



# Вопросы измерения влагосодержания в приземном слое атмосферы с использованием внешнего излучателя и фотометра с LED-излучателями в режиме фотодетектора

У. Ф. Маммадова

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Сформулирована и решена задача измерения влагосодержания в приземном слое атмосферы с использованием внешнего излучателя и LED-фотометра. Отмечено, что отсутствие во многих зонах планеты автоматизированных станций измерения влагосодержания воздуха международной сети AERONET диктует необходимость разработки и использования простых солнечных фотометров. Приборы измерения влагосодержания в приземном слое атмосферы могут быть построены на базе двух LED-светодиодов, работающих в режиме узкоспектральных фотоприемников. Сформулирована и решена задача определения оптимальной зависимости внешней термальной радиации от длины волны, при которой величина атмосферного пропускания в приземной атмосфере достигает максимума. Получено выражение для определения оптимальной температуры внешнего излучателя.

**Ключевые слова:** солнечный фотометр, оптическое пропускание атмосферы, влагосодержание, осадочная вода, оптимизация

Статья поступила: 04.08.2020  
Принята к публикации: 24.09.2020

# Issues of Measuring the Moisture Content in the Surface Atmosphere Layer Using an External Emitter and a Photometer with LED Emitters in The Photodetector Mode

U. F. Mammadova

Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

The problem of measuring the moisture content in the surface layer of the atmosphere using an external emitter and an LED photometer is defined and solved. It is noted that the absence in many zones of the planet of automated stations for measuring the moisture content of air of the international network AERONET induces the need to develop and use simple sun photometers. The devices for measuring the moisture content in the surface layer of the atmosphere can be built on the basis of two LED light emitters operating in the mode of narrow-spectrum photodetectors. The problem of determining the optimal dependence of external thermal radiation on the wavelength at which the value of atmospheric transmission in the surface atmosphere reaches its maximum is defined and solved. An expression for determining the optimal temperature of the external radiator is obtained.

**Keywords:** sun photometer, optical transmission of the atmosphere, moisture content, precipitated water, optimization

Received on: 04.08.2020  
Accepted on: 24.09.2020



## ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в работе [1], современные средства дистанционного зондирования атмосферы позволяют определить высотный профиль влажности на базе микроволновых и инфракрасных измерений. Известны такие средства спутникового базирования как ИК зондировщики HIRS/3, AMSU-A, AMSU-B и др., работающие в диапазонах десятки и сотни ГГц. Для наземных измерений используются СВЧ радиометры, работающие на частоте 22 ГГц и 36 ГГц. Погрешность измерения таких приборов не ниже 15-30%. Основной недостаток этих приборов - высокая погрешность определения профиля в приземном слое.

Согласно [2] информация о высотном распределении влажности в атмосфере необходима как метеорологам, так и специалистам по распространению радиоволн, включая специалистов по GPS измерениям. Существуют эмпирические формулы для определения содержания водяных паров по высоте (формула Ганна, формула Зюрцига - Хргиана и др. [2]). Однако погрешность вычислений по таким формулам оказывается не ниже  $\pm(5-10\%)$ .

Специалистам известны методы измерения влажности воздуха, реализованные в современных измерительных комплексах для наблюдения за атмосферным электричеством с помощью радиозондов [3]. При этом часто в первичных отчетах температуры и влажности присутствуют недостоверные значения, единичные выбросы или скачкообразные измерения.

В этом случае проведение оперативного дистанционного зондирования позволяет проанализировать первичные данные радиозонда и исключить влияние на общий результат недостоверных значений [4]. Такое оперативное зондирование может быть осуществлено с помощью солнечных фотометров SIMEL, используемых в международной сети аэрозольных измерений AERONET. Вместе с тем количество автоматизированных станций сети AERONET во всем мире не превышает 500 штук, и во многих зонах автоматизированные станции этой сети еще не установлены. Следовательно, возникает актуальный вопрос о необходимости создания и использования простых по конструкции солнечных фотометров, работающих в автоматическом режиме. Таким техническим средством можно считать LED-солнечные фотометры, специализированные на измерении влагосодержания воздуха. Далее в настоящей работе дается краткий обзор

## INTRODUCTION

As noted in [1], modern means of remote sensing of the atmosphere make it possible to determine the height profile of humidity based on microwave and infrared measurements. Known such satellite-based means as IR sounding devices HIRS/3, AMSU-A, AMSU-B and others operating in the ranges of tens and hundreds of GHz. For ground measurements, SHF radiometers operating at 22 GHz and 36 GHz are used. The measurement error of such devices is not less than 15-30%. The main disadvantage of these devices is the high error in determining the profile in the surface layer.

According to [2], information on the altitude distribution of humidity in the atmosphere is needed by both meteorologists and specialists in radio wave propagation, including specialists in GPS measurements. There are empirical formulas for determining the content of water vapor by height (Gann's formula, Sürzig-Hrgian's formula, etc. [2]). However, the calculation error using such formulas turns out to be no less than  $\pm(5-10\%)$ .

