

УДК 551.510

МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЛИБРОВКОЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ АТМОСФЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Р. О. Гусейнова^{а, 1}, старший преподаватель, диссертант

^аАзербайджанский государственный архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджанская Республика

Постановка проблемы: солнечные фотометры являются наиболее универсальными измерительными устройствами, позволяющими исследовать как аэрозоль, некоторые малые газы и водяные пары, имеющиеся в атмосфере, так и показатели солнечной радиации. При этом правильная калибровка солнечных фотометров является важным условием достижения высокой достоверности полученных результатов измерения. Известный метод калибровки солнечных фотометров при двух различных значениях оптической воздушной массы имеет характерную аэрозольную погрешность, которая вызвана временной изменчивостью атмосферного аэрозоля во временном интервале, формирующемся вышеуказанными двумя оптическими воздушными массами. Целью исследования является усовершенствование данного метода для повышения точности калибровки солнечных фотометров. **Результаты:** разработан алгоритм реализации метода: коэффициент калибровки должен быть вычислен с учетом выходных сигналов фотометра, взятых в такие определенные моменты времени, при которых выполнялось бы сформулированное особое условие равенства функциональных величин временных отношений оптической воздушной массы и оптической толщины аэрозоля, вычисленных отдельно. Модельные исследования, проведенные с учетом зависимости оптической воздушной массы от угла высоты Солнца, показали, что сформулированное условие проведения калибровки может быть удовлетворено в течение временного промежутка с 9⁰⁰ до 11⁰⁰, когда уровень аэрозольного загрязнения воздуха возрастает. **Практическая значимость:** повышение точности калибровки солнечных фотометров позволяет более точно оценить степень аэрозольной загрязненности атмосферы. Это важно для предсказания состояния климата, а также для решения ряда экологических задач, связанных со здоровьем населения региона.

Ключевые слова — адаптивность, фотометр, калибровка, атмосфера, измерение.

Введение

Хорошо известно, что спектральные системы атмосферных измерений, в том числе мульти-спектральные солнечные фотометры, должны пройти точную калибровку при стабильных внешних условиях. Например, многоканальные солнечные фотометры марки CIMEL, используемые во Всемирной сети аэрозольных измерений AERONET, проходят периодическую калибровку в научно-исследовательской лаборатории NASA, расположенной на Гавайских островах на высоте 2000 м над уровнем моря, в местечке Маона-Лоа. Удаленность этой станции от материков и высота расположения позволяют обеспечить высоко-точную калибровку солнечных фотометров путем сведения к минимуму влияния атмосферного аэрозоля [1–4].

Вместе с тем существуют многочисленные локальные станции и сети атмосферных измерений, где используются солнечные фотометры различных типов, также подлежащие калибровке. Для калибровки этих приборов применяют метод эталонных источников излучателей, а также метод сравнения с использованием эталонного прибора.

Появившийся в последнее время метод калибровки солнечных фотометров при разных опти-

ческих воздушных массах позволяет осуществить калибровку с определенной степенью точности. В настоящей статье анализируется погрешность этого метода и предлагается качественно новый метод, содержащий элементы адаптивного управления режимом калибровки.

Постановка задачи организации адаптивной калибровки солнечных фотометров

В работах [5–7] авторами был предложен и развит метод проведения калибровки солнечных фотометров путем фотометрических измерений при разных оптических массах. Согласно этому методу, фотометрические измерения должны осуществляться при оптических воздушных массах $m(t_1)$ и $m(t_2)$, где $t_2 = t_1 + \Delta t$. Результаты проведенных измерений с учетом закона Бугера — Бера могут быть определены как

$$I(\lambda, t_1) = CI_0(\lambda_1)e^{-m(t_1)\cdot\tau(\lambda_1, t_1)}; \quad (1)$$

$$I(\lambda, t_2) = CI_0(\lambda_1)e^{-m(t_2)\cdot\tau(\lambda_1, t_2)}; \quad (2)$$

где $I(\lambda_1, t_i)$ — выходной сигнал фотометра при проведении измерений в момент t_i на длине волны λ_1 ; $i = 1, 2$; C — коэффициент калибровки; $I_0(\lambda_1)$ — интенсивность внеатмосферного солнечного измерения на длине волны λ_1 ; $\tau(\lambda_1, t_i)$ — оптическая толщина атмосферы.

