

## Связь параметров аэрозоля Центральной России с воздушными массами

А.А. Исаков, А.В. Тихонов\*

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

Поступила в редакцию 17.12.2013 г.

По результатам многолетних измерений в Подмоскowie проанализирована связь параметров приземного аэрозоля с направлением прихода воздушных масс. Используются результаты 2004, 2006, 2007, 2010 и 2011 гг. Данные получены с помощью спектрополяриметра, трехсуточные обратные траектории рассчитывались с помощью стандартной программы NOAA HYSPLIT. Все возможные направления прихода воздушных масс были разбиты на 8 секторов, и принадлежность траектории к данному сектору определялась начальной ее точкой и ее характером. Соответствующие характеристики аэрозоля – массовая концентрация  $M$  и параметр Хенела  $\chi$  – осреднялись по сектору. В распределении траекторий по секторам присутствует ярко выраженный максимум на секторе Балтика–Северная Атлантика, массовая концентрация имеет максимум на секторе Украина–Средиземноморье, усредненные величины параметра Хенела не зависят от направления прихода воздушных масс. Осредненное временное распределение траекторий отчетливо показывает наличие для секторов Балтика–Атлантика и Российская Западная Арктика–Полярный Урал периодических максимумов с периодом около 11–12 нед. В остальных секторах распределение реализаций их по времени относительно равномерно.

*Ключевые слова:* приземный аэрозоль, массовая концентрация, конденсационная активность, обратные траектории; near surface aerosol, mass concentration, condensation activity, back trajectories.

### Введение

Многие атмосферные процессы демонстрируют ярко выраженную цикличность или, по меньшей мере, квазицикличность. Оставляя в стороне суточные и годовые циклы, остановимся на вариациях с длительностью в несколько недель. Как правило, это имеющие ярко выраженный всплесковый характер вариации. Применительно к оптическим и микрофизическим характеристикам приземного аэрозоля этот вопрос мы исследовали в работах [1–3]. Фурье-анализ подобных процессов неэффективен именно в силу их всплескового характера, и удобнее использовать анализ вейвлетный [4] или скользящего среднего [3] – именно вторым способом удалось выявить неожиданный характер вариаций массовой концентрации в Подмоскowie.

Обычно осредненные аэрозольные характеристики рассчитывают для суточных, месячных и годовых интервалов. Такая «календарная» привязка осреднения (за исключением суточных интервалов) никак не связана с характерными периодами вариаций анализируемых величин и при усреднении эти вариации чаще всего утрачиваются. В результате получаются достаточно гладкие кривые, как, например, в [2], где приведена развертка средне-

массовых значений массовой концентрации  $\langle M \rangle$  сухой основы субмикронного аэрозоля, дополнительно осредненных по нескольким годам.

На протяжении 20 лет за редким исключением характер осредненных со скользящим (а не фиксированным по календарным месяцам) осреднением был коротко следующим: с января по конец мая два четко выраженных практически идентичных пика, разнесенных на устойчиво воспроизводимый интервал в несколько недель, глубокий минимум с мая по август и еще два таких же максимума с таким же интервалом вплоть до декабря. На протяжении 10 лет начиная с 1991 г. этот интервал составлял 7 нед (семь «седмиц»), далее он резким скачком изменился на период в 11 нед и держался в течение 6 лет с 2005 по 2010 г., в 2011 г. он также скачком снова вернулся к 7 нед. Сейчас уже нет необходимости доказывать, что основные вариации параметров аэрозоля связаны с его дальним переносом и именно особенности последнего и обуславливают вышеописанный характер вариаций массовой концентрации  $M$ . В [4] нами выполнен предварительный анализ связи параметров аэрозоля: показателя преломления вещества частиц и их конденсационной активности с направлением прихода воздушных масс в Подмоскowie.

