



СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОМЕТРЫ. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ЛЕНГЛИ

*А.Фатуллаев, аспирант, М.Тахмазли,
Национальное аэрокосмическое агентство,
Баку, Азербайджан*

Калибровка фотометрической аппаратуры для метрологического обеспечения измерений необходима для решения многих задач – дистанционного зондирования Земли, исследования радиационного баланса, слежения за малыми космическими объектами. При отсутствии высокогорных условий для калибровки солнечных фотометров обычно используют метод диаграмм Ленгли, но из-за изменчивости атмосферных параметров он не позволяет достаточно точно откалибровать прибор. Для правильной оценки солнечной радиации, поступающей в земную атмосферу, предложена процедура его усовершенствования. Изложено ее теоретическое, физическое и математическое обоснование.

Специалистам хорошо известно, что солнечные фотометры являются наиболее универсальными приборами, предназначенными для исследования атмосферы. Солнечные фотометры, установленные на Земле, позволяют исследовать состав аэрозолей, газы малых концентраций, водяные пары, имеющиеся в атмосфере. Солнечные фотометры исследуют облака, ионосферные излучения, аэрозольные шлейфы, возникающие из-за песчаных бурь, извержений вулканов и тому подобные объекты. Солнечные фотометры, установленные на борту, могут измерять как прямое, так и рассеянное излучение Солнца. Солнечные фотометры эффективно функционируют в составе различных глобальных и региональных сетей исследования атмосферы. Так, например, глобальная сеть AERONET содержит более 300 измерительных станций, распределенных по всему миру и построенных на базе солнечных фотометров типа Cimel.

Очевидно, что, как и всякий измерительный прибор, солнечные фотометры должны быть тщательно откалиброваны. Согласно классическим представлениям, солнечные фотометры должны быть откалиброваны в высокогорных геофизических лабораториях, где атмосфера содержит малое

SUN PHOTOMETERS. MODERNIZATION OF THE LANGELY CALIBRATION METHOD

*A.Fatullayev, PhD student, M.Takhamasly,
National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan*

Calibration of photometric equipment for the metrological provision of measurements is necessary for the solution of many tasks – remote sensing of the Earth, study of radiation balance, tracking of small space objects. When there are no high-altitude conditions for the calibration of Sun photometers the method of Langely diagrams is usually used but due to the variability of atmospheric parameters it does not allow calibrating the device with the adequate accuracy. The procedure of its modernization is suggested for the correct estimation of the solar radiation incoming to the Earth atmosphere. Its theoretical, physical and mathematical grounds are set forth.

Experts know well that the Sun photometers are the most universal instruments intended for the study of atmosphere. Sun photometers mounted at the Earth allow studying the composition of aerosols, gases with small concentrations, water vapors which are present in atmosphere. Sun photometers study the clouds, ionospheric radiations, aerosol trails occurring as a result of the sand storms, volcanic eruptions and similar objects. Sun photometers mounted on board can measure the direct and scattered radiation of the Sun. Sun photometers effectively function within the structure of different global and regional networks for the atmosphere study. Thus, for example, AERONET global network keeps more than 300 measuring stations allocated all over the world and constructed on the basis of Sun photometers of Cimel type.

Obviously, Sun photometers just as any measuring instrument must be carefully calibrated. According to the classic conception, Sun photometers must be calibrated in mountain-top geophysical laboratories where the atmosphere contains small amount of aerosol. For example, Sun photometers of AERONET global network are usually calibrated in NASA high-altitude



количество аэрозоля. Например, солнечные фотометры всемирной сети AERONET обычно калибруются на высокогорной калибровочной станции NASA, расположенной в местечке Маона-Лоа, на Гавайских островах.

Основным методом, используемым для калибровки солнечных фотометров, является метод Ленгли. Алгоритм его вкратце заключается в следующем.

Рассматривается закон Бугера-Бера, который без учета затухания интенсивности солнечного луча по расстоянию имеет следующий вид:

$$I_1(\lambda) = kI_0(\lambda)e^{-m\tau_{at}}, \quad (1)$$

где $I_1(\lambda)$ – выходной сигнал солнечного фотометра на длине волны λ ; m – оптическая воздушная масса; k – коэффициент калибровки; τ_{at} – оптическая толщина атмосферы. Оптическая толщина атмосферы в общем случае определяется суммой

$$\tau_{at} = \tau_{oz} + \tau_R + \tau_{aer},$$

где τ_{oz} – оптическая толщина озона; τ_R – оптическая толщина релеевского рассеяния; τ_{aer} – оптическая толщина атмосферного аэрозоля.

