

Ю.Я. Матющенко¹, В.К. Ошлаков², В.Е. Павлов¹

О селекции данных AERONET. Часть I: обоснования методик

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул,

²Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.07.2005 г.

На базе теоретических расчетов интенсивности рассеянного света и наблюдений абсолютных индикатрис яркости в безоблачной атмосфере предложены методы селекции данных мониторинговых измерений яркости неба, представленных на сайте AERONET, с целью исключения облачных ситуаций. В основе методик используется следующее условие: рассеяние солнечного света в безоблачной атмосфере реализуется на системе частиц с широким спектром их размеров, что исключает возможности проявления «лепестковой» структуры индикатрисы рассеяния.

В ряде пунктов наблюдений яркости на фотометрах CIMEL, расположенных в пустынях, в лесах, на океанских островах и в российских городах, проведена селекция наблюдательных данных с целью исключения облачных ситуаций. Отмечен малый процент безоблачных дней в океанских условиях.

Хорошо известно, что качественная информация об интегрированных по высоте оптических параметрах аэрозоля может быть получена из анализа спектральной прозрачности, интенсивности рассеянного света и некоторых других характеристик безоблачной атмосферы [1]. Проводимый в последние годы NASA на фотометрах CIMEL наземный мониторинг аэрозольной оптической толщи и яркости дневного неба в альмукантарате Солнца во многих пунктах земного шара обеспечивает обширный наблюдательный материал, который может быть использован для построения как региональных, так и глобальных аэрозольных моделей атмосферы. Однако в выставленных на сайте AERONET табличных величинах яркости неба [2] далеко не полностью исключено влияние облачности.

Выполненный в основном специалистами NASA трехуровневый отбор данных для исключения влияния облачности касается ситуаций, когда они располагаются на небосводе в направлении на Солнце. В большинстве же случаев величины яркости отдельных облачных образований входят в окончательные ряды данных по яркости неба, обозначенных как Level-2. Поэтому каждый исследователь, использующий сведения из AERONET в тех или иных целях, сталкивается с необходимостью решения этой проблемы [3–7]. Наиболее объективный путь исключения влияния облачности из анализируемых рядов видится в привлечении спутниковой информации, что по ряду причин не всегда оказывается возможным. В связи с этим назрела необходимость обосновать и представить в компактной форме такие методы анализа угловых распределений наблюдаемой яркости неба, которые заведомо исключали бы из последующего рассмотрения облачные ситуации. Эта задача для солнечного альмукантарата решается в настоящей работе.

Основная физическая предпосылка, используемая во всех последующих построениях, состоит в том, что в подавляющем большинстве случаев аэрозольное рассеяние света во всей атмосфере в целом осуществляется на широко распределенной по размерам системе частиц. Исходя из представлений [8], будем считать, что частицы аэрозоля включают в себя три моды: ультрамикроскопическую (ядра Айткена), субмикронную и грубодисперсную. Внутри каждой из фракций функция распределения частиц по размерам носит нормальный логарифмический характер. Можно, например, показать [9], что средняя аэрозольная индикатриса однократного рассеяния $f_a(\varphi)$ для области спектра $\lambda = 0,55$ мкм, полученная путем обращения экспериментальных данных о яркости неба в Юго-Восточном Казахстане [10], в интервале углов рассеяния $2^\circ \leq \varphi \leq 160^\circ$ с точностью до нескольких процентов аппроксимируется суммой индикатрис, соответствующих вышеуказанным модам. Параметры мод следующие: $\sigma^2 = 0,4$ и $a = -0,1$ (ультрамикроскопическая фракция, 15%), 0,4 и 0,4 (субмикронная фракция, 60%) и 0,4 и 0,8 (грубодисперсная фракция, 25%). Здесь σ — дисперсия логарифмов радиусов, $a = -\ln \rho_0$; $\rho_0 = 2\pi r_0/\lambda$; r_0 — средний геометрический радиус сферических частиц. Цифры в скобках указывают вклад каждой из фракций в суммарное аэрозольное ослабление света. Показатель преломления равен 1,5; аэрозольное поглощение пренебрежимо мало (коэффициент при мнимой части показателя преломления η принимается равным нулю).

