



УДК 535.2

ОБОБЩЕННЫЙ МЕТОД ЛЕНГЛИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОМЕТРОВАсадов Х. Г.¹, Маммадова У. Ф.², Годжаева-Гасымова С. Н.¹¹Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Отмечено, что при проведении калибровки солнечных фотометров по методу Ленгли важным условием является стабильность атмосферных условий. Классический метод Ленгли при нестабильности оптической толщины атмосферного аэрозоля всегда приводит к существенной неточности калибровки. Предлагаемый метод обобщенной калибровки предусматривает построение диаграмм на базе таких двух временных точечных измерений, в которых оптические толщины атмосферного аэрозоля почти равны между собой. Разработан алгоритм реализации предлагаемого метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КАЛИБРОВКА, ОПТИЧЕСКАЯ ВОЗДУШНАЯ МАССА, АЭРОЗОЛЬ, СОЛНЕЧНЫЙ ФОТОМЕТР, ПОГРЕШНОСТЬ**DOI:** 10.54252/2304-7380_2021_29_9**1. ВВЕДЕНИЕ**

Хорошо известно, что наземные и бортовые измерения атмосферного аэрозоля с помощью солнечных фотометров позволяют определить оптико – физические характеристики аэрозоля и тем самым более точно осуществлять валидацию спутниковых данных. Точность результатов солнечно – фотометрических измерений во многом зависит от точности калибровки этих приборов. Для калибровки солнечных фотометров повсеместно используют метод диаграмм Ленгли, суть которого заключается в следующем:

(а) Осуществление нескольких фотометрических измерений при различных оптических воздушных массах на длине волны λ .

(б) Логарифмирование общего выражения закона Бугера – Бера (1) для случая $\tau_{aer}(\lambda) = \tau_{atm}(\lambda)$.

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

где $I(\lambda)$ – сигнал на выходе солнечного фотометра; $I_0(\lambda)$ – выходной сигнал солнечного фотометра гипотетически установленного на верхней границе атмосферы; m – оптическая воздушная масса; $\tau_{aer}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферного аэрозоля; $\tau_{atm}(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферы;

(с) Построение графика линейной зависимости $\ln I_0(\lambda)$ от m :

$$\ln I(\lambda) = \ln I_0(\lambda) - m \cdot \tau_{aer}(\lambda) \tag{2}$$

Отметим, что уравнение (2) легко получается путем логарифмирования выражения (1).

(d) Экстраполяция полученной наклонной линии в сторону ординатной линии при $m \rightarrow 0$.

(e) Определение точки пересечения ординатной линии в качестве Y_0 и вычисления величины $I_0(\lambda)$ по формуле

$$I_0(\lambda) = e^{Y_0} \tag{3}$$

Соответствующая процедура (а)÷ (е) отображена на рис. 1.

