

Г.С. Зинченко¹, Ю.Я. Матющенко², В.Е. Павлов¹, С.В. Смирнов³

О селекции данных AERONET. Часть 3: облачность и эффективность функционирования солнечных фотометров в южных районах Сибири

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН,

²Алтайский государственный университет, г. Барнаул

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 29.12.2006 г.

Приводятся средние характеристики облачности по сведениям метеостанций, расположенных на юге Сибири. Показано, что только в 15% случаев от общего числа охваченных наблюдениями ситуаций небовод можно считать абсолютно ясным, а данные измерений спектральной яркости и прозрачности атмосферы использовать для построения радиационных моделей аэрозоля. На основе данных по Томску оценивается эффективность методик селекции данных AERONET с целью исключения облачных ситуаций в представляемых рядах яркости в альмукантарате и вертикале Солнца.

Хорошо известно, что разрывная облачность в существенной мере и практически непредсказуемо влияет на яркость дневного неба. Поэтому при решении задач по исследованию оптических свойств аэрозоля по данным наблюдений спектральной прозрачности атмосферы и интенсивности рассеянной радиации следует прибегать к рассмотрению исключительно безоблачных ситуаций. В противном случае при решении уравнения переноса излучения, используемого для восстановления оптических параметров аэрозоля, возникает слишком много неопределенностей, вызванных необходимостью исключения влияния облачных образований на яркость. С другой стороны, исследования аэрозоля в глобальном масштабе для всей толщи атмосферы, несомненно, актуальны, поскольку задача о влиянии аэрозоля на климат Земли еще далека от решения [1].

Исходя из этих соображений, NASA было размещено по всему земному шару свыше сотни солнечных фотометров CIMEL, производящих мониторинговые измерения оптических толщ атмосферы τ_a , яркости дневного неба $B(Z_0, Z, \Psi)$ в альмукантарате и вертикале Солнца, а также некоторых других параметров атмосферы в интервале длин волн $0,38 \leq \lambda \leq 1,02$ мкм. Здесь Z_0 и Z — зенитные углы Солнца и наблюдаемой точки неба; Ψ — азимут точки неба, отсчитываемый от плоскости солнечного вертикала. Данные наблюдений выставляются на сайте AERONET [2]. Два таких фотометра в настоящее время функционируют в Южно-Сибирском регионе — в Томске и Иркутске. Два прибора некоторое время работали в Барнауле [3] и Красноярске.

Первичный анализ результатов наблюдений с целью обнаружения облаков и их последующего

исключения из экспериментальных рядов яркости осуществляется непосредственно специалистами NASA. Однако тщательное изучение величин $B(Z_0, Z, \Psi)$, выставленных даже на самом высоком доверительном уровне Level-2 на сайте AERONET, показывает, что во многих случаях облака исключены далеко не полностью. Поэтому при решении большого ряда конкретных радиационных задач, например по восстановлению спектров частиц из результатов измерений τ_a и $B(Z_0, Z, \Psi)$, приходится проводить дополнительную, причем весьма основательную, селекцию последних [4–6]. Такая селекция заметно сокращает количество наблюдательных данных, на основе которых в дальнейшем строятся оптические аэрозольные модели атмосферы.

Известно, что модулирование облаками прямого солнечного света, проходящего сквозь атмосферу, приводит к заметным изменениям физических параметров аэрозоля в нижних слоях [7]. А ведь именно здесь, под облаками, сосредоточена весьма существенная, а над городами — при наличии температурных инверсий — основная масса аэрозольного вещества. Поэтому возникает естественный вопрос: в какой мере оптические параметры аэрозоля, определенные как результат решения обратных задач по исходным данным измерений спектральной прозрачности атмосферы и яркости дневного неба в безоблачные дни, будут «типичными» для обследуемого региона в целом?

Решение этой проблемы связано с необходимостью выполнения статистического анализа многолетних данных по облачности, полученных южно-сибирскими метеостанциями. С использованием справочных данных для некоторых из них за предыдущие годы [8, 9], а также результатов наблюдений

последнего десятилетия была получена следующая информация о поведении облачности в районах Южной Сибири, которая имеет непосредственное отношение к изучаемой проблеме.

