

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

О селекции данных AERONET. Часть 2: метод коррекции ореолов

¹ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул,*² *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 8.06.2006 г.

Рассматривается вопрос о необходимости выполнения процедур селекции и последующей коррекции данных наблюдений яркости неба в альмукантарате Солнца при азимутальных углах 2–6°, представленных на самом высоком уровне достоверности Level-2 в таблицах AERONET. Для окончательного исключения облачных ситуаций и оптических неоднородностей в атмосфере на первом этапе применяются условия систематического убывания углового градиента яркости с ростом азимута. Второй этап состоит в использовании эмпирических закономерностей в угловом распределении яркости, выведенных из высокоточных наблюдений, с целью устранения систематических ошибок в рядах экспериментальных данных для солнечных фотометров CIMEL. Приводятся необходимые для практических целей формулы и таблицы.

Введение

Проводимый NASA во многих пунктах земного шара наземный мониторинг аэрозольных оптических толщ атмосферы и яркости дневного неба на фотометрах CIMEL дает обширный материал для использования в решении широкого круга радиационных задач. Однако предварительный анализ выставленных на сайте AERONET [1] наблюдений яркости неба $B(\Psi)$ на разных азимутальных углах Ψ от Солнца приводит к следующим выводам. Даже после селекции результатов наблюдений специалистами NASA с целью исключения облачных ситуаций доведенные до самого высокого доверительного уровня (Level-2) угловые распределения $B(\Psi)$ в якобы безоблачной атмосфере в отдельных направлениях все-таки включают яркость отдельных облаков [2]. В целом же недочеты в определении яркости обусловлены не только тем, что не полностью исключается влияние облачности, но и частично тем, что используемая аппаратура имеет определенные недостатки.

В настоящей статье предлагаются методические разработки, позволяющие при малых азимутах достаточно просто выполнить следующий после уровня Level-2 этап селекции экспериментальных данных, а затем осуществить их коррекцию, исключающую систематические аппаратурные погрешности. В итоге это позволит более полноценно использовать наблюдательный материал.

Особенности измерительных процедур и возможные источники ошибок

Для дальнейшего обоснования предлагаемых методик кратко изложим последовательность вы-

полнения измерительных процедур при определении величин $B(\Psi)$ на фотометрах CIMEL. Наблюдения яркости в солнечном альмукантарате выполняются в разных азимутальных углах Ψ , отсчитываемых от Солнца ($\Psi = 0^\circ$), на четырех длинах волн: 0,44, 0,68, 0,87 и 1,02 мкм. Первоначально прибор устанавливается в направлении $\Psi = 354^\circ$ (или при другом обозначении: $\Psi = -6^\circ$) и проводятся измерения $B(\psi)$ в диапазоне $354^\circ \leq \Psi \leq 358^\circ$, после чего фотометр автоматически «проходит» солнечный диск ($\Psi = 0^\circ$), и далее измеряются величины $B(\Psi)$ в углах $2^\circ \leq \Psi \leq 6^\circ$. Будем называть эти углы по обе стороны от Солнца околосолнечным ореолом. После сканирования ореола фотометр измеряет яркость в средних и больших азимутах $6^\circ \leq \Psi \leq 354^\circ$, а затем повторяется цикл ореольных измерений: от 354° до 358° и после вторичного прохода солнечного диска — от 2° до 6° . Таким образом, каждое выставленное на сайте AERONET распределение яркости $B(\Psi)$ в интервале азимутов от 358° до 2° содержит четыре группы данных по околосолнечному ореолу: $B_1(\Psi)$ в диапазонах $354^\circ \leq \Psi \leq 358^\circ$ и $2^\circ \leq \Psi \leq 6^\circ$ в начале и $B_2(\Psi)$ в тех же интервалах азимутов в конце серии (соответственно первый и второй проходы фотометра).

Так как в последующем изложении будут использоваться как азимуты Ψ , так и углы рассеяния ϕ , необходимо сделать следующее замечание. Переход от Ψ к ϕ в альмукантарате Солнца осуществляется с помощью известной формулы

$$\cos \phi = \cos Z_0 + \sin Z_0 \cos \Psi, \quad (1)$$

где Z_0 — зенитный угол Солнца. Если Z_0 больше 60° , то для ореола азимут и угол рассеяния (ϕ всегда меньше Ψ) отличаются незначительно. Так, например, при $Z_0 = 60^\circ$ и $\Psi = 6^\circ$ или соответственно

$\Psi = 354^\circ$ по другую сторону от Солнца, угол ϕ в обоих случаях равен $5,2^\circ$. Естественно, что при $\Psi \leq 4^\circ$ и $Z > 60^\circ$ отличие ϕ от Ψ будет заметно меньше.