The methods for measuring air humidity, implemented in modern measuring systems for observing atmospheric electricity using radiosondes are known to the experts [3]. At the same time, often in the primary readings of temperature and humidity, there are unreliable values, single emissions or abrupt measurements.

In this case, operational remote sensing makes it possible to analyze the primary data of the radiosonde and eliminate the influence of unreliable values on the overall result [4]. Such operational sensing can be carried out using SIMEL sun photometers used in the international aerosol measurement network AERONET. However, the number of automated stations of the AERONET network worldwide does not exceed 500, and in many areas the automated stations of this network have not yet been installed. Consequently, an urgent question arises about the need to create and use sun photometers that are simple in design and operate in an automatic mode. Sun LED photometers, specialized in measuring the moisture content of air, can be considered as such technical means. Further in this work, a brief overview of known studies on the development of sun LED photometers is given, a method is proposed for the use of these devices, and the problem of optimal measurements is formulated and solved.

## MATERIALS AND METHOD

The research [4] describes the design of a simple LED-photometer used to measure the total columnar amount of water vapor in air. The device was used

известных исследований по разработке LED-солнечных фотометров, предлагается метод по использованию этих приборов, формулируется и решается задача проведения оптимальных измерений.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОД

В работе [4] изложена конструкция простого LED-фотометра, используемого для измерения общего колонного количества водяных паров в воздухе. Устройство использовалось по программе GLOBE (Программа по глобальному изучению распространения водяного пара на планете) и работало в ближнем ИК-диапазоне. В качестве фотоприемников с узкой полосой измеряемой оптической радиации использовались фотодиод с фильтром (940 нм) и LED (светодиодами 825 нм), функционирующий в режиме фотодетектора. Отношение выходных сигналов этих сенсоров позволяет вычислить общее колонное количество водяных паров в дневное время.

В работе [5] сообщается о разработке аналогичного устройства. В этом устройстве использованы два LED-излучателя, работающих в режиме фотодетектора на длинах волн 815 и 940 нм соответственно. Спектр сигналов этих светочувствительных элементов представлен на рис. 1.

Для технической реализации наземно-высотного метода измерений влагосодержания в приземном слое мы построили двухканальную измерительную установку (оптико-электронная схема измерительного устройства представлена на рис. 2).

Созданное устройство, работающее на длинах волн  $\lambda_1=940$  нм и  $\lambda_2=870$  нм, было исследовано экспериментально. На рис. 3 приведена эксперимен-

тально снятая зависимость  $\ln \frac{V_1}{V_2} = f\left(\tau \cdot m - mPW^{\frac{1}{2}}\right)$ ,

где  $V_1$  – сигнал на выходе канала длины волны 940 нм;  $V_2$  – сигнал на выходе канала 870 нм.

Для вычисления общего количества осажде-

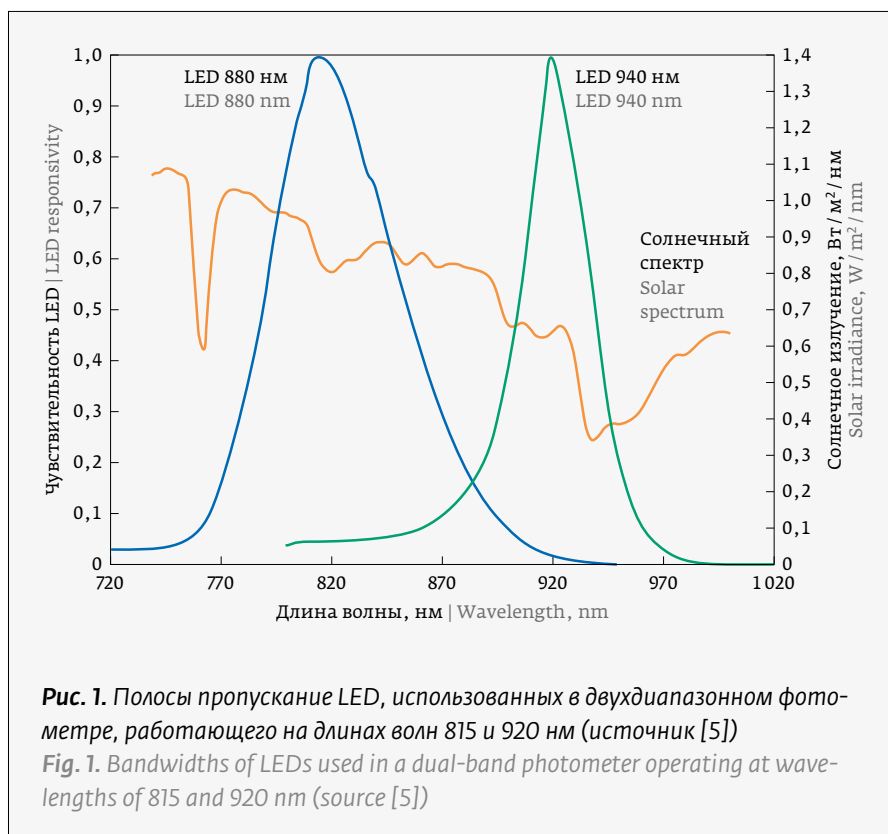


Рис. 1. Полосы пропускания LED, использованных в двухдиапазонном фотометре, работающего на длинах волн 815 и 920 нм (источник [5])  
 Fig. 1. Bandwidths of LEDs used in a dual-band photometer operating at wavelengths of 815 and 920 nm (source [5])