В таблице приведены средние значения общего количества облаков n в баллах. Наиболее полные сведения представлены для территории Алтайского края, что продиктовано неоднократным рассмотрением вопроса о размещении в крае станции для проведения астрономических наблюдений. Представленные данные охватывают более чем 40-летний интервал с 1936 по 1980 г. В связи с высказываниями ряда известных специалистов о происходящих климатических изменениях на Земле, в том числе и на юге Сибири, такие данные за прошлые годы могут послужить отправным пунктом в последующих исследованиях климатических изменений в регионе.

Из таблицы видно, что средний балл общей облачности на юге Сибири достаточно высок и равен 6,4. Иначе говоря, во всем регионе в целом преобладает облачная погода. На метеостанциях Алтайского края среднее значение n равно 6,1, что несущественно отличается от среднего для всего юга Сибири.

Приводимые в таблице значения балла облачности не дают ответа на вопрос об эффективности использования солнечных фотометров в изучаемом регионе с целью сбора наблюдательного материала по спектральной прозрачности и яркости неба для построения аэрозольных моделей атмосферы. Для этого необходимо из рассматриваемого массива данных вычленить число безоблачных дней.

В метеорологии принято считать небо ясным, если общее количество облаков составляет 0–2 балла. На рис. 1 представлено среднее для всех вышеперечисленных наблюдательных пунктов сезонное распределение повторяемости таких ситуаций, рассчитанных по отношению к общему числу наблюдений (кривая 1). В зимний период включены месяцы с ноября по март, в весенний – апрель и май, в летний – с июня по август и в осенний – сентябрь и октябрь. С учетом среднеквадратического разброса повторяемость уменьшается от зимних

месяцев к осенним. В целом же для юга Сибири она составляет около 30%. Видимо, эта цифра и является ответом на вопрос о «типичности» ситуаций, при которых разрывная облачность в изучаемом регионе минимально влияет на радиационные свойства аэрозоля.

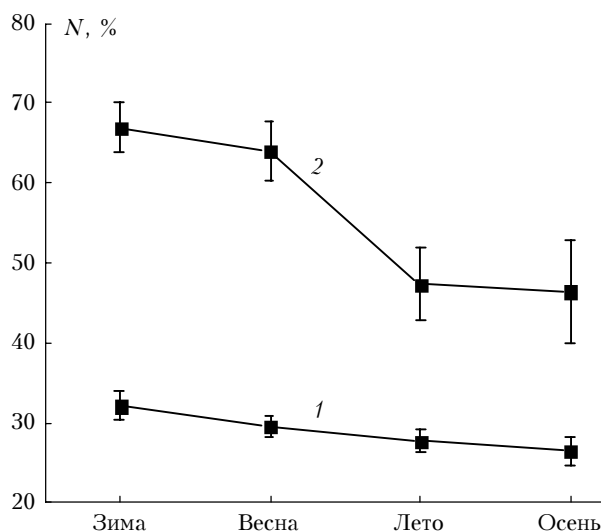


Рис. 1. Сезонное распределение повторяемости облачности 0–2 балла по данным метеостанций юга Сибири (1) и повторяемости абсолютно ясного неба из числа случаев с облачностью 0–2 балла по данным метеостанции ИМКЭС СО РАН в Томске (2)

Как говорилось выше, надежное решение обратной задачи по восстановлению оптических параметров частиц из наблюдений яркости неба путем решения уравнения переноса излучения может быть осуществлено только при полном отсутствии облаков на небосводе, т.е. когда балл облачности равен нулю. Мы имели возможность осуществить оценку числа абсолютно безоблачных случаев (0 баллов) по отношению к числу ситуаций с облачностью 0–2 балла по г. Томску. Эти данные представлены также на рис. 1 (кривая 2); они относятся к периоду с 1994 по 2005 г.

