проводились метеонаблюдения (температура воздуха, относительная влажность, скорость и направление ветра) и измерения массовой концентраций аэрозоля (стандарт  $\text{PM}_{10}$ ) и ряда малых газовых компонентов, в том числе  $\text{CO}$ , озона,  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  и т.д.

Десятисуточные (на самом деле начальные участки траекторий лишь принимались к сведению, в анализе участвовали только последние 3–5 сут движения воздушных масс) траектории, высота прихода в точку наблюдений 100 м, рассчитывались ежедневно обычно для 9 ч. При смене воздушных масс, контролировавшейся как по данным метеостанции ЗНС, так и по поведению очень быстро откликающейся на эту смену массовой концентрации  $M$ , временной интервал между траекториями сокращался до 3 ч.

## Результаты и их обсуждение

Начало цикла комплексных измерений определил выход на стандартный режим измерений приборами поста в сентябре 2007 г. Нами рассматривался не непрерывный ряд измерений, а группа случаев с повышенным содержанием указанных выше компонентов атмосферы. Измерение массовой

концентрации по стандарту  $\text{PM}_{10}$  предполагает осаждение аэрозоля на фильтр с последующим периодическим взвешиванием, т.е. методика принципиально отличается от нефелометрической. Подробные анализ и сопоставление двух методик выходят за рамки предлагаемой статьи, здесь мы ограничимся кратким сравнением. На рис. 1, а приведены результаты синхронной регистрации массовой концентрации аэрозоля двумя методами. Данные относятся к октябрю 2007 г.

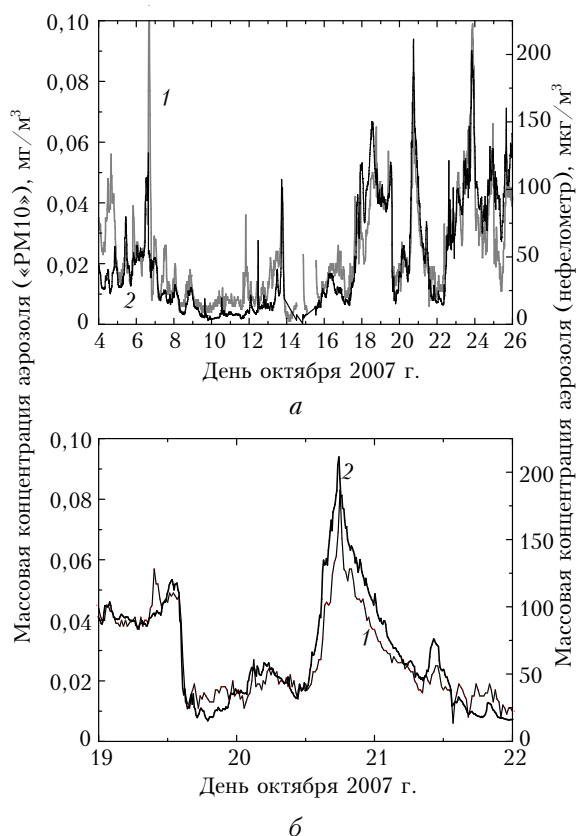


Рис. 1. Временная (а) и подробная временная (б) развертка для эпизода 19.10–22.10.2007 г. синхронных данных поста Мосэкомониторинга: стандарт « $\text{PM}_{10}$ » (кривая 1) и нефелометра ФАН (2)

В целом согласие между показаниями приборов достаточно хорошее, оно хуже при малых содержаниях аэрозоля и весьма хорошее в эпизодах с большим содержанием. На рис. 1, б приведен один из таких случаев с подробной временной разверткой. Видно, что здесь оба прибора одинаково хорошо воспроизводят даже мелкую «рябь» вариаций  $M$ , что позволяет в дальнейшем для анализа использовать данные обоих приборов. Случаи высоких (в 3–4 раза выше средних значений) содержания перечисленных компонентов атмосферы обычно связаны либо с прохождением фронтов окклюзии по типу теплого, либо с устойчивым антициклоном. В первом случае наблюдается всплеск концентраций всех величин, кроме озона — его концентрация, напротив, падает. Обратные траектории зачастую имеют вид спирали и указывают на

приход воздушной массы из Центральной или Южной Европы. Во втором в тыловой части антициклона воздушные массы приносятся из района Поволжья и Калмыкии. Часто наблюдается ярко выраженный согласованный суточный ход как массовой концентрации аэрозоля, так и приземной концентрации  $\text{NO}_2$  и его содержания в нижней тропосфере.

