

УДК 551.521.3:681.7

Повышение точности и достоверности мониторинговых измерений яркости неба на малых угловых расстояниях от Солнца системой фотометров SIMEL

Ю.Я. Матющенко, В.В. Пашинев

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Improvement of Accuracy and Reliability of Monitoring Measurements of Sky Brightness on Small Angular Distances from the Sun SIMEL Photometer System

Yu.Ya. Matyuschenko, V.V. Pashnev

Altai State University (Barnaul, Russia)

Рассмотрены сравнительные характеристики различных модификаций фотометров SIMEL, касающиеся погрешностей измерений яркости и точности позиционирования. Проведен статистический анализ на предмет наличия явных ошибок в данных, полученных новыми моделями приборов и выставленных на сайте проекта AERONET. Описаны инструментальные погрешности мониторинговых наблюдений в альмукантарате Солнца при малых азимутах и критерии отбора достоверных угловых распределений яркости.

Предложена методика восстановления наблюдательных данных в зависимости от точности механической наводки фотометра в малые углы и установленной модельной погрешности измерений яркости. Проведена апробация программного обеспечения, реализующего указанную методику, с использованием данных AERONET за последние годы.

Результаты исследования показывают существенное уменьшение числа ошибок, вызванных аппаратными погрешностями, в угловых распределениях яркости, полученных с помощью новых моделей фотометров SIMEL. Представленная методика позволяет произвести предварительную оценку качества данных AERONET с целью последующего их использования для построения аэрозольных моделей атмосферы.

Ключевые слова: глобальная сеть AERONET, солнечный фотометр SIMEL, альмукантарат Солнца, малые угловые расстояния, точность позиционирования, модельная погрешность измерений.

DOI 10.14258/izvasu(2019)1-06

Введение

Исследования климатических изменений в настоящее время приобретают все большую актуальность, при этом важное место отводится изучению влияния

Comparative characteristics of various modifications of CIMEL photometers related to errors in brightness measurements and positioning accuracy are considered. A statistical analysis was carried out for the presence of obvious errors in the data obtained by the new models of devices and displayed on the website of the AERONET project. Instrumental errors of monitoring observations in the almucantar of the Sun with small azimuths and criteria for selecting reliable angular distributions of brightness are described.

A technique for reconstructing observational data is proposed, depending on the accuracy of the mechanical aiming of the photometer at small angles and the established model error of brightness measurements. Approbation of software implementing this method was carried out using AERONET data in recent years.

The results of the study show a significant decrease in the number of errors caused by instrumental errors in the angular brightness distributions obtained by using new models of CIMEL photometers. The presented technique allows for a preliminary assessment of the quality of AERONET data with the aim of their subsequent use for building aerosol models of the atmosphere.

Key words: global network AERONET, solar photometer CIMEL, almucantar of the Sun, small angular distances, positioning accuracy, model error of measurements.

атмосферного аэрозоля на формирование радиационного баланса тропосферы и подстилающей поверхности. Для объективного понимания воздействия аэрозоля на климат необходимо создание и обновление

в режиме реального времени карты распределения аэрозоля по земному шару. В этих целях развернуты различные национальные и международные программы, одной из которых является AERONET. В рамках этой системы функционирует автоматизированная сеть наземного мониторинга атмосферы [1, 2]. Измерения оптических параметров выполняются с помощью солнечных фотометров более чем в трехстах точках земного шара. После обработки сотрудниками NASA результаты наблюдений доступны на сайте программы и могут быть использованы для моделирования климатических изменений регионального и глобального масштабов.

Ранее в работах [3, 4] был проведен детальный анализ данных AERONET по яркости неба. Было показано, что даже после предварительной селекции, проводимой специалистами NASA с целью исключения ситуаций разрывной облачности, данные измерений могут содержать величины яркости отдельных облаков. Предложены методы отбора безоблачных ситуаций в альмукантарате и вертикале Солнца, а также коррекции и восстановления данных при малых углах азимута. В 2014–2015 гг. произошло очередное обновление парка измерительного оборудования сети AERONET. В настоящем исследовании предпринята попытка оценить качество наблюдательных данных AERONET на малых угловых расстояниях от Солнца с помощью разработанного авторами программно-обеспечения.