Поскольку наводка фотометра CIMEL в точки солнечного альмукантарата с вышеуказанными углами Ψ осуществляется не оптическим методом с помощью оптического искателя [3], а механическим способом с применением шагового двигателя, то абсолютные погрешности установки прибора $\Delta\Psi$ в заданном направлении могут быть существенными.

Так, известно, что у нового только поступающего в эксплуатацию фотометра величина погрешности $\Delta\Psi$ составляет около $0,05^\circ$. По мере эксплуатации ходовые части прибора изнашиваются, и неточность его наведения в заданные точки ореола через 1–2 года возрастает до $0,25^\circ$ и даже более [4, 5]. Естественно, каждый прибор характеризуется своей величиной $\Delta\Psi$. Эти погрешности, несомненно, влияют на результаты измерений распределений яркости вблизи Солнца, что обусловлено существенным угловым градиентом яркости в ореоле.

При $\Delta\Psi > 0,25^\circ$ может возникнуть еще один эффект, влияние которого на измеряемую яркость неба учесть практически невозможно. Если величина $\Delta\Psi$ одинакова для всех точек ореола, то самые близкие к Солнцу углы будут равны $(358^\circ + \Delta\Psi)$ либо $(2^\circ - \Delta\Psi)$. В этом случае возникает реальная вероятность появления во входном канале фотометра бликов прямых солнечных лучей, попадающих на фотоприемник. Такой отраженный от диафрагмы и от внутренних стенок фотометра свет будет в существенной мере и непредсказуемо искажать (увеличивать) измеряемое значение яркости по сравнению с истинной величиной, связанной только с атмосферным рассеянием. Из-за наличия систематической погрешности в наводке фотометра будут искажены (хотя и в меньшей степени) величины $B(\Psi)$ в ореоле и при других азимутах: по одну сторону от солнечного диска они будут завышены, а по другую — занижены.

Предварительный анализ данных AERONET

Нами был изучен обширный наблюдательный материал AERONET по $B(\Psi)$ на уровне достоверности Level-2 в пунктах, расположенных в аридной местности: Solar Village (Аравийский полуостров), Tinga Tingana (Австралия) и Dalanzadgad (Монголия), на островах: Thaiti (Тихий океан, центр), Nauvu (Тихий океан, запад) и Ascension Island (Атлантический океан, север), в континентальных точках, покрытых лесами: Belterra (Южная Америка), Santa-Cruz (Северная Америка) и Zambezi (Африка), а также в трех российских городах: Москве, Томске и Барнауле. Всего было подвергнуто анализу 246715 околосолнечных ореолов в четырех участках спектра на разных зенитных расстояниях Солнца Z_0 . Сделаны следующие выводы.

Случаи весьма вероятного присутствия облаков на небе в том или ином направлении, как и явно

выраженные ошибочные значения $B(\Psi)$, обнаруженные специалистами NASA, маркируются ими в таблицах AERONET символом «-100». Если из дальнейшего анализа полностью исключить распределения яркости, которые в интервалах углов $2^\circ \leq \Psi \leq 6^\circ$ и $354^\circ \leq \Psi \leq 358^\circ$ содержат хотя бы одну «отрицательную» яркость, то количество исследуемых ореолов уменьшится почти десятикратно и станет равным 27015. Следует заметить, что в некоторых пунктах, например в Монголии, в результате такой селекции данных отбраковываются практически все результаты наблюдений.

Естественным законом распределения яркости в околосолнечном ореоле при наличии в атмосфере полидисперсных аэрозольных дымок с широким распределением частиц по размерам является систематическое уменьшение $B(\phi)$ (или соответственно $B(\Psi)$) с ростом угла рассеяния ϕ (или Ψ). Более того, наши наблюдения на малоугловых фотометрах с оптической наводкой в заданные направления ϕ показывают, что в степи и предгорьях Юго-Восточного Казахстана, а также на Черноморском побережье [3, 6, 7] практически всегда выполняется условие систематического убывания углового градиента яркости $\Delta B(\phi)/\Delta\phi$ с увеличением угла ϕ [2]. Нарушения этого правила, по сути включающего и условие уменьшения $B(\phi)$ с ростом ϕ , изредка вызываются попаданием в поле зрения фотометра плотных локальных пылевых либо водных облаков. Обычно они хорошо видны невооруженным глазом.

Используем условие убывания $\Delta B(\phi)/\Delta\phi$ с ростом ϕ в качестве критерия для селекции оставшихся 27015 угловых распределений яркости в ореолах и протестируем на его основе эти оставшиеся мониторинговые кривые. В итоге число распределений $B(\phi)$ (или соответственно $B(\Psi)$), которые могут быть использованы в последующем анализе, окажется равным 10866.

