



УДК 535.2

МЕТОД УСКОРЕННОЙ КАЛИБРОВКИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММ ЛЕНГЛИ

Х. Г. Асадов¹, Л. Р. Бекирова², А. Дж. Алиева¹¹ Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика² Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Предложен вариант ускоренной калибровки солнечных фотометров с применением элементов классического метода диаграмм Ленгли. Разработанный метод позволяет осуществить ускоренную калибровку на некоторой паре длин волн, в которых диаграммы Ленгли пересекаются в текущем интервале изменения оптической воздушной массы. Показано, что применительно к таким длинам волн суммарное время калибровки может быть существенно сокращено (до пяти раз), что значительно уменьшает вероятность влияния вариаций метеобстановки (в частности аэрозоля атмосферы) на результат проводимой калибровки и появления соответствующей методической погрешности калибровки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КАЛИБРОВКА, СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР, ОПТИЧЕСКАЯ ВОЗДУШНАЯ МАССА, ДИАГРАММЫ ЛЕНГЛИ, АТМОСФЕРА, АЭРОЗОЛЬ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_39_3

<https://elibrary.ru/krlldme>

1. ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в работе [1], практика показывает, что в течение годичной работы солнечные фотометры изменяют свою чувствительность на 10% из-за износа используемых детекторов и оптических фильтров. Это явление приводит к необходимости их калибровки, что обычно осуществляется с использованием метода диаграмм Ленгли. В работе [2] указывается, что наиболее широко применяемый солнечный фотометр типа CE 318 также обладает существенной температурной погрешностью, так, например, увеличение внешней температуры на 1°C приводит к погрешности измерения 1% на длине волны 1030 нм для детекторов типа InGaAs, примененных в CE 318. Указанный факт показывает необходимость осуществления термостабилизации солнечного фотометра в течение всего цикла его калибровки, т.к. калибровка длится достаточно долго, обычно в течение нескольких часов, в течение которых оптическая воздушная масса изменяется в пределах 1÷6. Вместе с тем, следует четко различить инструментальную (приборную) и методическую погрешности. Фотометра и в данном случае целью является уменьшение методической погрешности калибровки.

Другим важным фактором, требующим проведения ускоренных процедур калибровки солнечного фотометра является влияние атмосферного аэрозоля на результат солнечно-



фотометрических измерений. Покажем это. Хорошо известно, что метод диаграмм Ленгли основывается на законе Бугера-Бера, согласно которому:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-m\tau} \quad (1)$$

где: $I_0(\lambda)$ – внеатмосферный поток солнечного излучения;

m – оптическая воздушная масса;

τ – оптическая толщина атмосферы;

$I(\lambda)$ – поток солнечного излучения на уровне установки солнечного фотометра.

При этом τ определяется как

$$\tau = \tau_{aer} + \tau_{rel} + \tau_g \quad (2)$$

где:

τ_{aer} – оптическая толщина аэрозоля;

τ_{rel} – оптическая толщина релеевского рассеяния;

τ_g – оптическая толщина атмосферных газов.

Так как τ_{rel} и τ_g являются достаточно стабильными показателями, то причиной нестабильности является оптическая толщина аэрозоля, изменчивость которого достигает значительных величин даже в часовом интервале. При этом погрешность из-за изменчивости аэрозоля в данном случае может быть классифицирована как методическая погрешность метода Ленгли, возникающая из-за длительности реализации этого метода.

Процедура построения диаграмм Ленгли заключается в следующем. Логарифмирование (1) дает

$$\ln I(\lambda) = \ln I_0(\lambda) - m\tau \quad (3)$$

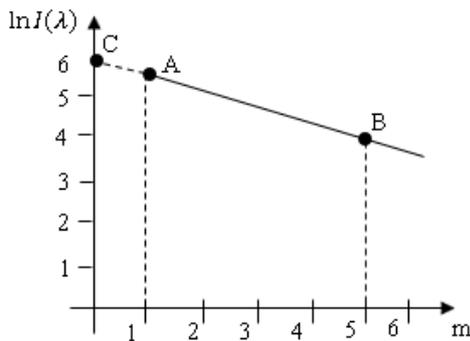


Рис. 1. Примерный график зависимости $\ln I(\lambda) = f(m)$

Далее, на базе выражения (3) строится график зависимости $\ln I(\lambda)$ от m , используя результаты проведенных измерений $I(\lambda)$ (рис. 1) при двух заданных значениях m ; $m = 1$ и $m = 5$.