Среднее месячное и годовое общее количество облаков (в баллах) на юге Сибири

Пункт наблюдения	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Барнаул*	6,4	6,1	5,9	6,2	6,2	6,0	5,9	5,9	5,8	7,3	7,3	6,9	6,8
Бийск-Зональное*	6,1	6,2	6,1	6,2	6,1	5,8	5,7	5,7	5,7	7,2	7,2	6,7	6,2
Земногорск*	5,9	5,7	6,1	6,0	5,9	5,7	5,5	5,4	5,4	6,8	6,9	6,6	6,0
Иркутск	6,7	6,0	6,0	6,8	7,1	7,1	7,0	6,9	6,5	6,4	7,2	7,7	6,8
Кемерово	6,9	6,5	6,4	6,4	6,7	6,6	6,3	6,6	6,8	7,9	7,8	7,3	6,8
Ключи*	5,4	5,1	5,4	5,4	5,2	5,2	5,0	5,2	5,0	6,5	6,6	6,1	5,5
Красноярск	6,6	6,4	6,4	6,5	6,7	6,4	6,2	6,5	6,8	7,6	7,5	6,9	6,7
Новосибирск (Огурцово)	6,9	6,6	6,6	6,5	6,7	6,3	6,4	6,7	6,7	7,9	7,7	7,3	6,9
Омск	6,3	5,7	5,7	5,9	6,0	6,1	6,2	6,2	6,4	7,4	7,3	6,6	6,3
Славгород*	5,7	5,4	5,7	5,7	5,6	5,6	5,4	5,5	5,3	6,9	6,9	6,3	5,8
Томск	6,7	6,2	6,4	6,2	6,7	6,5	6,2	6,6	6,8	8,1	7,8	7,2	6,8

* Данный пункт наблюдения расположен в Алтайском крае.

Как и для облачности 0–2 балла, в распределении повторяемости абсолютно ясного неба отмечается тенденция убывания от зимы к осени. В среднем же значение этой величины несколько превышает 50%.

Из рис. 1 следует, что не более чем в 15% от общего числа регистрируемых в атмосфере ситуаций экспериментальные данные по яркости неба в атмосфере г. Томска могут быть применены к решению обратных задач по радиационным свойствам аэрозоля. Их число заметно уменьшится, если в этих целях использовать только данные, соответствующие условию равномерного горизонтального распределения атмосферной мутности по небосводу [9].

Учитывая однотипность атмосферных процессов над южными районами Сибири, можно предположить, что приведенные цифры будут почти такими же и в других пунктах данного региона.

Информация о наличии облаков на небосводе в конкретные дни и часы позволяет оценить эффективность методик по использованию результатов мониторинговых измерений яркости неба из таблиц AERONET для отбора безоблачных дней. Подобная оценка важна в тех случаях, когда прямая информация об облачности в атмосфере отсутствует. Ранее было показано [10], что в условиях абсолютно безоблачной атмосферы угловой градиент яркости в альмукантарате Солнца $\Delta B/\Delta\varphi$ систематически убывает с увеличением угла рассеяния φ до $\varphi = \varphi_{\min}$. Угол φ_{\min} примерно соответствует минимуму в угловом распределении яркости, т.е. обычно составляет около 85–120°. К анализу данных по Томску было решено применить этот критерий в расширенном виде, распространив его на плоскость солнечного вертикала, т.е. на те точки небосвода, где Ψ равен 0 и 180°.

С целью первоначальной отработки такой методики были проанализированы результаты наблюдений $B(Z_0, Z, \Psi)$ на юго-востоке Казахстана [11]. Они получены в абсолютно ясную устойчивую погоду в широком спектральном диапазоне от УФ- до ИК-областей спектра. Здесь необходимо упомянуть, что угол рассеяния φ для точек, лежащих в плоскости солнечного вертикала над Солнцем, определяется как $\varphi = Z - Z_0$ при $\Psi = 0^\circ$ и $\varphi = Z + Z_0$ при $\Psi = 180^\circ$.

Вычисления $\Delta B(Z_0, Z, \Psi)/\Delta\varphi$ по измеренным яркостям со всей несомненностью показали, что угловой градиент яркости в абсолютном большинстве случаев действительно убывает с ростом φ и проходит нулевое значение вблизи $\varphi_{\min} \approx 80^\circ$. После прохождения φ_{\min} градиент $\Delta B(Z_0, Z, \Psi)/\Delta\varphi$ становится отрицательным, а его модуль $|\Delta B/\Delta\varphi|$ возрастает с ростом φ . Примеры таких угловых зависимостей $|\Delta B/\Delta\varphi|$ в видимой и близкой ИК-областях спектра приведены на рис. 2 и 3 (здесь $\Delta\varphi$ дана в градусах).