Сопоставим яркости $B(\Psi)$, измеренные в симметричных точках справа и слева от Солнца, например $B(2^\circ)$ и $B(358^\circ)$, разделив большую величину B_{\max} на меньшую B_{\min} в каждом из проходов фотометра. Подобный сравнительный подход к анализу результатов наблюдений широко используется многими специалистами при селекции данных AERONET. В его основе лежит очевидное положение: яркость неба на равных угловых расстояниях ϕ от Солнца в случае однородного распределения аэрозоля по горизонтали должна быть одинакова по обе стороны от плоскости солнечного вертикала.

Так, согласно [4, 5], если наблюдаемые величины B_{\max} и B_{\min} отличаются более чем на 10%, то такие распределения следует исключать из последующей процедуры восстановления спектра крупных частиц в атмосфере. Сразу необходимо заметить, что подобный подход к выборке качественных результатов наблюдений яркости является весьма «жестким» критерием и в результате его применения остается мало данных. Если, например, его напрямую использовать для селекции 27015 ореолов, оставшихся после первоначального исключения

распределений $B(\Psi)$ со значениями «-100», то число угловых зависимостей $B(\Psi)$, которые могут быть использованы в последующем анализе, уменьшится до 796, что составит всего лишь 0,3% от их первоначального числа (246715) в анализируемых таблицах AERONET.

Формула Ван де Хюлста

Осредненные результаты определения отношений B_{\max}/B_{\min} по данным наблюдений 10866 ореолов, для которых выполняется условие регулярного убывания $\Delta B(\varphi)/\Delta\varphi$ с увеличением угла рассеяния, представлены на рис. 1.

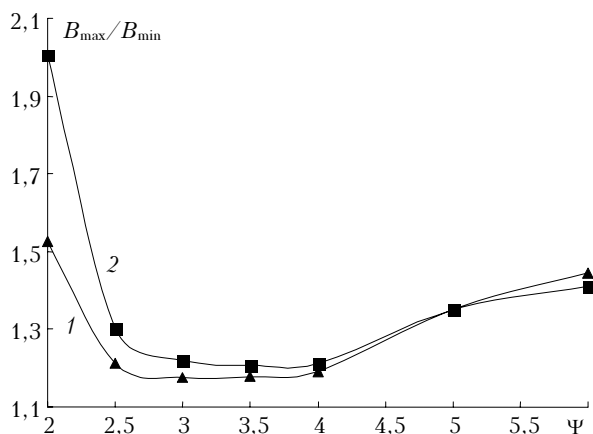


Рис. 1. Средние отношения B_{\max}/B_{\min} при первом (1) и втором (2) сканировании фотометрами CIMEL около-солнечных ореолов

Как уже говорилось выше, отличия B_{\max}/B_{\min} от единицы свидетельствуют либо о преимущественно неоднородном распределении мутности атмосферы вблизи Солнца, либо о существенной роли погрешности $\Delta\Psi$ наведения фотометра в заданные точки небосвода при измерениях яркости неба слева и справа от солнечного диска. В первом случае данные должны быть исключены из последующего анализа, а во втором — можно попытаться скорректировать результаты измерений $B(\Psi)$, предельно уменьшив влияние ошибок установки фотометра на окончательный результат.

С целью отработки методов селекции и коррекции следует привлечь данные наблюдений ореолов в абсолютно безоблачные дни с высокоточной наводкой аппаратуры. Такие измерения $B(\varphi)$ с начала 60-х гг. и до конца прошлого столетия проводились сотрудниками Астрофизического института Академии наук Казахстана.

Наведение фотометров, функционировавших в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном участках спектра, в заданные малые углы рассеяния φ с погрешностью $\Delta\varphi$ менее 1' осуществлялось наблюдателями с помощью оптических искателей, установленных на каждом из приборов [3, 6, 7]. Согласно полученным данным, расхождения $B(\varphi)$ слева и справа от Солнца при фиксированных углах $\varphi \geq 2^\circ$ крайне редко превышали 2–3%, причем

при переходе от одной серии наблюдений к другой не носили систематического характера. Как показали эти наблюдения $B(\varphi)$, яркость неба в видимой и ближней инфракрасной областях спектра с хорошей точностью (обычно не хуже 2–3%) описывается формулой Ван де Хюлста [3, 6, 8]:

$$B(\varphi) = A\varphi^{-q}, \quad (2)$$

где величина A не зависит от угла рассеяния, а параметр q определяется в основном оптическими свойствами крупных частиц в атмосфере. Соотношение (2) выполняется в диапазоне углов рассеяния $2^\circ \leq \varphi \leq 6-7^\circ$; при этом не обнаруживается систематической зависимости q от длины волны.

Чтобы убедиться в универсальности формулы Хюлста, были проведены дополнительные исследования угловых распределений яркости при $2^\circ \leq \varphi \leq 6^\circ$ на юго-востоке Казахстана в степи и в предгорьях Заилийского Алатау. Использовались с этой целью также данные, полученные на побережье Черного моря [6, 7]. Анализ 180 ореолов в безоблачной атмосфере показал, что соотношение (2) уверенно выполняется практически повсеместно. Гистограмма повторяемости параметра q представлена на рис. 2.