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, профессор Агаев Фахраддин Гюлали оглы.

Отметим, что в выражениях (1) и (2) аппаратная функция прибора условно принята равной единице.

Хорошо известно, что оптическая толщина атмосферы в видимом диапазоне определяется как [8–11]

$$\tau(\lambda_1, t_i) = \tau_{aer}(\lambda_1, t_i) + \tau_r(\lambda_1, t_i) + \tau_g(\lambda_1, t_i), \quad (3)$$

где $\tau_{aer}(\lambda_1, t_i)$ — оптическая толщина атмосферного аэрозоля; $\tau_r(\lambda_1, t_i)$ — оптическая толщина релеевского рассеяния; $\tau_g(\lambda_1, t_i)$ — оптическая толщина атмосферных газов.

Длина волны λ_1 при калибровке многоканального фотометра выбирается таким образом, чтобы она не совпадала с линиями поглощения различных атмосферных газов. При этом ввиду того, что калибровка осуществляется в обычных условиях, релеевское рассеяние из-за малости по сравнению с аэрозольным рассеянием не учитывается.

Таким образом, имеем

$$\tau_r(\lambda_1, t_i) = \tau_{aer}(\lambda_1, t_i). \quad (4)$$

С учетом условия (4) выражения (1) и (2) имеют следующий вид:

$$I(\lambda_1, t_1) = CI_0(\lambda_1) e^{-m(t_1) \cdot \tau_{aer}(\lambda_1, t_1)}; \quad (5)$$

$$I(\lambda_1, t_2) = CI_0(\lambda_1) e^{-m(t_2) \cdot \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)}. \quad (6)$$

Далее, в известных работах [5–7] предлагается проведение следующих операций. Правая и левая стороны выражения (5) возводятся в степень k_0 , где

$$k_0 = \frac{m(t_2)}{m(t_1)}. \quad (7)$$

Имеем

$$I(\lambda_1, t_1)^{k_0} = C^{k_0} I_0^{k_0}(\lambda_1) e^{-m(t_1) k_0 \cdot \tau_{aer}(\lambda_1, t_1)}. \quad (8)$$

Уравнение (6) с учетом (7) может быть выражено следующим образом:

$$I(\lambda_1, t_2) = CI_0(\lambda_1) e^{-k_0 m(t_1) \cdot \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)}. \quad (9)$$

Деление (8) на выражение (9) дает

$$\begin{aligned} & \frac{I(\lambda_1, t_1)^{k_0}}{I(\lambda_1, t_2)} = \\ & = C^{k_0-1} I_0^{k_0-1}(\lambda_1) e^{-m(t_1) \cdot k_0 [\tau_{aer}(\lambda_1, t_1) - \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)]}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$\begin{aligned} & [CI_0(\lambda_1)] = \\ & = k_0^{-1} \sqrt[k_0]{\frac{I(\lambda_1, t_1)}{I(\lambda_1, t_2)}} e^{m(t_1) \cdot k_0 [\tau_{aer}(\lambda_1, t_1) - \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)]}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, при $C = 1$ и при

$$\tau_{aer}(\lambda_1, t_1) = \tau_{aer}(\lambda_1, t_2) \quad (12)$$

формула (11) совпадает с формулой, приведенной в работах [5–7]. Однако с учетом дневного изменения оптической толщины атмосферного аэрозоля по часам можно ожидать, что точность калибровки на базе выражения (11) будет невысокой. Следовательно, имеет смысл усовершенствовать известный метод калибровки, вводя в метод элементы адаптивного контроля.