В настоящей статье мы продолжим этот анализ на базе многолетних наблюдений приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции. Цели ее

\* Андрей Александрович Исаков (A.A.Isakov@mail.ru); Анатолий Владимирович Тихонов (ifaran@yandex.ru).

сформулируем следующим образом: а) проследить на большом массиве данных характер связи параметров аэрозоля с направлением прихода воздушных масс; б) проследить сам характер вариаций направлений прихода.

## Методика и аппаратура

Данные 2004–2011 гг. получены с помощью спектрополяриметра, ежедневно измерявшего спектральные характеристики светорассеяния для приземного аэрозоля *in situ* и его сухой основы, по которым восстанавливались массовая концентрация аэрозоля  $M$  и конденсационная активность  $\chi$ .

Массовая концентрация  $M$  восстанавливалась по формуле

$$M = D_{11} \cdot 3000, \quad (1)$$

где  $D_{11}$  — коэффициент направленного светорассеяния под углом рассеяния  $45^\circ$  и на длине волны  $0,54$  мкм, а под конденсационной активностью  $\chi$  мы понимаем оптический отклик  $D_{11}$  на осушение аэрозоля в нагревателе, обработанный с помощью модифицированной формулы Хенела:

$$D_{11}(Rh) = D_{11}(Rh = 0)(1 - Rh)^{-\lambda}. \quad (2)$$

Здесь  $Rh$  — относительная влажность воздуха.

Трехсуточные обратные траектории рассчитывались с помощью стандартной программы NOAA HYSPLIT для каждого дня 2004, 2006, 2007, 2010 и 2011 гг. Точка прихода в Подмоскowie была выбрана на высоте 100 м из компромиссных соображений, чтобы, с одной стороны, насколько возможно уменьшить влияние рельефа местности, а с другой — избежать влияния высотной стратификации аэрозоля. Далее все возможные направления прихода воздушных масс, так же как и в [4], были разбиты на 8 равных секторов и по начальной точке каждой траектории и ее виду для нее фиксировался сектор прихода.

Сектор определялся как начальной точкой каждой траектории, так и, в случае ее сильной «закрученности», ее «телом». Примерное соответствие секторов регионам: 1 — Российская Арктика, Полярный Урал, 2 — Поволжье и Средний Урал, 3 — аридная зона Прикаспия, Казахстан, 4 — Ростовская область, Кавказ, Турция, 5 — Украина и далее Средиземноморье, 6 — Центральная Европа, 7 — Балтика, Северная Атлантика, 8 — Скандинавия, Баренцево море. Легко видеть, что разбиение отчасти соответствует метеорологическим представлениям о характере формирования воздушных масс, но несколько более конкретизированы возможные регионы — источники аэрозоля вдоль траекторий, которые, скорее всего, накладывают свой отпечаток на параметры аэрозоля.

Для каждого из выбранных годов сформированы восемь (по числу секторов) подмассивов, содержащих временную развертку реализации каждого из секторов. В день, когда воздушная масса приходила из данного сектора, в соответствующий массив заносилось число — номер сектора, в прочие дни — нуль. Сформированные таким образом под-

массивы прошли через операцию скользящего сглаживания с осреднением по 30 точкам. Целью такой операции было выявление характера смены воздушных масс в Подмоскowie.

## Результаты и их обсуждение

Для анализа данных измерений мы выбрали 5 лет. 2004 г. находился на восходящей части кривой зависимости среднегодовых значений  $M$ , 2006–2007 гг. — это годы максимальных уровней среднегодовых  $M$ , а 2011 г. — вблизи ожидаемого в 2013 г. минимума значений среднегодовых  $M$ . 2010 г. был во многих отношениях аномальный, и его результаты мы рассмотрим отдельно. Для начала мы построили для этих лет диаграмму частот распределения направлений воздушных масс по секторам (рис. 1). В целом характер распределения для четырех лет сходен, резко выделяется седьмой сектор, по представительности составляя более четверти случаев. Для Подмоскowie этот факт, учитывая господствующий западно-восточный перенос, вполне естествен. Заметим, что в условиях Сибири, например в Томске [5, 6], эта картина может быть иной по причине совершенно разных географических условий.

