

А.А. Исаков

О межгодовой изменчивости вариаций оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции

Институт физики атмосферы РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 15.02.2007 г.

В течение 2001–2006 гг. на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы с помощью проточных спектрополяриметра и нефелометра проведены измерения массовой концентрации приземного субмикронного аэрозоля M и его конденсационной активности χ ; выполнен анализ вариаций этих величин на масштабах от нескольких суток до нескольких месяцев. Показано, что за эти годы в Центральной России участились случаи плотных и сверхплотных дымок. Это привело к изменению характера сезонной зависимости массовой концентрации аэрозоля M : в сезонном ходе M появились упорядоченные колебания с увеличивающейся год от года амплитудой. Именно за счет учащения случаев плотных и сверхплотных дымок в 2002–2006 гг. наблюдается значительный монотонный рост среднегодовых значений M . Среднегодовое значение M в 2006 г. выросло по сравнению с 2001 г. более чем в два раза (с 23 до 62 мкг/м³).

Введение

Важнейшую роль в изменчивости аэрозоля в центральной области России играет смена воздушных масс. Массовая концентрация аэрозоля в морской арктической воздушной массе, располагающейся в тыловой части холодного фронта арктического циклона, может опускаться до значений ~ 5 мкг/м³. В замутненной континентальной воздушной массе теплого сектора циклона или тыловой части антициклона значения массовой концентрации аэрозоля значительно более высокие — десятки и сотни микрограмм. Соотношение суммарных длительностей нахождения точки наблюдения в той или иной воздушной массе во многом определяет и среднегодовое значение содержания аэрозоля в данной местности.

В [1] на основе длинных рядов наблюдений получен годовой ход массовой концентрации субмикронного аэрозоля для региона Кавказских Минеральных Вод. Сезонный ход массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы РАН рассматривался в [2] по десятилетним рядам наблюдений. На основе комплексных наблюдений составляющих атмосферы в Сибири и Татарстане, включающих измерения массовой концентрации аэрозольных частиц, в [3, 4] выявлен ряд закономерностей изменчивости аэрозольных характеристик.

В [5] обращено внимание на постепенное нарастание начиная с 2002 г. среднегодовых значений массовой концентрации субмикронного аэрозоля M на ЗНС.

В настоящее время мы располагаем практически непрерывными рядами наблюдений M и χ дли-

ной 4 года (январь 2003 г. — декабрь 2006 г.). Данная статья посвящена анализу вариаций этих двух основных интегральных параметров приземного аэрозоля в Подмосковье в течение 2003–2006 гг. Измерения выполнялись на Звенигородской научной станции ИФА с помощью спектрополяриметра и частично — нефелометра В.Н. Сидорова [2]. Станция расположена в сельской местности примерно в 50 км к западу от Москвы.

Аппаратура и методика определения параметров аэрозоля

Спектрополяриметр регистрирует поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния D на углах 45, 90 и 135° в спектральном диапазоне 0,4–0,75 мкм с шагом по длине волны 20 нм. Прибор оборудован низкотемпературным нагревателем для контролируемого подогрева и осушки исследуемого аэрозоля.

Измерения проводились практически ежедневно, и количество пропусков (по причинам неисправности прибора и отключения электричества), например в 2004 г., составило несколько дней. Время записи одной регистрограммы составляло 13 мин; обычно прописывался блок из пяти регистрограмм и выводились средние значения параметров. На их основе рассчитывались средние за 1 сут значения параметров.

Массовая концентрация аэрозоля M оценивалась по величине индикатрисы рассеяния D на угле 45° на длине волны 0,54 мкм по известной формуле $M = 3000D$, где M выражается в мкг/м³, а D — в км⁻¹ · ср⁻¹. Средняя точность определения M составляет около 20%. Использование M более при-

вычно для занимающихся исследованием аэрозолей, нежели использование D .