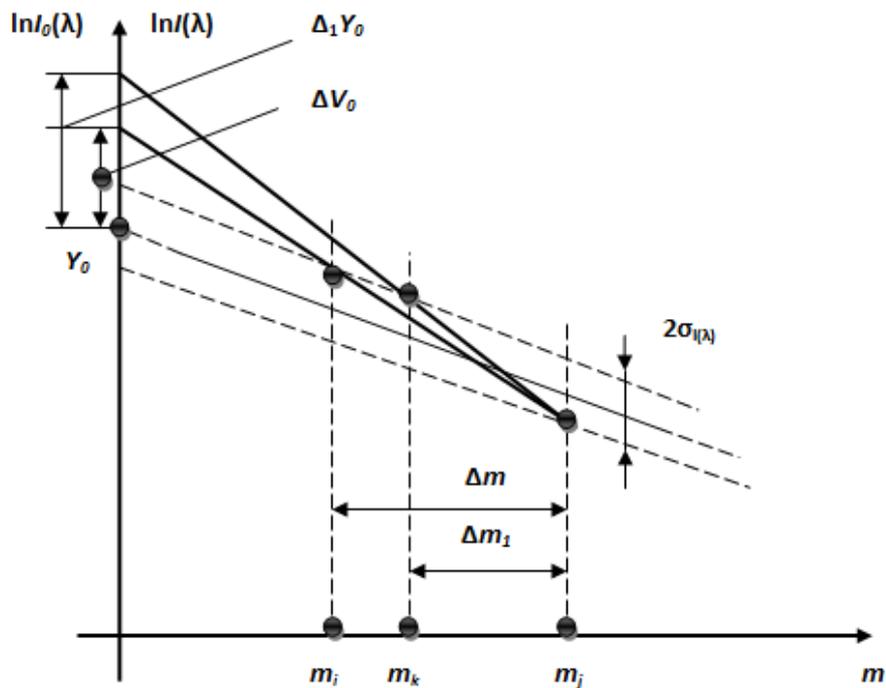


Рис. 1. Схематическое представление метода Ленгли для калибровки солнечного фотометра; $\sigma_{I(\lambda)}$ – с.к.о погрешности измерения $I(\lambda)$

Очевидно, что для обеспечения разумно низкой методической погрешности данного графоаналитического метода достаточно выбрать значения m_i и m_j так, чтобы соответствующая временная разность между моментами реализации этих измерений достиг несколько десятков минут. Дело в том, что, как это показано на рис.1 уменьшение ϵ интервала Δm до величины $\Delta_1 m$ приведет к увеличению соответствующей погрешности ΔY_0 до значения $\Delta_1 Y_0$, что может быть непозволительной с учетом требуемой точности калибровки. С другой стороны, увеличение $\Delta_1 m$ до значения Δm уменьшая погрешность $\Delta_1 Y_0$ до значения ΔY_0 может вызвать появления другой составляющей общей случайной погрешности калибровки, вызванной неконтролируемым изменением оптической толщины аэрозоля. Суммарную погрешность калибровки σ_{Σ} можно выразить в виде геометрической суммы

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\tau_{aer}}^2(\lambda) + \sigma_{пр}^2} \quad (4)$$

где $\sigma_{\tau_{aer}}(\lambda)$ – с.к.о. случайной погрешности из-за неконтролируемого изменения оптической толщины аэрозоля; $\sigma_{пр}^2$ – с.к.о случайной погрешности используемого спектрального измерителя.

Таким образом, одним из путей уменьшения погрешности калибровки является уменьшение значения $\sigma_{\tau_{aer}}(\lambda)$, что эквивалентно проведению измерительных процедур при стабильных атмосферных условиях. Как отмечено в работе [1], применительно к семиаридным зонам далеким от промышленных центров наиболее стабильными считаются месяцы декабрь и сентябрь. Согласно [2], в идеальном случае калибровку можно осуществить в лаборатории НАСА находящейся в местечке Мауна Лоа (Гавайские острова) расположенной на высоте 2700м над уровнем моря. Изменения фоновой величины оптической толщины аэрозоля (AOD) здесь не превышает значения $0.01 \div 0.02$. Согласно работе [3], исследования, проведенные в Сьерра Неваде, показали, что наилучшие результаты получаются при значениях оптической воздушной массы равной $(2 \div 4)$. Согласно [4], на длинах волн, где поглощение водяных паров значительно, калибровку следует проводить используя формулу

$$\frac{I(\lambda_1)}{T(W)} = I_0(\lambda_1) \cdot e^{-m\tau_{aer}(\lambda_1)} \quad (5)$$

где λ_1 – длина волны измерений где пропускание водяных паров $T(W)$ значительно уменьшается.

Согласно работе [5], предложен метод калибровки солнечных фотометров, где взамен требования стабильности атмосферных условий ставится требование обеспечения стабильности закона распределения аэрозольных частиц по размерам.

Оригинальный метод калибровки солнечных фотометров, в котором графическая процедура экстраполяции не осуществляется предложен в работе [6]. В этой работе приводится выражение для вычисления величины калибрующего показателя. Наличие такой формулы позволяет избежать специфической погрешности, возникающей из-за осуществления геометрических построений.