Логарифмирование выражения (1) приводит к следующему его виду

$$\ln I_1(\lambda) = \ln I_0(\lambda) - m\tau_{at}. \quad (2)$$

Зависимость (2) функции $\ln I_1(\lambda)$ от m линейная. Для ее графического изображения (рис.1), называемого диаграммой Ленгли, используют следующую процедуру. Измеряют интенсивность $I_1(\lambda)$ при двух значениях оптических воздушных масс m_1 и m_2 . Далее в системе координат $\ln I_1(\lambda) - m$ наносят значения логарифмов обоих замеров $I_1(\lambda, m_1)$ и $I_1(\lambda, m_2)$, которые соответствуют точкам А и В на двухмерной плоскости. Проводят через точки А и В прямую линию и экстраполируют ее до оси ординат. Это позволяет определить точку С пересечения линии АВ с осью ординат. Используя ординату точки Y(C) и вводя коэффициент калибровки

$$k = \frac{Y(C)}{I_0(\lambda)},$$

осуществляют калибровку фотометра.

При отсутствии высокогорных условий для калибровки солнечных фотометров обычно используют метод диаграмм Ленгли, но из-за изменчивости атмосферных параметров он не позволяет достаточно точно откалибровать прибор

calibration station located in Mauna Loa, Hawaiian Islands.

The main method used for the calibration of Sun photometers is Langely method. Algorithm of its procedures is briefly described below.

Bouguer-Beer law is considered; without due regard to the decay of the Sun beam intensity by distance it has the following form:

$$I_1(\lambda) = kI_0(\lambda)e^{-m\tau_{at}}, \quad (1)$$

where $I_1(\lambda)$ is the output signal of Sun photometer at the wavelength λ ; m is the optical air mass; k is the calibration coefficient; τ_{at} is the optical atmosphere depth. Generally, optical atmosphere depth is determined by the sum

$$\tau_{at} = \tau_{oz} + \tau_R + \tau_{aer},$$

where τ_{oz} is the optical ozone depth; τ_R is the optical depth of Rayleigh scattering; τ_{aer} is the optical depth of atmospheric aerosol.

Taking the logarithm of the expression (1) results in the following form:

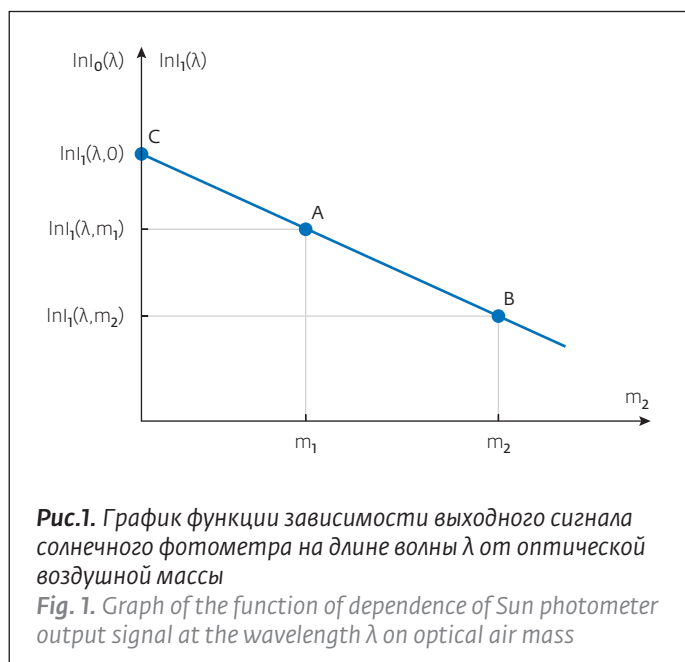
$$\ln I_1(\lambda) = \ln I_0(\lambda) - m\tau_{at}. \quad (2)$$

Dependence (2) of the function $\ln I_1(\lambda)$ of m is linear. The following procedure is used for its graphic representation (Fig. 1) which is called the Langely diagram. The intensity $I_1(\lambda)$ is measured with two values of the optical air masses m_1 and m_2 . Then, the values of logarithms of both measurements $I_1(\lambda, m_1)$ and $I_1(\lambda, m_2)$ which correspond to the points A and B on two-dimensional surface are applied in the coordinate system $\ln I_1(\lambda) - m$. The straight line is drawn through the points A and B and extrapolated to the ordinate axis. It allows estimating the point C of intersection of AB line with ordinate axis. Using the ordinate of the point Y(C) and introducing the calibration coefficient

$$k = \frac{Y(C)}{I_0(\lambda)},$$

the photometer calibration is performed.

