

**Введение.** Глобальная сеть AERONET – одна из наиболее распространенных сетей автоматизированного наземного мониторинга атмосферы [1–2]. Она развернута для получения в режиме реального времени больших объемов данных, их накопления и последующей обработки с целью создания карты распределения аэрозоля по земному шару. Измерения оптических параметров атмосферы осуществляются с помощью солнечных фотометров CIMEL [3–4]. Данные наблюдений используются для построения региональных и глобальных аэрозольных моделей атмосферы.

Специалистами NASA проводится предварительная селекция наблюдательного материала с целью исключения из дальнейшего рассмотрения данных измерений яркости при наличии разрывной облачности на небосводе [5–7]. Однако анализ выставленных на сайте AERONET данных даже на самом высоком доверительном уровне LEVEL-2 свидетельствует о недостаточности проводимой процедуры и о сравнительно частом наличии облаков на линиях визирования фотометров [8–9].

Для исключения облачных ситуаций нами предложены дополнительные методы селекции мониторинговых измерений яркости неба [10]. В настоящей работе представляется соответствующее программное обеспечение.

**Методы селекции данных. Критерии обнаружения облаков на линиях визирования в альмукантарате и вертикале Солнца.** На основе расчетов яркости неба из уравнения переноса излучения [11–13] и анализа результатов измерений яркости в абсолютно безоблачных условиях [10, 14–15] разработаны следующие методы отбора безоблачных ситуаций при мониторинговом сканировании небосвода на станциях сети AERONET:

1. Метод обнаружения облаков, заключающийся в регистрации скачкообразных вариаций яркости при прохождении облака фотометром. При отсутствии облаков на трассе сканирования небосвода в альмукантарате Солнца должно иметь место регулярное убывание яркости неба в видимой и ближней ИК областях спектра с увеличением угла рассеяния  $\varphi$  от 2 до 90° и затем ее последующее возрастание на угловых расстояниях более 120°. Иначе говоря, для яркости безоблачного неба  $B(\varphi)$  должно выполняться условие:

$$\begin{aligned} B(\varphi) > B(\varphi + \Delta\varphi) & \quad \text{при } 2^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \\ \text{и} \\ B(\varphi) < B(\varphi + \Delta\varphi) & \quad \text{при } \varphi > 120^\circ. \end{aligned} \quad (1)$$

Это условие названо нами «мягким» критерием селекции исходных данных.

2. Метод обнаружения малококонтрастных облачных образований, заключающийся в фиксировании нарушений гладкости угловой зависимости градиента яркости при наличии облака на линии визирования. Речь идет об облаках, яркость которых превышает яркость безоблачного неба лишь на 1–2% [10]. Суть метода состоит в том, что такие образования скачкообразно нарушают систематическое убывание углового градиента яркости в альмукантарате и вертикале Солнца («жесткий» критерий). Угловые градиенты определяются как разности значений яркости в соседних углах, отнесенные к их интервалу. Должны выполняться следующие условия:

$$\begin{aligned} f(\varphi) - f(\varphi + \Delta\varphi) > f(\varphi + \Delta\varphi) - f(\varphi + 2\Delta\varphi) & \quad \text{при } \varphi < \varphi_{\min} \\ \text{и} \\ f(\varphi + \Delta\varphi) - f(\varphi) < f(\varphi + 2\Delta\varphi) - f(\varphi + \Delta\varphi) & \quad \text{при } \varphi > \varphi_{\min}, \end{aligned} \quad (2)$$

где величина шага  $\Delta\varphi$  задается соответствующей угловому градиенту яркости.

Выполненный анализ экспериментальных данных абсолютно безоблачного неба показал, что в солнечном вертикале так же, как и в альмукантарате, имеет место систематическое убывание градиента яркости с увеличением угла рассеяния [14].