Решение задачи

В предлагаемом новом варианте правая и левая стороны выражения (5) возводятся в степень k , который определяется как

$$k = \sqrt{\frac{m(t_2)}{m(t_1)}}. \quad (13)$$

В этом случае выражение (6) с учетом (13) принимает следующий вид:

$$I(\lambda_1, t_2) = CI_0(\lambda_1) e^{-k^2 m(t_1) \cdot \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)}. \quad (14)$$

Деление (8) на выражение (14) дает

$$\begin{aligned} & \frac{I(\lambda_1, t_1)^k}{I(\lambda_1, t_2)} = \\ & = C^{k-1} I_0^{k-1}(\lambda_1) e^{-km(t_1) [\tau_{aer}(\lambda_1, t_1) - k \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)]}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из выражения (15) находим

$$\begin{aligned} & CI_0(\lambda_1) = \\ & = k^{-1} \sqrt[k]{\frac{I(\lambda_1, t_1)^k}{I(\lambda_1, t_2)}} e^{-km(t_1) [\tau_{aer}(\lambda_1, t_1) - k \tau_{aer}(\lambda_1, t_2)]}. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, полученное выражение (16) предъявляет новое требование к выбору величины коэффициента k , которое формируется следующим образом:

$$k = \frac{\tau_{aer}(\lambda_1, t_1)}{\tau_{aer}(\lambda_1, t_2)}. \quad (17)$$

Следовательно, с учетом выражений (13) и (17) можно получить следующее общее условие проведения калибровки по предлагаемому методу:

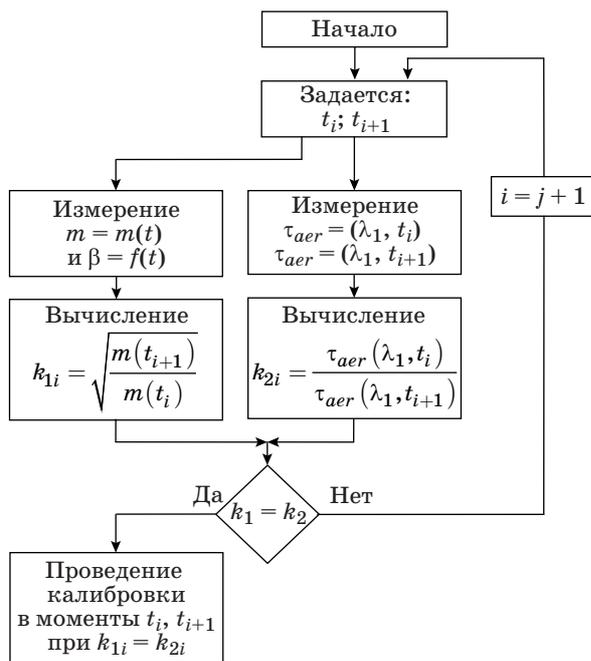
$$k = \sqrt{\frac{m(t_2)}{m(t_1)}} = \frac{\tau_{aer}(\lambda_1, t_1)}{\tau_{aer}(\lambda_1, t_2)}. \quad (18)$$

При выполнении условий (17) и (18) выражение (16) принимает следующий вид:

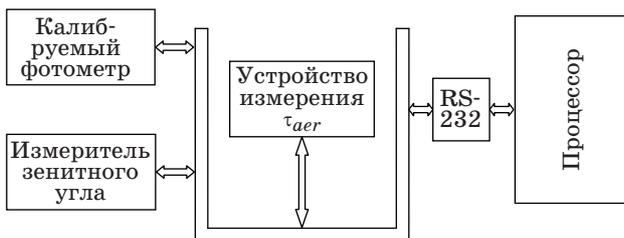
$$CI_0(\lambda_1) = k^{-1} \sqrt{\frac{I(\lambda_1, t_1)^k}{I(\lambda_1, t_2)}} \quad (19)$$

Как видно из представленной схемы (рис. 1), предлагаемый метод калибровки обладает свойством адаптивности, так как параметры рабочего режима калибровки t_1 , t_2 и k определяются в зависимости от показателей аэрозольной загрязненности атмосферы $\tau_{aer}(t_1)$ и $\tau_{aer}(t_2)$.

Устройство, обеспечивающее адаптивную калибровку фотометра по предлагаемому методу (рис. 2), содержит блок измерения зенитного угла. Проведение таких измерений объясняется большим разбросом функции зависимости зенитного угла от дневного времени и требуется для осуществления необходимых корректировок этой зависимости исходя из географических координат пункта проведения калибровки.



