УДК 535.2
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-18-22

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ЛЕНГЛИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОМЕТРОВ

ISSUES OF INCREASING THE STABILITY OF THE ANALYTICAL MODIFICATION OF THE LANGLEY METHOD FOR CALIBRATION OF SOLAR PHOTOMETERS

И. Г. Чобанзаде, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку
ichobanzada@cameron.slb.com

I. Chobanzade, National Aerospace Agency, Baku

Сформулирована и решена задача повышения стабильности аналитической модификации метода Ленгли для калибровки солнечных фотометров. Солнечные фотометры предназначены для исследования различных компонентов атмосферы и излучения Солнца. С помощью солнечных фотометров могут быть измерены атмосферный аэрозоль, водяные пары и параметры свечения Солнца. Известно. что водяные пары и атмосферный аэрозоль – основные причины возникновения глобального потепления. Точная оценка указанных факторов является важнейшей задачей метеорологии и физики атмосферы. *Актуальность исследования:* высокая достоверность результатов измерений с помощью солнечных фотометров может быть обеспечена при осуществлении точной калибровки этих приборов. Для калибровки солнечных фотометров обычно используется графоаналитический метод диаграмм Ленгли и некоторые его аналитические модификации. Основным недостатком метода Ленгли, а также его аналитической версии является влияние нестабильности оптической толщины атмосферы на результат калибровки солнечных фотометров. Как результат, точность и достоверность таких измерений оказываются невысокими. Следовательно, разработка новых, высокоточных методов калибровки солнечных фотометров является актуальной задачей. *Объектом исследования* являются солнечные фотометры, широко применяемые в международных измерительных сетях, применяемых для исследования атмосферы. *Предметом исследования* является метод калибровки этих приборов, являющийся важнейшей и необходимой метрологической процедурой, обеспечивающей работоспособность солнечных фотометров. *Целью исследования* является повышение точности и стабильности известного метода калибровки солнечных фотометров. *Задачи исследования:* а) выяснение причин, приводящих к появлению погрешностей калибровки солнечных фотометров; б) разработка методологической основы предлагаемого способа повышения точности и стабильности калибровки солнечных фотометров. *Результаты исследования:* для решения поставленных задач предложено учесть основные тренды изменения оптической толщины атмосферного аэрозоля в течение дня для проведения компенсации его влияния. Получены аналитические выражения вновь вводимого коэффициента коррекции влияния изменения оптической толщины атмосферного аэрозоля, что позволяет повысить точность проводимой калибровки солнечного фотометра

Ключевые слова: *солнечные фотометры, атмосфера, калибровка, оптическая воздушная масса, оптическая толщина, аэрозоль, измерения, точность, погрешность, водяные пары*

The problem of increasing the stability of the analytical modification of the Langley method for calibration of solar photometers is formulated and solved. Solar photometers are designed to study various components of the atmosphere and solar radiation. With the help of solar photometers, atmospheric aerosol, water vapor and solar luminescence parameters can be measured. It is known that water vapor and atmospheric aerosol are one of the main causes of global warming and an accurate assessment of these factors is the most important task of meteorology and atmospheric physics. High reliability of measurement results using solar photometers can be ensured by accurate calibration of these devices. To calibrate solar photometers, the graphoanalytic method of Langley diagrams

© И. Г. Чобанзаде, 2022

and some of its analytical modifications are used. The main disadvantage of the Langley method, as well as its analytical version, is the effect of instability of the optical thickness of the atmosphere on the result of calibration of solar photometers. As a result, the accuracy and reliability of the results of such measurements are low. Therefore, the development of new, high-precision methods of calibration of solar photometers is an urgent task. *The object of the study* is solar photometers, widely used in international measurement networks used to study the atmosphere. *The subject of the study* is the calibration method of these devices, which is the most important and necessary metrological procedure that ensures the operability of solar photometers. *The purpose of the study* is to improve the accuracy and stability of the known method of calibration of solar photometers. *The objectives of the study* are (a) to find out the reasons leading to errors in the calibration of solar photometers and (b) to develop a methodological basis for the proposed method of improving the accuracy and stability of calibration of solar photometers. To solve the tasks set, it is proposed to take into account the main trends of changes in the optical thickness of atmospheric aerosol during the day to compensate for its influence. Analytical expressions of the newly introduced correction factor for the effect of changes in the optical thickness of the atmospheric aerosol are obtained, which makes it possible to increase the accuracy of the calibration of the solar photometer

Key words: *solar photometers, atmosphere, calibration, optical air mass, optical thickness, aerosol, measurements, accuracy, error, water vapor*

Введение. Солнечные фотометры являются важнейшим инструментом, предназначенным для исследования различных компонентов атмосферы и излучения Солнца. С помощью солнечных фотометров могут быть измерены атмосферный аэрозоль, водяные пары и параметры свечения Солнца. Известно. что водяные пары и атмосферный аэрозоль являются одной из причин возникновения глобального потепления, и точная оценка указанных факторов является важнейшей задачей метеорологии и физики атмосферы.