When there are no high-altitude conditions for the calibration of Sun photometers the method of Langely diagrams is usually used but due to the variability of atmospheric parameters it does not allow calibrating the device with the adequate accuracy [1]. And this is the essential fault of this method. For example, in eastern regions of China



[1]. И в этом его существенный недостаток. Например, в восточных регионах Китая в провинциях Кеанхи, Тайху и Шоксиан во время Регионального международного эксперимента по изучению тропосферного аэрозоля [2] в 2004 и в 2008 годах измерения, проводимые с помощью солнечного фотометра CIMEL, показали, что в течение дня оптическая толщина аэрозоля AOD_{550} изменяется в пределах $0,80 \pm 0,14$. Такая изменчивость аэрозоля не позволила откалибровать мультифильтровый теневой радиометр типа MFRSR. В работе [3] отмечается, что ошибки, допущенные при калибровке солнечного фотометра, приводят к искусственным дневным вариациям, симметричным относительно полдня, значений оптической толщины аэрозоля (AOD) и α - показателя Ангстрема. Особенно это сказывается при низких значениях оптической толщины аэрозоля. Для вычисления калибровочного коэффициента при минимизации дневных изменений показателей Ангстрема и ее кривизны был использован метод Монте-Карло.

Для повышения точности калибровки при использовании классического метода диаграмм Ленгли мы предлагаем новый метод. Он основан на двух хорошо известных особенностях аэрозольной физики и атмосферной оптики.

Первая - результаты многочисленных экспериментальных исследований показывают наличие отрицательной корреляционной связи между показателем Ангстрема и оптической толщиной аэрозоля [4-6].

in the following provinces: Kyung Hee, Taihu and Shoxian during the Regional International Experiment for Study of Tropospheric Aerosol [2] in 2004 and 2008, the measurements which were carried out with the help of CIMEL Sun photometer showed that during the day the aerosol optical depth AOD_{550} varies within the range 0.80 ± 0.14 . Such variability of aerosol did not make it possible to calibrate the Multi-Filter Shadow Radiometer of MFRSR type. In the paper [3] it is noted that the mistakes made during the calibration of Sun photometer cause the artificial day variations, which are symmetric relative to noon, concerning the values of aerosol optical depth and α - Angstrom index. Especially, it has impact upon the low values of aerosol optical depth. In order to calculate the calibration coefficient for the minimization of day variations of Angstrom indices and its curvature we used the Monte-Carlo method.

In order to increase the calibration accuracy when using the classic method of Langely diagrams, we suggest the new method. It is based on two well-known characteristics of aerosol physics and atmospheric optics.

The first characteristic: the results of many experimental tests show the negative correlation between Angstrom index and aerosol optical depth [4-6].

As it is reported in the paper [4], the measurements of Angstrom index and aerosol optical depth were carried out in 2004-2008 in north-west region of China in Taklimakan Desert. It was detected that maximum AOD (aerosol optical depth) occurs in April with the value of 0.83 ± 0.41 whereas the minimum Angstrom index occurs in May. Herewith, the minimum value of AOD occurs in November (0.19 ± 0.10) and the minimum value of Angstrom index occurs in May (0.09 ± 0.06). Mutual-inverse character of the variation of Angstrom index and aerosol optical depth values during the day is shown in Fig. 2.

Mutual-inverse character of the variation of aerosol optical depth and Angstrom index is also noted in the paper [5]. In Fig. 3 the average results of AOD measurements at 57 stations of AERONET network are given, and in Fig. 4 the average results at 47 stations are given. Mutual-inverse character of the dependence of AOD and Angstrom index can be deemed the common pattern and we can cite many papers where this pattern is confirmed.

