

## ДВУХВОЛНОВОЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОМЕТРОВ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Р. О. ГУСЕЙНОВА

*Азербайджанский государственный архитектурно-строительный университет,  
AZ1073, Баку, Азербайджан  
E-mail: renahuseynova55@gmail.com*

Предлагается двухволновой метод калибровки солнечных фотометров с высокой точностью. В качестве функционального анализа рассматривается графоаналитический метод диаграмм Лэнгли. Показано, что несмотря на симметричность математического выражения закона Бугера — Бера относительно оптической воздушной массы и оптической толщины аэрозоля построение диаграммы Лэнгли с взаимной заменой этих параметров невозможно. Приведен алгоритм реализации метода.

**Ключевые слова:** солнечный фотометр, калибровка, метод Лэнгли, оптическая воздушная масса, аэрозоли.

Суммарная солнечная радиация при среднем значении расстояния между Солнцем и Землей известна как „солнечная постоянная“, однако спутниковые измерения, осуществленные в 1980—90-х гг., показали очевидность изменения этой величины. До спутниковых измерений солнечная радиация оценивалась наземными радиометрами с помощью традиционного метода диаграмм Лэнгли. Развитие спутниковой измерительной техники привело, в свою очередь, к созданию более совершенных наземных сетей и систем атмосферных измерений, в частности сети AERONET. Подробное описание солнечных радиометров сети AERONET приведено в работе [1]. Автоматизированная сеть AERONET охватывает более 200 измерительных пунктов, распределенных по всему миру.

Основным фактором ограничения точности наземных измерений солнечной радиации является изменение оптических свойств атмосферы.

Остановимся коротко на методе Лэнгли и рассмотрим возможность введения альтернативного метода, дуального методу Лэнгли.

Метод Лэнгли базируется на законе Бугера — Бера, который в общем случае имеет следующий вид:

$$I_1 = I_0 \exp(-m\tau), \quad (1)$$

где  $I_1$  — измеренная фотометром солнечная спектральная радиация на уровне Земли;  $I_0$  — солнечная спектральная радиация на верхней границе атмосферы;  $m$  — оптическая воздушная масса;  $\tau$  — суммарная оптическая толщина атмосферы.

Прологарифмировав обе части выражения (1), получим

$$\ln I_1 = \ln I_0 - m\tau. \quad (2)$$

Заметим, что уравнение (2) является основой метода диаграмм Лэнгли, в котором строятся графики зависимости  $\ln I_1(m)$  при разных значениях  $\tau$ . Величина  $I_0$  определяется продолжением графиков влево до предельного значения  $m = 0$ .

Рассмотрим, не останавливаясь на функциональных возможностях этого метода, вопрос о точности получаемых результатов. Из выражения (2) получим уравнение, позволяющее вычислить погрешность определения солнечной постоянной по методу Лэнгли:

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{\Delta I_1}{I_1} + \tau \frac{\Delta m}{m} + m \frac{\Delta \tau}{\tau}. \quad (3)$$

Метод Лэнгли предусматривает варьирование величины  $m$ , следовательно, отношение  $\Delta m/m$  можно классифицировать как инструментальную погрешность; здесь также принимается, что  $\tau = \text{const}$ , следовательно, составляющая  $\Delta \tau/\tau$  должна быть отнесена к методической погрешности.

Представленный анализ возможных погрешностей при реализации метода Лэнгли позволяет перейти к синтезу новых методов калибровки солнечных фотометров. Теоретической основой такого синтеза является само математическое выражение закона Бугера — Бера, т.е. формула (1), а также запись этой формулы для длины волны, при которой линии поглощения атмосферных газов отсутствуют:

$$I(\lambda) = CI_0 \exp\{-m\tau_{\text{аер}}(\lambda)\}. \quad (4)$$

В выражении (4) принято условие

$$\tau_{\text{аер}}(\lambda) = \tau(\lambda), \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{аер}}(\lambda)$  — оптическая толщина аэрозоля,  $C$  — коэффициент калибровки.