under the GLOBE program (Program for the global study of the distribution of water vapor on the planet) and worked in the near infrared range. A photodiode with a filter (940 nm) and LED (light-emitting diode 825 nm), operating in the photodetector mode, were used as photodetectors with a narrow band of measured optical radiation. The ratio of the output signals of these sensors allows the calculation of the total columnar amount of water vapor during the daytime.

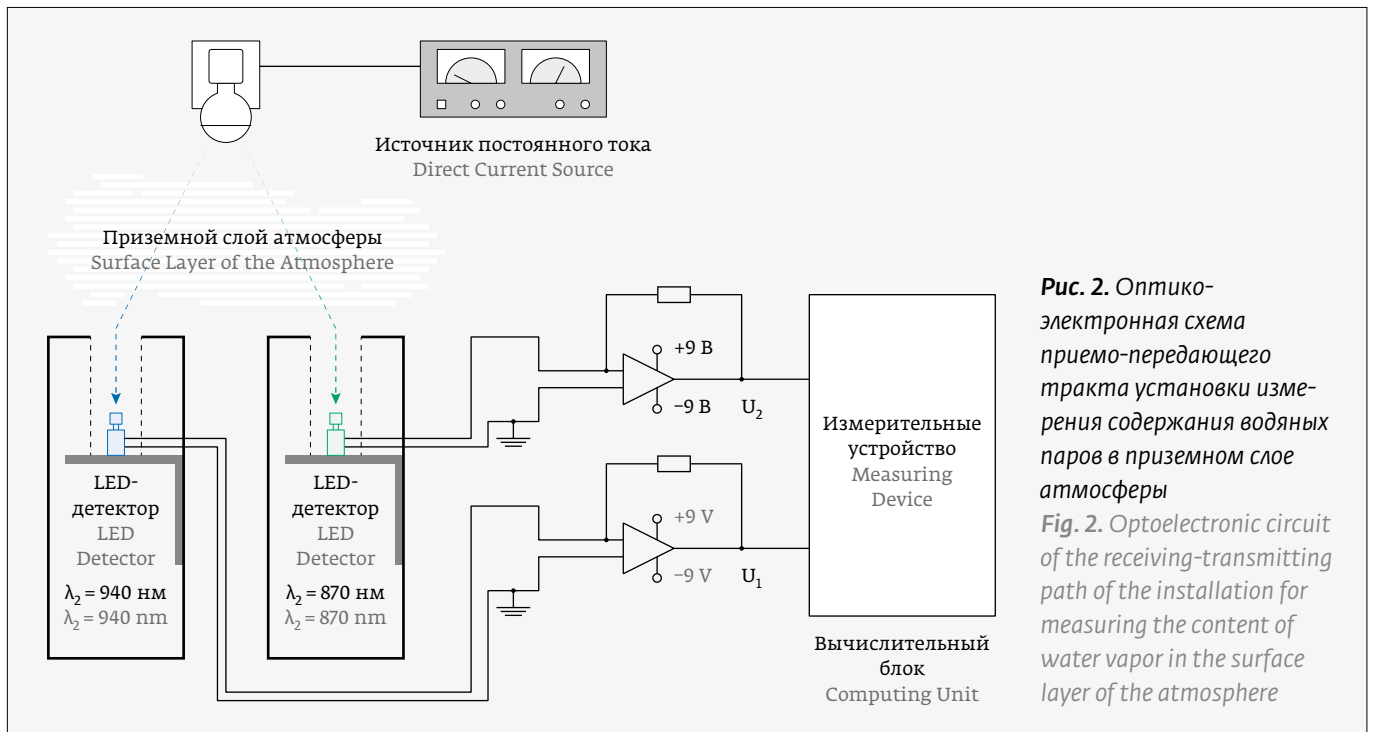
The research [5] reports on the development of a similar device. This device uses two LED-emitters operating in the photodetector mode at wavelengths of 815 and 940 nm, respectively. The signal spectrum of these light-sensitive elements is shown in Fig. 1.

For the technical implementation of the ground-level method for measuring the moisture content in the surface layer, we built a two-channel measuring device (the optical-electronic circuit of the measuring device is shown in Fig. 2).