3. Дополнительным условием отсутствия облаков является констатация факта идентичности оптических характеристик правой и левой половин небосвода [8, 10, 16]. В этом случае независимо от стратификации мутности для яркости неба в альмукантарате Солнца должно выполняться условие:

$$B(\Psi) = B(360^\circ - \Psi) \quad (3)$$

при изменении азимута  $\Psi$  от 0 до 180°. Оно лежит в основе селекции данных AERONET, выполняемой специалистами NASA [6]. Известно, что погрешность измерений яркости неба на фотометрах CIMEL в абсолютных единицах составляет около 5% [2, 5, 17]. Эта цифра определяет возможности всех последующих манипуляций с наблюдаемыми величинами  $B(\Psi)$  и  $B(360^\circ - \Psi)$ , направленных на решение прямых и обратных радиационных задач.

**Анализ исходных файлов сети AERONET, содержащих угловые распределения яркости в альмукантарате и вертикале Солнца.** Угловые распределения яркости в альмукантарате и вертикале Солнца, прошедшие селекцию NASA [6], выставляются на сайте AERONET в виде текстовых ASCII-файлов с расширениями \*.alm и \*.prl соответственно.

Согласно техническому описанию и инструкции по эксплуатации фотометра CIMEL CE-318 [3–4], по-

следовательность измерений  $B(\Psi)$  в альмукантарате следующая. На длине волны 1,02 мкм при заданном зенитном угле Солнца  $Z_0$  фотометр устанавливается в точку с азимутом  $\Psi = -6^\circ$  ( $\Psi = 354^\circ$ ) и проводятся измерения яркости в интервале азимутов от  $-6$  до  $-2^\circ$  и от  $2$  до  $6^\circ$  с шагом  $0,5$  и  $1^\circ$  и далее до  $\Psi = 160^\circ$ . С увеличением азимута шаг также возрастает. Аналогично фотометр сканирует отрицательную полуплоскость при  $\Psi = -160^\circ \div -2^\circ$  и завершает измерения яркости кривой в диапазоне азимутов  $\Psi = 2^\circ \div 6^\circ$ . После этого устанавливается длина волны 0,87 мкм, и все повторяется в той же последовательности. По окончании серии измерений в четырех длинах волн выполняется аналогичная серия в солнечном вертикале. Цикл измерений  $B(\Psi)$  занимает время около 5 мин; при этом  $Z_0$  меняется на  $0,1 \div 0,5^\circ$ . Для абсолютного большинства угловых распределений яркости, прошедших селекцию по описываемой далее методике, диапазон вариаций зенитных углов обычно составляет  $50 \div 75^\circ$ .

В отличие от файлов альмукантарата, значения яркости в файлах \*.prf вертикала Солнца являются функцией не азимутов, а углов рассеяния. Диапазон углов рассеяния изменяется от  $-6$  до  $150^\circ$ .

Остановимся на ряде особенностей файлов альмукантарата и вертикала, которые необходимо учитывать при разработке программы селекции. Для альмукантарата характерно наличие отрицательных яркостей (ошибок), обычно маркируемых числом  $(-100)$ , в интервале азимутов  $-2,5, -2, 2, 2,5^\circ$  при первом сканировании ореола и  $-2,5, -2, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 5, 6^\circ$  при втором. По числу кривых, содержащих ошибки, файлы можно поделить на три группы:

1. Ошибок практически нет или они носят нерегулярный характер, что связано со спецификой наблюдений яркости в области ореола.

2. В начале серии наблюдений ошибки отсутствуют, но возникают во второй половине файла. Число таких кривых может составлять около  $20 \div 50\%$  от их общего количества. Например, для пустыни Solar Village на Аравийском полуострове из 57487 исходных кривых 30177, т.е. более  $50\%$ , включают яркости со значением  $(-100)$  в указанном интервале азимутов, причем с самого начала и почти до середины числового массива такие ошибки отсутствуют. Подобные файлы особенно характерны для пунктов наблюдений в океанах.

3. Ошибки присутствуют во всех без исключения кривых. Примерами могут служить данные в пустынях Tinga Tingana и Dalanzadgad, в городах Москве и Томске и др.

Наличие таких ошибок диктует необходимость частичного либо полного исключения наблюдательных данных из анализируемого массива яркостей. Следует отметить, что для файлов вертикала характерным является существенно меньшее количество подобных ошибок измерений.