Оценивали конденсационную активность (или параметр Хенела χ) коротким методом по двум значениям индикатрисы (D_1 и D_2), полученным при различных значениях температуры и относительной влажности воздуха (Rh_1 и Rh_2) в рабочей камере прибора [6]. Таким образом, χ есть оптический отклик аэрозоля на уменьшение относительной влажности воздуха, полученное путем его нагрева. Параметр χ по смыслу близок к характеристике конденсационной активности γ , используемой в Институте оптики атмосферы СО РАН (в ИОА аэрозоль, наоборот, увлажняют [3]), в диапазоне Rh 40–80% он с ней практически совпадает [6]. Ошибки определения χ обусловлены в первую очередь флуктуациями характеристик аэрозоля из-за его пространственно-временной неоднородности и составляют в среднем около 0,1. Параметр χ по определению не зависит от численной концентрации частиц [6].

В [6] отмечалось, что качество данных χ зависит от относительной влажности воздуха на момент измерений, поэтому начиная с 2004 г. для получения более надежных оценок χ измерения выполнялись утром или поздно вечером, когда относительная влажность достаточно высока. Измерения в 2003 г. часто выполнялись и днем, однако благодаря прохладному дождливому лету в Подмоскowie относительная влажность воздуха держалась высокой даже в дневное время, что в этот год позволило получить данные о χ . Наряду со спектрополяриметром большую часть времени в 2003 г. работал нефелометр В.Е. Сидорова, также оборудованный низкотемпературным нагревателем воздуха. Это позволило в ряде случаев заполнить пробелы в данных M и χ данными нефелометра.

Результаты и их обсуждение

Временная развертка ежедневных среднесуточных значений массовой концентрации M приведена на рис. 1; жирной кривой указано 15-суточное скользящее среднее.

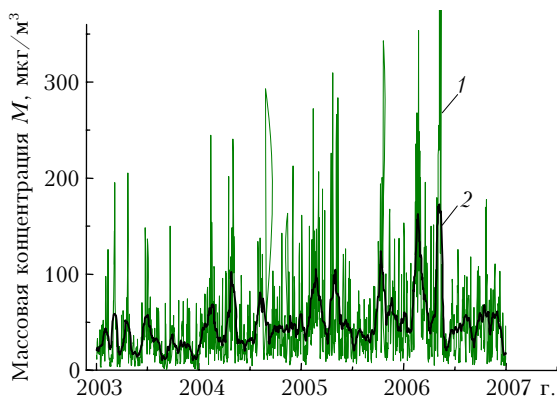


Рис. 1. Среднесуточное значение массовой концентрации субмикронного аэрозоля M (1) и пятнадцатисуточное скользящее среднее $\langle M \rangle$ (2) в 2003–2006 гг.

Обратим внимание на следующие особенности поведения среднесуточных значений M . В течение всего периода наблюдений 2003–2006 гг. происходил отчетливый рост величины и частоты пиковых значений M .

Моменты появления пиков носят вполне упорядоченный характер, а именно: они группируются в серии, разделенные промежутками, когда значения M близки к средним значениям. Для иллюстрации к средним значениям. Для иллюстрации на рис. 2 приведен фрагмент ряда, соответствующий первым 3 мес 2006 г. Из него следует, что в этот период большие уровни M в сериях следовали с интервалом около 4 сут с продолжительностью таких серий 2–3 нед.

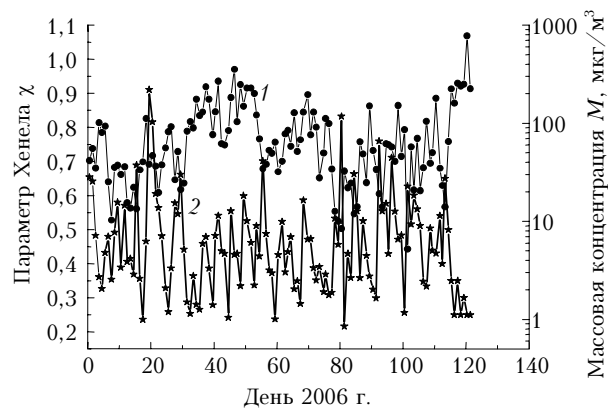


Рис. 2. Среднесуточные значения M (1) и χ (2) в январе–апреле 2006 г.