The created device, operating at wavelengths  $\lambda_1=940$  nm and  $\lambda_2=870$  nm, was investigated experimentally. Fig. 3 shows the experimentally taken

dependence  $\ln \frac{V_1}{V_2} = f\left(\tau \cdot m - mPW^{\frac{1}{2}}\right)$ , where  $V_1$  is the sig-

nal at the output of the channel with a wavelength of



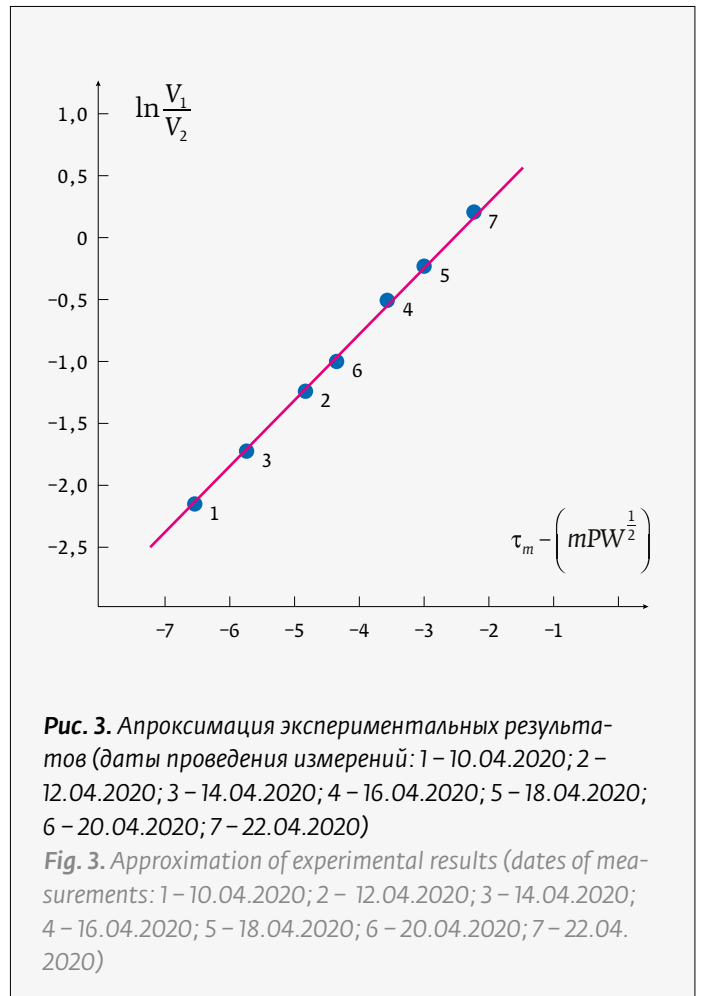
нием (1) из работы [5], модифицировав его путем перемножения на коэффициент калибровки.

$$PW = \frac{k}{m} \left[ 17,627 - 30,719 \left( \frac{I_{940}}{I_{815}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $m$  – оптическая воздушная масса;  $I_{940}$ ,  $I_{815}$  – сигналы на выходах фотометра;  $k$  – калибровочный коэффициент.

В качестве эталонной величины общего количества осажденных водяных паров использовали результаты измерения по методу Батлера [6]. Проведенные измерения показали, что значение коэффициента  $k$  может меняться в пределах 1,03–1,08, что частично объясняется значительной методической погрешностью самого метода Батлера.

Что касается температурной стабильности LED-диодов, работающих в режиме фотодетектора, то здесь следует различить амплитудную стабильность сигнала фотодетектора и цветовое смещение при излучении. Исследования, проведенные в [7], показали, что амплитудная стабильность интенсивности излучения при изменении температуры в пределах 300–350K не превышает 5%, а смещение пиковой длины волны  $\approx 2$  нм. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что температурная нестабильность LED-диодов в режиме фотодетектора не окажет столь заметное влияние на суммарную погрешность измерения общего количества осажденных водяных паров, достигающую 10–15%.



Очевидно, что измерение общего количества осажденных паров по всей толще атмосферы может быть осуществлено в дневное время с использованием оптической радиации Солнца. Однако часто более актуальной задачей становится задача исследования влагонасыщенности приземного слоя атмосферы. Это важно для систем прогнозирования гроз и молний, а также в санитарно-медицинских целях. Для решения данной задачи может быть предложен метод фотометрирования высокотемпературного излучателя, установленного на специальном высотном объекте. В качестве такого высотного объекта могут быть использованы высотное здание, радиомачта или специальные метеорологические мачты. Технологическая схема проведения таких измерений приведена на рис. 4.

Очевидно, что при таких наземно-высотных измерениях, осуществляемых в вечерне – ночное время, оптическая воздушная масса определяется как

$$m = \frac{\sqrt{h^2 + L^2}}{h} \quad (2)$$

или

$$m = \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (3)$$

При этом величина  $PW$  может быть определена по выражению (1), где  $m$  вычисляется по формулам (2) или (3). Достоверность результатов таких измерений будет зависеть от пропускания приземного слоя атмосферы. Следовательно, имеет смысл исследовать условия, при которых пропускание приземного слоя атмосферы достигло бы максимальной величины.