The second regularity of atmospheric physics (optics) used in the suggested modernization of the



Как сообщается в работе [4], измерения показателя Ангстрема и AOD проводились в течение 2004–2008 годов в северо-западном регионе Китая, в пустыне Таклимакан. Было обнаружено, что максимум AOD появляется в апреле ($0,83 \pm 0,41$), в то время как в мае появляется минимум показателя Ангстрема. При этом минимальное значение AOD появляется в ноябре ($0,19 \pm 0,10$), а минимальное значение показателя Ангстрема появляется в мае ($0,09 \pm 0,06$). Взаимно-инверсный характер изменения значений показателя Ангстрема и оптической толщины аэрозоля в течение дня показан на рис.2.

Взаимно-инверсный характер изменения оптической толщины аэрозоля и показателя Ангстрема также отмечается в работе [5]. На рис.3 показаны усредненные результаты измерений AOD по 57 станциям сети AERONET, а на рис.4 показаны усредненные результаты по 47 станциям. Взаимно-инверсный характер зависимости AOD и показателя Ангстрема можно считать общей закономерностью, и можно привести большое количество работ, где эта закономерность подтверждается.

Вторая закономерность физики (оптики) атмосферы, используемая в предлагаемом усовершенствовании метода диаграмм Ленгли, – взаимно-инверсный характер, или отрицательная коррелированность между показателем видимости и оптической толщиной аэрозоля. Исследования, проведенные в работе [6], показали, что между видимостью и оптической толщиной аэрозоля существует значительная отрицательная корреляция ($r = -0,28$). В таблице [6] приведены расчетные значения некоторых показателей видимости на поверхности Земли и оптической толщиной аэрозоля.

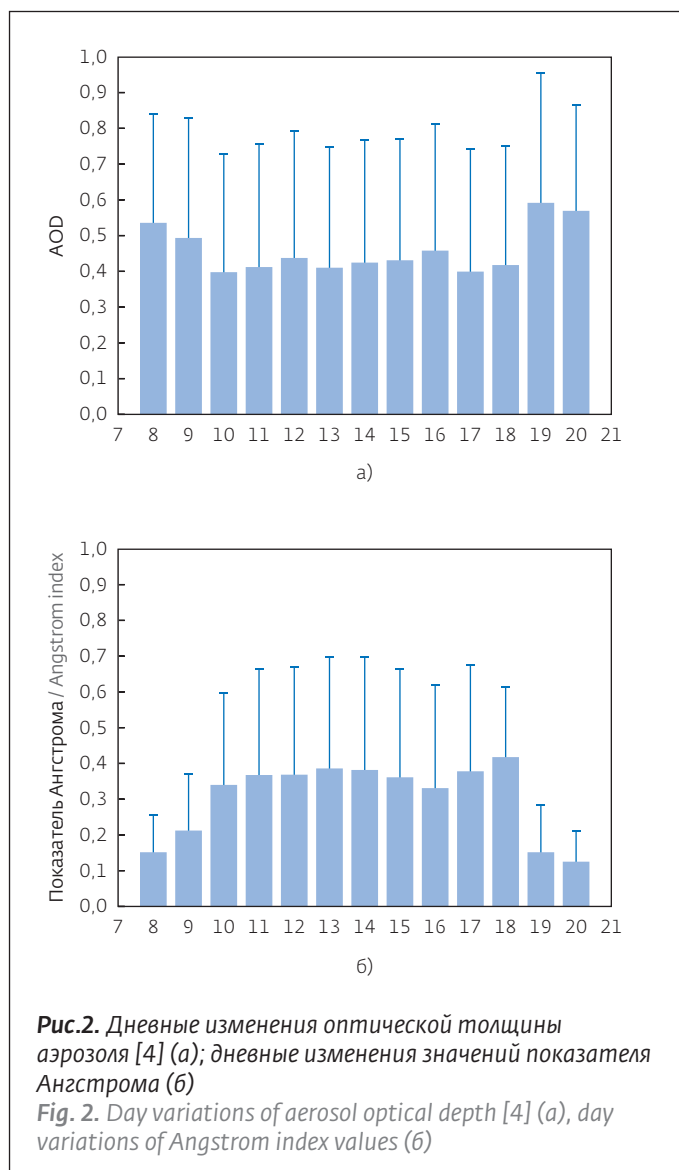
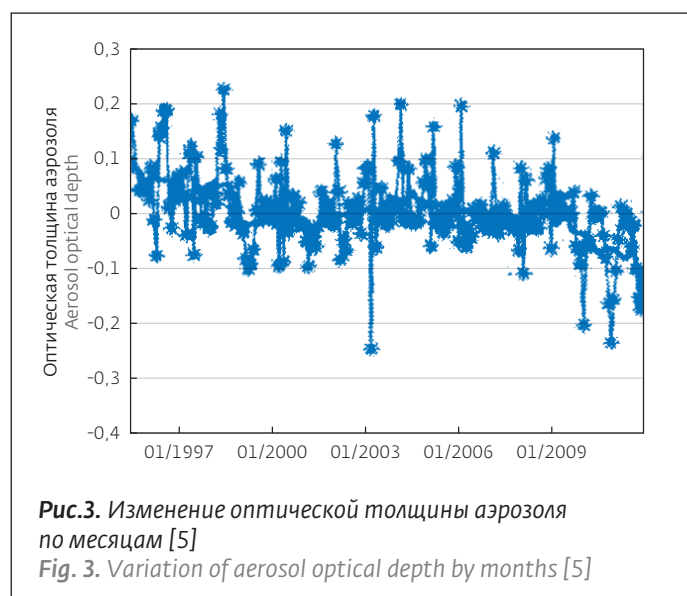