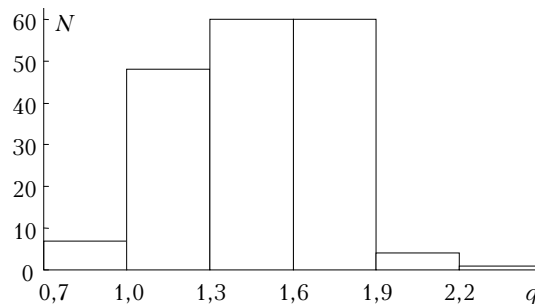


Рис. 2. Повторяемость параметра q в Юго-Восточном Казахстане. N — число случаев

Его величина действительно регулярно не зависит от длины волны; сам параметр меняется в пределах от 0,72 до 2,2 и в среднем равен 1,46. Поскольку угловая зависимость яркости неба в ореоле описывается степенной функцией, то, естественно, лучшим приближением в последующей коррекции данных наблюдений ореолов через осреднение величин $B(\varphi)$, измеренных слева и справа от Солнца, представляется использование среднегеометрических, а не среднеарифметических значений яркости.

5. Методы селекции и коррекции ореолов

Разрабатывая методы селекции и коррекции мониторинговых наблюдений околосолнечных ореолов, необходимо учитывать, что реально измеряемое на фотометрах CIMEL угловое распределение яркости в безоблачной атмосфере определяется в основном тремя факторами: индикатрисой рассеяния при малых углах φ , систематической погрешностью установки прибора $\Delta\Psi$ в исходное по-

ложение и, наконец, возможным попаданием блика прямого солнечного света на фотоприемник. Поскольку такие методики могут базироваться только на анализе экспериментальных угловых распределений яркости (иного не дано), то формируемый селекционный фильтр должен пропускать самые вытянутые угловые распределения яркости $B(\Psi)$, связанные с рассеянием света именно в атмосфере. В противном случае будет теряться информация о наличии в воздухе наиболее крупных частиц. Поэтому будем условно считать, что в пунктах, где функционируют фотометры CIMEL, яркость безоблачного неба с максимальным угловым градиентом при малых ϕ формируется за счет индикатрисы рассеяния с параметром $q = 2,2$.

Используя формулу (2), вычислим модельные отношения $B(\Psi - \Delta\Psi)/B(\Psi + \Delta\Psi)$ для азимутов $\Psi = 2, 4$ и 6° . Соответствующие результаты для зенитного угла Солнца $Z_0 = 60^\circ$ и девяти значений $\Delta\Psi$ приведены в таблице. Если зенитный угол Солнца равен 75° , получают практически те же самые величины отношений.

Влияние систематической ошибки наведения прибора $\Delta\Psi$ в заданные точки ореола Ψ на отношение B_{\max}/B_{\min} при максимально вытянутой индикатрисе рассеяния в малых углах ($q = 2,2$)

$\Delta\Psi$	$\frac{B(2^\circ - \Delta\Psi)}{B(2^\circ + \Delta\Psi)}$	$\frac{B(4^\circ - \Delta\Psi)}{B(4^\circ + \Delta\Psi)}$	$\frac{B(6^\circ - \Delta\Psi)}{B(6^\circ + \Delta\Psi)}$
0,00	1,00	1,00	1,00
0,05	1,12	1,06	1,04
0,10	1,25	1,12	1,08
0,15	1,39	1,18	1,12
0,20	1,55	1,25	1,16
0,25	1,74	1,32	1,20
0,30	1,95	1,39	1,25
0,35	2,18	1,47	1,29
0,50	3,08	1,74	1,44

Пусть эти значения $\Delta\Psi$ эквивалентны абсолютным погрешностям установки фотометра CIMEL в заданные направления Ψ . Тогда приведенные выше табличные отношения $B(\Psi - \Delta\Psi)/B(\Psi + \Delta\Psi)$, или, по сути, B_{\max}/B_{\min} , позволяют вычлени из общего массива наблюдений такие угловые распределения $B(\Psi)$, для которых отличие величин яркости в симметричных точках слева и справа от Солнца будет обусловлено в основном неточностью наводки прибора, а не какими-либо другими причинами (облаками, бликами прямых солнечных лучей в фотометре и др.).