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО НАЗЕМНО-ВЫСОТНОГО МЕТОДА

Согласно исследованиям авторов работы [8] в условиях, когда оптическая радиация является существенно немонахроматической и уравнение Бугера – Бера – Ламберта плохо описывает режимы измерений с помощью солнечного фотометра, широкополосный электрический сигнал  $V$  на выходе фотометра может быть определен как

$$V = V_0 \cdot T_1,$$

где  $V_0$  – величина сигнала фотометра, размещенного на верхней границе приземного слоя;  $T_1$  – функция широкополосного пропускания.

940 nm;  $V_2$  is the signal at the channel output 870 nm.

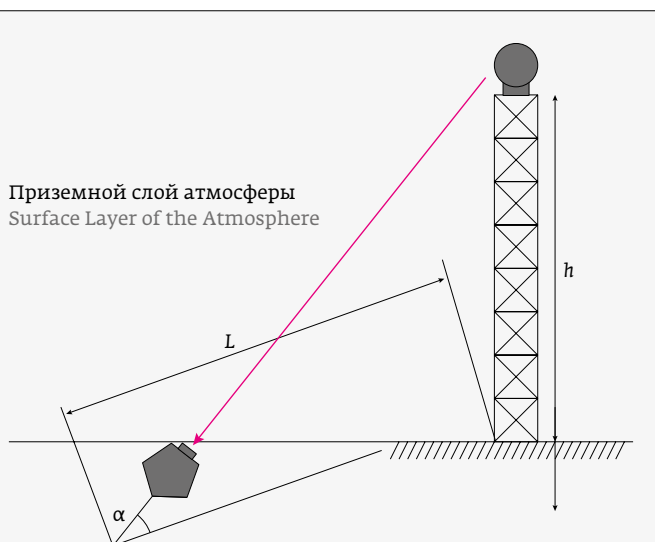
To calculate the total amount of precipitated water vapor, we used expression (1) from [5], modifying it by multiplying it by the calibration factor.

$$PW = \frac{k}{m} \left[ 17,627 - 30,719 \left( \frac{I_{940}}{I_{815}} \right) \right], \quad (1)$$

where  $m$  is the optical air mass;  $I_{940}$ ,  $I_{815}$  are the signals at the outputs of the photometer;  $k$  is the calibration factor.

The results of measurements by the Butler method [6] were used as a reference value for the total amount of precipitated water vapor. The measurements have shown that the value of the coefficient  $k$  can vary within the range of 1.03-1.08, which is partially explained by a significant methodological error of the Butler method itself.

As for the temperature stability of LED diodes operating in the photodetector mode, here one should distinguish between the amplitude stability of the photodetector signal and the color shift during emission. The studies carried out in [7] showed that the amplitude stability of the radiation intensity with a change



**Рис. 4.** Технологическая схема наземно-высотного метода измерений влажностного содержания в приземном слое атмосферы ( $L$  – расстояние между фотометром и основанием мачты;  $h$  – высота приземного слоя)

**Fig. 4.** Process diagram of the ground-altitude method for measuring the moisture content in the surface layer of the atmosphere ( $L$  is the distance between the photometer and the base of the mast;  $h$  is the height of the surface layer)



Согласно [10] функция широкополосного пропускания для приземного слоя атмосферы может быть определена как

$$T_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot F_{0\lambda} \cdot \exp(-m_a \alpha_{a,\lambda} - m_R \alpha_{R,\lambda} - m_g \alpha_{g,\lambda})}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda F_{0,\lambda} d\lambda}, \quad (4)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - начальная и конечная точки измеряемого интервала длин волн;  $R_\lambda$  - нормализованная спектральная реакция детектора;  $F_{0\lambda}$  - солнечная радиация на верхней границе приземного слоя;  $m_a, m_R, m_g$  - оптические воздушные массы аэрозоля, релеевского рассеяния и малых газов;  $\alpha_{a,\lambda}, \alpha_{R,\lambda}, \alpha_{g,\lambda}$  - оптические толщины соответственно аэрозоля, релеевского рассеяния и малых газов.

Оптимизация показателя  $T_1$  осуществляется по следующей схеме.

1. Вводится на рассмотрение функция квадратического широкополосного пропускания.

Вместе с тем согласно [9] спектр поглощения водяных паров в видимом диапазоне и в ближней ИК-области имеет континуальный характер с пиками на длинах волн 590; 650; 690; 720; 760; 820; 940 нм. Это обстоятельство вызывает необходимость исследования экстремального характера широкополосного пропускания атмосферы в соответствующей спектральной зоне.

$$T_{1,KB} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^2 \cdot F_{0\lambda}^2 \cdot \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda} - 2m_R \alpha_{R,\lambda} - 2m_g \alpha_{g,\lambda})}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda F_{0,\lambda} d\lambda}. \quad (5)$$

2. Принимается условие

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot F_{0\lambda} \cdot d\lambda = C = \text{const}. \quad (6)$$