**Алгоритм и описание программы селекции данных AERONET.** При разработке алгоритма программы селекции были учтены особенности исходных файлов для исключения потерь информации и последующей ее корректной обработки. Необходимо было обеспечить:

- использование описанных выше критериев обнаружения облаков;
  - возможность установки начальных параметров селекции;
  - вычисление и вывод статистических данных;
  - возможность визуального контроля исходных данных, промежуточных и окончательных результатов;
  - приемлемое время обработки информации.
- Алгоритм включает следующие основные этапы:
- выбор файлов и их объединение;
  - считывание и обработку заголовков файлов;
  - загрузку данных в оперативную память и их типизацию;
  - непосредственную обработку и селекцию данных;
  - вывод результатов.

Первый этап предполагает поиск и отображение имен файлов альмукантарата или вертикала в выбранном диске (каталоге). При необходимости можно дописать данные следующего файла в конец предыдущего и далее обрабатывать как один файл. Обычно такая процедура требуется в двух случаях: для обработки данных в одной точке наблюдений за разные периоды времени (например, за несколько лет) либо для одновременной обработки данных в местностях со схожими географическими, климатическими или другими условиями (например, несколько точек в океане).

Загрузка исходных результатов наблюдений производится, исходя из структуры файлов, в заранее созданные массивы с соответствующим типом данных. При этом используются разделители текстовой информации. В результате структура данных в памяти компьютера становится подобной таблице. Дальнейшая обработка кривых яркости, измеренных в альмукантарате Солнца, представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

Отметим ряд особенностей программы, не отраженных на блок-схеме. Перед запуском можно выбрать нужный диапазон азимутов: от  $10$  до  $-10^\circ$  ( $350^\circ$ ) либо полный диапазон углов:  $-6, -5, -4, -3,5, -3, -2,5, -2, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, -160, -140, -120, -100, -90, -80, -70, -60, -50, -40, -30, -20, -12, -10, -8, -7, -6, -5, -4, -3,5, -3, -2,5, -2, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 5, 6^\circ$ . В последнем случае имеется возможность исключить из проверки углы с отрицательными значениями яркости в области ореола.

Исходные распределения яркости содержат по два значения при азимутах:  $+60$  (для альмукантарата)

