

О сопоставлении осредненных направлений прихода в Подмоскowie воздушных масс со средними величинами параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц

А.А. Исаков, А.В. Тихонов*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
109017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 27.01.2009 г.

В январе—июле 2008 г. на основе спектрополяриметрических измерений получены ряды среднесуточных значений параметра Хенела, показателя преломления вещества аэрозольных частиц и их суммарного объема. Показано, что при смене воздушных масс, связанных с прохождением атмосферных фронтов, две последние величины меняются синхронно и в противофазе.

Для всего ряда наблюдений получен массив двухсуточных обратных траекторий для Звенигородской научной станции (ЗНС). Проанализирована связь между направлением прихода воздушной массы и характером вариаций параметра Хенела χ и показателя преломления вещества частиц n . Показано, что минимальные в среднем значения n характерны для обогащенных аэрозолем воздушных масс, приходящих в Подмоскowie с юга, — это регионы Ростовской области, Кавказа, Турции. Максимальные значения n реализуются в морских арктических массах, приходящих с севера и северо-северо-запада, это Северная Атлантика и Баренцево море. Максимальные средние значения χ ($\approx 0,6$) реализовывались в континентальных массах, пришедших из района Прикаспия, минимальные (около 0,35) — в арктических массах. Для воздушных масс всех западных румбов среднее значение χ оказалось примерно постоянным — около 0,45. Связь между вариациями n и χ отсутствует как для синхронно измеренных отдельных значений, так и для средних значений.

Ключевые слова: аэрозоль, показатель преломления, параметр Хенела, воздушная масса; aerosol, refractive index, Hanel's parameter, air mass.

Введение

Важную роль в изменчивости аэрозоля в Центральной области России играет смена воздушных масс. По нашим многолетним данным, массовая концентрация аэрозоля в воздушной массе, располагающейся в тыловой части холодного фронта арктического циклона, может опускаться до значений ~ 5 мкг/м³, тогда как в замутненной континентальной воздушной массе теплого сектора циклона или тыловой части антициклона значения массовой концентрации аэрозоля достигают десятков и сотен микрограмм. В работе [1] на основе длинного ряда наблюдений проанализирована связь характеристик аэрозоля с сектором циклона (или антициклона), в котором в момент измерений находится точка наблюдения. В настоящей статье представлен несколько иной подход к задаче — анализируется связь двух характеристик аэрозоля — конденсационной активности (параметра Хенела) и показателя преломления вещества аэрозольных частиц с направлением (азимутальным углом) прихода воздушной массы в Подмоскowie. Для оценок этого

угла были привлечены данные обратнотраекторного анализа.

Методика и аппаратура

Спектрополяриметр регистрирует поляризационные компоненты индикатрисы рассеяния света приземным аэрозолем на углах рассеяния $\phi = 45, 90, 135^\circ$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4\div 0,76$ мкм со спектральным разрешением $\Delta\lambda \approx 10$ нм, что позволяет решать комплексную обратную задачу восстановления распределения частиц по размерам и оценку показателя преломления вещества частиц.

Низкотемпературный нагреватель заборного воздуха и контроль его температуры дают возможность оценивать конденсационную активность аэрозоля. Под конденсационной активностью аэрозоля мы понимаем оптический отклик аэрозоля на уменьшение относительной влажности воздуха при его нагреве, обработанный по формуле Хенела:

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

где D — коэффициент направленного светорассеяния; Rh — относительная влажность воздуха; χ —

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

параметр конденсационной активности (параметр Хенела).

Алгоритм решения обратной задачи следующий. Сетка ядер интегрального уравнения рассчитывается для набора значений действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления и состоит из 22 ядер ($m \times k = 22$). Здесь $m = 11$ — количество значений действительной части комплексного показателя преломления n в диапазоне $n = 1,35 \div 1,65$ с шагом $\Delta n = 0,03$; $k = 2$ — количество значений мнимой части $\kappa = 0,0; 0,005$. Результаты восстановления представляются в форме *распределения объемов частиц по размерам*, это позволяет получить суммарный или интегральный объем частиц V в единице объема воздуха простым интегрированием функции распределения. Диапазон радиусов $r = 0,05 \div 1,5$ мкм (двадцать точек разбиения). Для основной массы данных восстановленные распределения ограничиваются размером $r = 1,2$ мкм. При оптимальной ситуации (точности измерений 5–10%) можно оценить точность восстановления распределения в области размеров $r \sim 0,2–0,5$ мкм примерно 15–20% [2]. Заметим, что отличные от нуля значения мнимой части показателя преломления получались достаточно редко, лишь в холодных секторах циклонов в условиях слабого рассеяния, поэтому в предлагаемой статье возможное поглощение аэрозолем не рассматривается.