3. Допускается что

$$m_a \alpha_a \gg m_R \alpha_{R,\lambda}, \quad (7)$$

$$m_a \alpha_{a,\lambda} \gg m_g \alpha_{g,\lambda}; R_\lambda = \text{const}. \quad (8)$$

С учетом условий (6-8) задача оптимизации  $T_{1,KB}$  путем нахождения оптимальной величины  $F_{0\lambda}$  может быть выражена в виде задачи безусловной вариационной оптимизации

$$T_{1,KB} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot F_{0\lambda}^2 \cdot \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda}) + \gamma \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{0\lambda} \cdot d\lambda - C \right], \quad (9)$$

где  $\gamma$  - множитель Лагранжа.

in temperature within the range of 300–350 K does not exceed 5%, and the mixing of the peak wavelength is  $\approx 2$  nm. These results allow us to conclude that the temperature instability of LED diodes in the photodetector mode will not have such a noticeable effect on the total measurement error of the total amount of precipitated water vapor, which reaches 10–15%.

Apparently, the measurement of the total amount of deposited vapors throughout the entire thickness of the atmosphere can be carried out in the daytime using the optical radiation of the Sun. However, the task of studying the moisture saturation of the surface layer of the atmosphere often becomes a more urgent task. This is important for systems for forecasting thunderstorms and lightning, as well as for sanitary purposes. To solve this problem, a method of photometric measurement of a high-temperature radiator installed on a special high-rise object can be proposed. A high-rise building, a radio antenna or special meteorological masts can be used as such a high-rise object. The process scheme of such measurements is shown in Fig. 4.

Apparently, with such ground-altitude measurements carried out in the evening/night time, the optical air mass is determined as

$$m = \frac{\sqrt{h^2 + L^2}}{h} \quad (2)$$

or

$$m = \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (3)$$

In this case, the value of PW can be determined by the expression (1) where  $m$  is calculated by the formulas (2) or (3). The reliability of the results of such measurements will depend on the transmission of the surface layer of the atmosphere. Therefore, it makes sense to investigate the conditions under which the transmission of the surface layer of the atmosphere would reach the maximum value.

## OPTIMIZATION OF THE PROPOSED GROUND-ALTITUDE METHOD

According to the studies of the authors of [8], under conditions when optical radiation is essentially non-monochromatic and the Beer-Lambert-Bouguer equation poorly describes the measurement modes with a sun photometer, the broadband electrical signal  $V$  at the photometer output can be defined as

$$V = V_0 \cdot T_1,$$

Согласно [11] оптимальная функция  $F_{0\lambda}$ , приводящая  $T_{1,KB}$  к экстремальной величине, должна удовлетворить условию

$$\frac{\partial \{R_\lambda F_{0\lambda}^2 \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda}) + \gamma [F_{0\lambda} - C]\}}{\partial F_{0\lambda}} = 0. \quad (10)$$

Из (10) легко получить следующее решение:

$$F_{0\lambda, \text{opt}} = \frac{\gamma_0}{2R_\lambda \cdot \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda})} = \frac{\gamma_0 \exp(2m_a \alpha_{a,\lambda})}{2R_\lambda}. \quad (11)$$

Известно, что оптическая толщина аэрозоля определяется формулой Ангрстрема [12], т. е.

$$\alpha_{a,\lambda} = \beta \cdot \lambda^{-\chi}, \quad (12)$$

где  $\beta$  – аэрозольная мутность атмосферы;  $\chi$  – показатель Ангрстрема.

С учетом (11) и (12) имеем

$$F_{0\lambda, \text{opt}} = \frac{\gamma_0 \exp(2m_a \beta \lambda^{-\chi})}{2R_\lambda}. \quad (13)$$

Таким образом в оптимальном случае  $F_{0\lambda, \text{opt}}$  должен уменьшаться с ростом  $\lambda$ . Однако согласно закону Планка в диапазоне 0,5–1,2 мкм в зависимости от температуры излучателя возможен как рост, так и уменьшение интенсивности по длине волны.

Согласно закону Планка оптическая радиация абсолютно черного тела определяется как [13]

$$U(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \quad (14)$$

Приравняв (13) к (14) получим

$$\frac{\gamma_0 \exp(2m_a \beta \lambda^{-\chi})}{2R_\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \quad (15)$$

Из равенства (15) можно вычислить  $T$ , при которой при заданной величине  $\lambda$ , параметр  $T_{1,KB}$  достиг бы максимального значения. При этом значение  $\lambda$

можно выбрать в качестве  $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ .

$$T_{\text{opt}} = \frac{hc}{2k \cdot \ln \left[ \frac{16R_\lambda \cdot \pi hc}{\lambda \gamma_0 \exp(2m_a \beta \lambda^{-\chi})} \right]} \quad (16)$$

where  $V_0$  is the signal value of the photometer located at the upper boundary of the surface layer;  $T_1$  is a broadband function.