Формула (4) абсолютно симметрична относительно параметров  $m$  и  $\tau_{\text{аер}}(\lambda)$ . Свойство симметричности означает, что гипотетически можно построить калибровочную линию, аналогичную калибровочной линии Лэнгли, путем замены на оси абсцисс параметра  $m$  на параметр  $\tau_{\text{аер}}(\lambda)$ .

Однако любые две точки  $A$  и  $B$ , полученные в результате измерений  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в диапазоне калибровки фотометра, либо через временной интервал  $\Delta t$  между измерениями, либо на двух разных длинах волн, не могут быть соединены прямой линией:

— если, как и в методе Лэнгли, первичным аргументом  $\tau_{\text{аер}}$  является текущее время  $t$ , то вследствие случайного характера изменения  $\tau_{\text{аер}}$  во времени линия, соединяющая точки  $A$  и  $B$ , не является прямой;

— если первичным аргументом  $\tau_{\text{аер}}$  является длина волны и смена длин волн происходит за короткое время  $\Delta t$ , в течение которого аэрозольная обстановка не изменяется, то линия, соединяющая точки  $A$  и  $B$ , также не будет прямой, так как оптическая толщина аэрозоля согласно формуле Ангстрема [2] является нелинейной функцией длины волны, т.е.

$$\tau_{\text{аер}}(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (6)$$

где  $\beta$  — показатель аэрозольной мутности атмосферы,  $\alpha$  — показатель Ангстрема.

Таким образом, анализ показывает, что свойство симметричности математического выражения закона Бугера — Бера не позволяет исключить погрешность классических диаграмм Лэнгли, вызываемую влиянием аэрозолей, путем замены основного аргумента диаграммы на оптическую толщину аэрозоля.

Для исключения влияния нестабильности оптической толщины аэрозоля на точность проводимой калибровки можно предложить двухволновой параметрический метод, алгоритм реализации которого заключается в следующем.

1. Проводятся солнечно-фотометрические измерения на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2 = k_1\lambda_1$ , где  $k_1 = \text{const}$ . Выбор коэффициента  $k_1$  осуществляется таким образом, чтобы на длине волны  $\lambda_2$  отсутствовали линии поглощения атмосферных газов. При этом оптическая толщина аэрозоля вычисляется соответственно по следующим формулам:

$$\tau_{\text{аер}}(\lambda_1) = \beta\lambda_1^{-\alpha}, \quad (7)$$

$$\tau_{\text{aer}}(k_1\lambda_1) = \beta k_1^{-\beta} \lambda_1^{-\alpha}. \quad (8)$$

Сигнал фотометра с учетом формул (7) и (8) характеризуется выражением

$$I(\lambda_1) = CI_0(\lambda_1) \exp\{-m\tau_{\text{aer}}(\lambda_1)\} = CI_0(\lambda_1) \exp(-m\beta\lambda_1^{-\alpha}), \quad (9)$$

тогда оптическая толщина аэрозоля определяется как

$$\tau_{\text{aer}}(k_1\lambda_1) = CI_0(k_1\lambda_1) \exp(-m\beta k_1^{-\alpha} \lambda_1^{-\alpha}). \quad (10)$$

Возведем выражение (9) в степень  $k_2$ :

$$I^{k_2}(\lambda_1) = C^{k_2} I_0^{k_2}(\lambda_1) \exp(-k_2 m\beta \lambda_1^{-\alpha}). \quad (11)$$

Приняв

$$k_2 = k_1^{-\alpha} \quad (12)$$

и разделив уравнение (10) на выражение (11), получим

$$\frac{I(k_1\lambda_1)}{I^{k_2}(\lambda_1)} = \frac{CI_0(k_1\lambda_1) \exp(-m\beta k_1^{-\alpha} \lambda_1^{-\alpha})}{C^{k_2} I_0^{k_2}(\lambda_1) \exp(-k_2 m\beta \lambda_1^{-\alpha})} = \frac{I_0(k_1\lambda_1)}{C^{k_2-1} I_0^{k_2}(\lambda_1)}, \quad (13)$$

откуда окончательно получаем

$$C = {}_{k_2-1} \sqrt{\frac{I^{k_2}(\lambda_1) I_0(k_1\lambda_1)}{I(k_1\lambda_1) I_0^{k_2}(\lambda_1)}}. \quad (14)$$

Таким образом, используя выражение (14) и проводя за короткий интервал времени измерения  $I(\lambda_1)$ ,  $I(k_1\lambda_1)$ , можно вычислить коэффициент калибровки.