Следует сказать, что яркость неба (и, соответственно, разность ΔB) при наблюдениях определялась в единицах S (πS — спектральная солнечная постоянная) путем ее привязки к стандартному эк-

рану, освещенному перпендикулярными солнечными лучами. Иногда при углах рассеяния $80^\circ \leq \varphi_{\min} \leq 100^\circ$ может возникать смена знака у $\Delta B/\Delta\varphi$ два или более раз, что чаще всего вызывается погрешностями измерений мало отличающихся яркостей $B(Z_0, Z, \Psi = 180^\circ)$. В случае наличия облака на линии визирования вышеописанная угловая зависимость $\Delta B/\Delta\varphi$ обычно существенно и скачком нарушается.

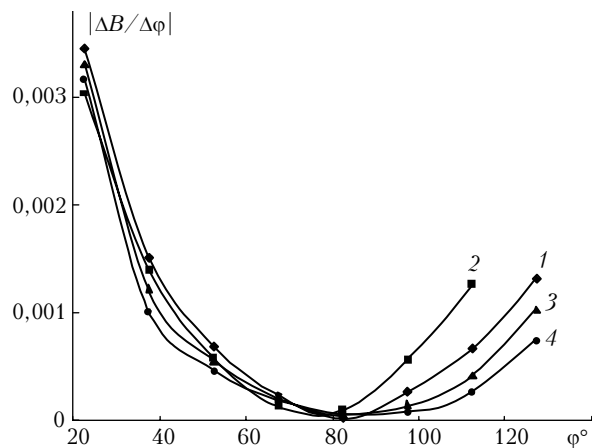


Рис. 2. Примеры углового хода модуля градиента яркости $\Delta B/\Delta\varphi$ в вертикале Солнца в видимой области спектра 7 сентября 1967 г. до полудня: 1 — $\lambda = 0,454$ мкм, $Z_0 = 60^\circ$; 2 — 0,454 мкм, 45° ; 3 — 0,548 мкм, 60° ; 4 — 0,645 мкм, 60°

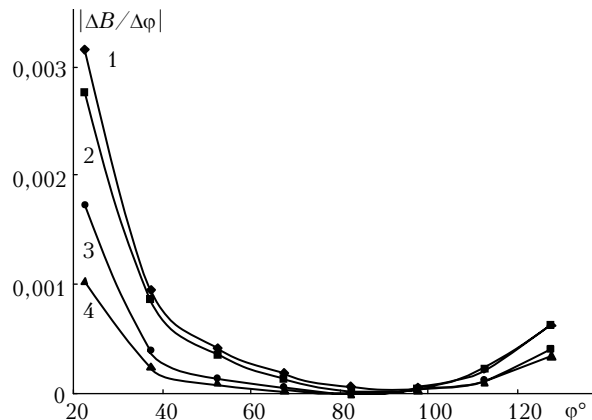


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но в инфракрасной области спектра для $Z = 60^\circ$: кривые 1, 2 — 7 сентября 1967 г. до полудня: 1 — $\lambda = 0,7$, 2 — 0,772 мкм; кривая 3 — 14 июня ($\lambda = 1,01$ мкм); 4 — 24 сентября ($\lambda = 0,85$) 1971 г. до полудня

С целью практического использования предлагаемого метода выявления облаков на небосводе был осуществлен анализ результатов измерений яркости неба фотометром CIMEL с 24 октября 2002 г. по 13 декабря 2005 г. в Томске, выставленных на сайте AERONET. Вычислялись угловые градиенты яркости $\Delta B/\Delta\varphi$ в альмукантарате и вертикале Солнца и исследовались их угловые зависимости. Всего анализу было подвергнуто 15 400 угловых распределений яркости в обеих плоскостях.

