

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 толщи в эти дни были соответственно равны 0,06 и 0,34 для λ_1 и 0,05 и 0,32 для λ_2 .

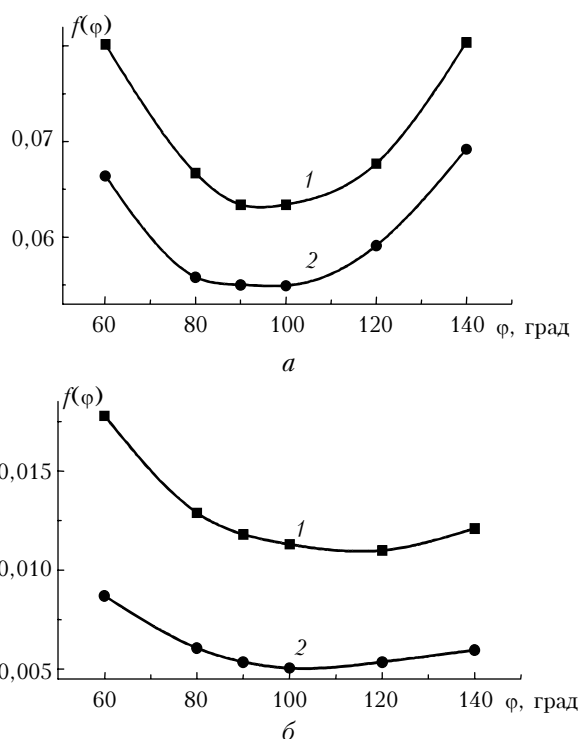


Рис. 1. Индикатрисы яркости $f(\varphi)$ при углах рассеяния $60\text{--}140^\circ$ по измерениям в Кирбалтабае для длин волн $\lambda_1 = 0,405$ мкм (а) и $\lambda_2 = 0,706$ мкм (б) при большой (1) и малой (2) мутности атмосферы

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 природных 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.

Для исключения ситуаций, характеризующихся наличием подобных малококонтрастных образований, может быть предложен более жесткий критерий селекции данных AERONET. В результате выполненного анализа наблюдаемых данных на юго-востоке Казахстана и в Геленджике было установлено, что для всех точек исследуемых экспериментальных массивов (2400 направлений φ) за исключением 16 из них выполняются следующие соотношения:

$$f(\varphi) - f(\varphi + \Delta\varphi) > f(\varphi + \Delta\varphi) - f(\varphi + 2\Delta\varphi) \text{ при } \varphi < \varphi_{\min} \quad (4)$$

и

$$f(\varphi + \Delta\varphi) - f(\varphi) < f(\varphi + 2\Delta\varphi) - f(\varphi + \Delta\varphi) \text{ при } \varphi > \varphi_{\min}, \quad (5)$$

где величина шага $\Delta\varphi$ задается соответствующей градиенту изменения яркости (см. выше). Примеры угловых зависимостей логарифмов разностей ($f(\varphi) - f(\varphi + 10^\circ)$) в диапазоне $10^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ представлены на рис. 2, а для области ореола [$f(\varphi) - f(\varphi + 2^\circ)$] в диапазоне $2^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$ — на рис. 3. Рассмотрены те же абсолютные индикатрисы яркости, что и на рис. 1. Отчетливо видно систематическое увеличение разностей [$f(\varphi) - f(\varphi + \Delta\varphi)$] с уменьшением угла рассеяния φ .