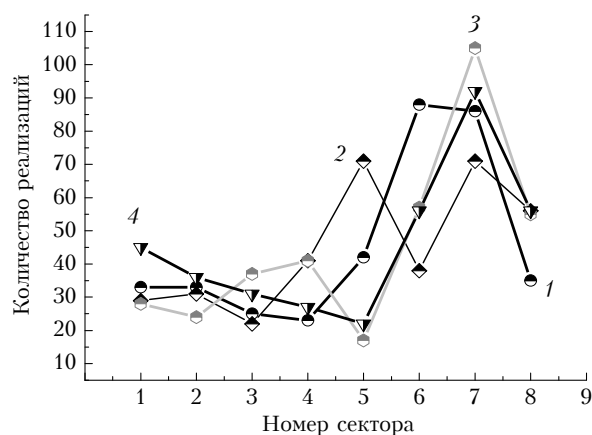


Рис. 1. Распределение траекторий воздушных масс по секторам: 1 — 2004, 2 — 2006, 3 — 2007, 4 — 2011 г.

Под средними по секторам значениями массовой концентрации  $M$  мы подразумеваем ту же величину, что и в [3]. Примеры распределения  $M$  по секторам приведены на рис. 2. Как и следовало ожидать, все четыре года заметно различаются. Воспроизводимость наблюдается лишь в двух моментах — максимумы  $M$  приходятся чаще на южные секторы, а секторам 7, 8 северо-запада (Балтика, Северная Атлантика, Баренцево и Белое моря) всегда соответствуют минимумы.

Неожиданно повела себя конденсационная активность (рис. 3). Если в [4] на полугодовом интервале проявились значимые различия по секторам, то на всех четырех годовых массивах  $\chi$  демонстрирует, с точностью до ее ошибки измерений  $0,1$ , удивительное постоянство (исключая 2007 г., см. ниже), сохраняющееся и по всем секторам, и от года к году.

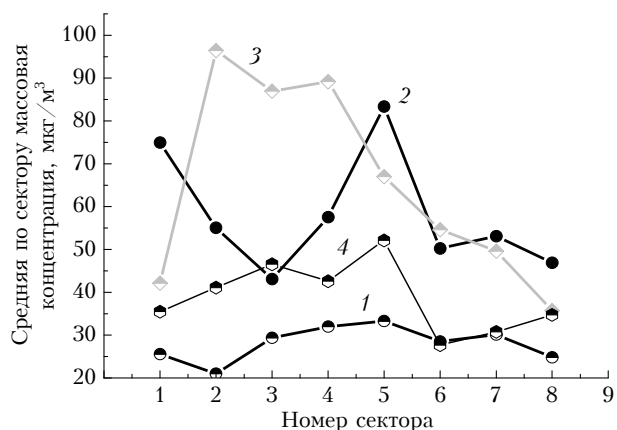


Рис. 2. Осредненные по секторам величины массовой концентрации аэрозоля: 1 – 2004, 2 – 2006, 3 – 2007, 4 – 2011 г.

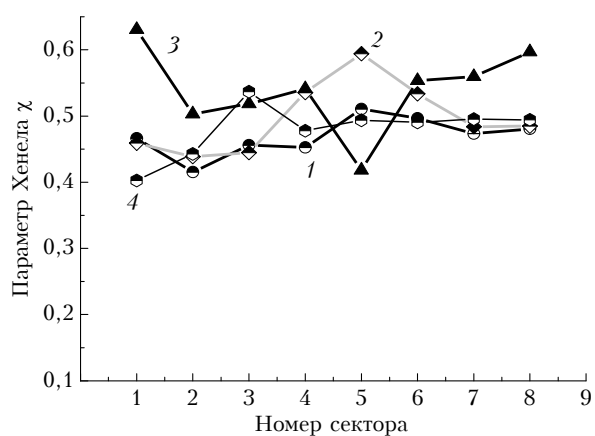


Рис. 3. Осредненные по секторам величины параметра Хенела аэрозоля: 1 – 2004, 2 – 2006, 3 – 2007, 4 – 2011 г.