■ Рис. 1. Алгоритм реализации предлагаемого метода калибровки фотометра



■ Рис. 2. Блок-схема устройства калибровки

Модельные исследования

Из вышеизложенного становится ясным, что для реализации вновь предлагаемого метода калибровки следует проводить синхронные аэрозольные измерения для определения значения коэффициента k по выражению (17). Полученная величина также должна удовлетворять условию (18). Хорошо известно, что оптическая воздушная масса может быть интерпретирована в качестве отношения оптической толщины атмосферы, вычисленной для угла высоты Солнца α к оптической толщине воздуха в зенитном направлении (рис. 3) [12–15], т. е. при зенитном угле $\beta = 0$. По значениям оптической воздушной массы для различных зенитных углов (таблица) видно, что при наиболее вероятном диапазоне зенитного угла $\beta = 0 \div 60^\circ$ оптическая воздушная масса растет от 1 до 2. Согласно работе [12], зависимость $m = m(\beta)$ в этом диапазоне практически линейна (рис. 4). На рисунке параллельно оси абсцисс также условно показаны дневные часы, соответствующие указанным значениям оптической воздушной массы. Как видно из рис. 4, если принять $t_2 = 11.00$; $t_1 = 9.00$, из выражения (18) получим

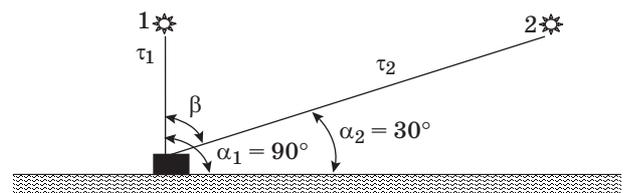
$$k = \sqrt{\frac{2}{1,5}} \approx 1,15. \quad (20)$$

При этом, согласно условию (18), должно быть удовлетворено условие

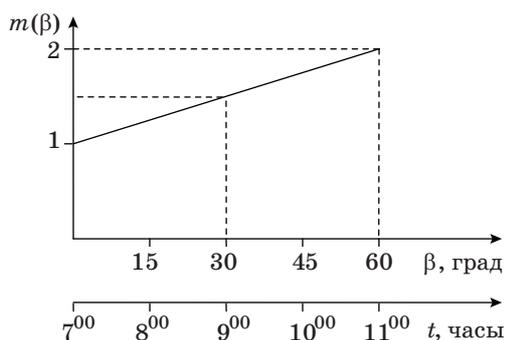
$$\frac{\tau_{aer}(\lambda_1, 9.00)}{\tau_{aer}(\lambda_1, 11.00)} \approx 1,15. \quad (21)$$

■ Значения оптической воздушной массы для различных зенитных углов

β , град	m	β , град	m
0	1,0	80	5,6
60	2,0	85	10,3
70	2,9	88	19,4
75	3,8	90	37,9



■ Рис. 3. Определение понятия «оптическая воздушная масса»: α_i — угол высоты Солнца, $i = 1, 2$; β — зенитный угол; τ_i — оптическая толщина атмосферы при углах высоты Солнца α_i ; 1, 2 — позиции Солнца



■ **Рис. 4.** Зависимость оптической массы воздуха от зенитного угла β и текущего дневного времени t

Если учесть, что пик производственной деятельности, скорее, близок к 9.00, чем к 11.00, то можно ожидать, что в городской местности условие (21) может быть удовлетворено. Таким образом, оптимальными в рассматриваемом модельном случае параметрами, определяющими усло-

вия проведения калибровки, являются: $t_2 = 11.00$; $t_1 = 9.00$; $k = 1,15$.

Заключение

На основе исследований существующей практики калибровки солнечных фотометров критически проанализирован известный метод проведения калибровки солнечных фотометров, реализованный на базе измерений при двух значениях оптической воздушной массы. Предложен новый метод калибровки, реализующий измерения солнечных фотометров при двух значениях оптической воздушной массы, корень отношения величин которых равен отношению оптических толщин атмосферного аэрозоля, измеренных в обратной временной последовательности. Такой порядок проведения калибровки позволяет уменьшить аэрозольную погрешность известного метода калибровки солнечного фотометра.