Начиная с зимы 2004 г. на скользящих средних M отчетливо проявляются характерные колебания с временным масштабом около 3 мес, связанные с появлением плотных и сверхплотных дымок. В 2004 г. это три колебания, в 2005 г. — два, в 2006 г. — два, причем начала этих серий привязаны к концу декабря — началу января. Скорее всего, это связано с особенностями зимнего режима циркуляции атмосферы.

Частота появления таких дымок также монотонно нарастала от года к году. На рис. 3 приведены гистограммы M по данным измерений в 2001 и 2003–2006 гг. (данные за 2002 г. не использовались из-за сильнейших задымлений в период летних пожаров).

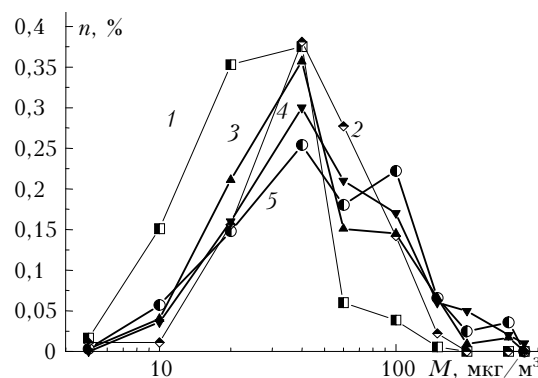


Рис. 3. Гистограммы массовой концентрации аэрозоля M для 2001 (1), 2003 (2), 2004 (3), 2005 (4) и 2006 гг. (5)

По сравнению с 2001 г. в 2003 г. резко снизилось относительное количество дней с малым значением M и несколько возросло количество дней, когда значения M превышали 100 мкг/м^3 . В 2004 г. при примерно одинаковом с 2003 г. количестве случаев слабого рассеяния резко возросло количество плотных и очень плотных (с $M > 150 \text{ мкг/м}^3$) дымок. В 2005–2006 гг. этот рост продолжился, и впервые за последнее десятилетие зарегистрированы сверхплотные дымки, когда массовая концентрация M сухой основы аэрозоля превысила 350 мкг/м^3 , а 01.05.2006 г. был отмечено значение $M = 770 \text{ мкг/м}^3$.

На рис. 3 отчетливо видна тенденция поднятия от года к году правого крыла распределения, что обусловлено увеличением частоты появления плотных дымок. В 2006 г. гистограмма M вообще стала двухмодальной – второй максимум появился в области $M \sim 100\text{--}150 \text{ мкг/м}^3$ (т.е. плотные дымки), однако несмотря на деформацию распределения положение наиболее вероятного значения M (основного максимума гистограммы) в течение этих лет оставалось неизменным и составило 40 мкг/м^3 .

Такой характер деформации частотного распределения M сильно повлиял на поведение сезонного хода M . Кривая 1 на рис. 4 – заимствованный из [2] осредненный за 1991–1998 гг. ход среднемесячных значений M . Близкий к нему сезонный ход M в 2003 г. не показан, чтобы не загромождать рисунок. Отчетливо видно, как от года к году нарастают пиковые значения зимне-весенних колебаний среднемесячных значений M .

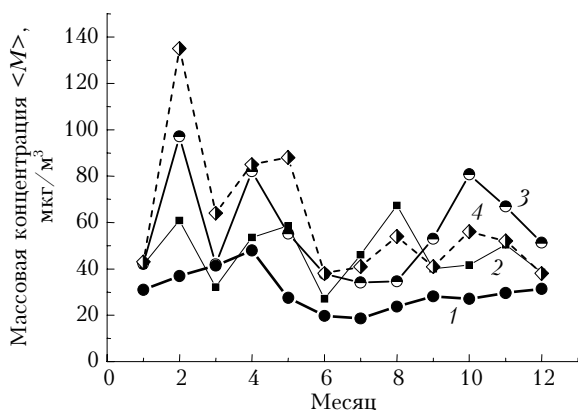


Рис. 4. Сезонный ход среднемесячных значений M : 1 – средний за 1991–1998 гг. по данным В.Н. Сидорова, 2 – в 2004 г., 3 – в 2005 г., 4 – 2006 г.