Точность фотометров сети AERONET

Точности и достоверности фотометрических измерений в последнее время уделяется большое внимание. Предлагаются более совершенные процедуры калибровки солнечных фотометров [5, 6], прецизионные механизмы механической наводки в заданную точку небосвода, регулярно обновляется программное обеспечение (версии прошивок). В рамках настоящей работы в первую очередь интерес представляют точностные характеристики фотометров, а именно ошибки (погрешности) измерения яркости и наведения в заданный угол азимута.

Фотометры сети AERONET работают в автоматическом режиме непрерывно в течение достаточно длительного срока, как правило, нескольких лет. Соответственно, со временем механическая часть неизбежно будет обеспечивать меньшую точность установки фотометра в заданную точку неба, что в первую очередь приведет к искажению результатов измерений при приближении к солнечному диску. Специалисты, использующие данные AERONET в своей работе, априори не могут знать реальные погрешности фотометра во время измерений, они ориентируются на технические характеристики, предоставленные производителем прибора. Сайт AERONET, равно как и другие источники мониторинговой информации, не содержит сведений об оборудовании конкретной точки

наблюдений. Однако приборы регулярно проходят техническое обслуживание и калибровку. Очевидно, сведениями о реальных величинах погрешностей фотометров после определенного срока эксплуатации располагают специалисты, выполняющие указанные процедуры, но в открытых источниках есть лишь информация о приборах 10–15-летней давности. Поэтому одной из задач данной работы стала попытка учесть возможные ошибки измерений новых моделей фотометров AERONET.

Проект AERONET официально функционирует с 1992 г. [1, 2], т.е. свыше 25 лет, в течение которых проводилась неоднократная замена существующего парка измерительных приборов, было введено в строй множество новых станций наблюдений, оснащенных более совершенными модификациями фотометров. На сайте AERONET размещены сведения об оборудовании, в соответствии с которыми в период до 2004 г. в сети использовались аналоговые фотометры CIMEL CE-318 с версиями прошивок 4.x, а также CE-318-1 и CE-318-2 версий 4.8xb. Доступные спецификации на эти приборы [7, 8] не содержат информации об упомянутых выше характеристиках, подобные сведения приведены для атмосферной оптической толщи — AOD ($0,01 \div 0,02$) и точности установки зенитного угла ($0,25^\circ$). Однако из публикаций специалистов NASA следует, что максимальная абсолютная погрешность измерения яркости неба фотометром CIMEL составляет не более 5%. Ошибка установки азимута в начале срока эксплуатации — около $0,05^\circ$, но через один-два года она может возрасти до $0,25^\circ$ и более значительных величин [9].

С 2004 по 2014 г. на станциях функционировали приборы моделей CE318-N (V, E, U) различной комплектации, использовавшие прошивки 5.2x (a-f). Начиная с 2014 г. CIMEL предлагает приобретать и задействовать в рамках AERONET модель CE318-T, при этом для использования вне программы по-прежнему рекомендуется CE318-N. Технические характеристики данных моделей на начало 2015 г. были практически идентичны. Погрешность измерений яркости не должна превышать 0,1%, точность установки азимута заявлена на уровне $0,01^\circ$ [10, 11]. Однако, в отличие от упомянутых аналоговых моделей, сведения об изменении точности позиционирования фотометров CE318-T и CE318-N после первого и последующих лет эксплуатации обнаружить не удалось.