Трехмерные двухсуточные (двое суток — это одно из ограничений в опциях программы для расчета пучка траекторий. Хорошо известно, что при увеличении длины траектории быстро падает надежность восстановления) обратные траектории рассчитывались с помощью программы NOAA HYSPLIT MODEL для Звенигорода. Обращаясь к модельным расчетам, авторы отдавали себе отчет в их полуколичественном характере. Высота точки прихода траектории 100 м была выбрана из компромиссных соображений — с одной стороны, чтобы хоть как-то ослабить влияние на расчеты гидродинамической шероховатости и орографии поверхности, с другой, что нам показалось важнее, не выйти за пределы приземного слоя воздуха. Все возможные направления прихода воздушных масс были разбиты на восемь равных секторов 0–45°, 45–90°, ..., 315–360°. Сектор определялся *начальной точкой каждой траектории*. Примерное соответствие секторов регионам: 1 — Российская Арктика, Полярный Урал, 2 — Поволжье, 3 — аридная зона Прикаспия, 4 — Ростовская область, Кавказ, Турция, 5 — Украина и далее Средиземноморье, 6 — Западная и 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 (речь идет не о локальных источниках, а именно о регионах с масштабом ~1000 км) аэрозоля вдоль траекторий, которые, скорее всего, накладывают свой отпечаток на параметры аэрозоля.

В данной статье анализируются вариации параметров аэрозоля, полученные решением обратной задачи для ежедневных измерений поляризационных компонент индикатрисы рассеяния D подсушенного аэрозоля, полученные в январе–июле 2008 г. (На сайте ARL/NOAA до момента написания статьи отсутствовали данные для расчета обратных траекторий позже 31.07.2008 г.) Наблюдения сопровождалась непрерывной (интервал выборки 1 мин) круглосуточной регистрацией массовой концентрации аэрозоля с помощью серийного нефелометра ФАН. В тех случаях, когда погода была достаточно стабильна, выполнялись утренние либо вечерние (с тем, чтобы начальная относительная влажность воздуха была $Rh \geq 0,7$) измерения на спектрополяриметре. В случаях заметного тренда (примерно в 2 раза или более) сигналов ФАНа, указывавшего на возможную смену воздушной массы, наблюдения выполнялись несколько раз в сутки. Для показателя преломления n и параметра Хенела χ выводились средние за сутки значения.

Результаты и их обсуждение

Тенденция уменьшения показателя преломления вещества аэрозольных частиц с увеличением коэффициента рассеяния была обнаружена еще при построении однопараметрической модели приземного аэрозоля [3]. Позже существование такой корреляционной связи для конкретных данных, полученных с помощью вышеописанного спектрополяриметра, было продемонстрировано в [2].

Относительно невысокий коэффициент корреляции (~0,5 для рядов данных длиной в несколько месяцев) можно объяснить погрешностью методики — малым отношением диапазона изменчивости показателя преломления n к шагу Δn сетки ядер обратной задачи, грубостью модели n , не зависящего от размера частиц (см., например, [4]), а также различиями в формировании аэрозоля в разных по природе воздушных массах. Синхронность вариаций n и коэффициента рассеяния σ (или суммарного объема частиц V в силу существования очень высокой корреляции между σ и V) отчетливо проявляется при прохождении через точку наблюдения развитых атмосферных фронтов, т.е. при смене воздушных масс. На рис. 1 приведена временная развертка n и интегрального объема частиц V в диапазоне 0,05–0,6 мкм.

Рис. 1 носит иллюстративный характер, поэтому на нем изображен лишь фрагмент ряда (с 80-го по 180-й день года) с наиболее резкими по времени и амплитуде вариациями. Четко выраженные фронты помечены стрелками как пример антикорреляции вариаций объема частиц и показателя преломления. Слабо выраженные в поле давления или температуры фронты, число которых намного больше, на рис. 1 плохо различимы. При этом момент их прохождения вообще может (с точностью до погрешности определения) не отразиться на параметрах аэрозоля.