Вместе, с тем, общая тенденция усилий в улучшении точности солнечных фотометров такова, что проблема уменьшения погрешности калибровки солнечных фотометров сводится к задаче отыскания наиболее стабильных месяцев, дней или дневных часов, когда оптическая толщина аэрозоля наиболее стабильна. Далее рассматривается предлагаемый метод определения дневного временного интервала, в течение которого изменение оптической толщины атмосферы минимально.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Предлагаемый метод калибровки солнечных фотометров предполагает проведение измерений оптической толщины аэрозоля с помощью некалиброванного фотометра. При этом ставится задача выявления моментов времени, когда вычисленные с помощью некалиброванного фотометра значения оптической толщины аэрозоля одинаковы по величине. В качестве базового положения используется общеизвестный факт о том, что стабильный по величине показатель $\tau_{aer}(\lambda)$ не влияет на точность проводимой калибровки по методу Ленгли. Порядок выбора моментов измерения в предложенном методе иллюстрируется на рис. 2.

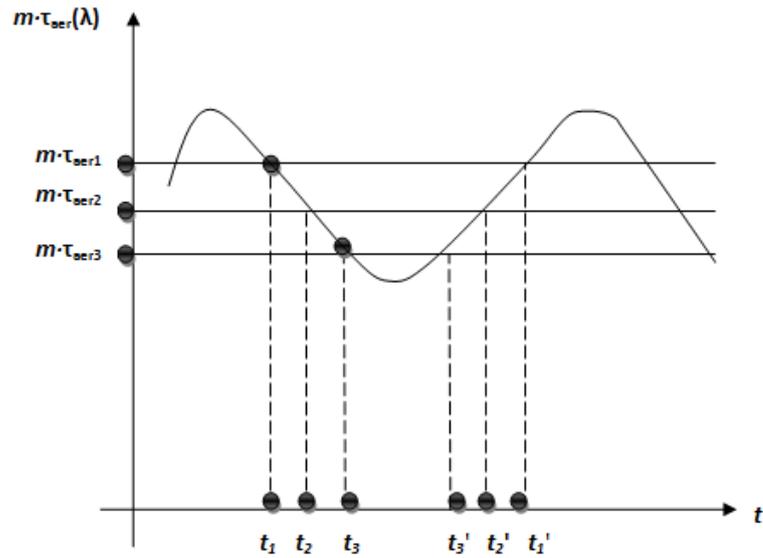


Рис. 2. Выбор моментов с одинаковой величиной оптической толщины аэрозоля.
 Для τ_{aer1} это пара $(t_1$ и $t_1')$; $\tau_{aer2}-(t_2$ и $t_2')$; $\tau_{aer3}-(t_3$ и $t_3')$;

Следует отметить наличие большого количества публикации [7–11], в которых подтверждается наличие двух максимумов в дневном изменении оптической толщины аэрозоля.

Покажем, что некалиброванность используемого солнечного фотометра не влияет на решение задачи определения временных моментов существования равных между собой оптических толщин заданной величины. Допустим, что с помощью некалиброванного солнечного фотометра осуществляются измерения, а результаты измерений сравниваются с заданной определенной величиной I_{01} .

Следовательно, по аналогии с (1) имеем

$$I(\lambda, t_1) = k_1 I_0(\lambda) \cdot e^{-m(t_1) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_1)} \tag{5}$$

$$I(\lambda, t_2) = k_1 I_0(\lambda) \cdot e^{-m(t_2) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_2)} \tag{6}$$

где $I(\lambda, t_i); i = \overline{1, 2}$ – значение выходного сигнала фотометра; k_1 – коэффициент калибровки; $m(t_i)$ – значение оптической воздушной массы; $\tau_{aer}(\lambda, t_i)$ – значение оптической толщины аэрозоля в момент t_i .

Логарифмируя (5) и (6) получим

$$\ln I(\lambda, t_1) = \ln k_1 + \ln I_0(\lambda) - m(t_1) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_1) \quad \ln I(\lambda, t_1) = \ln k_1 + \ln I_0(\lambda) - m(t_1) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_1) \tag{7}$$

$$\ln I(\lambda, t_2) = \ln k_1 + \ln I_0(\lambda) - m(t_2) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_2) \tag{8}$$

Вычислим разность

$$\ln I(\lambda, t_1) - \ln I(\lambda, t_2) = m(t_2) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_2) - m(t_1) \tau_{aer}(\lambda, t_1) \tag{9}$$