According to [10], the function of broadband transmission for the surface layer of the atmosphere can be defined as

$$T_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot F_{0\lambda} \cdot \exp(-m_a \alpha_{a,\lambda} - m_R \alpha_{R,\lambda} - m_g \alpha_{g,\lambda})}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda F_{0,\lambda} d\lambda}, \quad (4)$$

where  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  are the start and end points of the measured wavelength interval;  $R_\lambda$  is the normalized spectral response of the detector;  $F_{0\lambda}$  are the solar radiation at the upper boundary of the surface layer;  $m_a$ ,  $m_R$ ,  $m_g$  are optical air masses of aerosol, Rayleigh scattering and small gases;  $\alpha_{a,\lambda}$ ,  $\alpha_{R,\lambda}$ ,  $\alpha_{g,\lambda}$  are the optical thicknesses of aerosol, Rayleigh scattering, and small gases, respectively.

Optimization of the  $T_1$  indicator is carried out as follows.

1. The function of quadratic broadband transmission is introduced for consideration.

Furthermore, according to [9], the absorption spectrum of water vapor in the visible range and in the near-IR region has a continuous character with peaks at wavelengths of 590; 650; 690; 720; 760; 820; 940 nm. This leads the circumstance of studying the extreme nature of the atmosphere transmission broadband in the corresponding spectral zone.

$$T_{1,KB} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda^2 \cdot F_{0\lambda}^2 \cdot \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda} - 2m_R \alpha_{R,\lambda} - 2m_g \alpha_{g,\lambda})}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda F_{0,\lambda} d\lambda}. \quad (5)$$

2. The following condition is accepted

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot F_{0\lambda} \cdot d\lambda = C = \text{const}. \quad (6)$$

3. It is assumed that

$$m_a \alpha_a \gg m_R \alpha_{R,\lambda}, \quad (7)$$

$$m_a \alpha_{a,\lambda} \gg m_g \alpha_{g,\lambda}; R_\lambda = \text{const}. \quad (8)$$

Taking into account conditions (6–8), the optimization problem for  $T_{1,KB}$  by finding the optimal value of  $F_{0\lambda}$  can be expressed as a problem of unconstrained variational optimization

$$T_{1,KB} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \cdot F_{0\lambda}^2 \cdot \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda}) + \gamma \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{0\lambda} \cdot d\lambda - C \right], \quad (9)$$

Таким образом, при заданных значениях  $\lambda$ ,  $\chi_0$ ,  $m_a$ ,  $\beta$ ,  $\chi$  оптимальная температура излучателя в предложенном наземно-высотном методе может быть вычислена по формуле (16).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, отсутствие во многих зонах планеты автоматизированных станций измерения влагосодержания воздуха международной сети AERONET диктует необходимость разработки и использования простых солнечных фотометров. Приборы могут быть построены на базе двух LED-светодиодов, работающих в режиме узкоспектральных фотоприемников. Такие LED-фотометры позволяют измерить влагосодержание а приземном слое атмосферы в вечерне-ночное время при использовании термального излучателя, установленного на высотном объекте. Сформулирована и решена оптимизационная задача, позволяющая определить оптимальную зависимость исходной оптической радиации от длины волны, при которой атмосферное пропускание в приземной атмосфере достигает максимума. Сравнение выявленной оптимальной зависимости с аналитическим выражением закона Планка позволило вычислить выражение для определения оптимальной температуры внешнего излучателя.

### АВТОР

Маммадова Улькер Физули гызы, аспирант, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан. Область интересов: солнечный фотометр, оптическое пропускание атмосферы.

where  $\gamma$  is the Lagrange multiplier.

According to [11], the optimal function  $F_{0\lambda}$  that leads  $T_{1,KB}$  to an extreme value should satisfy the condition

$$\frac{\partial \{R_\lambda F_{0\lambda}^2 \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda}) + \gamma [F_{0\lambda} - C]\}}{\partial F_{0\lambda}} = 0. \quad (10)$$

It is easy to obtain the following solution from (10):

$$F_{0\lambda, \text{opt}} = \frac{\gamma_0}{2R_\lambda \cdot \exp(-2m_a \alpha_{a,\lambda})} = \frac{\gamma_0 \exp(2m_a \alpha_{a,\lambda})}{2R_\lambda}. \quad (11)$$

It is known that the optical thickness of an aerosol is determined by the Angstrom formula [12], i. e.

$$\alpha_{a,\lambda} = \beta \cdot \lambda^{-\chi}, \quad (12)$$

where  $\beta$  is the aerosol turbidity of the atmosphere;  $\chi$  is the Angstrom exponent.

Taking into account (11) and (12), we obtain

$$F_{0\lambda, \text{opt}} = \frac{\gamma_0 \exp(2m_a \beta \lambda^{-\chi})}{2R_\lambda}. \quad (13)$$

Thus, in the optimal case,  $F_{0\lambda, \text{opt}}$  should decrease with increasing  $\lambda$ . However, according to Planck's law, in the range of 0.5-1.2  $\mu\text{m}$ , depending on the temperature of the emitter, both an increase and a decrease in the intensity along the wavelength are possible.