Следует заметить, что вышеприведенный диапазон углов рассеяния для альмукантарата Солнца $2^\circ \leq \varphi \leq 160^\circ$ охватывает все наблюдательные данные, представленные в AERONET. Аэрозольная индикатриса $f_a(\varphi)$, суммированная по всем фракциям,

имеет минимум вблизи $\varphi = 120^\circ$ (обозначим этот угол как φ_{\min}), а с изменением φ от 120° до околосолнечного ореола (2°) и от $\varphi = 120^\circ$ до $\varphi = 160^\circ$, т.е. в противоположную сторону, представляет собой два систематически возрастающих «куска» функций, что подтверждается, например, анализом табличных данных [11]. Лепестковая структура аэрозольной индикатрисы рассеяния, характерная для отдельных крупных частиц и сред с узкими распределениями их по размерам, при таких значениях параметров ρ_0 и σ в интервале углов рассеяния $2^\circ \leq \varphi \leq 160^\circ$ отсутствует.

Комбинируя в различных пропорциях веса вышеперечисленных мод в суммарном аэрозольном ослаблении света (или параметры λ , σ , ρ_0 , n и η), можно в существенной степени менять форму интегральной аэрозольной индикатрисы рассеяния $f_a(\varphi)$, имитируя ее природные вариации. Так, например, величина коэффициента асимметрии рассеянных световых потоков для частиц аэрозоля

$$\Gamma_a = \frac{\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} f_a(\varphi) \sin \varphi d\varphi}{\int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} f_a(\varphi) \sin \varphi d\varphi} \quad (1)$$

путем вариаций вклада мод в оптическую толщину рассеяния будет в рассматриваемом случае меняться в пределах от 5,6 (для чисто ультрамикроскопической фракции) до 15,7 (для чисто грубодисперсной фракции). Такой диапазон изменений Γ_a , по сути, включает в себя абсолютное большинство природных реализаций коэффициента асимметрии.

Поскольку в наблюдаемую абсолютную индикатрису яркости $f(\varphi)$ помимо аэрозольной компоненты $f_a(\varphi)$ входят молекулярная составляющая однократного рассеяния $f_m(\varphi)$, а также компоненты многократного рассеяния $f_2(\varphi)$ и отражения света от подстилающей поверхности $f_q(\varphi)$ с альбедо q [1]:

$$f(\varphi) = f_a(\varphi) + f_m(\varphi) + f_2(\varphi) + f_q(\varphi), \quad (2)$$

то при использовании наблюдаемой суммарной функции $f(\varphi)$ для селекции данных AERONET необходимо четко представлять, как каждая из ее составляющих может повлиять на угловое распределение яркости. Очевидно, что суммирование $f_a(\varphi)$ с $f_m(\varphi)$ из-за слабой угловой зависимости последней ($1 + \cos^2 \varphi$) существенно уменьшит вытянутость индикатрисы однократного рассеяния $f_1(\varphi) = f_a(\varphi) + f_m(\varphi)$ по сравнению с вытянутостью чисто аэрозольной индикатрисы $f_a(\varphi)$. При этом в зависимости от длины волны, мутности атмосферы и типа аэрозольной индикатрисы рассеяния заметно изменится и положение минимума в угловом распределении яркости при однократном рассеянии: смещение φ_{\min} может произойти от 120° вплоть до угла 90° . Однако условие систематического роста $f_1(\varphi)$ при $\varphi < \varphi_{\min}$ в сторону меньших углов и при $\varphi > \varphi_{\min}$ в сторону больших углов сохранится.

Поскольку отражение света от подстилающей поверхности специалистами по теории переноса излучения обычно принимается ламбертовым и соответственно компонента f_q — не зависящей от угла рассеяния, будем считать, что ее добавка к $f_1(\varphi)$ не повлияет на систематическое возрастание яркости с уменьшением φ от φ_{\min} и с увеличением φ на угловых расстояниях $\varphi > \varphi_{\min}$. Что же касается индикатрисы многократно рассеянного света $f_2(\varphi)$, то она в сравнении с индикатрисой первичного рассеяния $f_1(\varphi)$ обычно представляет собой слабо вытянутую «вперед» функцию с незначительной угловой зависимостью в задней полусфере [12]. Таким образом, есть все основания полагать, что суммарная индикатриса яркости $f(\varphi)$ будет регулярно возрастающей функцией при $\varphi < \varphi_{\min}$ в сторону меньших углов и при $\varphi > \varphi_{\min}$ — в сторону больших углов рассеяния. Анализ расчетов абсолютных индикатрис яркости $f(\varphi)$, выполненных Т.Б. Журавлевой для большого числа атмосферных параметров [13], полностью подтвердил это положение.