Соединение полученных точек А и В в линию и дальнейшая экстраполяция этой линии в направлении $m \rightarrow 0$ позволяет определить на оси ординат точку $\ln I(\lambda) = C$, с помощью которой осуществляется вычисление показателя $I_0(\lambda)$ по формуле:

$$I_0(\lambda) = e^C \quad (4)$$

Следует отметить наличие различных модификаций метода Ленгли, которые можно разделить на две группы: 1 – модификации, в которых элементы графического представления остаются [1, 3, 4]; 2 – модификации, в которых графические представления исключены [5, 6, 7]. Во второй группе модификации метода Ленгли предлагаются аналитические формулы для вычисления $I_0(\lambda)$, однако основной недостаток метода Ленгли, заключающаяся в необходимости осуществлении многочасовой процедуры калибровки остается. С учетом вышеизложенного нами предлагается метод ускоренной реализации, или процедура быстрой калибровки солнечных фотометров методом диаграмм Ленгли.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Прежде чем изложить предлагаемый метод, вкратце рассмотрим результаты экспериментальных работ по калибровке солнечного фотометра DTF-1, изложенные в работе [8].

В этой работе указывается, что достаточно стабильные атмосферные условия позволили получить хорошую степень линейности диаграмм Ленгли (рис. 2).

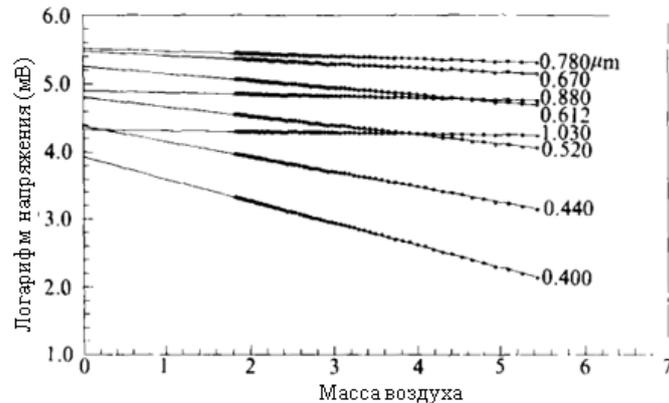


Рис. 2. Диаграммы Ленгли полученные на разных длинах волн при калибровке солнечного фотометра DTF-1

Как видно из диаграмм, приведенных на рис. 2 существуют несколько пар диаграмм, которые имеют общую точку пересечения. Так, например, диаграммы длин волн 880 нм и 612 нм пересекаются при $m = 4,3$; а диаграммы длин волн 1030 нм и 520 нм пересекаются в точке $m = 3,9$. Подобный факт также наблюдается в результатах работы [9], в которой были изложены результаты калибровки солнечного фотометра типа SE 317.

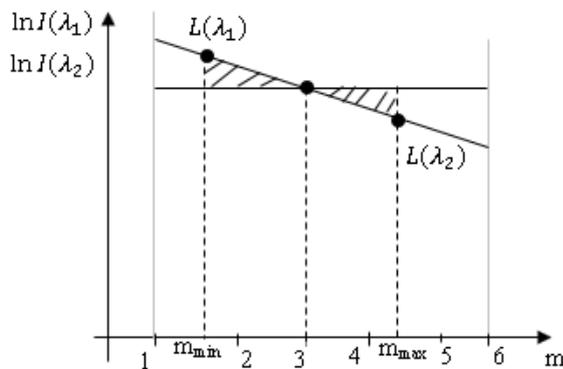


Рис. 3. Примерные графики диаграмм Ленгли поясняющие предлагаемый метод ускоренной калибровки солнечных фотометров

С учетом вышеизложенного сформулируем предлагаемый метод ускоренной калибровки солнечных фотометров по методу диаграмм Ленгли. Суть предлагаемого метода изложим с помощью вспомогательного графика, представленного на рис. 3.