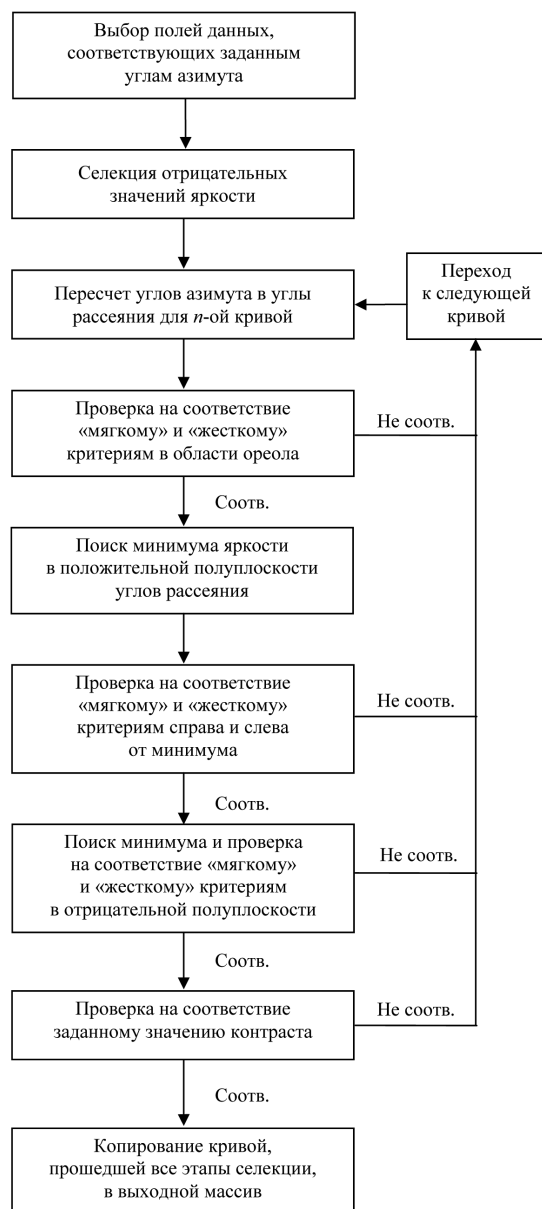


Рис. 1. Блок-схема алгоритма селекции данных

та и вертикала) и  $-6^\circ$  (только для альмукантарата). При фильтрации отрицательных значений яркости исключение анализируемой кривой осуществляется только в том случае, если оба значения для каждой пары указанных углов меньше нуля. Все последующие действия производятся относительно одной и той же кривой согласно алгоритму, изображенному на блок-схеме (рис. 1). Несоответствие какому-либо из критериев инициирует отбраковку данной кривой и переход к следующей.

Пересчет азимутальных углов в углы рассеяния для альмукантарата Солнца выполняется по формуле  $\cos\varphi = \cos^2 Z_0 + \sin^2 Z_0 \cos\psi$ . (4)

Вычисленные углы рассеяния используются во всех случаях анализа распределений яркости.

Далее угловые распределения яркости исследуются на соответствие «мягкому» и «жесткому» критериям. В случае выбора для селекции полного диапазона углов в первую очередь анализируются области ореола с азимутами  $-6^\circ \div +7^\circ$  и  $-7^\circ \div +6^\circ$ .

Прежде чем проверять остальные значения яркости при азимутах от  $8^\circ$  до  $160^\circ$  и от  $-160^\circ$  до  $-8^\circ$ , необходимо определить минимальное значение яркости слева или справа от Солнца. Для альмукантарата Солнца соответствующий угол рассеяния  $\varphi_{\min}$  может находиться в интервале  $90^\circ \div 120^\circ$ .

На фотометре фиксируется яркость при азимутах  $90^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 140^\circ, 160^\circ$ . Расширяя диапазон углов  $\psi$  на  $5^\circ \div 10^\circ$ , по формуле (4) получаем искомые азимутальные границы поиска минимума.

Что касается проверки на равенство величин  $B(\psi)$  и  $B(360^\circ - \psi)$  слева и справа от Солнца, то допустимое расхождение в соответствии с [2] не должно превышать 5% за исключением области ореола. Программа позволяет установить и 10%-ное различие, либо вообще пропустить этот этап алгоритма.

Кривая, прошедшая все этапы селекции, копируется в выходной массив вместе со своими параметрами измерения: датой, временем измерений, длиной волны и зенитным углом Солнца. Выходной массив доступен

Date	Time	Wavelength	SZAngle	10	20	30	40	50	60	70
26.02.1998	14:19:21	0.4	17.020451	27834.49853	8337.480915	5011.261430	3727.006696	3165.091314	2833.103256	2636.
26.02.1998	16:53:03	0.9	54.973054	1226.482206	474.2224184	259.4590174	164.1908916	110.9556801	81.88307715	63.40
26.02.1998	16:54:30	0.7	55.330459	2072.526835	800.1297235	479.7344916	333.5262064	247.6785940	190.2784011	155.6
26.02.1998	16:55:53	0.4	55.671412	2538.659611	1353.365382	1073.626563	896.3364576	771.5430996	674.0514447	601.2
26.02.1998	17:15:58	1	60.619058	906.3387870	364.1725196	194.8253584	118.9466356	76.84263924	53.07189672	38.66
26.02.1998	17:17:29	0.9	60.932503	1250.280061	498.5807987	269.4303191	167.3863671	113.6688375	82.06122865	61.31
26.02.1998	17:18:55	0.7	61.345401	2043.469672	795.4879516	476.3319627	334.7031346	254.4386887	195.6081550	154.6
26.02.1998	17:20:19	0.4	61.690065	2417.671630	1314.945835	1042.586688	874.8831524	750.6129715	651.5811091	579.5

Рис. 2. Внешний вид интерфейса программы селекции

для просмотра в виде таблицы. Предусмотрен вывод промежуточных массивов в табличной форме.