В работе [7] мы отметили некоторое различие в химическом составе частиц, приносимых с юго-восточного и западного направлений. Небольшое количество подобных проб не позволяет утверждать, что такая картина устойчива, но если такие различия в химическом составе частиц и влияют на величину  $\chi$ , есть факторы, которые в массе данных нивелируют в значительной степени фактор направления прихода воздушной массы. Заведомо выпадающим из картины является 2007 г., когда различие между северо-западными секторами и юго-восточными значимо выходит за ошибки измерений. Напомним, что этот год был экстремальным и по количеству реализовавшихся сверхплотных ( $c M > 200 \text{ мкг/м}^3$ ) дымок, и июльских  $\chi \geq 0,6$ , и, разумеется, по большому среднегодовым значениям  $\langle M \rangle$ .

Интересная картина получилась для осредненных частот реализации разных секторов. Для всех четырех рассмотренных лет секторы от 3-го до 6-го не продемонстрировали каких-либо выраженных периодических процессов, т.е. количество появлений относительно равномерно распределено по годичному интервалу без какой-либо выраженной закономерности. Тем удивительней картина для седьмого и, несколько слабее выраженная, для первого сектора (рис. 4).

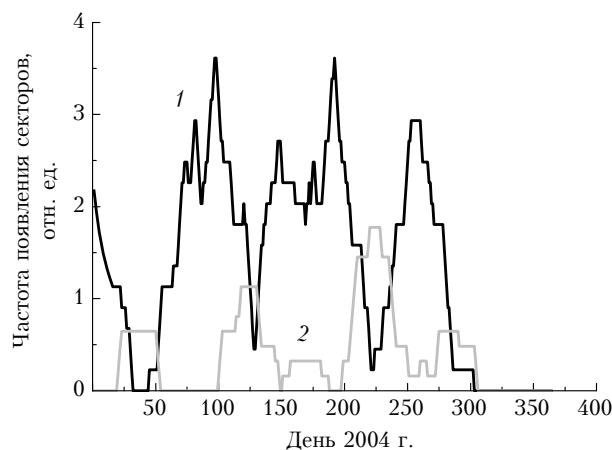


Рис. 4. Полученные с помощью скользящего осреднения сглаженные временные зависимости частоты появления секторов в течение 2004 г.: 1 – седьмой сектор, Балтика и Северная Атлантика; 2 – первый сектор, Баренцево море и Российская Арктика

Для седьмого сектора – Балтика и Северная Атлантика – во все анализируемые годы наблюдались отчетливые периодические структуры. Поскольку, как отмечалось ранее, анализ носит полуколичественный характер и амплитуда пиков отражает лишь относительную частоту прихода воздушной массы именно из этого сектора, обратим внимание лишь на наличие трех-четырех эквидистантных пиков, разделенных временным интервалом в те же 11 нед, что и в [3]. Что касается первого сектора, то отчетливость и воспроизводимость пиков ниже, но сомневаться в наличии периодических структур нет оснований. Отметим еще, что пики первого сектора следуют в противофазе по отношению к пикам седьмого сектора. Интервал между пиками в первом секторе составляет те же 11 нед. Отметим еще одну особенность рассчитанных обратных траекторий: если для секторов юго-восточных, южных и юго-западных направлений воздушные массы имели характер «стелящийся» – они перемещались практически без изменений высоты, то для северных секторов очень характерен был нисходящий с высоты вплоть до 1,5 км вид.