Таким образом, из теории переноса излучения следует, что для широко распределенных по спектру частиц аэрозоля должен иметь место систематический рост наблюдаемой функции $f(\varphi)$ с изменением φ по обе стороны от φ_{\min} . Если же на практике будут возникать нарушения этого роста в виде скачков в отдельных углах либо в интервале углов, то они с наибольшей вероятностью будут вызваны не индикатрисными эффектами, а горизонтальными неоднородностями в пространственном распределении рассеивающих частиц в атмосфере и в первую очередь наличием на небе отдельных облаков. Безусловно, такой критерий отбора безоблачных ситуаций должен быть отработан на полноценном экспериментальном материале в идеализированных безоблачных условиях.

Такие наблюдательные ряды абсолютных индикатрис яркости $f(\varphi)$ в свое время были получены сотрудниками Астрофизического института АН КазССР и Казахского педагогического института. На юго-востоке Казахстана пунктами наблюдений служили Астрофизическая обсерватория и пос. Кирбалтабай, на Черноморском побережье Кавказа — пос. Геленджик [14]. Помимо наблюдений $f(\varphi)$, на малоугловых фотометрах дневного неба измерялись оптические толщи τ и контролировалась стабильность оптических свойств атмосферы во времени по методике [15]. Фотометры были снабжены узкополосными интерференционными светофильтрами с длинами волн 0,40, 0,45, 0,55, 0,67, 0,71, 0,87 и 1,02 нм, т.е. соответствовали тому спектральному диапазону, в котором представлены данные AERONET. Измерения индикатрис яркости выполнялись в углах рассеяния $2^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$ с шагом $\Delta\varphi = 2^\circ$, далее при $10^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$ с шагом $\Delta\varphi = 5^\circ$, при $20^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ с шагом $\Delta\varphi = 10^\circ$ и затем с шагом $\Delta\varphi = 20^\circ$ вплоть до максимального угла рассеяния φ_{\max} , определяемого из условия

$$\cos \varphi = \cos^2 Z + \sin^2 Z \cos \Psi, \quad (3)$$

где Z — зенитный угол Солнца; Ψ — азимут наблюдаемой точки неба, отсчитываемый от Солнца. В противосолнечной точке $\Psi = 180^\circ$ имеем: $\varphi_{\max} = 2Z$. Поскольку наблюдения яркости неба, представленные в AERONET, проводятся при значениях Z , не превышающих $70\text{--}75^\circ$, то величина φ_{\max} в пределе достигает $140\text{--}150^\circ$. Полученные на юго-востоке Казахстана и в Геленджике именно при таких Z (и соответствующих им значениях φ_{\max}) экспериментальные данные использовались для решения вопроса о регулярности возрастания $f(\varphi)$ по обе стороны от φ_{\min} . Для примера на рис. 1 изображены индикатрисы яркости при $\varphi \geq 60^\circ$, измеренные в Кирбалтабае в дни с максимальной и минимальной мутностью атмосферы. Аэрозольные оптические толщину в эти дни были соответственно равны 0,06 и 0,34 для λ_1 и 0,05 и 0,32 для λ_2 .