На рис. 2 приведены временная развертка значений массовой концентрации  $M$  по данным ФАН, величины показателя преломления вещества частиц  $n$  по данным спектрополяриметра и тропосферного содержания  $\text{NO}_2$ , полученного по утренним измерениям октября 2007 г.

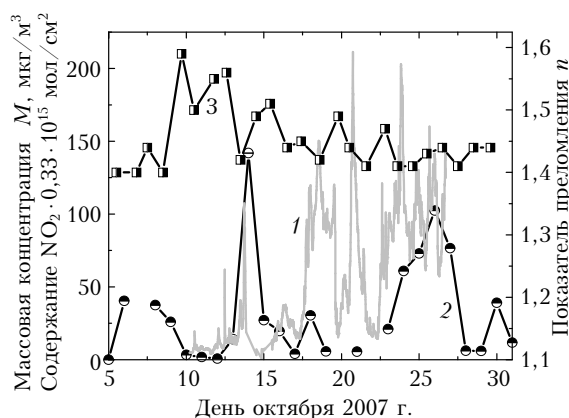


Рис. 2. Временная развертка массовой концентрации  $M$  по данным нефелометра ФАН (кривая 1), утренних значений тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  (2) и показателя преломления  $n$  вещества частиц (3) в октябре 2007 г.

Обращают на себя внимание три эпизода повышенного содержания как  $M$ , так и  $\text{NO}_2$  — 05–07.10, 13.10 и 19–31.10. В первом случае (05–07.10) Подмоскowie находилось на границе между уходящим антициклоном и приближающимся атлантическим циклоном. Траектории имели юго-восточное направление с начальной точкой в районе Прикаспия. Восьмого октября прошел слабо-выраженный холодный фронт, воздушная масса сменилась на морскую. Второй эпизод связан с прохождением через Подмоскowie классического фронта окклюзии по типу теплого. В течение нескольких часов в несколько раз выросли массовая концентрация аэрозоля  $M$ , содержание  $\text{NO}_2$ , а еще через несколько часов в подошедшем холодном секторе циклона значения  $M$  и  $\text{NO}_2$  резко пошли на убыль. На рис. 3 показана более подробная временная развертка относящихся к этому короткому эпизоду данных приборов поста.

Приведены значения приземной концентрации  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ , массовой концентрации аэрозоля «PM10» и озона. На фоне резкого роста первых трех величин концентрация озона падает в теплом секторе и нарастает вместе с падением  $M$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  в холодном. Подчеркнем, что речь идет не о кратковременном «выедании» озона, а о прохождении

через Подмоскowie с интервалом в несколько часов воздушных масс трех различных типов — предшествовавшей эпизоду морской, умеренной континентальной и морской арктической массы.

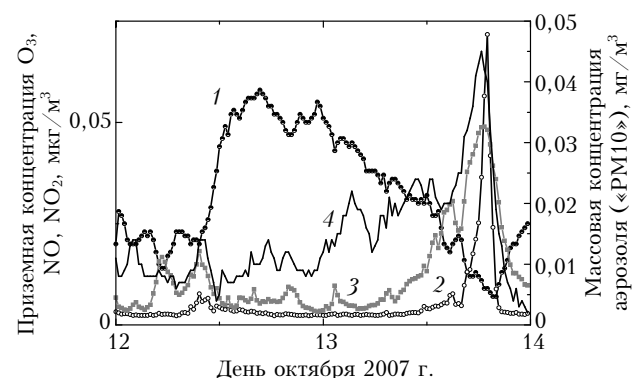


Рис. 3. Подробная временная развертка для эпизода прохождения теплого фронта 13.10.07 г. приземных концентраций озона (кривая 1),  $\text{NO}$  (2),  $\text{NO}_2$  (3) и массовой концентрации аэрозоля (кривая 4) по данным поста Мосэкомониторинга

На момент пика теплого сектора обратная траектория начиналась над Балтикой, далее шла через Польшу, Беларусь, Украину и над Ростовской областью резко поворачивала на север, подходя к Подмоскowie с юга (что исключает влияние Москвы как источника антропогенных примесей). В дальнейшем по мере прохождения фронта траектории поворачивались против часовой стрелки и к утру 15.10 обратные траектории приходили строго с севера, начинаясь вблизи Северного полюса. На наш взгляд, рассмотренный эпизод иллюстрирует характерный случай дальнего переноса из Европы.