Этот процесс отразился даже на ходе среднегодовых значений M (рис. 5). Данные за 1991–2000 гг. получены В.Н. Сидоровым. Из рис. 5 следует, что почти монотонный спад среднегодовых значений M в 1991–2001 гг. сменился в 2002 г. довольно быстрым монотонным ростом среднегодовых значений M (среднегодовое значение M в 2002 г. получено по 10 мес, исключены данные в период лесных пожаров), что указывает на вероятные изменения в 2002 г. атмосферной циркуляции.

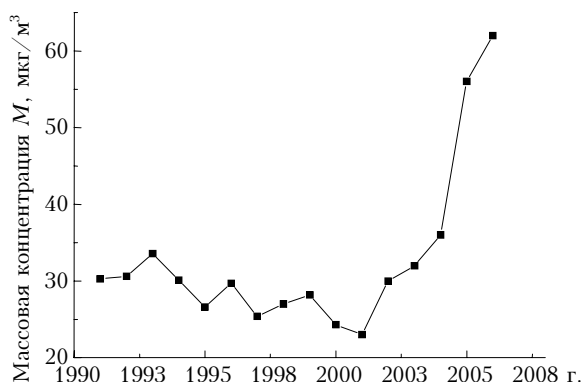


Рис. 5. Среднегодовое значение массовой концентрации $\langle M \rangle$ в 1991–2006 гг.

Плотные и сверхплотные дымки реализуются в теплых секторах атмосферных циклонов, а также в антициклонах при условии сильных атмосферных инверсий. Подчеркнем, что это заведомо не последствия неких антропогенных выбросов на территории Центральной России. К образованию этих дымок не имеют никакого отношения ни зимние «печные смоги», ни лесные пожары. Этот вывод следует из результатов сравнительного анализа распределений частиц по размерам в таких дымках и в дымах лесных пожаров [6].

Для дымовых распределений объемов частиц по размерам характерен узкий колокол основной моды распределений в окрестности размеров частиц $r \sim 0,2 \text{ мкм}$. Это выражается в почти нейтральном спектральном ходе $D(\varphi = 45^\circ, \lambda)$ в дымах. Распределения, полученные для плотных дымок, более широкие, их мода находится в области $r \sim 0,1\text{--}0,12 \text{ мкм}$, и у них, как правило, присутствует столь характерный для распределений в дымках участок с обратнотепенным законом в области радиусов $0,2\text{--}0,6 \text{ мкм}$. Иначе говоря, обычные и плотные дымки различаются, в основном, концентрацией частиц и показателем степени аппроксимирующего распределения обратнотепенного закона.

Если с позиции метеорологии уменьшение со временем относительного количества случаев со слабым рассеянием (т.е. нарастание $\langle M \rangle$) могло бы быть связано со смещением траекторий циклонов к северу, т.е. с ослаблением влияния арктических воздушных масс в холодных секторах арктических циклонов (подтверждение или опровержение роли этого механизма требует специального исследования), то заметно участвовавшие случаи сверхплотных дымок требуют отдельного объяснения.

В ряде случаев появление плотных дымок связано с накоплением аэрозоля в приземном слое в условиях сильных приземных температурных инверсий в антициклоне, однако были нередки случаи, когда высокие уровни содержания аэрозоля наблюдались в теплых секторах циклонов в отсутствие каких-либо приземных инверсий. Превышение среднего уровня M в таких ситуациях доходит до порядка. Благодаря столь сильному возрастанию в них концентрации M и достаточно высоких

частот их появления именно плотные и сверхплотные дымки оказали наиболее сильное влияние на вариации рассчитываемых среднемесячных и даже среднегодовых значений M в 2003–2006 гг.

На рис. 6 по аналогии с рис. 1 приведены временные развертки величины параметра Хенела χ и 15-суточного скользящего среднего $\langle\chi\rangle$, а на рис. 7 — ход среднемесячных величин параметра, который хорошо прослеживается даже на скользящих средних.