Особняком стоит 2010 г. Он оказался аномальным не только небывалой жарой в Центральной России. Уже практически с зимы в обратных траекториях необычно часто реализовывался третий сектор, даже без учета летнего антициклона частота его появления была примерно в 2 раза выше привычной. В целом же он наравне с демонстрировавшим обычную частоту седьмым сектором составил четвертую часть случаев. Так же как в [3], данные дымовых заносов были изъяты из рассмотрения, но даже без них в распределении массовой концентрации по секторам максимум выпал на третий сектор, т.е. на него пришлось значительное количество очень плотных ( $M > 100 \text{ мкг/м}^3$ ) дымок, чего ни раньше, ни позже не наблюдалось. Как отмечалось в [3], вслед за двумя зимне-весенними максимумами  $M$  последовал не провал в значениях  $M$ , а третий, июньско-июльский максимум, причем начало

его появилось задолго до пожаров. Необычно себя повела и величина конденсационной активности  $\chi$  — на ее развертке по секторам появился отчетливый, выходящий за пределы ошибок максимум на шестом секторе, величина его ( $\chi \sim 0,6$ ) тоже нехарактерна (рис. 5). Что касается временных распределений траекторий по секторам, то ни в одном из них не замечается какая-либо периодичность, даже в седьмом секторе она просматривается лишь с трудом.

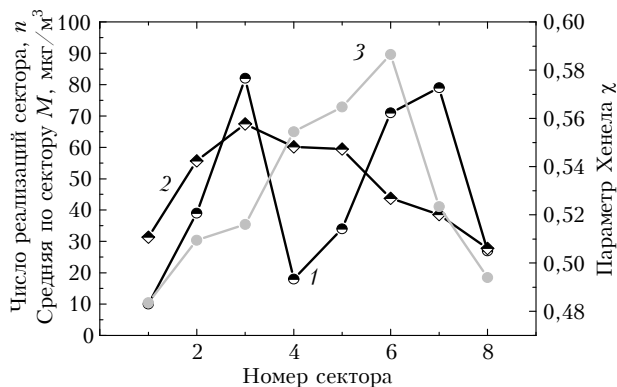


Рис. 5. Осредненные по секторам данные 2010 г.: 1 — частота реализаций сектора; 2 — величина осредненной по секторам массовой концентрации  $M$ ; 3 — осредненные по секторам значения параметра Хенела  $\chi$

Остановимся еще на одном аспекте долгопериодных вариаций параметров аэрозоля. В [3] была прослежена возможная связь такого параметра приземного аэрозоля как среднегодовое значение массовой концентрации  $M$  с величиной, характеризующей солнечную активность — интенсивность  $f$  радиоизлучения на длине волны 10,7 см. Уже тогда был отмечен четкий противофазный ход этих величин на протяжении десяти лет с 2000 по 2009 г. Сегодня мы можем дополнить эту зависимость данными последних четырех лет (рис. 6).

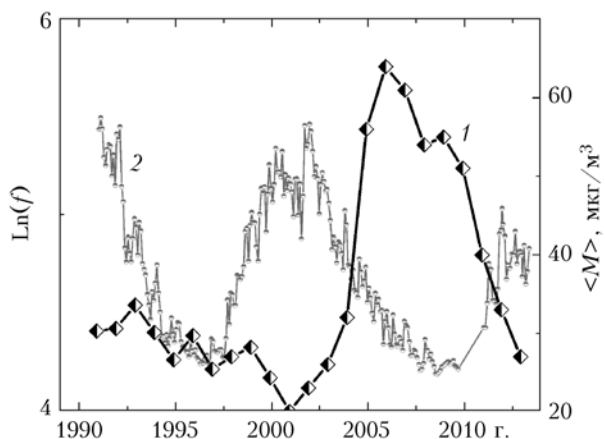


Рис. 6. Временная развертка среднегодовых значений массовой концентрации аэрозоля  $\langle M \rangle$  — 1 и параметра величины солнечной активности 2

Эти данные прекрасно вписались в предыдущую картину — после минимума солнечной актив-