Актуальность темы исследования. Высокая достоверность результатов измерений с помощью солнечных фотометров может быть обеспечена при осуществлении точной калибровки этих приборов. Для калибровки солнечных фотометров обычно используется графоаналитический метод диаграмм Ленгли и некоторые его усовершенствования [4–6]. Существует также аналитическая версия этого метода, впервые изложенная в работе [3]. В дальнейшем появились различные модификации аналитической версии [1; 2]. Основным недостатком метода Ленгли, а также его аналитической версии, является влияние нестабильности оптической толщины атмосферы на результат калибровки солнечных фотометров. Точность и достоверность результатов таких измерений оказываются невысокими. Следовательно, разработка новых, высокоточных методов калибровки солнечных фотометров является актуальной задачей.

Объектом исследования являются солнечные фотометры, широко используемые в международных измерительных сетьях для исследования атмосферы.

Предметом исследования является метод калибровки этих приборов, являющийся важнейшей и необходимой метрологической процедурой, обеспечивающей работоспособность солнечных фотометров.

Целью исследования является повышение точности и стабильности известного метода калибровки солнечных фотометров.

Задачи исследования:

1) выяснение причин, которые приводят к появлению погрешностей калибровки солнечных фотометров;

2) разработка методологической базы предлагаемого способа повышения точности и стабильности калибровки солнечных фотометров.

*Методы исследования***.** Как в графоаналитической версии, так и в аналитической версии метода Ленгли калибровки солнечных фотометров причинами неточности и нестабильности результата калибровки являются:

а) метод Ленгли основан на законе Бугера-Бера;

б) для калибровки солнечного фотометра используется не реальная, а расчетная величина внеатмосферной солнечной радиации;

с) для вычисления внеатмосферной Солнечной радиации используется метод экстраполяции во времени, в течение которой атмосферные показатели изменяются.

Методология предлагаемого способа предусматривает специальные операции, позволяющие осуществить учет временного изменения оптической толщины атмосферы

для повышения точности проводимой калибровки.

Изложим аналитическую версию метода Ленгли [3]. Освещенность на входе солнечного фотометра при оптических воздушных массах m_1 и m_2 определим как

$$I(\lambda,m_1) = I_0(\lambda)exp[-m_1\tau_{atm}(\lambda)]; \quad (1)$$

$$I(\lambda,m_2) = I_0(\lambda)exp[-m_2\tau_{atm}(\lambda)], \quad (2)$$

где $I_0(\lambda)$ – внеатмосферная радиация;

$\tau_{atm}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферы;

$I(\lambda,m_1)$, $I(\lambda,m_2)$ – освещенность на входе фотометра при соответвующих оптических массах.

Если принять

$$m_1 = k \cdot m_2, \quad (3)$$

а также возвести (2) в степень k, то на основе (1)…(3) можно получить следующее выражение для вычисления $I_0(\lambda)$:

$$I_0(\lambda) = \sqrt[k-1]{\frac{I(\lambda,m_2)^k}{I(\lambda,km_2)}}. \quad (4)$$

Таким образом, для вычисления внеатмосферной радиации достаточно провести измерения при оптических воздушных массах m_2 и km_2 и далее выполнить некоторые вычисления в соответствии с формулой (4).

Вместе с тем, если m_1>m_2 и за период Δt изменения оптической воздушной массы от m_2 до m_1 оптическая толщина атмосферы может измениться на величину $\Delta\tau_{atm}(\lambda)$.

Следовательно, выражение (1) примет вид

$$I(\lambda,m_1) = I_0(\lambda) \cdot exp\left[-m_1[\tau_{atm}(\lambda) + \Delta\tau_{atm}]\right] = I_0(\lambda) \cdot exp[-m_1\tau_{atm}(\lambda)] \cdot exp[-m_1\Delta\tau_{atm}]. \quad (5)$$

Если учесть (3), то выражение (5) примет вид

$$I(\lambda,km_2) = I_0(\lambda) \cdot exp[-km_2\tau_{atm}(\lambda)] \cdot exp[-km_2\Delta\tau_{atm}]. \quad (6)$$

Возведя (2) в степень *к*, получим

$$(\lambda,m_2)^k = I_0(\lambda)^k \cdot exp[-km_2\tau_{atm}(\lambda)]. \quad (7)$$

Вычислим отношение (6), (7).