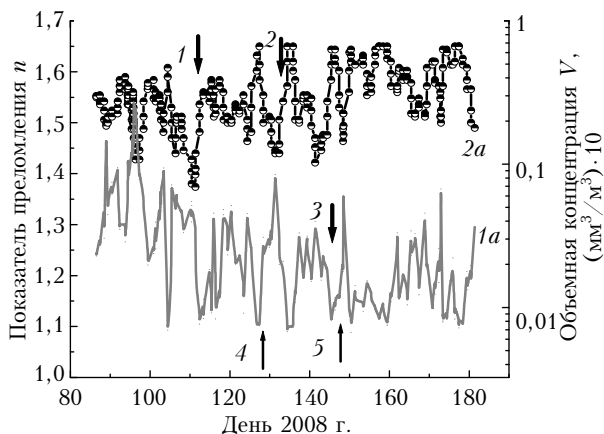


Рис. 1. Временная развертка синхронных измерений объемной концентрации субмикронного аэрозоля V (кривая 1а) и показателя преломления вещества частиц n (кривая 2а) в 2008 г.

Жирные стрелки с обращенным вниз острием (1–3) обозначают холодные фронты, тонкая стрелка с острием вверх (4) – теплый фронт 6 мая и фронт окклюзии по типу теплого (5) 27 мая. Резкое падение уровня рассеяния (т.е. объема V) при синхронном росте величины показателя преломления вплоть до $n \sim 1,65$ обычно связано с вторжением морской арктической массы с Северной Атлантики и реализуется достаточно часто. В то же время с ростом уровня рассеяния падение n наблюдается чаще всего в теплых секторах южных циклонов.

В антициклонах плотные дымки могут быть образованы и достаточно жесткими частицами. Рис. 2 иллюстрирует связь вариаций n с направлением прихода воздушной массы.

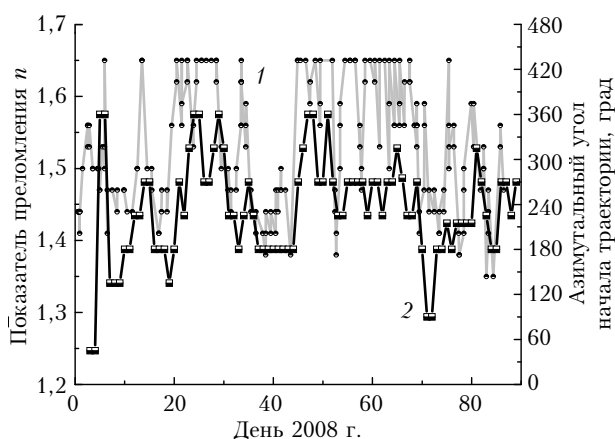


Рис. 2. Временная развертка показателя преломления вещества частиц n (кривая 1) и азимутального угла (2) начальной точки двухсуточной обратной траектории (угла прихода в Подмоскowie воздушной массы)

Интерфейс программы HYSPLIT организован так, что за одно обращение к программе можно рассчитывать пучок до 12 двухсуточных обратных траекторий, разнесенных по времени на 6 ч. Это давало возможность проследить предысторию каж-

дого эпизода измерений. Моменты прохождения фронтов отслеживались как по данным метеостанции ЗНС, картам погоды Гидрометеоцентра, картам геопотенциала для уровней 500 и 850 мбар, выложенным на сайте университета штата Вайоминг, так и по характерным «поворотам» траекторий в «пучке». Как отмечалось выше, в качестве оперативного дополнения к перечисленному рассматривались резкие изменения массовой концентрации M , фиксированной ФАНОм; для подобных ситуаций отдельно временной интервал между рассчитываемыми траекториями сокращался до 3 ч. По этим же картам определялся и тип барического образования, присутствовавшего на момент измерения на ЗНС.

По всему массиву данных для каждого сектора были рассчитаны средние по сектору значения показателя преломления и параметра Хенела. В каждый сектор попадало от 15 до 35 ситуаций, определяемых по направлению прихода траекторий. На рис. 3 приведена зависимость среднего значения $\langle n \rangle$ от направления прихода воздушной массы.

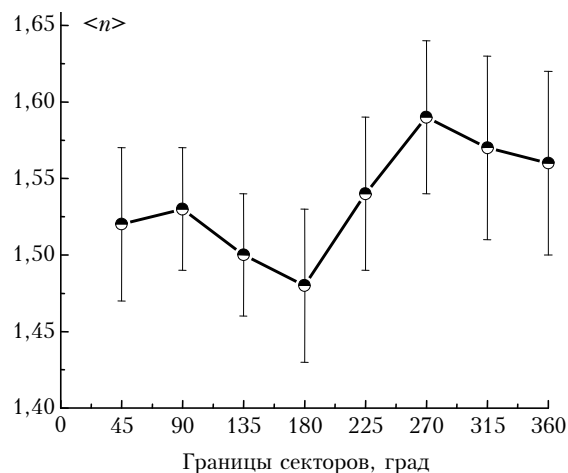


Рис. 3. Зависимость осредненного по сектору прихода воздушной массы показателя преломления вещества частиц $\langle n \rangle$ от номера сектора