Разработаны алгоритм выполнения и блок-схема устройства для практической реализации метода.

Литература

1. Shaw G. E. Aerosols at Mauna Loa: Optical Properties // *J. of the Atmospheric Sciences*. 1979. Vol. 36. P. 862–869.
2. Kim S.-W. et al. Global Surface-Based Sun Photometer Network for Long-Term Observations of Column Aerosol Optical Properties: Intercomparison of Aerosol Optical Depth // *Aerosol Science and Technology*. 2008. Vol. 42. P. 1–9.
3. Livingston J. M. et al. Retrieval of Ozone Column Content from Airborne Sun Photometer Measurements During SOLVE II: Comparison with Coincident Satellite and Aircraft Measurements // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005. Vol. 5. P. 2035–2054.
4. Beegum S. N. et al. Characteristics of Spectral Aerosol Optical Depths over India During ICARB // *J. of Earth System Sciences*. July 2008. Vol. 117. Iss. 1 Supplement. P. 303–313.
5. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New method for calibration of Sun Photometers // *Chinese Optics Letters*. Sept. 2009. Vol. 7. N 9. P. 760–763.
6. Асадов Х. Г., Чобанзаде И. Г., Алиев Д. З. Дистанционное зондирование с переменным углом обзора. Состояние и перспективы для исследования поверхности Земли и атмосферы // *Авиакосмическое приборостроение*. 2009. № 1. С. 31–34.
7. Асадов Х. Г., Чобанзаде И. Г., Агаев Ф. Г. Метод калибровки трехволновых солнечных фотометров // *Инженерная физика*. 2009. № 6. С. 26–28.
8. Гущин Г. П., Виноградова Н. Н. Суммарный озон в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 342 с.
9. Liang Sh., Zhong B., Fang H. Improved Estimation of Aerosol Optical Depth from MODIS Imagery over Land Surfaces // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 104. P. 416–425.
10. Li G., Li Ch., Mao J. Evaluation of Atmospheric Aerosol Optical Depth Products at Ultraviolet Banda Derived from MODIS Products // *Aerosol Science and Technology*. 2012. Vol. 46. Iss. 9. P. 1025–1034.
11. Retails A. et al. Comparison of Aerosol Optical Thickness with in Situ Visibility Data over Cyprus // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2010. Vol. 10. P. 421–428.
12. Kasten F., Young A. T. Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula // *Applied Optics*. 1989. Vol. 28. Iss. 22. P. 4735–4738.
13. Rapp-Arraras I., Domingo-Santos J. M. Functional Forms for Approximating the Relative Optical Air Mass // *Journal of Geophysical Researches*. 2011. Vol. 116. D24308. doi:10.1029/2011JD016706
14. Bayat A., Masoumi A., Khalesifard H. R. Retrieval of Atmospheric Optical Parameters from Ground-Based Sun-Photometer Measurements for Zanjan, Iran // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2011. Vol. 4. P. 857–863. doi:10.519/amt-4-857-2011
15. Vollmer M., Gedzelman S. D. Colours of the Sun and Moon: the Role of the Optical Air Mass // *European Journal of Physics*. 2006. N 27. P. 299–309. doi:10.1088/0143-0807/27/2/013

UDC 551.510

Method of Adaptive Control of Calibration of Multispectral Photometric Systems of Atmospheric Measurements

Huseynova R. O.^a, Senior Lecturer, Dissertant, renahuseynova55@gmail.com^aAzerbaijan Architecture and Construction University, 5, A. Sultanova St., AZ1073, Baku, Azerbaijan Republic