Выражение (9) вкратце напомним как

$$C_1 = C_2 \quad (10)$$

где

$$C_1 = m(t_2) \cdot \tau_{aer}(\lambda, t_2) - m(t_1) \tau_{aer}(\lambda, t_1) \quad (11)$$

$$C_2 = \ln I_{01}(\lambda) - \ln I_{02}(\lambda) \quad (12)$$

Из (11) при условии

$$\tau_{aer}(\lambda, t_1) = \tau_{aer}(\lambda, t_2) = \tau_{aer}(t_1, t_2) \quad (13)$$

получим

$$C_1 = C_2 = \tau_{aer}(t_1, t_2) \cdot [m(t_2) - m(t_1)] \quad (14)$$

График функции (14) показан на рис. 3.

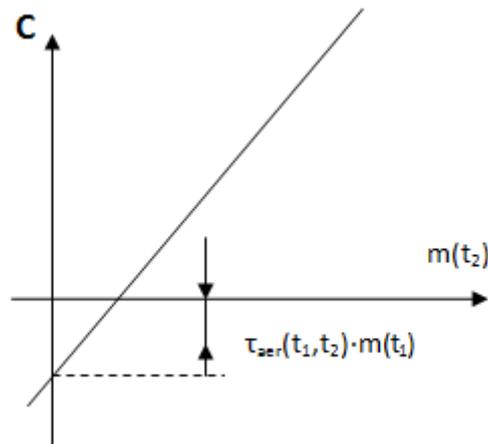


Рис. 3. График линейной зависимости $C_1=C_2=C$ от $m(t_2)$

Таким образом, задаваясь величиной C , $\tau_{aer}(t_1 t_2)$ и $m(t_1)$ (т.е. величиной t_1) можно определить $m(t_2)$, (т.е. и t_2). Как видно из вышеизложенного, при заданных величинах I_{01} , I_{02} использование некалиброванных солнечных фотометров позволяет идентифицировать временные моменты t_1 и t_2 при которых оптические толщины аэрозоля равны между собой. Таким образом, искусственно моделируется условие неизменности атмосферных условий в моменты t_1 , t_2 проведения измерений, используемых в качестве базовых точек для построения диаграмм Ленгли.

Алгоритм реализации предложенного метода измерений может быть представлен в виде следующей последовательности выполняемых операций:

1. Задаются фиксированное значение $\ln I_{01}(\lambda)$;
2. Проводится измерение в момент t_1 ;
3. Определяется t_1 и $m(t_1)$;
4. Принимается условие (13);
5. Осуществляется измерение в момент t_{2i} , ($i=1, m$), вычисляется при каждом i величина C_{1i} , по t_2 определяется величина $m(t_2)$;
6. Вычисляется C_{2i} .

7. Определяется значение i , при котором выполняется условие (14). Фиксируется эта величина i обозначаемая далее как i_0 .
8. Строится диаграмма Ленгли по точкам

$$\{m(t_1), I_{01}(\lambda, t_1)\} \text{ и } \{m(t_{2i_0}), I(\lambda, t_{2i_0})\} \quad (15)$$

Блок – схема алгоритма реализации предложенного метода показана на рис. 3.