В итоге оказалось, что условию систематического убывания $|\Delta B(Z_0, Z, \Psi)/\Delta\phi|$ при $\phi < \phi_{\min}$ и увеличения при $\phi > \phi_{\min}$ удовлетворяют всего 354 угловых распределения яркости в альмукантарате и 425 — в вертикале Солнца. Беря за основу меньшее значение, можно констатировать, что только 2,3% от общего числа измеренных распределений $B(Z_0, Z, \Psi)$ могут быть использованы в последующем сопоставлении с данными по облачности за охваченный наблюдениями период.

Как уже говорилось выше, количество облаков регистрируется на метеостанциях через каждые 3 ч. За период с 24 октября 2002 г. по 13 декабря 2005 г. по метеосводкам было определено 566 случаев, когда общее количество облаков составляло 0–2 балла. В 387 случаях из них количество облаков было равно нулю.

Поскольку моменты времени наблюдений облачности на метеостанции редко совпадают с моментами измерений яркости неба фотометром, то будем считать, что случай фиксации нулевого балла облачности в некий конкретный момент t_0 может быть распространен на интервал $t_0 \pm 1$ ч. Тогда из 354 угловых распределений яркости $B(Z_0, Z, \Psi)$, отобранных по принципу систематического углового изменения градиента в каждой серии наблюдений в альмукантарате и вертикале Солнца, занимающей несколько минут, лишь 177 попадут в указанные интервалы $t_0 \pm 1$ ч, когда мы небо считаем абсолютно ясным на основе метеорологических данных. Это составляет всего 1,1% от общего числа изначально измеренных распределений (15 400).

Таким образом, только половина ситуаций, которые по данным наблюдений яркости неба одновременно в альмукантарате и вертикале Солнца мы предполагаем как безоблачные, будет реально соответствовать отсутствию облаков на небосводе.

Облака, не попадающие на линию визирования фотометра в альмукантарате и вертикале Солнца, безусловно, увеличивают яркость безоблачных участков неба. Особенно это касается облаков верхнего яруса [5]. Поэтому в отсутствие прямой информации о количестве облаков при использовании данных наблюдений яркости с целью определения аэрозольных оптических толщ рассеяния τ_a и альбедо частиц Λ_a рационально применять разностные,

а не интегральные методики [6]. В этом случае при статистической обработке итоговых результатов определения τ_a и Λ_a для обширных рядов наблюдений итоговый вклад хаотически распределенных по небу облаков в яркость безоблачных зон, где проходят линии визирования фотометра, по-видимому, можно считать примерно одинаковым для передней и задней полусфер небосвода.

1. Кондратьев К.Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и воздействия атмосферного аэрозоля. 7. Аэрозольное возмущающее воздействие на климат // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 7. С. 335–556.
2. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
3. Павлов В.Е., Пашиев В.В. Дневная изменчивость загрязненности аэрозолем города Барнаула // Сиб. экол. ж. 2003. Т. 10. № 2. С. 205–208.
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 Archive for Aerosol Characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66. P. 1–16.
5. 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.
6. Zhuravleva T.B., Pavlov V.E., Pashnev V.V., Sheshtukhin T.B. 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.
7. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Исаков А.А., Конейкин В.М., Шишков П.О. Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1118–1123.
8. Справочник по климату СССР: В 34 выпусках. Вып. 20. Часть 5. Облачность и атмосферные явления. Л.: Гидрометеониздат, 1970. 323 с.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Часть 1–6. Вып. 20. СПб.: Гидрометеониздат, 1993. 717 с.
10. 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.
11. 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.

G.S. Zinchenko, Yu.Ya. Matyuschenko, V.Ye. Pavlov, S.V. Smirnov. About the AERONET Data Selection. Part 3: cloudiness and sun photometers efficiency in the southern regions of Siberia.

The mean statistical characteristics of cloudiness based on analysis of meteorological data for the southern regions of Siberia are presented. It is shown that the sky is absolutely clear in 15% of all situations observed, thus, only this measuring data of spectral brightness can be used for aerosol radiation modeling. Using data of cloud observations in Tomsk, the efficiency of AERONET data selection is estimated to exclude the cloudiness situations from observation data of spectral brightness in solar almucantar and vertical position.