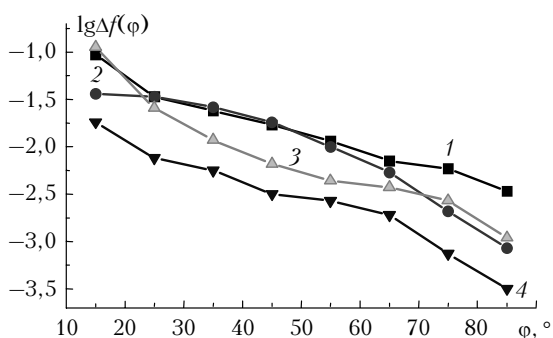


Рис. 2. Логарифмы разностей $\lg\Delta f(\varphi)$ для углов рассеяния $10\text{--}90^\circ$ по измерениям в Кирбалтабае для длин волн $\lambda = 0,706$ мкм (1, 2) и $0,405$ мкм (3, 4) при большой (1, 3) и малой (2, 4) мутности атмосферы

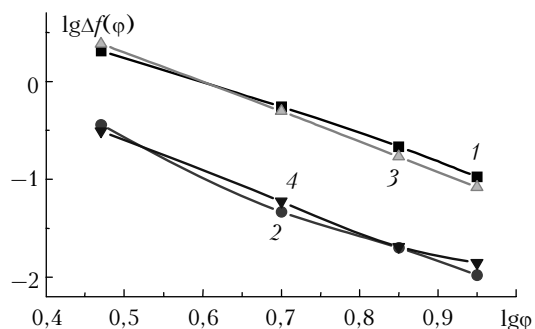


Рис. 3. Логарифмы разностей $\lg\Delta f(\varphi)$ для углов рассеяния $3\text{--}9^\circ$ по измерениям в Кирбалтабае для длин волн $\lambda = 0,706$ мкм (1, 2) и $0,405$ мкм (3, 4) при большой (1, 3) и малой (2, 4) мутности атмосферы

Необходимо сказать, что отмеченные выше 16 отклонений от формул (4), (5) не связаны с длиной волны и с зенитным углом Солнца, причем лишь три из них имели место в передней полусфере, т.е.

при углах рассеяния $\varphi < 90^\circ$. В приземном слое г. Алма-Аты [16] для тех же φ зафиксировано пять случаев отклонений из 45 рассмотренных. Иначе говоря, соотношение (4) для приземного слоя выполняется не реже, чем в 90% ситуаций. Поэтому оно может быть рекомендовано в качестве дополнительного «жесткого» критерия при выборке безоблачных ситуаций по данным AERONET. Наиболее эффективен подобный критерий для передней полусферы небосвода.

Следует отметить, что использование «жесткого» критерия, т.е. формул (4), (5), по сравнению с «мягким» условием систематического возрастания $f(\varphi)$ с изменением φ по обе стороны от φ_{\min} приводит к уменьшению числа прошедших селекцию случаев в 2–3 раза для пустынь, в 5–10 раз для континентальных лесов и в 10–20 раз для океанских островов. Эти цифры относятся к пунктам, о которых будет идти речь далее.

Другим необходимым условием в отборе экспериментальных данных с целью их последующего объективного анализа является констатация факта однородного распределения атмосферной мутности в горизонтальных направлениях в пределах погрешностей оптических измерений. Ранее этот вопрос уже рассматривался в некоторых работах, например в [5, 17]. Если аэрозоль в каждом из слоев стратифицированной атмосферы распределен однородно по горизонтали, то оптические характеристики правой и левой половин небосвода, условно разделенного плоскостью солнечного вертикала, должны быть идентичными. В этом случае независимо от высотного распределения мутности для яркости неба в альмукантарате Солнца должно выполняться условие

$$B(\Psi) = B(360^\circ - \Psi) \quad (6)$$

при изменении Ψ от 0 до 180° (измерения яркости на фотометрах SIMEL начинаются с $\Psi \geq 2^\circ$).

Здесь следует заметить, что в случае необходимости перехода от азимутальной зависимости яркости неба $B(\Psi)$ или $B(360^\circ - \Psi)$ к угловой $B(\varphi)$ следует использовать формулу (3). В свою очередь $B(\varphi)$ и абсолютная индикатриса яркости $f(\varphi)$ связаны соотношением

$$B(\varphi) = E_0 m f(\varphi) \exp(-\tau m), \quad (7)$$

где E_0 — спектральная солнечная постоянная; m — атмосферная масса в направлении на Солнце и τ — суммарная оптическая толщина атмосферы [15]. Все необходимые для перехода данные в явной или неявной форме можно найти в таблицах AERONET. Отметим и то обстоятельство, что значения Ψ в области ореола $\varphi < 10^\circ$ в силу выполнимости формулы (3) мало отличаются от φ (чуть превышают), если зенитный угол Солнца Z не меньше 60° .