Допустим, что в интервале $m = (1 \div 6)$ проведена калибровка солнечного фотометра и получены калибровочные диаграммы $L(\lambda_1)$ и $L(\lambda_2)$ при длинах волн λ_1 и λ_2 . Суть предлагаемого метода ускоренной калибровки изложим в виде следующей теоремы:

Теорема: Если при калибровке солнечного фотометра по методу диаграмм Ленгли с использованием уравнения (3) получены линейные диаграммы $L(\lambda_1)$ и $L(\lambda_2)$ в специально выбранном ограниченном интервале $m = (m_{min} \div m_{max})$, то при выполнении условий:

$$\ln \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)} \right]_{m_{max}} > \ln \left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)} \right]_{m_{max}} \quad (5)$$

$$\ln \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I(\lambda_1)} \right]_{m_{min}} < \ln \left[\frac{I_0(\lambda_2)}{I(\lambda_2)} \right]_{m_{min}} \quad (6)$$

$$\int_{m_{min}}^{m_{max}} \ln I(\lambda_1) dm = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \ln I(\lambda_2) dm \quad (7)$$

между $I_0(\lambda_1)$ и $I_0(\lambda_2)$ справедливо следующее соотношение:

$$I_0(\lambda_1) = I_0(\lambda_2) \cdot \exp[\Delta\tau m_{cp}] \quad (8)$$

где:

$$\Delta\tau = \tau(\lambda_1) - \tau(\lambda_2) \quad (9)$$

$$m_{cp} = \frac{m_{max} + m_{min}}{2} \quad (10)$$

Доказательство:

Условие (7) перепишем как:

$$\int_{m_{min}}^{m_{max}} [\ln I_0(\lambda_1) - m\tau(\lambda_1)] dm = \int_{m_{min}}^{m_{max}} [\ln I_0(\lambda_2) - m\tau(\lambda_2)] dm \quad (11)$$

Из (11) получаем:

$$\int_{m_{min}}^{m_{max}} \ln \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)} \right] dm = \int_{m_{min}}^{m_{max}} [m(\tau(\lambda_1) - \tau(\lambda_2))] dm \quad (12)$$

Из (12) получаем:

$$(m_{max} - m_{min}) \ln \left[\frac{I_0(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)} \right] = \frac{\Delta\tau}{2} (m_{max}^2 - m_{min}^2) \quad (13)$$

Из (13) имеем:

$$I_0(\lambda_1) = I_0(\lambda_2) \cdot \exp \left[\frac{\Delta\tau}{2} (m_{max} + m_{min}) \right] \quad (14)$$

или

$$I_0(\lambda_1) = I_0(\lambda_2) \cdot \exp[\Delta\tau m_{cp}] \quad (15)$$

где:

m_{cp} – точка пересечения линий $L(\lambda_1)$ и $L(\lambda_2)$.

Таким образом, алгоритм реализации предлагаемого метода заключается в следующем.

1. На длине волны λ_1 формируется диаграмма Ленгли и вычисляется точка $I_0(\lambda_1)$ следуя методу диаграм Ленгли.
2. На длине волны λ_2 формируется ограниченный отрезок диаграммы Ленгли в диапазоне $m_{min} - m_{max}$ так, чтобы выполнялись условия (5), (6), (7).
3. $I_0(\lambda_2)$ вычисляется по формулам (8), (9), (10).

Оценим выигрыш, получаемый в быстрейшем при реализации предлагаемого метода, применительно к длинам волн λ_1 и λ_2 .

В классическом методе Ленгли суммарное время, необходимое для калибровки в этом случае равен:

$$T_{k\Sigma_1} = T(\lambda_1) + T(\lambda_2) \quad (16)$$

В предлагаемом методе время калибровки $T_{k\Sigma_2}$ определим как

$$T_{k\Sigma_2} = T(\lambda_1) + T(\lambda_2)_{огр} \quad (17)$$

где: $T(\lambda_2)_{\text{огр}}$ – время формирования калибровочной линии в ограниченном промежутке m_{min} – m_{max} .