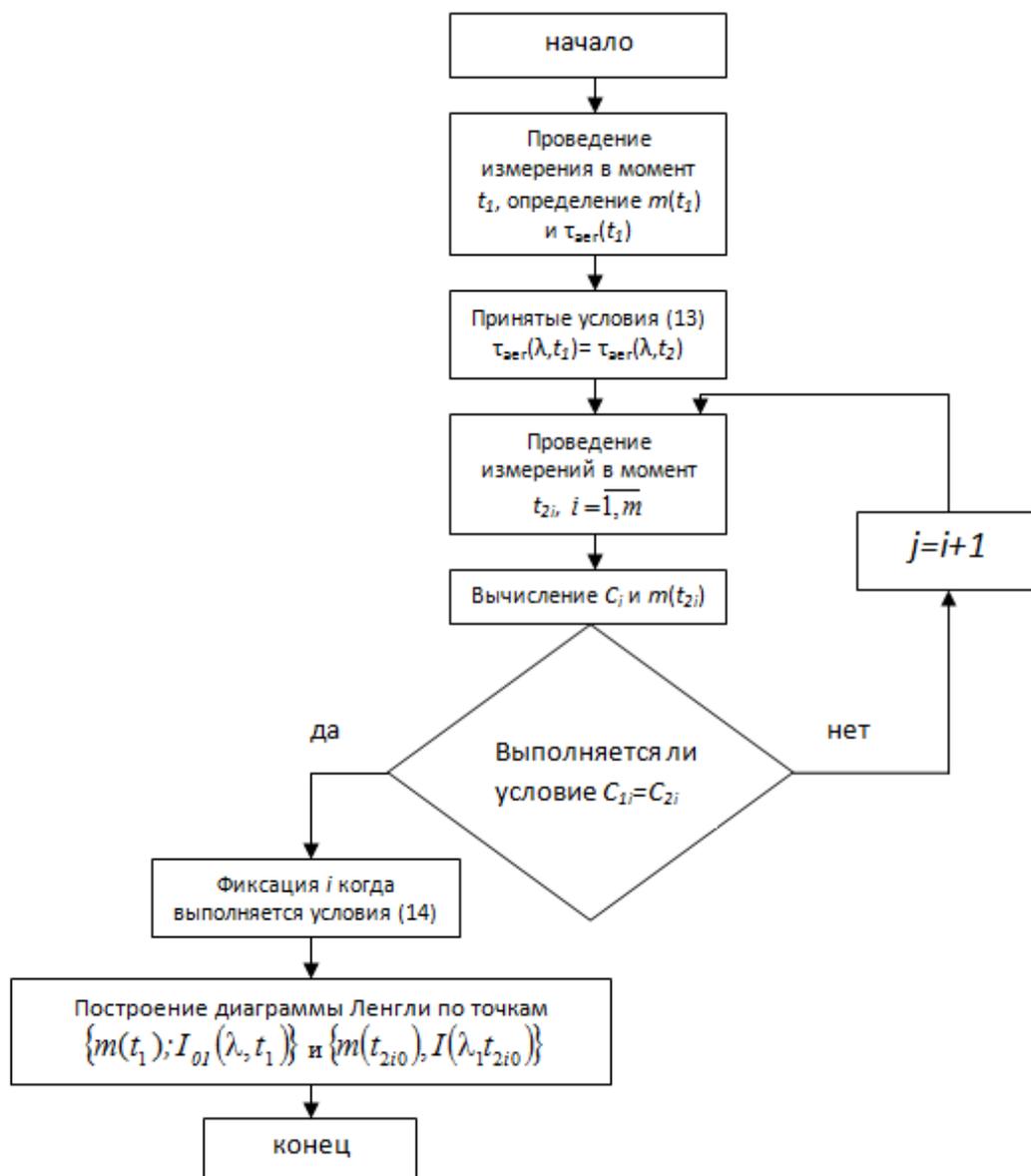


Рис. 3. Блок – схема алгоритма реализации предложенного метода

3. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Допустим, что в результате проводимых измерений с помощью некалиброванного фотометра в интервале времени 08.00 – 18.00 получены следующие данные:

- (1) Временная зависимость $I(\lambda)=f_1(t)$
- (2) Временная зависимость $\tau_{\text{aer}}(\lambda,t)=f_2(t)$

Графики функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$ показаны условно.