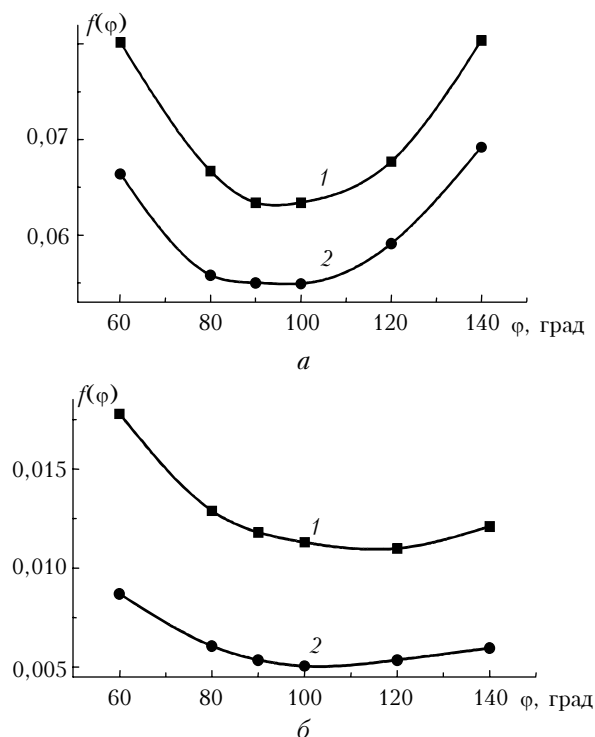


Рис. 1. Индикатрисы яркости $f(\varphi)$ при углах рассеяния $60\text{--}140^\circ$ по измерениям в Кирбалтабае для длин волн $\lambda_1 = 0,405$ мкм (а) и $\lambda_2 = 0,706$ мкм (б) при большой (1) и малой (2) мутности атмосферы

Погрешность измерений $f(\varphi)$ в относительных единицах (именно эти величины требуются для решения настоящей задачи) составляет около 1% при доверительной вероятности 0,95. Из рис. 1 видно, что угол φ_{\min} с точностью до нескольких градусов может быть выявлен достаточно надежно. Иногда минимум функции $f(\varphi)$ в красной и инфракрасной областях спектра не имеет четкой локализации и занимает интервал углов $\Delta\varphi = 10\text{--}30^\circ$, причем внутри интервала могут иметь место флуктуации $f(\varphi)$, обычно в пределах 1–2%. В подобных случаях яркость регулярно увеличивается с изменением φ по обе стороны от границ такого заранее выделенного интервала. К ана-

логичному выводу приводит анализ экспериментальных данных в разных участках спектра и в другие безоблачные дни.

Было исследовано свыше 150 индикатрис яркости, измеренных в 16 углах рассеяния. О положении угла φ_{\min} можно судить из данных наблюдений, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Число случаев (в %) расположения угла φ_{\min} на одном из трех угловых расстояний в альмукантарате Солнца

φ_{\min} , град	λ , мкм				
	0,45	0,65	0,70	0,85	1,01
90	13	5	2	0	0
100	87	80	72	41	22
120	0	15	26	59	78

Как и следовало ожидать, с уменьшением длины волны в формировании наблюдаемой индикатрисы яркости $f(\varphi)$ возрастает роль компонент $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$, что приводит к смещению φ_{\min} в сторону меньших углов. Для всех наблюдаемых индикатрис всегда выполнялось условие возрастания $f(\varphi)$ с систематическим изменением φ по обе стороны от φ_{\min} .

Чтобы убедиться, что это условие может быть использовано в анализе данных AERONET не только для натуральных условий, но и в городской атмосфере, были рассмотрены экспериментальные ряды аэрозольных индикатрис однократного рассеяния света в приземном слое воздуха в Алма-Ате [16]. Подобного типа абсолютные индикатрисы аддитивно складываются с абсолютными индикатрисами вышележащих слоев и формируют яркость неба над городом. Их просмотр показал, что условие убывания $f_a(\varphi)$ от малых углов до φ_{\min} и возрастания $f(\varphi)$ после φ_{\min} выполняется для всех исследованных 45 индикатрис в разных длинах волн в видимой области спектра.

Итак, подводя итоги вышесказанному, есть основания полагать, что в безоблачной атмосфере это условие должно выполняться практически всегда и поэтому может служить основой в выборке безоблачных реализаций для альмукантарата Солнца в системе данных AERONET. В случае попадания в поле зрения фотометра облака в каком-либо из направлений визирования ($\varphi + \Delta\varphi$) очень велика вероятность того, что его яркость будет больше яркости безоблачной атмосферы на угловом расстоянии φ от Солнца (имеются в виду наблюдения при $\varphi < \varphi_{\min}$). Вследствие этого скачком изменится гладкий угловой ход $f(\varphi)$. Особенно четко присутствие облаков может быть обнаружено на больших угловых расстояниях от Солнца при $\varphi > 70\text{--}80^\circ$, где яркость безоблачной атмосферы слабо зависит от угла рассеяния. Наличие в альмукантарате Солнца при $\varphi < 60\text{--}70^\circ$ малоконтрастных облаков, яркость которых незначительно превышает яркость безоблачного неба, с помощью подобного критерия обнаружить очень сложно.