Чтобы в анализе данных AERONET использовать условие (6), необходимо задаться какой-то исходной точностью его выполнения. Известно, что погрешность измерений яркости неба на фотометрах SIMEL в абсолютных единицах составляет около 5% [18]. Эта цифра определяет возможности всех по-

следующих манипуляций с наблюдаемыми яркостями $B(\Psi)$ и $B(360^\circ - \Psi)$ для определения аэрозольной индикатрисы однократного рассеяния $f_a(\varphi)$, разделения аэрозольной оптической толщи на компоненты поглощения и рассеяния или решения каких-либо других радиационных задач. Если различия между $B(\Psi)$ и $B(360^\circ - \Psi)$ не превышают 5%, то такие наблюдения могут быть использованы в вышеуказанных целях.

В отличие от [6], где для оценки однородности распределения мутности используется 21 азимутальное направление, будем считать, что условие (6) с точностью не хуже 5% должно выполняться для всех азимутов. Однако предварительный просмотр величин яркости неба на самых малых угловых расстояниях от Солнца, т.е. при азимутах 2–2,5 и 358–356,5°, в таблицах AERONET показал, что различия между ними всегда превышают 5%. Очень часто яркости вблизи Солнца специалистами NASA обозначаются символом «–100», что означает явные ошибки. Они возникают то слева, то справа от солнечного диска при четырехкратном автоматическом сканировании зоны околосолнечного ореола фотометром CIMEL в каждой серии наблюдений.

Так, в пункте Dalandzadgad в Монголии в числе представленных 8800 распределений яркости нет ни одного, не включающего при указанных Ψ величину «–100». В пункте Ascension Island в Атлантике число распределений равно 40 000 и лишь в 1/10 случаев отсутствуют значения «–100». Естественно, это вовсе не означает, что на небе рядом с Солнцем то по одну, то по другую сторону постоянно возникают и исчезают облака.

Трудно увязать подобный наблюдательный результат и с ошибками фотометрии ореола. С наибольшей вероятностью он вызван нерегулярным и неконтролируемым появлением бликов прямого солнечного света во входном канале фотометра при его не слишком точной механической установке в указанные точки небосвода рядом с солнечным диском. Вопрос этот требует специального исследования, а пока используем в анализе данные наблюдений яркости неба при азимутах больше 3 и меньше 357°.

Выборочно исследуем результаты наблюдений яркости из AERONET на одновременную выполнимость «жестких» условий (4), (5) и (6) для всех направлений в альмукантарате Солнца. Выберем три пункта в аридной местности: Solar Village (Аравийский полуостров), Tinga Tingana (Австралия) и Dalandzadgad (Монголия), на трех островах: Thaiti (Тихий океан, центр), Nauru (Тихий океан, запад) и Ascension Island (Атлантический океан, север), в трех континентальных точках, покрытых лесами: Belterra (Южная Америка), Santa-Cruz (Северная Америка) и Zambezi (Африка), а также в трех российских городах: Москве, Томске и Барнауле. Все значения яркости прошли предварительную селекцию в NASA и соответствуют уровню Level-2. В табл. 2 приведены данные для четырех длин волн λ по общему числу рассмотренных угловых распределений яркости N , по числу случаев, когда выполняются условия (3), (4) и (5), а также значения $\delta = (n/N) \cdot 100\%$. Заметим, что в случае применения условий (4), (5) и (6) по отдельности второе влечет за собой более существенную отбраковку исходных данных: в 2–10 раз в зависимости от места наблюдений.