Имеем

$$\frac{I(\lambda,km_2)}{I(\lambda,m_2)^k} = \frac{I_0(\lambda)}{I_0(\lambda)^k} \cdot exp[-km_2\Delta\tau_{atm}]. \quad (8)$$

Из (8) получим

$$I_0(\lambda) = \sqrt[k-1]{\frac{I(\lambda,m_2)^k \cdot exp[-km_2\Delta\tau_{atm}]}{I(\lambda,km_2)}}. \quad (9)$$

Очевидно, что нестабильная величина $\Delta\tau_{atm}$ приведет к появлению погрешности $I_0(\lambda)$ при неиспользовании формулы (9). Очевидно, что самым простым способом учета влияния $\Delta\tau_{atm}$ является динамическое изменение коэффициента к закону

$$k = \frac{1}{\Delta\tau_{atm}}, \quad (10)$$

для чего необходимо измерить $\Delta\tau_{atm}$ во времени.

В частном случае, если известен линейный тренд изменения $\Delta\tau_{atm}$ во времени, то следует рассмотреть возможность минимизации влияния этой составляющей на экспоненциальный множитель в (9). Если допустить, что $\Delta\tau_{atm}$ изменяется во времени в интервале (0÷$\Delta\tau_{atmmax}$), то среднюю величину γ этого множителя вычислим как

$$\gamma = \frac{1}{\Delta\tau_{atmmax}} \int_0^{\Delta\tau_{atmmax}} exp[-km_2\Delta\tau_{atm}]d\Delta\tau_{atm}. \quad (11)$$

Введем на рассмотрение функцию управления

$$k = f(\Delta\tau_{atm}) \quad (12)$$

и наложим на (12) следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{\Delta\tau_{atmmax}} f(\Delta\tau_{atm})d\Delta\tau_{atm} = C; \qquad C = const. \quad (13)$$

С учетом (11) и (13) составим задачу неоклассической вариационной оптимизации Лагранжа

$$F = \frac{1}{\Delta\tau_{atmmax}} \cdot \int_0^{\Delta\tau_{atmmax}} exp[-f(\Delta\tau_{atm})m_2\Delta\tau_{atm}]d\Delta\tau_{atm} + +\eta\left[\int_0^{\Delta\tau_{atmmax}} f(\Delta\tau_{atm})d\Delta\tau_{atm} - C\right]. \quad (14)$$

Согласно уравнению Эйлера-Лагранжа, оптимальная функция, приводящая F к минимуму, должна выполнять следующее условие:

$$\partial\left\{\frac{exp[-f(\Delta\tau_{atm})m_2\Delta\tau_{atm}]}{\Delta\tau_{atmmax}} \cdot m_2\Delta\tau_{atm} + + \eta f(\Delta\tau_{atm})\right\} = 0. \quad (15)$$

Из (15) находим

$$\frac{-exp[-f(\Delta\tau_{atm})m_2\Delta\tau_{atm}] \cdot m_2\Delta\tau_{atm}}{\Delta\tau_{atmmax}} + \eta = 0. \quad (16)$$

Из (16) получим

$$exp[-f(\Delta\tau_{atm})m_2\Delta\tau_{atm}] = \frac{\eta \cdot \Delta\tau_{atmmax}}{m_2\Delta\tau_{atm}}. \quad (17)$$

Из (17) находим

$$f(\Delta\tau_{atm}) = \frac{1}{m_2\Delta\tau_{atm}} \ln\frac{m_2\Delta\tau_{atm}}{\eta \cdot \Delta\tau_{atmmax}}. \quad (18)$$

Таким образом, при решении (18) функционал F достигает экстремума. Нетрудно показать, что этот экстремум является минимумом, т. к. вторая производная подынтегральной функции в (14) – всегда положительная величина.

Результаты исследования. Таким образом, предлагаемый метод предусматривает осуществление динамической компенсации влияния изменения оптической толщины атмосферы на точность калибровки. Согласно полученному результату, для компенсации влияния $\Delta\tau_{atm}$ на точность калибровки солнечного фотометра с ростом $\Delta\tau_{atm}$ во времени корректирующий коэффициент к в целом следует уменьшать. Согласно (3), при этом также подлежит изменению m_1, т. е. с ростом $\Delta\tau_{atm}$ следует работать в интервале времени до полудня, когда m_1 возможно уменьшается до единицы. И наоборот, если $\Delta\tau_{atm}$ уменьшается, то к следует увеличивать, что, согласно (3), приведет к росту m_1, т. е. калибровку следует осуществлять после полудня, когда m растет.