Рис.2. Дневные изменения оптической толщины аэрозоля [4] (а); дневные изменения значений показателя Ангстрема (б)
Fig. 2. Day variations of aerosol optical depth [4] (a), day variations of Angstrom index values (b)



method of Langely diagrams is the mutual-inverse character or negative correlation between the visibility index and aerosol optical depth. Analysis carried out in the paper [6] showed that there is considerable negative correlation between visibility and aerosol optical depth ($r = -0.28$). Table [6] gives the estimated values of some sensitivity indices at the Earth surface and aerosol optical depth.

Mutual-inverse character of the variation of visibility and aerosol optical depth is also outlined in the paper [7]. In Fig. 5 the curves of the variations of aerosol optical depth and visibility are shown for the period of 15 months obtained as a result of the measurements which were carried out in NASA Goddard Institute for Space Studies. As is seen from the graphs given in Fig. 5, the mutual-inverse character of visibility and aerosol optical depth does not give rise to doubts.



Взаимно-инверсный характер изменения видимости и оптической толщины аэрозоля также отмечен в работе [7]. На рис.5 показаны кривые изменения оптической толщины аэрозоля и видимости в течение 15 месяцев, полученные в результате измерений, проведенных в Институте космических исследований Годдарда NASA. Как видно из графиков, приведенных на рис.5, взаимно-инверсный характер видимости и оптической толщины аэрозоля не вызывает сомнений.

Оба рассмотренных положения атмосферной оптики положены в основу предлагаемого усовершенствованного метода диаграмм Ленгли. Его суть заключается в следующем. Напишем условие стабильности оптической толщины аэрозоля, используя для этого известную формулу Ангстрема

$$\tau_{\text{aer}}(\lambda) = \beta(t) \cdot \lambda(t)^{-\alpha(t)} = \text{const} = C_1, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{aer}}(\lambda)$ – оптическая толщина аэрозоля; $\beta(t)$ – аэрозольная мутность атмосферы; $\alpha(t)$ – показатель Ангстрема.

Из выражения (3) получаем:

$$\lambda(t) = \exp \left[\frac{1}{\alpha(t)} \cdot \ln \frac{\beta(t)}{C_1} \right]. \quad (4)$$

Смысл предлагаемого метода стабилизации диаграмм Ленгли заключается в изменении длины волны в соответствии с выражением (4).