Первые три сектора соответствуют по преимуществу антициклональному типу атмосферной циркуляции и континентальному типу воздушных масс; величина показателя преломления постоянна и равна примерно 1,5. (Однако в январе–феврале 2006 г. в обширном арктическом антициклоне при восточно-северо-восточном переносе сформировалась очень плотная дымка с жесткими частицами – $n \sim 1,62$). Минимальные в среднем значения $n < 1,48$ реализуются в обогащенных аэрозоле воздушных массах, приносимых южными циклонами (четвертый сектор). Наиболее ярко это выражено в «старых», окклюдивовавших циклонах, их относительно узких теплых секторах. Несколько большие средние значения n получились для аэрозоля, приносимого из Центральной Европы и Средиземноморья (пятый сектор). И наконец, наибольшие в среднем значения $n > 1,6$ характерны для морских масс холодных секторов арктических циклонов с весьма

низким содержанием аэрозоля (секторы 6–8). Заметим, что не было зарегистрировано ни одного случая больших значений $n \sim 1,6$ для южных секторов и малых, $n \sim 1,4$ для северных и северо-западных, т.е. различия n для этих секторов на рис. 3 физически достоверны, что подтверждают и оценки СКО. Все же, на наш взгляд, намного более надежным и физически ясным подтверждением существования зависимости между направлением прихода воздушной массы и n служит рис. 2, где в ряде эпизодов отчетливо видны их согласованные вариации.

Рис. 4 иллюстрирует связь с направлением прихода воздушной массы среднего по сектору значения χ .

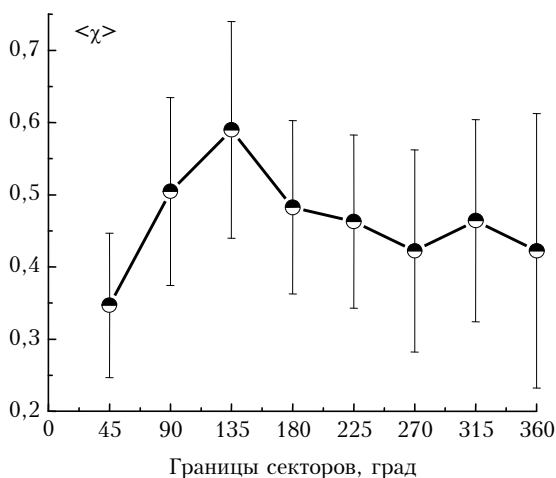


Рис. 4. Зависимость осредненного по сектору прихода воздушной массы параметра Хенела χ от номера сектора

Заметно отличаются лишь первый (минимальное значение $\langle \chi \rangle = 0,35$) сектор и третий (максимальное значение $\langle \chi \rangle \approx 0,6$). Для пяти последних секторов значение $\langle \chi \rangle$ примерно одинаковое — около 0,45. На деле это отнюдь не означает, что с направлений от южного до северного в среднем приносится аэрозоль с примерно одинаковой конденсационной активностью. Именно в последних трех секторах (6–8) разброс среднесуточных значений χ максимален — от 0,1 до 0,8 и близость средних может быть *особенностью именно этого массива данных*. Об этом же говорят и большие значения СКО для последних секторов, заведомо перекрывающие различия средних значений. Для иллюстрации того, насколько даже достаточно длинные (до полугода и более) ряды данных могут иметь «неустойчивое» среднее, на рис. 5 приведена временная развертка скользящего среднего по 50 точкам $\langle \chi \rangle$ для ряда длиной около 1000 дней (январь 2006 — август 2008 г.). Отчетливо видны три колебания с примерно одним и тем же периодом — 160–180 сут. Эти колебания по амплитуде в разы перекрывают амплитуду сезонного хода, делая фактически невозможным его выявление. К тому же колебания отсутствуют как в самом начале ряда, так и в его конце.

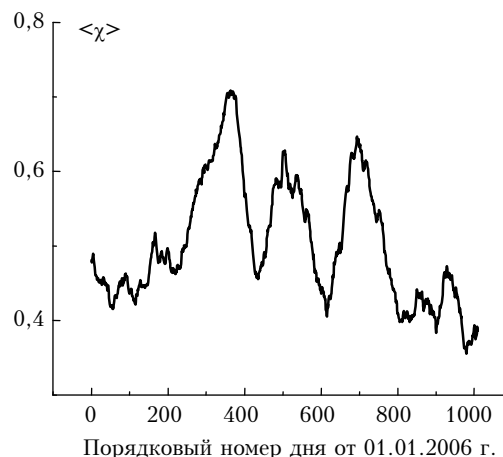


Рис. 5. Временная развертка скользящего 50-суточного среднего значения параметра Хенела χ 2006–2008 гг.