Выбор исходных данных AERONET

Диапазон углов азимута — 6, — 5, — 4, — 3,5, — 3, — 2,5, — 2° вблизи Солнца, представляющий интерес в данной работе, обычно называют околосолнечным ореолом, причем во время сканирования небосвода фотометр проходит его дважды. Анализ множества файлов AERONET с данными измерений яркости показывает, что в этой области присутствует наибольшее количество явных ошибок, обозна-

чаемых числом (-100). К примеру, в восьми выбранных точках наблюдений, содержащих около 100 тысяч угловых распределений яркости, все кривые в азимутах — $2,5 \div 2,5^0$ при первом проходе фотометром области ореола и — $2,5 \div 6^0$ — при втором, имели значение (-100). Поэтому при проверке массивов альмукантарата на соответствие критериям безоблачности указанные диапазоны азимутов из анализа исключаются. Следовательно, не используется процедура сравнения измеренных значений яркостей с вычисленными, т.е. вместо коррекции данных в углах — $2,5 \div 2,5^0$ выполняется их восстановление [4].

Представляется целесообразным для корректного сравнения данных с целью последующей оценки их качества обрабатывать исходные файлы одной и той же географической точки, имеющей данные наблюдений до 2004 г. и после 2014 г. Ранее в работах [4, 12] при обосновании методик исключения погрешностей, вызываемых неточностью наведения фотометров в заданную точку неба, использовались данные AERONET преимущественно за 1999–2003 гг., т.е. полученные, согласно [1], с помощью моделей фотометров, выпущенных до 2004 г. При выполнении настоящего исследования было решено взять данные по яркости неба уровня достоверности Level 2.0 за один-два года наблюдений, выставленные на сайте AERONET не ранее 2015 г. Предполагается, что они были получены с использованием новых моделей фотометров [10]. Были выбраны те же географические точки наблюдений, что и ранее, а именно: городские мегаполисы Москва, Томск; лесные массивы Santa Cruz (Южная Америка), Bondville (Северная Америка); пустыни Dalanzadgad (Монголия), Solar Village (Аравийский полуостров); острова в океане Ascension Island (Атлантический океан), American Samoa (Тихий океан). Общее число исследуемых распределений яркости составило 99007. Учитывая снижение со временем точностных характеристик фотометров, данные каждого пункта наблюдений были

разбиты на группы по году измерения и обрабатывались отдельно.