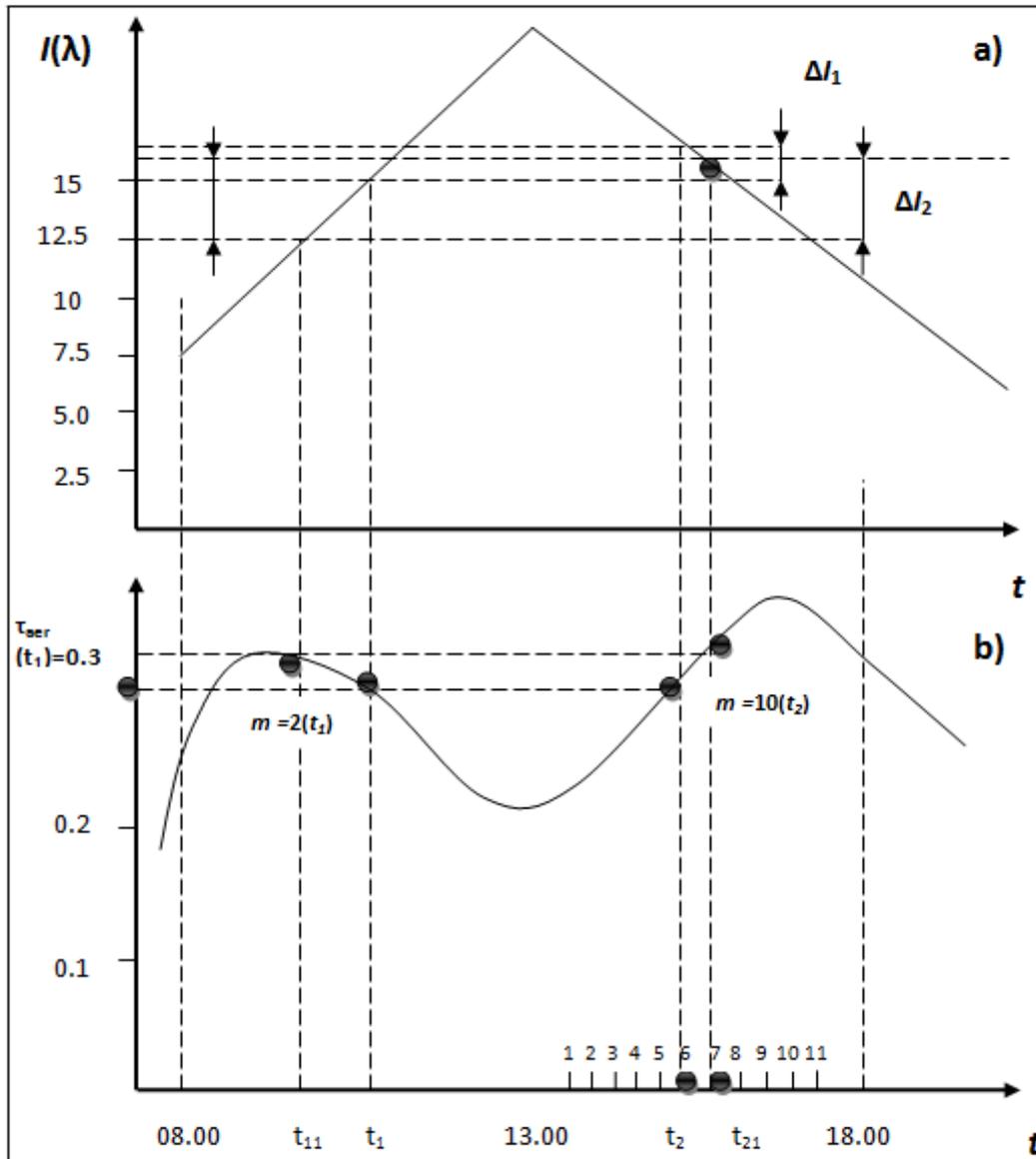


Рис. 4. График модельной зависимости: а) $I(\lambda_1)=f_1(t)$; б) $\tau_{\text{aer}}(\lambda,t)=f_2(t)$

Проверим пригодность точек (t_1) и (t_2) для построения диаграмм Ленгли. С учетом результатов измерений в моменты t_1 и t_2 вычислим величину показателя C_I :

$$C_I = m(t_2) \cdot \tau_{\text{aer}}(\lambda, t_2) - m(t_1) \cdot \tau_{\text{aer}}(\lambda, t_2) = 10 \cdot 0.3 - 2 \cdot 0.3 = 2.4$$

Вычисление величины C_2 также дает значение 2, 4, т.е. условие $C_1=C_2$ выполняется. Проверим выполнение этого условия для точек t_{11} и t_{21} .