Выводы.

1. Определено, что основная причина графоаналитической и аналитической версий метода диаграмм Ленгли заключается в использовании не реального, а расчетного значения солнечного внеатмосферного излучения.

2. Предложено учесть основные тренды изменения оптической толщины атмосферного аэрозоля в течение дня для проведения компенсации его влияния.

3. Получены аналитические выражения вновь вводимого коэффициента коррекции влияния изменения оптической толщины атмосферного аэрозоля, что позволяет повысить точность проводимой калибровки солнечного фотометра.

Список литературы

1. Абдулов Р. Н. Прикладные исследования // Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова. 2019. № 3. С. 25–31. DOI:10.25587/SVFU.2019.15.37087

2. Гусейнова Р. О. Двухволновой метод калибровки солнечных фотометров повышенной точности // Известия высших учебных заведений. 2015. Т. 58, № 5. С. 393–396. DOI:10.17586/0021-3454-2015-58.

3. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New method for calibration of sun photometer // Chinese optics letters. 2009. Vol. 7. Iss. 9. P. 760–763.

4. Bruce W. F. General method for calibrating Sun photometers. 1994. Vol. 33, no. 21. URL: https://www.researchgate.net/profile/Bruce-Forgan/publication/47385016_General_method_for_calibrating_Sun_photometers/links/004635354c463027c7000000/General-method-for-calibrating-Sun-photometers.pdf (дата обращения: 21.08.2022). Текст: электронный.

5. Chen Sh., Li Yu., Cao F., Zhang Yu. Calibration of automatic Sun photometer with temperature correction in field environment. Текст: электронный // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 66. URL: https://doi.org/10.3390/rs14010066 (дата обращения: 21.08.2022).

6. Toledano C., Gonzalez R., Fuertes D., Cuevas E., Eck T. F., Kazadzis S., Kouremeti N., Grobner J., Goloub Ph., Blarel L., Roman R., Barreto A., Berjon A., Holben B. N., Cachorro V. E. Assesment of Sun photometer Langley calibration at the high-elevation sites Mauna Loa and Izana. Текст: электронный // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. URL: https://doi.org/10.5194/acp-18-14555-2018 (дата обращения: 21.08.2022).

References

1. Abdulov R. N. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta imeni M. K. Ammosova* (Bulletin of the Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov), 2019, no. 3, pp. 25–31.

2. Guseynova R. O. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy* (News of higher educational institutions), 2015. vol. 58, no. 5, pp. 393-396.

3. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. Chinese optics letters, 2009, vol. 7, iss. 9, pp. 760–763.

4. Bruce W. F. General method for calibrating Sun photometers. 1994. Vol. 33, no. 21. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Bruce-Forgan/publication/47385016_General_method_for_calibrating_Sun_photometers/links/004635354c463027c7000000/General-method-for-calibrating-Sun-photometers.pdf (date of access: 21.08.2022). Text: electronic.

5. Chen Sh., Li Yu., Cao F., Zhang Yu. Remote Sensing, 2022, vol. 14, no. 66. Available at: https://doi.org/10.3390/rs14010066 (date of access: 21.08.2022). Text: electronic.

6. Toledano C., Gonzalez R., Fuertes D., Cuevas E., Eck T. F., Kazadzis S., Kouremeti N., Grobner J., Goloub Ph., Blarel L., Roman R., Barreto A., Berjon A., Holben B. N., Cachorro V. E. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018. Available at: https://doi.org/10.5194/acp-18-14555-2018 (date of access: 21.08.2022). Text: electronic.

Информация об авторе **Information about the author**

Чобанзаде Имран Гара оглы, докторант, Национальное аэрокосмическое агентство, старший менеджер, Бакинский филиал компании Камерон, г. Баку, Азербайджанская Республика. Область научных интересов: морское нефтегазопроизводство
ichobanzada@cameron.slb.com

Chobanzadeh Imran Kara oglu, applicant for a doctor's degree, specialist in the field of offshore oil and gas production, senior manager of the Baku branch of the Cameron Company, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Research interests: offshore oil and gas production

Для цитирования

Чобанзаде И. Г. Повышение стабильности аналитической модификации метода Ленгли для калибровки солнечных фотометров // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 8. С. 18–22. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-18-22.

Chobanzade I. K. Issues of increasing the stability of the analytical modification of the langley method for calibration of solar photometers // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 8, pp. 18–22. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-8-18-22.

Статья поступила в редакцию: 19.09.2022 г.
Статья принята к публикации: 22.09.2022 г.