Алгоритм обработки данных AERONET

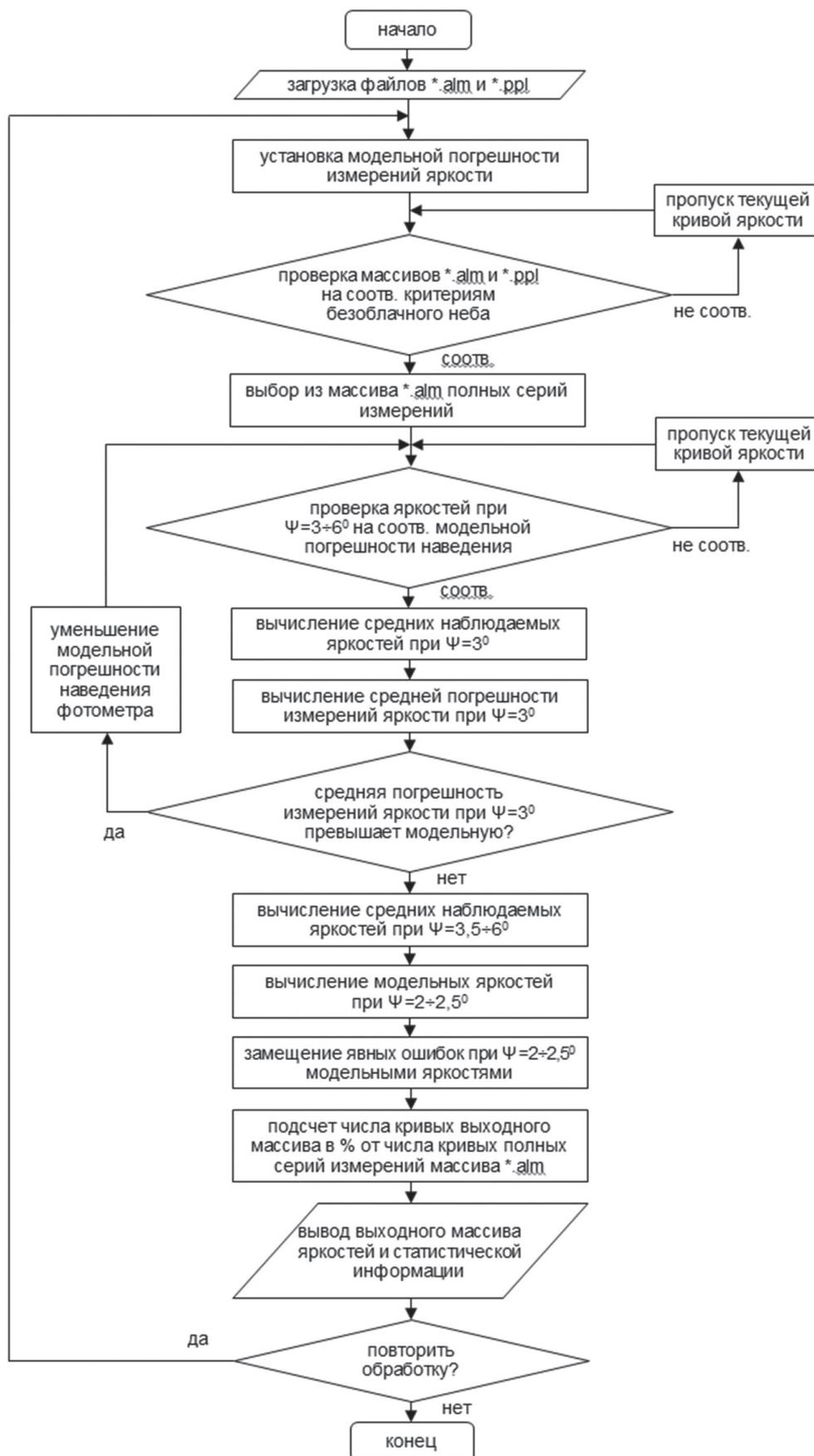
На рисунке представлен алгоритм обработки, реализующий методику получения результатов для оценки качества наблюдательных данных AERONET и последующего их использования при построении аэрозольных моделей атмосферы. После выбора и загрузки с сайта AERONET файлов альмукантарата *.alm и вертикала *.prf необходимо задать начальные параметры селекции. В первую очередь устанавливается модельная погрешность измерений яркости в диапазоне $0,1 \div 5\%$. Верхний предел определяется величиной ошибки наведения фотометров, использовавшихся до 2004 г. и прошедших длительную эксплуатацию (см. выше), нижний — соответствует указанной в технической документации на новые модели приборов. Кроме того, на этом этапе есть возможность задать параметры для последующей проверки данных на соответствие критериям безоблачного неба, такие как диапазон углов азимута и значение контраста в точках альмукантарата, симметричных относительно солнечного вертикала.

Селекция безоблачных ситуаций из загруженных массивов осуществляется по методикам, подробно описанным в [3]. Полная серия измерений массива *.alm представляет собой набор угловых распределений яркости в альмукантарате, для которых найдены совпадающие по времени распределения в вертикале Солнца. Далее предполагается вычисление отношений B_{\max}/B_{\min} наблюдаемых яркостей в симметричных относительно Солнца углах азимута $\Psi=3, 3,5, 4, 5, 6^0$ и сравнение их с предварительно вычисленными выражениями $B(\Psi-\Delta\Psi)/B(\Psi+\Delta\Psi)$, где $\Delta\Psi$ — модельная погрешность наведения фотометра.

В таблице приведены некоторые значения $\Delta\Psi$ и полученные для них отношения $B(\Psi-\Delta\Psi)/B(\Psi+\Delta\Psi)$, однако полный ряд погрешностей $\Delta\Psi$ составляет $0,25 \div 0,01^0$ с шагом $0,01^0$.