$$m(t_{21})=11; \tau_{\text{aer}}(t_{11})=0.33$$

$$C_1=11 \cdot 0.33 - 1.5 \cdot 0.33 = 4.035$$

Вычисление величины C_2 дает $C_2=4.5$ т.е. условие $C_1=C_2$ не выполняется. Следовательно, выбор точек t_1 и t_2 позволит более точно строить диаграмму Ленгли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gerquerira Jr. J. G., Fernandez J. H., Hoelzemann J. J., Leme N. M. P., Sousa C. T. Langley method applied in study of aerosol optical depth in the Brazilian semiarid region using 500, 670 and 870nm bands for sun photometer calibration// *Advances in Space Research*. 2014. Vol. 54. Pp. 1530-1543. www.elsevier.com/locate/asr.
2. Toledano C., Gonzalez R., Fuertes D., Cuevas E., Eck T. F., Kazadsis S., Kouremeti N., Grobner J., Goloub P., Blarel L., roman R., Barreto A., Berjon A., Holben B. N., Cachorro V. E. Assessment of sun photometer Langley calibration at the high – elevation sites Mauna Loa and Izana// *Atmos. Chem. Phys.* 2018. Vol. 18. Pp. 14555-14567. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14555-2018>.
3. Ruzi-Alcantra A., Olmo F. J., Arboledas -Alados L. Langley calibrations of sunphotometer at Sierra Nevada, Granada, Spain// *Optica Pura Y Alicada*. 2004. Vol. 37. No. 3.
4. Spinhirne J. D., Strange M. G., Blaine L. R. Solar Infrared Photometer// *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 2.
5. Forgan B.W. General method for calibrating sun photometers.
6. Asadov H. H., Chobanzadeh I. G. Neq method for calibration of sun photometers// *Chinese Optics Letter*. September 2009. Vol. 7(9). Pp. 760-763.
7. Lennartson E. M., Wang J., Gu J., Garcia L. C., Ge G., Gao M., Choi M., Saide P. E., Carcmichael G. R., Kim J., Janz S. Diurnal variation of aerosol optical depth and PM_{2.5} in South Korea: a synthesis from AERONET, Satellite (GOCI), KORUS-AQ observation and the WRF-CHEM model// *Atmos. Chem. Phys.* 2018. Vol. 18. Pp. 15125-15144. <https://doi.org/10.5194/acp-18-15125-2018>.
8. Song J., Xia X., Che H., Wang J., Zhang X., Li X. Daytime variation of aerosol optical depth in North China and its impact on aerosol direct radiative effects// *Atmospheric Environment*. www.elsevier.com/locate/atmosenv.
9. Esposito F., Mari S., Pavese G., Serio C. Diurnal and nocturnal measurements of aerosol optical depth at a desert site in Nambia// *Aerosol Science and Technology*. 2003. Vol. 37. Pp. 392-400. DOI:10.1080/02786820390126439.
10. Arola A., Eck T. F., Huttunen J., Lehtinen K. E. J., Lindfors A. V., Myhre G., Smirnov A., Tripathi S. N. Influence of observed diurnal cycles of aerosol optical depth on aerosol direct radiative effect// *Atmos. Chem. Phys.* 2013. Vol. 13. Pp. 7895-7901. DOI: 10.5194/acp-13-7895-2013. www.atmos-chem-phys.net/13/7895/2013/.
11. Zhang Y., Yu H., Eck T. F., Smirnov A., Chin M., Remer L. A., Bian H., Tan Q., Levy R., Holben B. N., Piazzolla S. Aerosol daytime variations over North and South America derived from multiyear AERONET measurements// *Journal of Geophysical Research*. 2012. Vol. 117. D05211. DOI:10.1029/2011JD017242.

GENERALIZED METHOD OF LANGLEY FOR CALIBRATION OF SUN PHOTOMETERS

Asadov H.H., Mammadova U.F., Qodjayeva-Qasimova S.N.

It is noted that upon calibration of sun photometers using Langley method the stability of atmospheric conditions is highly important. The classic Langley method upon non-stability of optical depth of atmospheric aerosol always lead to non-accuracy of calibration. The suggested method of generalized calibration envisages drawing of Langley diagram on the basis of two temporal point type measurements during daytime when optical depths of atmospheric aerosol are of same value. The algorithm for realization of suggested method is developed.

KEYWORDS: CALIBRATION, OPTICAL AIR MASS, AEROSOL, SUN PHOTOMETER, ERROR