Следующему эпизоду 19.10–31.10.07 соответствует совсем иная метеорологическая ситуация — установление обширного южного антициклона. В начале этого эпизода обратные траектории начинались над бассейном Черного моря и подходили к Звенигороду с юга-юго-запада. К 21.10 в тыловой части антициклона на подходе к Подмоскowie они приобрели юго-восточное направление и далее закручивались против часовой стрелки до восточного, принося в Подмоскowie континентальные воздушные массы Прикаспия, обогащенные аридным аэрозолем. С некоторой задержкой по отношению к аэрозолю, к 22.10 быстро стало нарастать тропосферное содержание  $\text{NO}_2$  (см. рис. 2). В последние дни октября в довольно устойчивом обширном антициклоне в точке наблюдения господствовали юго-восточные ветра и последние 3–4 дня перед приходом в Подмоскowie воздушные массы двигались над Поволжьем. На рис. 2 приведены среднесуточные значения показателя преломления  $n$  вещества частиц, полученные обращением данных спектрополяриметра. Отметим, что во всех трех случаях, вне зависимости от типа воздушной массы, наблюдались высокие концентрации аэрозоля и  $\text{NO}_2$ , а  $n$  уменьшался примерно до 1,4.

В отличие от кратковременных ситуаций в циклонах, в антициклоне эпизод длился несколько суток и микрофизические параметры аэрозоля сохранялись в третьем случае достаточно стабильными, несколько варьировала лишь массовая концентрация  $M$ . Что касается параметра Хенела, то во всех трех эпизодах заметные его вариации никак не были связаны с изменениями других параметров.

На рис. 4 и 5 приведены результаты измерений весной 2008 г. На рис. 4 изображена временная развертка тропосферного содержания  $\text{NO}_2$ , массовой концентрации аэрозоля  $M$  и параметра Хенела  $\chi$  по данным спектрополяримера для марта–апреля 2008 г., а на рис. 5 – данные приборов поста (массовая концентрация аэрозоля «PM10» и приземная концентрация  $\text{NO}_2$ ) для апреля 2008 г. с более подробной разверткой.

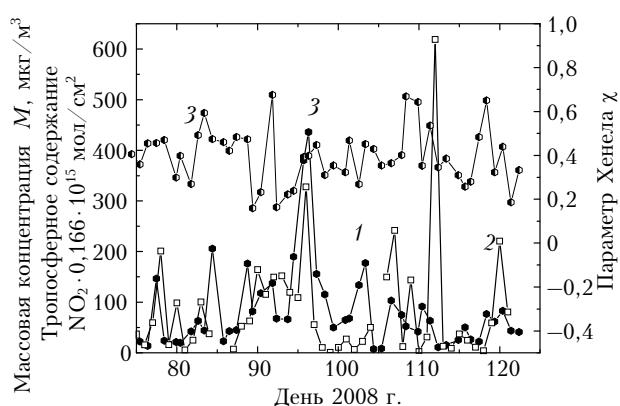


Рис. 4. Временная развертка массовой концентрации аэрозоля  $M$  для марта–апреля 2008 г. по данным спектрополяримера (1), утренних значений тропосферного содержания  $\text{NO}_2$  (2) и параметра Хенела (3)

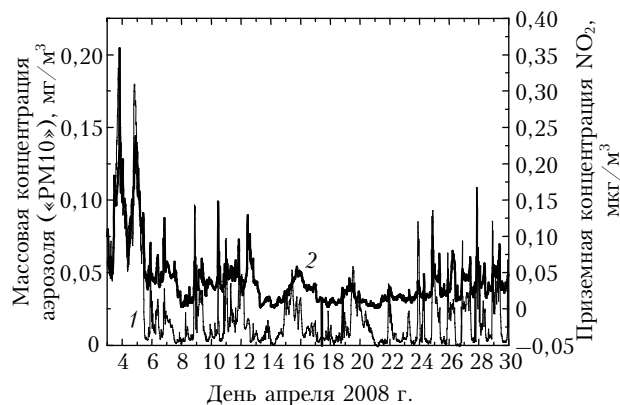


Рис. 5. Временная развертка для апреля 2008 г. массовой концентрации аэрозоля  $M$  (1) и приземной концентрации  $\text{NO}_2$  (2) по данным поста Мосэкомониторинга

В целом здесь картина примерно та же, что и на рис. 2, – заметные превышения фоновых уровней  $\text{NO}_2$  в тропосфере совпадают со случаями высоких концентраций  $M$ . Исключение составляет единственный эпизод 22 апреля, когда спектрофотометром был зарегистрирован пик очень высокого тропосферного содержания  $\text{NO}_2$ , в то же время

уровень  $M$  был вблизи среднего, а приборы поста не зафиксировали выброса приземной концентрации  $\text{NO}_2$ . В вариациях параметра Хенела, как и в октябре 2007 г., не обнаружено однозначной связи с вариациями  $M$  и  $\text{NO}_2$ .