Если абсолютная погрешность $\Delta\Psi$ при малых Ψ у только вступающих в эксплуатацию фотометров составляет около $0,05^\circ$ [4, 5], то отношения B_{\max}/B_{\min} для азимутальных углов $2, 4$ и 6° не должны превышать соответственно величин во второй строке таблицы: 1,12, 1,06 и 1,04. Для фотометров, прошедших эксплуатацию в течение нескольких лет и характеризующихся в среднем значением $\Delta\Psi = 0,25$, отношения $B(\Psi - \Delta\Psi)/B(\Psi + \Delta\Psi)$ для тех же азимутов должны быть меньше 1,74, 1,32 и 1,20. Если подобные превышения наблюдаемых

отношений над расчетными имеют место, то они не могут быть объяснены влиянием индикатрисного эффекта на яркость из-за неточной наводки прибора в заданные Ψ .

Должны существовать другие, дополнительные, причины, приводящие к более значимому расхождению B_{\max} и B_{\min} . Такие распределения яркости уже невозможно каким-либо способом скорректировать, и они просто должны быть исключены из рядов, подлежащих дальнейшему анализу.

Из рис. 1 следует, что средние наблюдаемые величины B_{\max}/B_{\min} для $\Psi = 2^\circ$ соответствуют абсолютным погрешностям $\Delta\Psi = 0,2^\circ$ в первом и $\Delta\Psi = 0,3^\circ$ во втором проходах фотометра. Таким образом, даже средние значения отношений B_{\max}/B_{\min} при втором сканировании ореола превышают указанные граничные пределы. Согласно таблице для $\Psi = 6^\circ$ отношение B_{\max}/B_{\min} не должно превышать 1,44 даже при $\Delta\Psi = 0,5^\circ$. Из рис. 1 видно, что это условие не выполняется.

По логике вещей сам по себе рост B_{\max}/B_{\min} с увеличением азимута, при $\Psi > 4^\circ$, не может быть вызван неточностью установки фотометра в заданные точки ореола. Остается предполагать, что предварительная «очистка» результатов измерений яркости вблизи Солнца от влияния почти прозрачных облачных образований с последующим выведением на доверительный уровень Level-2 в направлениях с $\Psi = 5\div 6^\circ$ в табличных данных AERONET выполнена менее основательно, чем для $\Psi = 2\div 4^\circ$. Повидимому, и критерий отбора безоблачных ситуаций, основанный на принципе убывания углового градиента яркости $\Delta B(\phi)/\Delta\phi$ [2], не полностью удовлетворяет полноценному решению поставленной задачи в области малых углов рассеяния.

Обсуждение результатов

Если считать, что фотометр только вводится в эксплуатацию, т.е. значение $\Delta\Psi = 0,05^\circ$ является абсолютной ошибкой его наведения в заданные точки небосвода вблизи Солнца [4, 5], то из оставшихся 10866 серий наблюдений яркости в результате проведения предлагаемой селекции в последующий анализ могут быть для дальнейшего анализа отобраны только 259. Остальные 10607 серий следует исключить, так как для них не выполняются ограничения по B_{\max}/B_{\min} , диктуемые второй строкой таблицы, хотя бы в одном из углов. При погрешности наводки прибора $\Delta\Psi = 0,25^\circ$, прошедшего длительную эксплуатацию в получении мониторинговых рядов яркости, число серий наблюдений должно быть ограничено величиной 5007. Следует сказать, что большинство данных AERONET в вышеперечисленных пунктах наблюдений соответствует именно второму случаю.

Хорошим критерием правдоподобности вышеприведенных рассуждений может быть согласие средних экспериментальных значений яркости в одних и тех же точках ореола при первом и втором проходах фотометра. Как отмечалось выше,

в случае степенной зависимости яркости от угла рассеяния правильный результат при осреднении данных соответствует использованию среднегеометрических величин:

$$L_1(\Psi) = \sqrt{B_1(\Psi)B_1(360 - \Psi)}, \quad (3)$$

$$L_2(\Psi) = \sqrt{B_2(\Psi)B_2(360 - \Psi)}, \quad (4)$$

где нижний индекс означает номер прохода. Используем наблюдаемые слева и справа от Солнца величины $B(\Psi)$ в предположении $\Delta\Psi = 0,05^\circ$ в 259 сериях наблюдений в расчетах $L_1(\Psi)$ и $L_2(\Psi)$, а затем сопоставим последние между собой.

На рис. 3, *a* представлена гистограмма отклонений $d = (L_1 - L_2)/L_1$ для угла $\Psi = 2^\circ$ при $\Delta\Psi = 0,05^\circ$. Среднее отклонение L_1 от L_2 составляет 5,4%.