Значения модельных отношений $B(\Psi-\Delta\Psi)/B(\Psi+\Delta\Psi)$ в азимутах $\Psi=3, 3,5, 4, 5, 6^0$ в зависимости от модельной погрешности наведения фотометра $\Delta\Psi$

$\Delta\Psi^0$	$\frac{B(3^0 - \Delta\Psi)}{B(3^0 + \Delta\Psi)}$	$\frac{B(3,5^0 - \Delta\Psi)}{B(3,5^0 + \Delta\Psi)}$	$\frac{B(4^0 - \Delta\Psi)}{B(4^0 + \Delta\Psi)}$	$\frac{B(5^0 - \Delta\Psi)}{B(5^0 + \Delta\Psi)}$	$\frac{B(6^0 - \Delta\Psi)}{B(6^0 + \Delta\Psi)}$
0,25	1,44	1,37	1,32	1,25	1,20
0,20	1,34	1,29	1,25	1,19	1,16
0,15	1,25	1,21	1,18	1,14	1,12
0,10	1,16	1,13	1,12	1,09	1,08
0,05	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04
0,03	1,045	1,038	1,034	1,027	1,022
0,01	1,015	1,013	1,011	1,009	1,007



Алгоритм обработки данных AERONET

Граничные значения определены аналогично выбору диапазона возможных погрешностей измерений яркостей. После запуска программы обработки $\Delta\Psi$ присваивается максимальное значение, т.е. $0,25^0$. Для вычисления яркостей $V(\Psi \pm \Delta\Psi)$ используется соотношение Хюльста [4]

$$V(\varphi) = A \varphi^{-q},$$

где значение параметра q зависит от свойств крупных аэрозольных частиц и принимается равным 2,2 [10]; коэффициент $A = 1$, т.е. $V(\varphi) = \varphi^{-2,2}$.

Угол рассеяния φ определяется из выражения

$$\cos\varphi = \cos^2 Z_0 + \sin^2 Z_0 \cos\Psi,$$

при этом в солнечном альмукантарате зенитные углы Солнца и точки наблюдения равны, т.е. $Z = Z_0$.

Следует заметить, что табличные отношения $V(\Psi - \Delta\Psi)/V(\Psi + \Delta\Psi)$ не зависят ни от длины волны, ни от зенитного угла Солнца, т.е. применимы к любому текущему распределению яркости обрабатываемого файла AERONET (в большинстве точек наблюдений сети зенитный угол кривой альмукантарата может изменяться в пределах $30 \div 80^0$). Поэтому при переходе от азимутов к углам рассеяния было принято $Z_0 = 60^0$.

При выполнении условия $V_{\max}/V_{\min} > V(\Psi - \Delta\Psi)/V(\Psi + \Delta\Psi)$ хотя бы для одного угла Ψ осуществляется пропуск текущей и переход к следующей кривой. Значения средних наблюдаемых яркостей находятся так: для вышеуказанных симметричных азимутов вычисляются среднегеометрические яркости L_1 и L_2 отдельно для каждого прохода фотометром области ореола, затем берется их среднее арифметическое, т.е.

$$L_1(\Psi) = \sqrt{B_1(\Psi) \cdot B_1(-\Psi)};$$

$$L_2(\Psi) = \sqrt{B_2(\Psi) \cdot B_2(-\Psi)};$$

$$L_{\text{ср.}}(\Psi) = [L_1(\Psi) + L_2(\Psi)] / 2,$$

где $B_1(\Psi)$ и $B_1(-\Psi)$, $B_2(\Psi)$ и $B_2(-\Psi)$ — яркости в симметричных углах азимута первого и второго проходов фотометра.

Очевидно, что с уменьшением азимута увеличивается и угловой градиент яркости, соответственно, погрешность измерений возрастает. В этой связи в первую очередь ее следует определить для наименьшего азимутального угла из исследуемого диапазона, т.е. для $\Psi = 3^0$. Средняя погрешность измерений яркости вычисляется по формуле

$$\sigma_{\text{ср.}}(\Psi) = [L_{\text{макс.}}(\Psi) - L_{\text{ср.}}(\Psi)] / L_{\text{макс.}}(\Psi) \cdot 100\%,$$

где $L_{\text{макс.}}$ — наибольшее из L_1 и L_2 значение яркости.