Таблица 2

Выполнимость условий (4), (5) и (6) в ряде пунктов земного шара при азимутах $3^\circ \leq \Psi \leq 357^\circ$

λ , мкм	N	n	δ	N	n	δ	N	n	δ
	1. Solar Village			2. Tinga Tingana			3. Dalandzadgad		
1,02	14457	237	1,6	3672	15	0,4	2361	2	0,1
0,87	14390	221	1,5	3663	11	0,3	2252	0	0
0,68	14311	182	1,3	3653	17	0,5	2126	1	0
0,44	14329	427	3,0	3656	25	0,7	2063	5	0,2
	4. Thaiti			5. Nauru			6. Ascension Island		
1,02	4305	0	0	8405	0	0	9983	1	0
0,87	4325	1	0	8398	0	0	9862	2	0
0,68	4317	1	0	8350	1	0	9834	7	0,1
0,44	4289	0	0	8305	4	0	9776	19	0,2
	7. Belterra			8. Santa-Cruz			9. Zambezi		
1,02	8552	1	0	2701	1	0	1368	15	1,1
0,87	8566	0	0	2676	2	0,1	1359	22	1,6
0,68	8520	5	0,1	2657	1	0	1327	35	2,6
0,44	8489	19	0,2	2678	4	0,1	1318	31	2,4
	10. Moscow			11. Tomsk			12. Barnaul		
1,02	1250	0	0	1295	0	0	306	0	0
0,87	1249	2	0,2	1289	0	0	307	0	0
0,68	1247	7	0,6	1317	0	0	310	0	0
0,44	1246	5	0,4	1320	0	0	314	0	0

Эти табличные данные требуют серьезных размышлений. Помимо известного факта, что контраст локального аэрозольного и тем более облачного образования в атмосфере на фоне ясного неба усиливается с увеличением длины волны [19, 20], они содержат следующую информацию. Количество ситуаций, которые при выполнимости условий (4), (5) и (6) мы считаем безоблачными с равномерным распределением аэрозоля по горизонтали, ничтожно мало. Даже в пустыне на Аравийском полуострове в синей области спектра оно не превышает 3% (в ИК-области оно в два раза меньше). А в городах пригодные для анализа данные наблюдений вообще отсутствуют.

Здесь необходимо сказать следующее. Начиная с работ Е.В. Пясковской-Фесенковой в начале 40-х гг. прошлого столетия [15], весь последующий пятидесятилетний опыт исследований оптических параметров безоблачной атмосферы сотрудниками Астрофизического института АН Казахстана свидетельствует о другом. В горах и особенно в степях и полупустынях нередко отмечаются абсолютно безоблачные дни с различием величин $B(\Psi)$ и $B(360^\circ - \Psi)$ на угловых расстояниях $\varphi \geq 10^\circ$ не более 1–3%. Особенно часты безоблачные ситуации в осенний период. Хорошая сходимости яркостей слева и справа от солнечного диска (обычно расхождения меньше 3% и уж всегда не больше 5%) отмечается и в околосолнечном ореоле $2^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$, если, конечно, для наведения малоуглового фотометра в заданную точку ореола используется оптический искатель.

Такая наблюдательная методика была осуществлена на практике еще в начале 60-х гг. XX в. [21]. В фотометрах CIMEL оптический искатель отсутствует, а механическая установка прибора в точки ореола, симметрично расположенные слева и справа от Солнца, по-видимому, не обеспечивает 5%-й точности в согласовании яркостей $B(\Psi)$ и $B(360^\circ - \Psi)$. При этом величина абсолютной погрешности наведения носит индивидуальный характер для каждой конкретной серии наблюдений, что исключает возможность внесения средних поправочных множителей в весь массив в целом. Вследствие того что большой градиент яркости неба вблизи Солнца охватывает широкий диапазон углов Ψ , существенные различия между $B(\Psi)$ и $B(360^\circ - \Psi)$ из-за неточной установки фотометра возникают не только при азимутах 2–2,5 и 358–357,5°, но и во всей области околосолнечного ореола, т.е. при $10^\circ \leq \varphi$. В этом случае, если использовать на практике напрямую кри-

терий (6), будет создаваться иллюзия о пространственно неоднородном распределении крупных частиц в атмосфере по разные стороны от плоскости солнечного вертикала.