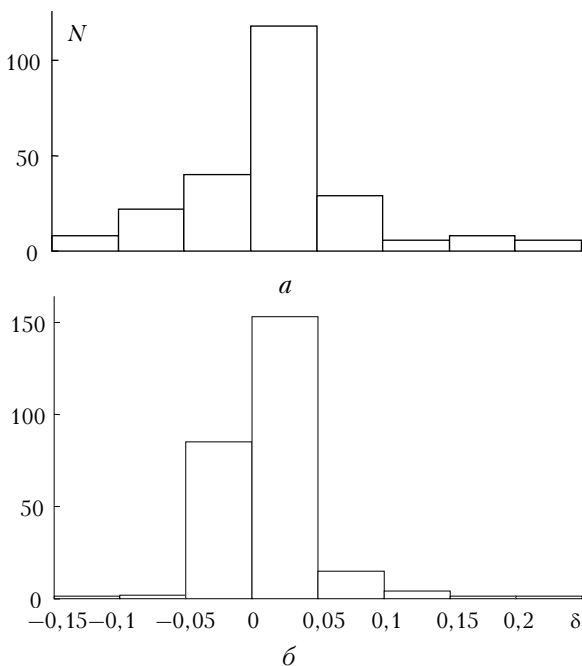


Рис. 3. Гистограммы отклонений среднегеометрических величин яркости L_1 и L_2 для углов $\Psi = 2^\circ$ (*a*) и 6° (*b*)

Из-за невозможности установить причину такого регулярного расхождения между L_1 и L_2 в дальнейшем следует просто вычислять средние величины:

$$L(\Psi) = [(L_1(\Psi) + L_2(\Psi)]/2. \quad (5)$$

При $\Psi = 2^\circ$ систематическая средняя ошибка в определении окончательного значения яркости $L(\Psi)$ будет приблизительно равна 2,7%. Это вполне допустимая ошибка для последующих исследований, так как абсолютная яркость неба на фотометрах CIMEL измеряется с абсолютной погрешностью не менее 5% [4, 5]. С ростом азимута Ψ эта систематическая ошибка будет быстро убывать, о чем свидетельствует исчезновение крыльев на соответствующей гистограмме (рис. 3, *b*) при азимутальном угле $\Psi = 6^\circ$. Погрешность вычислений $L(\Psi)$ за счет

наводки прибора в последнем случае не превысит долей процента.

Итак, селекцию данных AERONET для около-солнечных ореолов можно свести к следующим процедурам.

Предварительный анализ наблюдательных данных на доверительном уровне Level-2 для исключения явно выраженных облаков осуществляется на основе критерия о систематическом убывании $\Delta B(\varphi)/\Delta\varphi$ с ростом φ по обе стороны от солнечного диска.

Последующий этап селекции состоит в использовании данных таблицы для отсева тех наблюдений $B(\Psi)$, которые не укладываются в рамки различия яркостей слева и справа от Солнца из-за неточности установки фотометра в каждой серии наблюдений. При этом делается следующий «мягкий» допуск: индикатриса рассеяния в малых углах считается предельно вытянутой. В случае $q < 2,2$ отсев был бы более значительным.

И наконец, третий этап состоит в коррекции оставшихся величин яркости: определяются средние значения $L(\Psi)$ с помощью соотношений (3)–(5) в каждой серии наблюдений.

Контроль достоверности получаемых результатов по скорректированным значениям яркости $L(\Psi)$ можно осуществить следующим образом. Естественно, что в азимутальных углах Ψ , превышающих 3° , при $\Delta\Psi = 0,05^\circ$ маловероятны случаи попадания бликов прямого солнечного света на фотоприемник. Пересчитаем азимуты Ψ в углы рассеяния φ , а затем, пользуясь формулой Хюльста (2), для каждого углового распределения яркости $L(\varphi)$ в интервале $3^\circ \leq \varphi \leq 6^\circ$ определим значения параметра q . Далее, предполагая, что полученное значение q должно сохраняться и для меньших углов, т.е. для $\varphi = 2$ и $\varphi = 2,5^\circ$, вычислим величины L_q при $\Psi = 2$ и $2,5^\circ$, а затем сопоставим их со значениями $L(2^\circ)$ и $L(2,5^\circ)$, рассчитанными из наблюдений по формуле (5). Если все наши предыдущие рассуждения верны, то должно иметь место соответствие величин L и L_q .

Обобщенные гистограммы распределения параметра q по числу случаев N во всех вышеперечисленных пунктах наблюдений AERONET и во всех длинах волн представлены на рис. 4. Общее число ореолов, подвергнутых анализу при $\Delta\Psi = 0,05^\circ$, равно 259, а при $0,25^\circ$ – 5007. Гистограммы в достаточной мере сходны между собой. Сравнивая их вид с гистограммой, изображенной на рис. 2, можно сделать следующие выводы. Значения q на новых гистограммах существенно смещены в сторону меньших значений: средние величины параметра для всех местностей соответственно равны 1,02 и 1,21; минимальное значение – 0,104. Скорее всего, эти различия связаны с избытком крупных пылевых частиц в атмосфере Юго-Восточного Казахстана, что уже отмечалось ранее [6].