ности 2007 г. начался ее рост, а вместе с ним начался существенный непрерывный спад среднегодовой массовой концентрации  $M$ , достигший в 2013 г. величины, близкой к минимальному значению  $\langle M \rangle = 21 \text{ мкг/м}^3$  (2001 г.). Иначе говоря, с 1990 по 2013 г. две величины — масса  $\langle M \rangle$  и солнечная активность  $f$  — менялись четко в противофазе. Поскольку основная причина вариаций массовой концентрации — дальний перенос, то солнечная активность влияет на величину массовой концентрации, если таковое влияние действительно существует опосредованно, через атмосферную циркуляцию, хотя может быть и прямое влияние.

## Заключение

Рассчитаны и проанализированы трехсуточные обратные траектории в условиях Подмоскovie для ряда лет 2004–2011 гг. В поведении этих траекторий выявлены некоторые особенности. Установлено, что для большинства лет наблюдается отчетливая периодичность в частоте появления траекторий из районов Балтики (седьмой сектор) и Баренцева моря (первый сектор), причем пики появления для них находятся в противофазе. Совместно проанализированы многолетние наблюдения параметров приземного аэрозоля и данные по этим траекториям. Установлено, что, за редким исключением (2010 г.), практически отсутствует связь осредненной величины конденсационной активности и направления прихода в Подмоскovie воздушных масс. Связь массовой концентрации  $M$  проявляется в виде тенденции — самыми обедненными аэрозолем получились седьмой и восьмой секторы прихода воздушных масс (Балтика, Северная Атлантика, Баренцево море и Беломорье), максимум концентрации приходится на два совершенно различных района по климатическим условиям — Полярный Урал и юго-западное направление (Украина и далее вплоть до Средиземноморья).

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 13-05-00956 и 12-05-009-34-а.

- 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.
- 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.
- Исаков А.А. О внутригодовой изменчивости массовой концентрации субмикронного приземного аэрозоля в Подмоскovie // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 462–465.
- Исаков А.А., Тихонов А.В. О сопоставлении осредненных направлений прихода в Подмоскovie воздушных масс со средними величинами параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 9–13.
- Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М. Счетная концентрация аэрозоля в различных синоптических условиях в циклонах и антициклонах

// Тезисы докл. Шестой Междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли» 7–10 октября 2008 г. СПб., 2008. С. 6.

6. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Фофонов А.В. Блокирующая роль Уральских гор в трансграничном пере-

носе примесей из Европы в Азию // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 937–941.

7. Исаков А.А., Шукурова Л.М. Исследование связи азотсодержащих соединений в составе приземного аэрозоля с характером воздушных масс // XX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Сб. докладов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. С. 15.

*A.A. Isakov, A.V. Tikhonov.* **Relationship between aerosol parameters in Central Russia with air masses.**

According to the results of long-term measurements in the Moscow region, relationships between the parameters of the near-surface aerosol and directions of air masses arrival were analyzed. The results of 2004, 2006, 2007, 2010, and 2011 were taken into consideration. The data were obtained by means of the spectropolarimeter, and three-days back trajectories were calculated using a standard NOAA HYSPLIT program. All the possible directions of air masses coming were divided into eight sectors, and belonging of the trajectory to the sector was determined by its initial point and trajectory shapes. The basic characteristics of aerosol (mass concentration  $M$  and Hanel parameter) were averaged over sectors. A narrow maximum at the Baltic and the North Atlantic sectors was revealed in the frequency distributions of the trajectories. The mass concentration had a maximum in the Ukraine–Mediterranean sector. Average values of the Hanel parameter do not depend on the direction of air mass transport to the observational site. The averaged temporal distribution of trajectories displays the existence of periodic peaks with a period of about 11–12 weeks for the Baltic–Russian Atlantic and Western Arctic–Polar Urals sectors. In other sectors, the distributions on their time-based realizations were relatively homogeneous.