Однако если даже не вносить определенные коррективы в данные AERONET по ореолам и пользоваться средними значениями яркости из четырех в каждой серии наблюдений, то с помощью таких распределений $B(\Psi)$ можно решать определенный круг радиационных задач. Такова, например, задача об определении аэрозольных оптических толщ рассеяния по яркости неба. Для ее решения могут быть использованы интегралы [9, 13]:

$$\Delta_1 = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi \quad (8)$$

и

$$\Delta = 2\pi \int_0^{\pi} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi. \quad (9)$$

Погрешности в измерениях околосолнечного ореола для $3^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ$ из-за большого веса синуса в подынтегральных выражениях и малости диапазона углов рассеяния 0–10° при использовании механически осредненных наблюдательных данных для ореола незначительно скажутся на точности вычислений интегралов [22].

Более того, пользуясь некоторыми эмпирическими формулами для распределения яркости при малых углах рассеяния [1, 21] и считая погрешность установки фотометра в точки ореола в каждой полной серии наблюдений углового распределения яркости систематической, можно попытаться восстановить истинную угловую зависимость $f(\varphi)$. Решение такой задачи намечено нами на ближайшее будущее. Пока же определим величину δ^* , характеризующую отличие яркостей $B(\Psi)$ и $B(360^\circ - \Psi)$ при $\Psi \geq 10^\circ$, т.е. вообще исключив из анализа околосолнечный ореол (табл. 3).

Из сравнения табл. 2 и 3 следует, что исключение из критерия селекции (6) зоны ореола приводит к явному увеличению числа случаев, пригодных для последующего анализа. В частности, в аридных пунктах на Аравийском полуострове и в Австралии оно достигает 10–20%. Благодаря этому получаемые из наблюдений сведения о поглощающей способности аридных частиц по методикам [23] могут быть обеспечены полноценной статистикой [24].

Таблица 3

Выполнимость условий (4), (5) и (6) (значения δ^* в %) в ряде пунктов земного шара при азимутах $10^\circ \leq \Psi \leq 350^\circ$

λ , мкм	Номер пункта наблюдений (см. табл. 2)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,02	12,7	6,1	1,4	0,1	0,0	0,6	0,1	0,2	8,6	1,8	3,1	2,0
0,87	13,7	10,5	1,6	0,1	0,1	0,8	0,2	0,3	11,3	3,4	4,5	3,3
0,68	16,4	16,8	3,2	0,4	0,2	1,9	0,6	0,6	15,1	7,1	5,8	5,2
0,44	20,7	21,7	7,4	0,9	0,9	4,7	1,8	2,2	13,6	13,2	10,2	8,9

Тем не менее для некоторых пунктов наблюдений количество безоблачных ситуаций с равномерно распределенным аэрозолем в горизонтальных направлениях остается по-прежнему очень малым. На океанских островах в области спектра $\lambda \geq 0,68$ мкм оно не превышает 1%. Тем самым на повестку дня выдвигается вопрос о том, в какой мере данные, полученные в столь редкие безоблачные дни на океанских островах, будут репрезентативными для построения аэрозольных моделей атмосферы над океаном.

1. Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Павлов В.Е., Ташенов Б.Т., Тейфель Я.А. Рассеяние света в атмосфере. Ч. 2. Алма-Ата: Наука, 1968. 116 с.
2. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
3. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical Properties of Aerosols and Clouds: the software package OPAC // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 831–844.
4. Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I. Cloud-Screening and Control Algorithms for AERONET Database // Remote Sensing & Environ. 2000. N 73. P. 337–349.
5. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 16. P. 20673–20696.
6. Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanre D., Slutsker I. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. P. 590–608.
7. Улюмджиева Н.Н., Чубарова Н.Е., Смирнов А.В. Характеристики атмосферного аэрозоля в Москве по данным солнечного фотометра CIMEL // Метеорол. и гидрол. 2005. № 1. С. 48–57.
8. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовцева Ю.С. Оптические параметры атмосферного аэрозоля // Физика атмосферы и проблемы климата. М.: Наука, 1980. 262 с.
9. Мулдашев Т.З., Павлов В.Е., Тейфель Я.А. Об определении аэрозольной оптической толщи по яркости неба в видимой области спектра // Оптика атмосф. 1989. Т. 2. № 11. С. 1130–1134.
10. Антюфеев В.С., Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Михайлов Г.А. Определение аэрозольных индикатрис рассеяния безоблачной атмосферы в спектральной области 0,55–2,4 мкм // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1980. Т. 16. № 2. С. 146–155.
11. Яновский Э.Г., Думанский Э.О. Таблицы по рассеянию света полидисперсной системой сферических частиц. Киев: Наук. думка, 1972. 123 с.
12. Павлов А.В., Павлов В.Е., Мулдашев Т.З. Угловая структура многократно рассеянного света // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 5. С. 688–693.
13. Павлов В.Е., Пашиев В.В., Шестухин А.С., Журавлева Т.Б. Использование метода Монте-Карло для определения альbedo атмосферного аэрозоля // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7. № 4 (32). С. 34–41.
14. Глушко В.Н., Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Павлов В.Е., Федюлин И.А. Яркость и поляризация безоблачной атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1979. 201 с.
15. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд. АН СССР, 1957. 219 с.
16. Торопова Т.П., Тен А.П., Бушужева Г.В., Токарев О.Д. Оптические свойства приземного слоя атмосферы // Ослабление света в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1976. С. 33–113.
17. Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е. Малоугловые аэрозольные и облачные образования на фоне преобладающей безоблачной атмосферы // Межрегиональный экологический форум: Сб. матер. форума. Барнаул, 2004. С. 138–141.
18. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote F., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankoviak I., Smirnov A. AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization // Remote Sensing & Environ. 1998. N 66. P. 1–16.
19. Галилейский В.П., Морозов А.М., Ошлаков В.К. Цветовая температура атмосферы и аэрозольная оптическая толщина // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 11. С. 1229–1231.
20. Ошлаков В.К. Определение наличия облачности на линии визирования по результатам фотометрирования // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 4. С. 431–435.
21. Торопова Т.П., Павлов В.Е. Измерения индикатрис рассеяния при малых углах рассеяния // Тр. Всесоюз. научн. метеорол. совещ. Л.: Гидрометеониздат, 1964. Т. 6. С. 122–130.
22. Мулдашев Т.З., Павлов В.Е., Тейфель Я.А. О контроле устойчивости оптических свойств атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1991. Т. 27. № 8. С. 831–841.
23. Zhuravleva T.B., Pavlov V.E., Pashnev V.V., Shestukhin A.S. Integral and difference methods for the determination of the aerosol scattering optical depth from sky brightness data // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2004. V. 88. P. 191–209.
24. Шестухин А.С. Интегральный и нефелометрический методы определения аэрозольной оптической толщи рассеяния из измерений яркости неба: Автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. Барнаул, 2003. 19 с.

Yu. Ya. Matushchenko, V. K. Oshlakov, V. E. Pavlov. On AERONET data selection. Part I: methodical foundation.

Selection methods for AERONET monitoring data on sky brightness aiming at elimination of cloud situations are proposed. The methods are based on theoretical computations of the scattered light intensity and observations for absolute brightness phase functions in the cloudless atmosphere. It is assumed that solar light scattering in the cloudless atmosphere is realized by a system of particles with a wide size spectrum, which excludes a possibility of appearance of a lobe structure of the scattering phase function.

With the use of CIMEL photometers in brightness observations in a series of sites (deserts, forests, ocean island, Russian cities), the data selection was conducted. A low percentage of cloudless days were marked in ocean conditions.