Purpose: Sun photometers are versatile measuring instruments, allowing to study aerosol, certain atmospheric trace gases and water vapors, as well as some parameters of solar radiation. Correct calibration of sun photometers is an important condition of reaching high authenticity of measurement results. The well-known method of calibrating a sun photometer upon two different optical air masses has a specific aerosol error. This error is caused by temporal variability of the atmospheric aerosol within the time interval formed by the two above-mentioned optical air masses. A modification of this method could allow us to increase the accuracy of sun photometer calibration. **Results:** As an implementation of the new method, a special algorithm was developed. According to it, the calibration coefficient should be calculated taking into account the photometer output signals taken in such diurnal time moments when a special condition is met about the equality of functional values of temporal ratios for the optical air mass and the aerosol optical depth calculated separately. A model research performed with due regards for the dependence of the optical air mass on the sun elevation angle showed that the formulated calibration condition can be met during the time interval from 9:00 to 11:00 when the air aerosol pollution level increases. **Practical relevance:** The algorithm for the proposed method is developed and a block scheme of the instrument is composed. The results of the performed model research are given, confirming the feasibility of the calibration accuracy increase. **Social implications:** The increase in sun photometer calibration accuracy enables more precise estimation of atmospheric aerosol pollution level. This is important for climate prediction and for solving certain ecological problems linked to people's health.

Keywords — Adaptiveness, Photometer, Calibration, Atmosphere, Measurement.

References

1. Shaw G. E. Aerosols at Mauna Loa: Optical Properties. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1979, vol. 36, pp. 862–869.
2. Kim S.-W., et al. Global Surface-Based Sun Photometer Network for Long-Term Observations of Column Aerosol Optical Properties: Intercomparison of Aerosol Optical Depth. *Aerosol Science and Technology*, 2008, vol. 42, pp. 1–9.
3. Livingston J. M., et al. Retrieval of Ozone Column Content from Airborne Sun Photometer Measurements During SOLVE II: Comparison with Coincident Satellite and Aircraft Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, vol. 5, pp. 2035–2054.
4. Beegum S. N., et al. Characteristics of Spectral Aerosol Optical Depths over India During ICARB. *Journal of Earth System Sciences*, July 2008, vol. 117, iss. 1 Supplement, pp. 303–313.
5. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. New Method for Calibration of Sun Photometers. *Chine Optics Letters*, September 2009, vol. 7, no. 9, pp. 760–763.
6. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G., Aliyev D. Z. Remote Sensing with Changing Angle of View. Condition and Perspectives for Research of the Earth Surface and Atmosphere. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2009, no. 1, pp. 31–34 (In Russian).
7. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G., Agayev F. G. Method for Calibration of Three-Wavelengths Sun Photometers. *Inzhenernaia fizika*, 2009, no. 6, pp. 26–28 (In Russian).
8. Guchin G. P., Vinogradova N. N. *Summarnyi ozon v atmosfere* [Total Ozone in Atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982. 342 p. (In Russian).
9. Liang Sh., Zhong B., Fang H. Improved Estimation of Aerosol Optical Depth from MODIS Imagery over Land Surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 2006, vol. 104, pp. 416–425.
10. Li G., Li Ch., Mao J. Evaluation of Atmospheric Aerosol Optical Depth Products at Ultraviolet Banda Derived from MODIS Products. *Aerosol Science and Technology*, 2012, vol. 46, iss. 9, pp. 1025–1034.
11. Retails A., et al. Comparison of Aerosol Optical Thickness with in Situ Visibility Data over Cyprus. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, vol. 10, pp. 421–428.
12. Kasten F., Young A. T. Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, iss. 22, pp. 4735–4738.
13. Rapp-Arraras I., Domingo-Santos J. M. Functional Forms for Approximating the Relative Optical Air Mass. *Journal of Geophysical Researches*, 2011, vol. 116, D24308. doi:10.1029/2011JD016706
14. Bayat A., Masoumi A., Khalesifard H. R. Retrieval of Atmospheric Optical Parameters from Ground-Based Sun-Photometer Measurements for Zanjan, Iran. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, vol. 4, pp. 857–863. doi:10.519/amt-4-857-2011
15. Vollmer M., Gedzelman S. D. Colours of the Sun and Moon: the Role of the Optical Air Mass. *European Journal of Physics*, 2006, no. 27, pp. 299–309. doi:10.1088/0143-0807/27/2/013