Расчетные значения параметров видимости и AOD
Estimated values of visibility parameters and AOD

Параметр Parameter	Видимость на поверхности Visibility at the surface	Оптическая толщина аэрозоля Aerosol optical depth
Минимальное значение Minimum value	4	0,044
Максимальное значение Maximum value	9	1,549
Среднее значение Mean value	7,4	0,420
Вариация Variation	0,94	0,092
Среднеквадратическое отклонение Mean-square deviation	0,97	0,303
Коэффициент изменчивости Variability coefficient	0,1	0,72

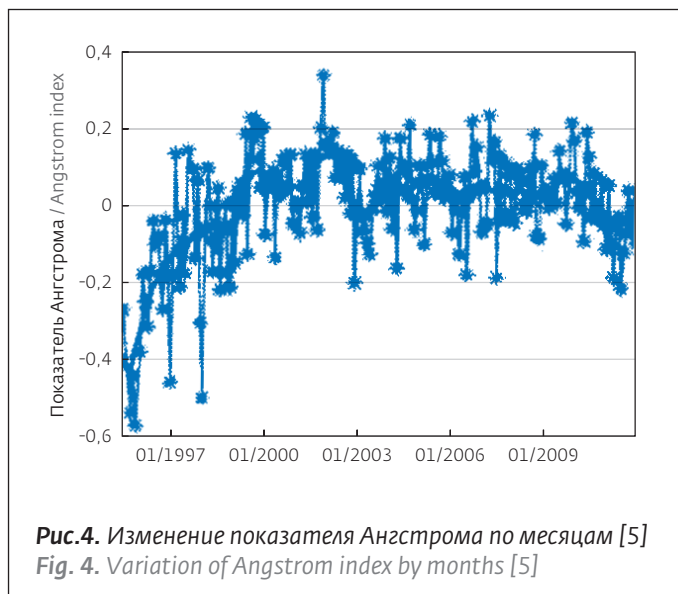


Рис.4. Изменение показателя Ангстрема по месяцам [5]
Fig. 4. Variation of Angstrom index by months [5]

Both considered provisions of the atmospheric optics are taken as the basis of the suggested modernized method of Langely diagrams. It is about the following. Let us write the condition for the stability of aerosol optical depth using the known Angstrom formula:

$$\tau_{\text{aer}}(\lambda) = \beta(t) \cdot \lambda(t)^{-\alpha(t)} = \text{const} = C_1, \quad (3)$$

where $\tau_{\text{aer}}(\lambda)$ is the aerosol optical depth; $\beta(t)$ is the aerosol atmospheric turbidity; $\alpha(t)$ is the Angstrom index.

We receive the following from the expression (3):

$$\lambda(t) = \exp \left[\frac{1}{\alpha(t)} \cdot \ln \frac{\beta(t)}{C_1} \right]. \quad (4)$$

The suggested method of the stabilization of Langely diagrams is about the variation of wavelength in accordance with the expression (4).

Pursuant to the first above mentioned provision of atmospheric optics the interrelation between $\alpha(t)$ and $\beta(t)$ has the mutual-inverse character. Therefore, the following equation can be written in the first approximation:

$$\alpha(t) = C_2 - \beta(t). \quad (5)$$

Taking into account the expression (5) we obtain:

$$\lambda(t) = \exp \left[\frac{1}{C_2 - \beta(t)} \cdot \ln \frac{\beta(t)}{C_1} \right]. \quad (6)$$

Как следует из вышеприведенного первого положения атмосферной оптики, взаимосвязь между $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ является взаимно инверсной. Следовательно, в первом приближении может быть записано следующее уравнение

$$\alpha(t) = C_2 - \beta(t). \quad (5)$$

С учетом выражения (5) получаем:

$$\lambda(t) = \exp\left[\frac{1}{C_2 - \beta(t)} \cdot \ln \frac{\beta(t)}{C_1}\right]. \quad (6)$$

Очевидно, что $\alpha(t)$ в выражении (6) является растущей функцией от $\beta(t)$.

Для практической реализации предлагаемого метода изменения $\lambda(t)$ по выражению (6) должен быть осуществлен контроль над величиной $\beta(t)$, для чего используется вышеизложенное второе положение атмосферной оптики, т.е. значение $\beta(t)$ контролируется путем наземного измерения видимости на поверхности земли.