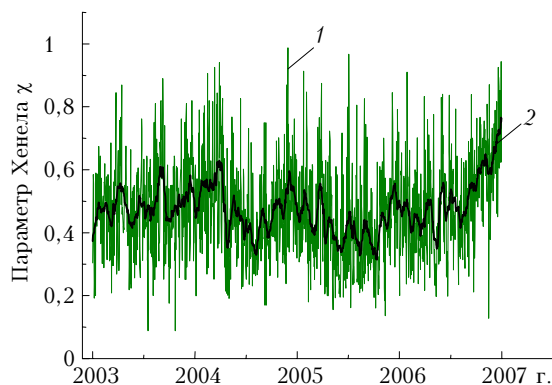


Рис. 6. Среднесуточное значение параметра Хенела χ (1) и пятнадцатисуточное скользящее среднее $\langle\chi\rangle$ (2) в 2003–2006 гг.

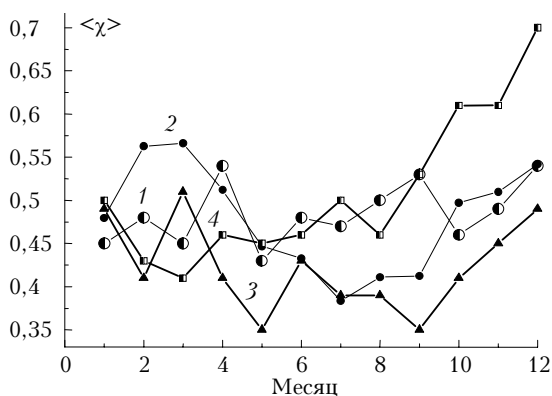


Рис. 7. Среднемесячные значения параметра Хенела в 2003 (1), 2004 (2), 2005 (3) и 2006 гг. (4)

Некоторые особенности временного хода параметра χ сходны с установленными в [3] основными закономерностями вариаций γ . В 2004–2005 гг. на фоне вариаций среднемесячных значений проглядывают зимне-весенний максимум и летний минимум. В [7] такой ход увязывается со сходом снежного покрова и выбросом в атмосферу накопленных за зиму в снегу веществ. Обратим внимание на согласованные противофазные вариации M и χ на рис. 2 с периодом около 4 сут, причем для параметра χ амплитуда таких вариаций намного превышает величину сезонных вариаций. Таким образом, наличие или отсутствие снегового покрова не являются главной причиной вариаций χ .

Во временном ходе χ даже без скользящего сглаживания прослеживаются колебания с перио-

дом около 7 нед (см. рис. 6), которые как бы модулируют четырехсуточные вариации χ . Это именно те периоды, что были установлены в [7].

На рис. 8 приведены гистограммы частот величины параметра Хенела отдельно для каждого из четырех лет наблюдений и для всего периода. Сводная гистограмма хорошо аппроксимируется нормальным распределением со средним значением $\chi = 0,5$ и стандартным отклонением $s = 0,21$.

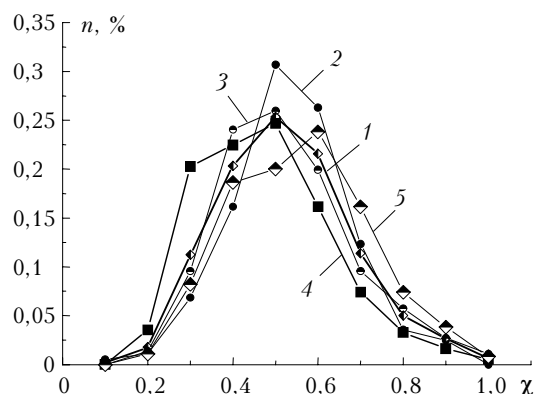


Рис. 8. Гистограммы распределений величин параметра Хенела χ по данным 2003–2006 гг. (1) и 2003 (2), 2004 (3), 2005 (4) и 2006 гг. (5)

В то же время годовые распределения заметно отличаются друг от друга — для 2003 г. распределение более узкое, в 2005–2006 гг. они, наоборот, заметно шире, причем первое уширяется за счет левого крыла (меньшие значения χ), второе, напротив, за счет правого, так что даже наиболее вероятное значение χ для 2006 г. получилось равным 0,6. Заметим, что в последнем случае проявились хорошо известные погодные аномалии конца 2006 г. в России — в течение ноября–декабря преобладали очень теплые и влажные морские умеренные воздушные массы с Атлантики.