Заключение

На основе спектрополяризметрических измерений в январе–июле 2008 г. получены ряды среднесуточных значений параметра Хенела, показателя преломления вещества аэрозольных частиц и их суммарного объема. Показано, что при смене воздушных масс, связанных с прохождением резко выраженных атмосферных фронтов, две последние величины меняются синхронно и в противофазе.

Для всего ряда наблюдений с интервалом 6 ч получен массив двухсуточных обратных траекторий для ЗНС. Проанализирована связь между направлением прихода воздушной массы (регионом, откуда эта масса пришла в Подмоскowie) и характером вариаций параметра Хенела и показателя преломления вещества частиц. Получены осредненные по секторам направлений прихода воздушной массы величины n и χ . Показано, что минимальные в среднем значения показателя преломления n характерны для обогащенных аэрозолем воздушных масс, приходящих в Подмоскowie с юга — это регионы Ростовской области, Кавказа, Турции. Максимальные значения n реализуются в морских арктических массах, приходящих с севера и северо-северо-запада, это Северная Атлантика и Баренцево море (мы говорим здесь только о примерном направлении прихода массы и пути следования ее вдоль траектории, а не о районе ее формирования). Максимальные средние значения параметра Хенела ($\approx 0,6$) реализовывались в континентальных массах, пришедших из района Прикаспия, минимальные (около 0,35) — в арктических массах. Для воздушных масс всех западных румбов среднее значение параметра Хенела оказалось примерно постоянным — около 0,45. Связь между вариациями показателя преломления и параметра Хенела отсутствует как для синхронно измеренных отдельных, так и для средних значений. Всплесковый характер связи n с направлением прихода воздушной массы не является каким-то исключением: довольно часто наблюдаются длящиеся неделями эпизоды высокой корреляции вариаций других аэрозольных параметров,

например M и χ , однако периоды очень высокой корреляции сменяются паузами с ее отсутствием [5].

Хотелось бы подчеркнуть следующее. Авторы отдают себе отчет в том, что результаты анализа полугодового ряда наблюдений и отмеченные закономерности пока не могут быть объявлены универсальными. Однако наблюдающаяся на рис. 2 отчетливая связь вариаций показателя преломления вещества частиц и направления прихода воздушных масс позволяет, на наш взгляд, сформулировать задачу дальнейшего исследования этих согласованных вариаций.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 07-05-00860 и ISTC 3254.

1. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Расказчикова Т.М. Счетная концентрация аэрозоля в различных синоптических условиях в циклонах и антициклонах // Тезисы докл. Шестой Международной

конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли» 7–10 октября 2008 г., Санкт-Петербург. СПб., 2008. С. 6.

2. Isakov A.A. Some results of investigations of optical and microphysical characteristics of smoke aerosol // Proc. SPIE. 1998. V. 3583. P. 234–241.
3. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
4. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Макиенко Э.В., Панченко М.В. Влияние массы, режима термического разложения и типа древесных образцов на специфику формирования оптико-микрофизических свойств смешанных дымов // Тезисы докл. 15-й Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, 2008. С. 20.
5. 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.

A.A. Isakov, A.V. Tikhonov. On relation between average directions of air masses arrival to the Moscow region and the mean values of Hanel's parameter and the refractive index of the particle matter.

Time series of the daily values of the near-surface aerosol volume concentration as well as particle's refractive index n and Hanel's parameter χ were retrieved from the data of spectral polarimetric measurements in January – July, 2008. It was shown that at air mass change, connected with atmospheric fronts, the two parameters change synchronously and in antiphase. The array of two-day back trajectories was obtained for all series. The relation between the direction of air mass arrival and the manner of variations of the refractive index and Hanel's parameter is analyzed. The directions of the trajectories were divided into eight equal sectors and averaged values of n and χ were calculated. It was shown, that the minimum in average values of the refractive index $n \sim 1.45$ was realized in air mass, loaded by aerosol, which came in Moscow region from the Rostov region, Caucasus and Turkey. The maximal values of the refractive index $n (\sim 1.65)$ were realized in the Arctic sea air mass, which came from North Atlantic and Barents Sea. The maximum mean values of the Hanel parameter (≈ 0.6) were realized in the continental air mass, which came from Caspian region, the minimum (≈ 0.35) in Arctic air masses.