Следовательно, если допустить взаимно инверсную зависимость

$$\beta(t) = C_3 - V(t), \quad (7)$$

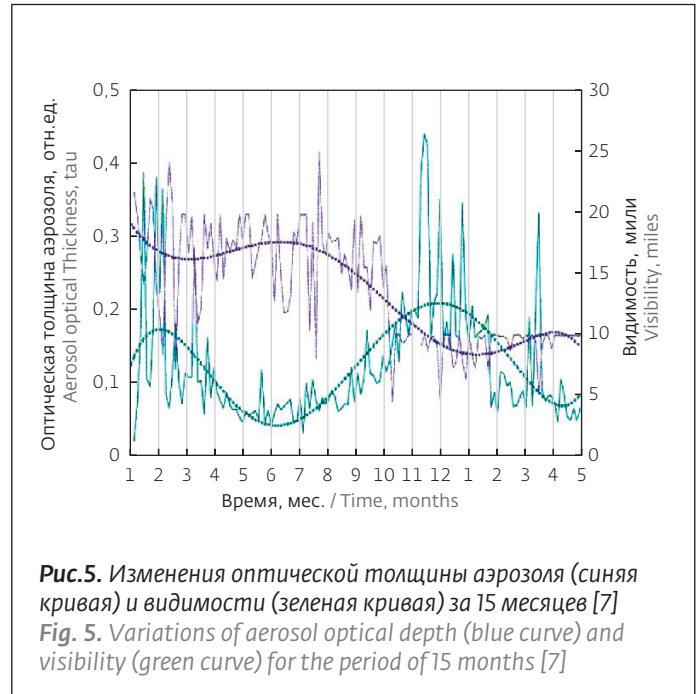


Рис.5. Изменения оптической толщины аэрозоля (синяя кривая) и видимости (зеленая кривая) за 15 месяцев [7]
Fig. 5. Variations of aerosol optical depth (blue curve) and visibility (green curve) for the period of 15 months [7]

Obviously, $\alpha(t)$ in the expression (6) is the growing function of $\beta(t)$.

The control of $\beta(t)$ must be performed for the practical implementation of the suggested

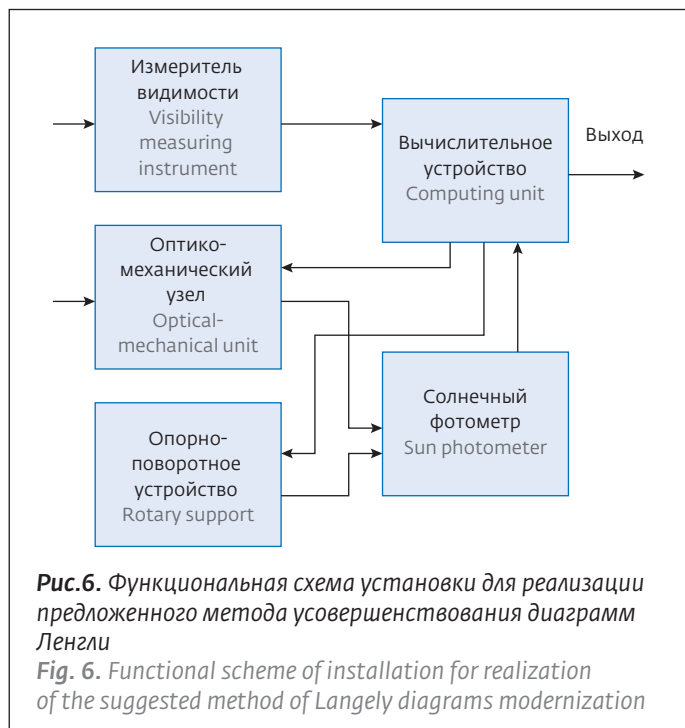


Рис.6. Функциональная схема установки для реализации предложенного метода усовершенствования диаграмм Ленгли

Fig. 6. Functional scheme of installation for realization of the suggested method of Langely diagrams modernization

где $V(t)$ – функция видимости, а $C_3 = \text{const}$, то из выражений (6) и (7) получим:

$$\lambda(t) = \exp \left[\frac{1}{C_2 - C_3 + V(t)} \ln \frac{C_3 - V(t)}{C_1} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, полученное выражение (8) позволяет найти условия для стабилизации диаграммы Ленгли в случае изменения аэрозольной турбидности атмосферы путем соответствующего изменения длины волны проводимых измерений.

Отметим, что диаграммы Ленгли обычно строятся на таких длинах волн, где, во-первых, релевское рассеяние пренебрежимо мало по сравнению с оптической толщиной аэрозоля, а во-вторых, отсутствуют линии поглощения малых газов и паров воды. По этой причине предлагаемая стабилизация диаграмм Ленгли путем вариации длины волны проводимых измерений не приводит к дополнительным погрешностям. Практическая реализация предлагаемого метода построения диаграмм Ленгли может быть осуществлена по схеме, показанной на рис.6. Принцип работы такой установки полностью соответствует описанному выше методу стабилизации диаграмм Ленгли и не требует дополнительного пояснения.