Особый интерес, на наш взгляд, представляет случай 4–7 апреля. Из-за отмеченных выше особенностей режимов работы спектрополяриметра и спектрофотометра на рис. 4 присутствует неразрешенный во времени двухсуточный пик содержания  $M$  и  $\text{NO}_2$ , но на рис. 5 четко видно, что это два разделенных глубоким минимумом всплеска. Метеорологическая ситуация оказалась довольно необычной. Все эти дни над Подмосковьем проходила граница между уходящим на восток антициклоном с центром над Уралом и приближающимся скандинавским циклоном с центром над Прибалтикой. Обратные траектории 04.04 и 05.04 имели экзотический вид – начинались над Северной Атлантикой на высоте около 4 км и, постепенно снижаясь, подходили с запада к Подмосковию, затем, описывая в течение последних 4–5 сут почти правильную окружность, резко проворачивались на север → северо-восток → восток и подходили к Звенигороду с востока. Далее 06.04 «кольцо» вблизи Москвы разомкнулось и превратилось в петлю, последние 2 сут траектория шла к Москве с востока. Наконец, 07.04 воздушная масса пришла к Подмосковию с юга.

Судя по картам погоды Гидрометцентра, ситуация соответствовала необычному прохождению теплого фронта. Разделяющий два пика на рис. 5 глубокий минимум мог быть связан с волной на теплом фронте.

Поведение показателя преломления в этом эпизоде практически полностью повторило ситуацию 13.10.2007 г. (см. рис. 2) – 05.04 зафиксировано значение  $n = 1,5$ , далее 06–07.04 оно упало до 1,44, а 08.04 с подходом холодного сектора циклона выросло до 1,56. На фоне довольно выраженного суточного хода в приземной концентрации озона в эти дни наблюдался глубокий провал, что опять-таки говорит в пользу дальнего переноса как причины вариаций характеристик в описанном эпизоде.

## Заключение

Проанализированы результаты комплексных измерений, полученные на ЗНС в 2007–2008 гг. с привлечением данных обратного траекторного анализа и карт погоды Гидрометцентра. Очерчен круг ситуаций, когда резкое увеличение концентраций аэрозоля, окислов азота и других малых компонентов атмосферы связано с дальним переносом воздушных масс. Показано, что подобные ситуации чаще всего связаны либо с прохождением теплых секторов атлантических и средиземноморских циклонов, когда воздушные массы несколько суток движутся над территорией Центральной Европы, либо с тыловыми секторами антициклонов, когда воздушные массы приходят в Подмосковию с востока и юго-востока. По крайней мере, в первом слу-

чае влияние Москвы как источника загрязнения исключено.

Поведение приземных концентраций аэрозоля и  $\text{NO}_2$  практически во всех случаях одинаково: вначале отмечается их рост, концентрация озона резко падает, величина показателя преломления вещества частиц заметно падает, а с подходом холодного сектора циклона ситуация меняется на строго обратную. Величина параметра Хенела не имеет устойчивой по знаку реакции на прохождение фронтов.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 07-05-00860 и ISTC № 32-54.

1. Груздев А.Н., Исаков А.А., Шукурова Л.М., Елохов А.С., Шукуров К.А. Совместные исследования субмикронного аэрозоля и двуокиси азота в приземном слое атмосферы в период лесных торфяных пожаров в Подмоскowie в июле–сентябре 2002 г. // Докл. РАН. 2003. Т. 391. № 4. С. 540–544.
2. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения  $\text{NO}_2$  на Звенигородской научной станции // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.
3. Исаков А.А. Некоторые статистические закономерности вариаций оптических и микрофизических характеристик приземного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 488–494.

*A.A. Isakov, A.S. Elokhov, E.A. Lezina. The synchronous variations of the mass concentration of the surface aerosol, nitric oxides and ozone.*

The cycle of the complex measurements of some gaseous and aerosol components of the atmosphere has been carried out in Moscow region. The group of the atmospheric situations, when strong changes of their content were connected with long transport, was selected using back trajectories and weather map analysis. They related to the passing of the warm atmospheric fronts of the Atlantic or Mediterranean cyclones through the Moscow region. It was shown, that in these situations, the simultaneous growth of the  $\text{NO}_2$  and  $\text{NO}$  content and aerosol mass concentration was observed, while the ozone concentration decreased. This effect was followed by strong decrease of the refractive index of the aerosol particles. Variations of the condensation activity parameter are not closely connected with this effect.