Отметим, что основная погрешность предлагаемого метода может возникнуть из-за несовершенства модели Ангрстрема (6), которое заключается в том, что показатель  $\beta$  несколько изменяется при изменении длины волны. В этом случае

$$I^*(k_1\lambda_1) = CI_0(k_1\lambda_1) \exp\{-m(\beta + \Delta\beta) k_1^{-\alpha} \lambda_1^{-\alpha}\}, \quad (15)$$

где  $\Delta\beta$  — приращение  $\beta$  в интервале  $\lambda_1 - k_1\lambda_1$ .

С учетом выражений (15) и (11) получим

$$\frac{I^*(k_1\lambda_1)}{I^{k_2}(\lambda_1)} = \frac{I_0(k_1\lambda_1) \exp(-m\Delta\beta)}{C^{k_2-1} I_0^{k_2}(\lambda_1)}, \quad (16)$$

откуда

$$C^* = {}_{k_2-1} \sqrt{\frac{I^{k_2}(\lambda_1) I_0(k_1\lambda_1) \exp(-m\Delta\beta)}{I(k_1\lambda_1) I_0^{k_2}(\lambda_1)}}. \quad (17)$$

Относительная погрешность вычисления коэффициента калибровки с учетом выражений (14) и (17) определяется как

$$\gamma = 1 - \frac{C^*}{C} = 1 - \exp\left(-\frac{m\Delta\beta}{k_2 - 1}\right). \quad (18)$$

Таким образом, предложена методика двухволновой калибровки солнечных фотометров повышенной точности, при разработке которой осуществлен общий анализ погрешности определения солнечной постоянной по графоаналитическому методу Лэнгли и показано, что несмотря на симметричность математического выражения закона Бугера — Бера относительно  $m$  (оптической воздушной массы) и  $\tau_{\text{aer}}(\lambda)$  (оптической толщины аэрозоля) построение диаграммы Лэнгли с заменой  $\tau$  на  $m$  невозможно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gobbi G. P., Kaufman Y. J., Koren I., Eck T. F. Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007. N 7. P. 453—458.
2. Russel P. B., Bergstrom R. W., Shinozuka Y., Clarke A. D., DeCarlo P. F., Jimenez J. L., Livingston J. M., Redemann J., Dubovik O., Strawa A. Absorption Angstrom exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. N 10. P. 1155—1169.

**Сведения об авторе**

**Гусейнова Рена Омар** — соискатель; Азербайджанский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра вычислительной техники и программного обеспечения; ст. преподаватель; E-mail: renahuseynova55@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники и программного  
обеспечения

Поступила в редакцию  
18.11.14 г.

**Ссылка для цитирования:** Гусейнова Р. О. Двухволновой метод калибровки солнечных фотометров повышенной точности // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2015. Т. 58, № 5. С. 393—396.

**TWO-WAVELENGTH METHOD FOR CALIBRATION OF HIGH-PRECISION SUN PHOTOMETER**

**R. O. Huseynova**

*Azerbaijan State Architecture Construction University,  
AZ1073, Baku, Azerbaijan  
E-mail: renahuseynova55@gmail.com*

A two-wavelength method for accurate calibration of high-precision Sun photometers is proposed. The graphical analytical technique of Langley diagrams is considered as a functional analogue. It is shown, that despite the symmetry of the Bouguer — Beer law mathematical formula with respect to optical air mass and optical depth of aerosol, development of Langley diagrams with mutual substitution of these parameters is impossible. An algorithm realizing the proposed method is presented.

**Keywords:** Sun photometer, calibration, Langley method, optical air mass, aerosol.

**Data on author**

**Rena Omar Huseynova** — Cand. for PhD Degree; Azerbaijan State Architecture Construction University, Department of Computer Technique and Software; Senior Lecturer; E-mail: renahuseynova55@gmail.com

**Reference for citation:** Huseynova R. O. Two-wavelength method for calibration of high-precision Sun photometer // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye*. 2015. Vol. 58, N 5. P. 393—396 (in Russian).