Выводы

По данным измерений на Звенигородской научной станции ИФА РАН в 2001–2006 гг. проанализированы вариации двух основных характеристик приземного аэрозоля: массовой концентрации M и параметра конденсационной активности χ . Показано, что за эти годы в Центральной России участились случаи плотных и сверхплотных дымок. Это привело к изменению характера сезонной зависимости массовой концентрации аэрозоля M : в сезонном ходе M появились упорядоченные колебания с увеличивающейся год от года амплитудой. Именно за счет учащения случаев плотных и сверхплотных дымок в 2002–2006 гг. наблюдается значительный монотонный рост среднегодовых значений M . Среднегодовое значение M в 2006 г. выросло по сравнению с 2001 г. почти в 3 раза (с 23 до 62 $\text{мкг}/\text{м}^3$).

По данным 2003–2006 гг. в сезонном ходе параметра Хенела присутствуют весенний максимум

и летний минимум. В то же время амплитуда вариаций χ с периодами в несколько суток в 4–5 раз превосходит амплитуду сезонного хода. Поэтому можно предположить, что сезонный ход χ возникает в результате сезонной модуляции процессов, которые ответственны за короткопериодные вариации. Гистограмма распределения параметра Хенела для всего периода хорошо аппроксимируется нормальным распределением со средним $\chi = 0,5$ и стандартным отклонением $s = 0,21$, однако распределения, построенные отдельно для каждого года, различаются и по среднему значению, и по дисперсии.

Автор благодарен М.В. Панченко, Б.Д. Белану и М.А. Свириденкову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта МНТЦ ISTC-3254 и гранта РФФИ, № 07-05-00860.

1. *Емиленко А.С.* Исследование вариаций концентрации субмикронного аэрозоля в атмосфере города // Сб. докл. Всесоюз. совещания «Состояние и охрана воздушного бассейна курортных районов». Кисловодск, 1990. С. 53–60.

2. *Сидоров В.Н.* Сезонный и суточный ход содержания сухой фракции субмикронного аэрозоля в приземном слое // Тр. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М.: Диалог МГУ, 1999. С. 356–367.
3. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Яушева Е.П., Тулаков А.Г.* Внутригодовая изменчивость конденсационной активности атмосферного аэрозоля // Тез. трудов Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля». М., Диалог МГУ, 1999. С. 254–255.
4. *Хуторова О.Г.* Взаимосвязь вариаций приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 6–7. С. 526–529.
5. *Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В.* О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 393–399.
6. *Исаков А.А.* Спектрополяриметрические и нефелометрические исследования приземного аэрозоля в период лесных и торфяных пожаров в Подмосковье в 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 791–798.
7. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Польшкин В.В., Яушева Е.П.* Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 678–683.

A.A. Isakov. Interyear variability of changes of optical and microphysical parameters of the ground aerosol at Zvenigorod Research Station.

During 2001–2006, measurements of mass concentration of near-surface submicron aerosol, M , and its condensation activity χ , were made to spectropolarimeter and nephelometer. Analysis of variations in these parameters at scales from several days to several months is made. It is shown that there were more episodes of dense and super-dense hazes in Central Russia for these years. This has resulted in the change in the character of the aerosol mass concentration, M , in such a way that oscillations with increasing from-year-to-year amplitude appeared in the annual variation of M . Just due to more frequent episodes of dense and super-dense hazes in 2002–2006, a significant steady increase in the annual mean values of M is observed. The annual mean value of M in 2006 is more than two times as much as that in 2001 (23 mcg/m³ compared with 62 mcg/m³). Thus, the variability of the mass concentration has a strongly intermittent character.