Анализ показывает, что не обнаруживается как и прежде систематической зависимости q от длины волны. Значение $q > 2$ в массиве данных из 5007

распределений с $\Delta\Psi = 0,25^\circ$ встречалось 57 раз, причем в единичном случае параметр достигал 2,4. Отсюда следует, что предлагаемые табличные данные отношений B_{\max}/B_{\min} для коррекции ореолов носят универсальный характер.

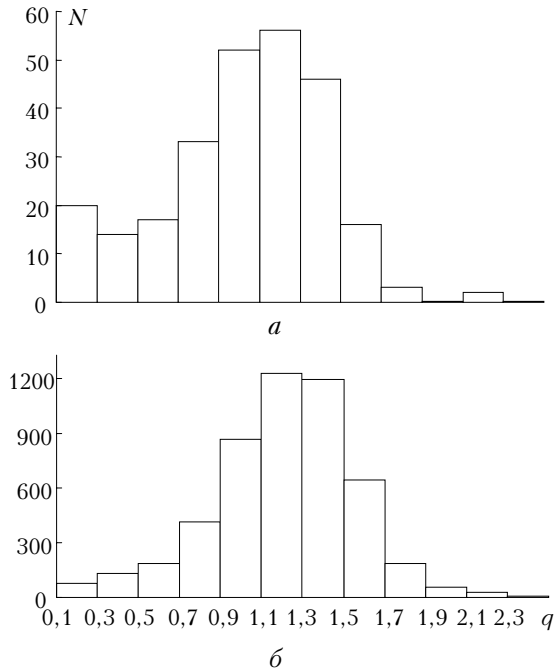


Рис. 4. Гистограммы распределения параметра q по данным AERONET при $\Delta\Psi = 0,05^\circ$ (а) и $0,25^\circ$ (б). Вычисления при $\varphi \geq 3^\circ$

Вернемся к вопросу о сопоставлении величин $L(2^\circ)$ и $L_q(2^\circ)$, а также $L(2,5^\circ)$ и $L_q(2,5^\circ)$. На рис. 5 представлены гистограммы распределения отношений $\delta = (L - L_q)/L$ по числу случаев N для азимута $\Psi = 2^\circ$ при $\Delta\Psi = 0,05$ и $0,25^\circ$.

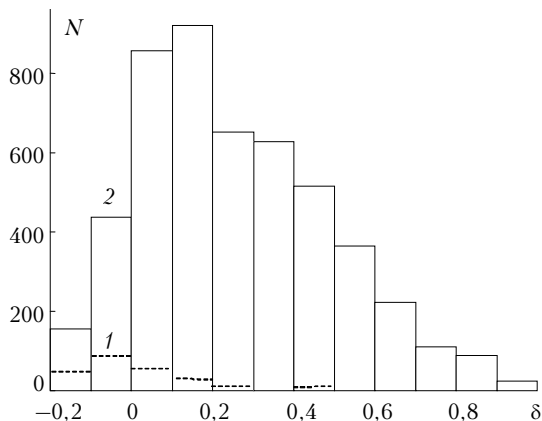


Рис. 5. Гистограммы отклонений L от L_q для азимута $\Psi = 2^\circ$ при значениях $\Delta\Psi$, равных $0,05^\circ$ (1) и $0,25^\circ$ (2)

В первом случае в интервал $-0,2 \leq \delta \leq 0,2$ попадает около 80% наблюдений. Возникают первые признаки отступления от симметричного распределения δ за счет увеличения крыла при больших различиях $L(2^\circ)$ и $L_q(2^\circ)$. Это приводит к отклоне-

нию средней величины $(L - L_q)/L$ от нуля: $\delta_{\text{ср}} = 0,05$. С ростом $\Delta\Psi$ до $0,25^\circ$ роль крыла со стороны больших значений δ в распределении становится доминирующей и среднее отклонение $\delta_{\text{ср}}$ становится равным $0,25$.

Вряд ли столь большие различия L и L_q , характерные для правого крыла гистограммы, особенно во втором случае, вызваны отступлением углового распределения яркости от формулы Хюлста. С наибольшей вероятностью они возникают как результат «просачивания» в отобранный массив данных таких наблюдений, у которых параметр q невелик, но погрешность наведения прибора $\Delta\Psi$ превышает $0,25^\circ$. В этом случае табличное условие $B_{\max}/B_{\min} \leq 1,74$ не гарантирует исключение проявления в фотометре бликов прямых солнечных лучей, влияющих на измеряемую яркость $B(2^\circ)$ или $B(358^\circ)$, а затем — после осреднения — и на яркость $L(2^\circ)$.

Вероятность попадания таких бликов на приемник света в приборе должна в существенной степени уменьшиться, если анализировать измерения при азимутах $\Psi \geq 2,5^\circ$. Результаты соответствующих расчетов отклонений L от L_q для $\Psi = 2,5^\circ$ при $\Delta\Psi = 0,05$ и $0,25^\circ$ представлены на рис. 6.