Подводя итоги, сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования.

1. Предложено усовершенствование метода диаграмм Ленгли, используемого для калибровки

method of $\lambda(t)$ variation according to the expression (6); for this reason the second above-stated provision of atmospheric optics is used, in other words the value of $\beta(t)$ is controlled by the ground measurement of visibility at the Earth surface.

Therefore, if we admit the mutual-inverse dependence

$$\beta(t) = C_3 - V(t), \quad (7)$$

where $V(t)$ is the visibility function and $C_3 = \text{const}$, from the expressions (6) and (7) we will receive

$$\lambda(t) = \exp \left[\frac{1}{C_2 - C_3 + V(t)} \ln \frac{C_3 - V(t)}{C_1} \right]. \quad (8)$$

Thus, the obtained expression (8) allows finding the conditions for the stabilization of Langely diagram in case of the variation of aerosol atmospheric turbidity by the relevant variation of wavelength of carried out measurements.

It should be noted that Langely diagrams are usually plotted at such wavelengths where, first of all, Rayleigh scattering is negligibly small in comparison with aerosol optical depth and, secondly, the absorption lines of idles and water vapors are absent. For this reason, the suggested stabilization of Langely diagrams by the variation of wavelengths of carried out measurements does not result in additional errors. The suggested method of Langely diagrams plotting can be practically implemented on the basis of the scheme shown in Fig. 6. Operation principle of such device corresponds completely to the above described method of the stabilization of Langely diagrams and does not require the additional explanation.

Summarizing, we can formulate the following main conclusions and provisions of the carried out analysis.

1. The modernization of the Langely method designated for calibration of Sun photometers is suggested. This modernization provides for stabilization of Langely diagrams by way of variation of measurement wavelength in line with variation of visibility at the Earth surface during carrying out of calibration procedure.

2. The theoretical, physical and mathematical basics of the suggested method are outlined.

3. The functional scheme of installation for realization of the suggested method is developed.



солнечных фотометров и заключающегося в реализации стабилизации диаграмм Ленгли путем изменения длины волны измерений в соответствии с изменением видимости на поверхности земли в течение времени осуществления калибровки.

2. Изложены теоретические, физические и математические основы предлагаемого метода.

3. Предложена функциональная схема установки, с помощью которой может быть реализован предлагаемый метод.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chang J.H.W., Dayon J., Sentain J.** Development of near-sea-level calibration algorithm for aerosol optical depth measurement using ground-based spectrometer. – *Aerosol and Air Quality Research*, x: 1-10, xxxx. ISSN: 1680-8584 print / 2071-1409 online. doi: 10.4209/aaqr.2013.04.0117.
2. **Lee K.H., Li Z., Cribb M.C., Liu J., Wang L.** et al. Aerosol optical depth measurements in eastern China and a new calibration method. – *Journal of Geophysical research*, 2010, v.115, D00K11, doi:10.1029/2009JDO12812.
3. **Kreuter A., Wuttke S., Blumthaler M.** Improving Langley calibrations by reducing diurnal variations of aerosol Angstrom parameters. – *Atmos. Meas. Tech. Discuss*, 2012, 5, 6479–6492 (www.atmos-meas-tech-discuss.net/5/6479/2012/doi:10.5194/amtd-5-6479-2012).
4. **Che H., Wang Y., Sun J., Zhang Xiaochun** et al. Variation of aerosol optical properties over the Taklimakan Desert in China. – *Aerosol and Air Quality Research*, 13: 2013, 777–785. ISSN:1680-8584 print / 2071-1408. online. doi: 10.4209/aaqr.2012.07.0200.
5. **Xia X.** Variability of aerosol optical and Angstrom wavelength exponent derived from AERONET observations in recent decades. – *Environ. Res. Lett.* 6 (2011) 044011 (9pp). doi:10.1088/1748-9326/6/4/044011.
6. **Podgorski J.** Correlation between surface visibility and aerosol optical depth recorded at geophysical observatory at Belsk. – *Publis. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, 2006, D-67 (382).
7. Correlation of aerosol optical depth with weather variables. – National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, <http://icp.giss.nasa.gov/research/ppa/1999/solis/results.html>.