Если найденная погрешность превышает ранее задан-

ную модельную, происходит уменьшение модельной погрешности и проверка на соответствие ее новому значению яркостей при $\Psi = 3 \div 6^0$. В противном случае вычисляются средние наблюдаемые яркости при $\Psi = 3,5 \div 6^0$ ($L_{\text{ср.}}(3^0)$ были получены ранее), и из них находятся значения параметра q в соотношении Хюльста для углов $3 \div 6^0$. С их помощью определяются модельные яркости при $\Psi = 2, 2,5^0$ и замещение ими явных ошибок (-100) в указанных азимутах.

После анализа массива результатов и статистических данных можно заново запустить обработку тех же исходных файлов без их повторной загрузки, предварительно изменив значение погрешности измерений яркости. Выбрать величину погрешности позволяет информация о процентном соотношении количества кривых массива результатов и массива альмукантарата с полными сериями измерений: чем меньше величина погрешности, тем жестче условия фильтрации, а отсев кривых более значителен.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1) данные AERONET по яркости неба вблизи солнечного диска, полученные с помощью новых моделей фотометров CIMEL, действительно включают аппаратные погрешности измерений;
- 2) среднее отклонение среднегеометрических наблюдаемых значений для азимутов 3 и -3^0 при погрешности наведения фотометра $0,1^0$ составило около 2%, т.е. средняя ошибка измерений яркости менее 1%, что свидетельствует о том, что качество данных AERONET вследствие увеличения точности фотометров возросло как минимум в два раза;
- 3) при погрешности измерений яркости 1% среднее значение числа кривых выходного массива относительно числа кривых массива альмукантарата с полными сериями измерений, т.е. отфильтрованных по ранее апробированным методикам, составило около 40%.

В отличие от предыдущих вариантов селекции [3, 4, 13], обработка данных AERONET по описанной методике предполагает отбор угловых распределений яркости и восстановление данных в азимутах 2 и $2,5^0$, соответствующих предварительно установленной модельной погрешности измерений, что дает возможность оперативной оценки качества наблюдательного материала. В конечном итоге, использование результатов подобной селекции для построения аэрозольных моделей атмосферы позволяет повысить их точность и достоверность.

Библиографический список

1. Goddard Space Flight Center [Electronic resource]. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
2. 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 & Environment. 1998. N. 66.
3. Матющенко Ю.Я., Ошлаков В.К., Павлов В.Е. О селекции данных AERONET. Ч. 1: Обоснования методик // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, №4.
4. Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е. О селекции данных AERONET. Ч. 2: Метод коррекции ореолов // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 21, №2.
5. Асадов Х.Г., Чобанзаде И.Г. О возможности калибровки солнечных фотометров на линиях поглощения паров воды // Датчики и системы. 2010. №1.
6. Гусейнова Р.О. Метод адаптивного управления калибровкой мультиспектральных фотометрических систем атмосферных измерений // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5.
7. Automatic sun trackline sunphotometer CE 318. Technical description. CIMEL Electronique. Phalsbourg; Paris, 1998.
8. User Manual SunPhotometer (rev. REV0 July 2001, ver. 4.6) [Electronic resource]. URL: http://lfa.if.usp.br/ftp/public/embrapa/Cimel/CIMEL_User%20Manual.pdf.
9. 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. Vol. 105, № D8.
10. Multiband photometer CE318-T User's Manual (rev. April 2015, ver. 3.2) [Electronic resource]. URL: http://support.CIMEL.fr/photo/pdf/man_ce318_t_us.pdf.
11. Multiband photometer CE318-N User's Manual (rev. April 2015, ver. 5.0) [Electronic resource]. URL: http://support.CIMEL.fr/photo/pdf/man_ce318_us.pdf.
12. Матющенко Ю.Я., Павлов В.Е. Программа коррекции мониторинговых измерений яркости околосолнечных ореолов // Известия Алтайского гос. ун-та. 2012. №1/1.
13. Матющенко Ю.Я., Пашнев В.В. Информационная система получения и обработки параметров атмосферы по данным мониторинговых наблюдений // Ползуновский вестник. 2017. №3.