Основные этапы селекции файлов вертикала \*.prf принципиально не отличаются от обработки данных альмукантарата. Отличия определены отсутствием в файлах вертикала распределений яркости в отрицательной полуплоскости углов рассеяния.

Программа написана на языке СИ [18–19]. Интерфейс программы (рис. 2), предоставляемый пользователю, включает в себя:

- браузер файлов с возможностями фильтрации файлов по расширению и одновременного выбора нескольких файлов;

- область вывода информации, содержащейся в заголовках исходных файлов;
- кнопки управления;
- таблицу вывода данных;
- окно вывода статистической информации.

Время обработки исходного массива альмукантарата объемом в 50 тысяч кривых с выводом данных занимает примерно 3–4 минуты, в зависимости от начальных параметров селекции.

*Авторы выражают признательность сотруднику NASA Б.Н. Холбену и сотруднику ИОА СО РАН М.В. Панченко за разрешение использования материалов AERONET при выполнении настоящей работы.*

## Библиографический список

1. Goddard Space Flight Center [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>. – Яз. англ.
2. Holben, B.N. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, F. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankoviak, A. Smirnov // Remote Sensing & Environment. – 1998. – №66.
3. Automatic sun trackline sunphotometer CE 318. Technical description.
4. Cimel Sun Photometer User Manual [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.cimel.fr/photo/pdf/man\\_ce318\\_us.pdf](http://www.cimel.fr/photo/pdf/man_ce318_us.pdf).
5. Nakajima, T. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions / T. Nakajima, G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, B. Holben // Appl. Optics. – 1996. – Vol. 3, №5.
6. Smirnov, A. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database / A. Smirnov, B.N. Holben, T.F. Eck, O. Dubovik, I. Slutsker // Remote Sensing of Environment. – 2000. – №73.
7. Smirnov, A. Optical properties of atmospheric aerosol in maritime environments / A. Smirnov, B.N. Holben, Y.J. Kaufman, O. Dubovik, T.F. Eck, I. Slutsker, C. Pietras // J. Atmos. Sci. – 2002. – Vol. 59.
8. Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е. Малоугловые аэрозольные и облачные образования на фоне преобладающе безоблачной атмосферы / Ю.Я. Матющенко, В.Е. Павлов // Межрегиональный экологический форум. – Барнаул, 2004.
9. Павлов, В.Е. Отбор безоблачных ситуаций по данным AERONET / В.Е. Павлов, П.М. Зацепин, Ю.Я. Матющенко // Аэрозоли Сибири : тез. докл. XI Рабочей группы. – Томск, 2004.
10. Матющенко, Ю.Я. О селекции данных AERONET.
11. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. – Новосибирск, 1976.
12. Журавлева, Т.Б. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Ч. I: Аэрозольная атмосфера / Т.Б. Журавлева, И.М. Насретдинов, С.М. Сакерин // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16, №5–6.
13. Павлов, А.В. Угловая структура многократно рассеянного света безоблачной атмосферы / А.В. Павлов, В.Е. Павлов, Т.З. Мулдашев // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 9, №5.
14. Зинченко, Г.С. Облачность и эффективность функционирования солнечных фотометров на юге Сибири / Г.С. Зинченко, Ю.Я. Матющенко, В.Е. Павлов, С.В. Смирнов // Аэрозоли Сибири : тез. докл. XIII Рабочей группы. – Томск, 2006.
15. Матющенко, Ю.Я. Методы селекции и коррекции экспериментальных данных AERONET по яркости неба : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ю.Я. Матющенко. – Барнаул, 2007.
16. Dubovik, O. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations / O. Dubovik, B.N. Holben, T.F. Eck, A. Smirnov, Y.J. Kaufman, M.D. King, D. Tanre, I. Slutsker // J. of Atm. Sciences. – 2002. – Vol. 59.
17. Dubovik, O. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements / O. Dubovik, M.D. King // J. of Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105, №D16.
18. Архангельский, А.Я. Программирование в C++Builder 5 / А.Я. Архангельский. – М., 2000.
19. Архангельский, А.Я. Язык C++ в C++ Builder 5 : справ. пособие / А.Я. Архангельский. – М., 2000.