Следовательно, выигрыш в быстродействии ΔT определим как:

$$\Delta T = T_{k\Sigma_1} - T_{k\Sigma_2} = T(\lambda_2) - T(\lambda_2)_{\text{огр}}$$

Например, если $T(\lambda_2)_{\text{огр}} = 0,2T(\lambda_2)$ и $T(\lambda_2) = 5$ час, то выигрыш ΔT составит 4 часа. В таком продолжительном временном интервале аэрозольная обстановка с относительно высокой вероятностью может измениться, что приведет к значительной погрешности проводимой калибровки.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод ускоренной калибровки солнечных фотометров с применением элементов классического метода диаграмм Ленгли. Предлагаемый метод применим к процедурам калибровки на тех парных длинах волн, в которых диаграммы Ленгли пересекаются в интервале изменения оптической воздушной массы. Показано, что применительно к таким длинам волн суммарное время калибровки может быть значительно сокращено, что существенно уменьшает вероятность влияния вариаций метеорообстановки (в частности аэрозоля атмосферы) на результат проводимой калибровки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Forgan B. W.* General method for calibrating Sun photometers // *Applied Optics*. Vol. 33. No 21. 20 July 1994.
2. *Chen S., Li Y., Cao F., Zhang Y.* Calibration of automatic sun photometer with temperature correction in field environment// *Remote Sens.* 2022. 14. 66. <https://doi.org/10.3390/rs14010066>.
3. *Zheng Y., Che H., Gui K., Xia X., Zhao H., Li L., Zhang L., Zhang X., Zhao H., Liang Y. et al.* Preliminary assessment and verification of the Langley plots calibration of the sun photometer at Mt Foyeding Observatory, Beijing // *Remote Sens.* 2022. 14.4321. <https://doi.org/10.3390/rs14174321>.
4. *Adler-Golden S. M., Slusser J. R.* Comparison of plotting methods for solar radiometer calibration // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 24. 935. 2007. DOI: 10.1175/JTECH2012.1
5. *Asadov H. H., Chobanzadeh I. G.* New method for calibration of sun photometers // *Chinese Optics Letters*. Vol. 7. No 9. September 10, 2009.
6. *Абдулов Р. Н.* Метод двухволновой калибровки солнечных фотометров при двух оптических массах воздуха// *Вестник СВФУ. Серия «Науки о земле».* № 3(15). 2019.
7. *Гусейнова Р. О.* Двухволновой метод калибровки солнечных фотометров повышенной точности // *ИЗВ. Вузов. Приборостроение.* Т. 58. № 5. 2015.
8. *Jun Z., Changyin C., Jun X., Huanling H.* Sun photometer calibration and its application// *Acta Meteorologica Sinica*. Vol. 8. No 2. 1994.
9. *Hu X., Zhang Y., Liu Z., Zhang G., Huang Y., Qiu K., Wang Y., Zhang L., Zhu X., Rong Z.* Optical characteristics of China radiometric calibration site for remote sensing satellite sensors (CRCSRSS), Proc. SPIE 4151, *Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere*, (8 February 2001); doi: 10.1117/12.416994

A METHOD FOR ACCELERATED CALIBRATION OF SOLAR PHOTOMETERS USING LANGLEY DIAGRAMS

Asadov H. H., Bekirova L. R., Alieva A. J.

A variant of accelerated calibration of solar photometers using elements of the classical Langley diagram method is proposed. The developed method makes it possible to carry out accelerated calibration at a certain pair of wavelengths, in which the Langley diagrams intersect in the current range of the optical air mass. It is shown that, for such wavelengths, the total calibration time can be significantly reduced (up to five times), which significantly reduces the likelihood of the influence of variations in the meteorological situation (in particular, atmospheric aerosol) on the result of the calibration and the appearance of the corresponding methodological calibration error.

KEYWORDS: CALIBRATION, SOLAR PHOTOMETER, OPTICAL AIR MASS, LANGLEY DIAGRAMS, ATMOSPHERE, AEROSOL