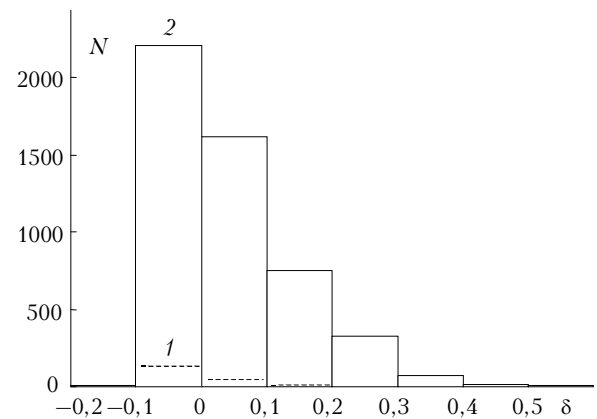


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для азимута $\Psi = 2,5^\circ$

Видно, что в первом случае абсолютное большинство наблюдений (88%) попадает в интервал $-0,1 \leq \delta \leq 0,1$; при этом среднее отклонение L от L_q составляет $-0,0008$, т.е. практически отсутствует. Во втором случае при $\Delta\Psi = 0,25^\circ$ по указанным выше причинам $\delta_{\text{ср}} = 0,044$. Напомним, что для этого случая число распределений, прошедших селекцию, равно 5007. Таким образом, если при решении радиационных задач по данным AERONET начинать не с $\Psi \geq 2^\circ$, а с $\Psi \geq 2,5^\circ$, то качество используемых данных заметно возрастет.

Примем абсолютную погрешность установки фотометра $\Delta\Psi$ в заданном направлении равной $0,25^\circ$, что соответствует реалиям для большинства данных системы AERONET. Тогда, согласно рис. 5 и 6, самые существенные отклонения δ от нуля по левую сторону от максимумов гистограмм равны $-0,2$. Будем считать, что они вызваны отступлениями от

формулы Хюлста. Если считать, что эти отступления имеют такой же предел и по правую сторону от максимумов гистограмм, то самый простой способ отсева яркостей, искаженных солнечными бликами или какими-либо другими эффектами, помимо индикатрисного, видится в ограничении материалов наблюдений условием $|\delta| \leq 0,2$. После выполнения всех предписанных выше процедур наблюдаемые яркости, для которых значения $|\delta|$ будут превышать 0,2, должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Если при такой селекции случайно будут отсеяны экспериментальные яркости $B(\Psi)$, для которых различия L и L_q превышают указанные величины $|\delta|$ за счет отступлений от формулы Хюлста, то их число будет заведомо невелико. В этом случае скорректированные значения яркости $L_q(2^\circ)$ и $L_q(2,5^\circ)$ могут быть введены в схему решения обратной задачи по восстановлению распределений аэрозольных частиц по размерам [4, 5], где они в настоящее время не используются.

Выводы

На основе независимых экспериментальных данных, полученных с помощью фотометров дневного неба с высокоточной наводкой в заданные углы рассеяния, предложены:

– объективные методы исключения облачных ситуаций из рядов мониторинговых наблюдений яркости в области ореолов, представленных на сайте AERONET на доверительном уровне Level-2;

– метод последующей коррекции оставшихся угловых распределений $B(\Psi)$ с целью исключения влияния систематических аппаратурных погрешностей на окончательные результаты.

1. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
2. Матющенко Ю.Я., Ошлаков В.К., Павлов В.Е. О селекции данных AERONET. Часть 1: обоснования методик // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 4. С. 271–277.
3. Торопова Т.П., Павлов В.Е. Измерение индикатрис рассеяния при малых углах рассеяния // Труды Всесоюз. научн. метеорол. совещания. Т. 6. Л.: Гидрометеоздат, 1964. С. 122–130.
4. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankoviak I., Smirnov A. AERONET – Federated Instrument Network and Data Archiv for Aerosol Characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66. P. 1–16.
5. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. 105(D8), 10.1029/2000JD900040. P. 9791–9806
6. 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.
7. 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.
8. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 501 с.

V.E. Pavlov, Yu.Ya. Matuschenko, V.K. Oshlakov. Selecting the AERONET data. Part II. The halo correction method.

The necessity of performing selection procedures with the following correction of the observation data on the sky brightness in the Sun almucantar at azimuth angles of 2–6°, presented at the Level-2 highest confidence in AERONET tables, is under discussion. To exclude fully the cloud situations and optical inhomogeneities in the atmosphere, the conditions of continuous decrease of the brightness angular gradient at the growing azimuth are applied at the first stage. The second stage includes the use of empirical regularities in the brightness angular distribution, inferred from the high-accuracy observations in order to eliminate systematic errors in experimental data series for the CIMEL solar photometers. Formulae and tables, necessary for the practical use, are presented.