Теплотелевизионный регистратор температуры тела

## АСТРОН-ТТ2019

Предназначен для автоматизированного бесконтактного определения людей с повышенной температурой тела на пунктах пропуска и досмотра

**АСТРОН**  
Оптико-механическое конструкторское бюро

140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1;  
тел.: +7 (495) 215-13-82;  
v@astrohn.ru, www.astrohn.ru





## REFERENCES

1. **SHCHukin G. G., Itkin M. I., Karavaev D. M., Chinkova U. F.** Svravnenie dannykh distancionnogo temperaturno – vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery dlya Severo-Zapadnogo regiona RF. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2008; 133. URL: [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S1\_17.pdf].  
**Шукин Г. Г., Иткин М. И., Караваев Д. М., Чинкова У. Ф.** Сравнение данных дистанционного температурно – влажностного зондирования атмосферы для Северо-Западного региона РФ. *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2008; 133. URL: [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/S1\_17.pdf].
2. **Ostrovskij E. V., Fridzon M. B.** Tonkaya struktura vertikal' nogo profilya vlazhnosti, vliyayushchaya na rasprostranenie radiovoln v troposfere. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/tonkaya-struktura-vertikalnogo-profilya-vlazhnosti-vliyayuschaya-na-rasprostranenie-radiovoln-v-troposfere].  
**Островский Е. В., Фридзон М. Б.** Тонкая структура вертикального профиля влажности, влияющая на распространение радиоволн в тропосфере. *Научный Вестник МГТУ ГА*. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/tonkaya-struktura-vertikalnogo-profilya-vlazhnosti-vliyayuschaya-na-rasprostranenie-radiovoln-v-troposfere].
3. **Petrov A. I., Petrova G. G., Panchishkina I. N., Kudrinskaya T. V., Petrov N. A.** Izmeritel'nyj kompleks dlya issledovaniya elektrichstva prizemnogo sloya atmosfery. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritelnyy-kompleks-dlya-issledovaniya-elektichstva-prizemnogo-sloya-atmosfery].  
**Петров А. И., Петрова Г. Г., Панчишкина И. Н., Кудринская Т. В., Петров Н. А.** Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы. *Научный Вестник МГТУ ГА*. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritelnyy-kompleks-dlya-issledovaniya-elektichstva-prizemnogo-sloya-atmosfery].
4. **Brooks D. R., Forrest M. M., Roettger R.** Inexpensive near-IR sun photometer for measuring total column water vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 24. URL: [https://mafiadoc.com/inexpensive-near-ir-sun-photometer-for-measuring-total-column\_59a5268b1723dd0a40e08b83.html].
5. **Forrest M. M.** An inexpensive and stable LED sun photometer for measuring the water vapor column over South Texas from 1990 to 2001. *Geophysical Research Letter*. 2002; 29(13). DOI:10.1029/2002GL014776.
6. **Maghrabi A., Dajani Al H. M.** Estimation of precipitable water vapour using vapour pressure and air temperature in an arid region in central Saudi Arabia. *Journal of the Association of Arab universities for Basic and Applied Sciences*. 2013; 14: 1–8.
7. **Jia Z., Yuan C., Wang X-J., Sun P., Wang L., Jiang H., Jiang J.** Strategies to approach high performance in Cr<sup>3+</sup> – doped phosphors for hog – power NIR – LED light sources. *Science and Application*. 2020; 9: 86.
8. **Reagan J. A., Pilewski P. A., Scott-Fleming I. C., Herman B. J., Ben-David A.** Extrapolation of earth-based solar irradiance measurements to exoatmospheric levels for broad-band and selected absorption-band observations. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens. GE*. 1987; 25(6): 647–653.
9. **Absorption of solar radiation by water vapor in clear and cloudy skies. Implications for anomalous absorption.** *Journal of Geophysical Research*. April 16, 2001; 105(D7): 9421–9428.
10. **Brooks D., Mims III F. M.** Development of an inexpensive handheld LED – based Sun photometer for the GLOBE program. *Journal of Geophysical Research*. March 16, 2001; 106 (D5):4733–4740.
11. **Toledano C., Cachorro V. E., Berjon A., Frutos A. M., Sorribas M., Morena de la B. A., Goloub P.** Aerosol optical depth and Angstrom exponent climatology at the Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2007; 133: 795–807. DOI: 10.1002/qj.54. www.interscience.wiley.com.
12. **El'cгоlc L. E.** *Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie.* – М. Nauka. 1974.  
**Эльцголиц Л. Э.** *Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление.* – М. Наука. 1974.
13. **Gossorg ZH.** *Infrakrasnaya termografu osnovy, tekhnika, primenenie.* – М. «Mir». 1988.  
**Госсорг Ж.** *Инфракрасная термографу основы, техника, применение.* – М. «Мир». 1988.

According to Planck's law, the optical radiation of an absolutely black body is defined as [13]

$$U(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (14)$$

By equating (13) to (14), we obtain

$$\frac{\gamma_0 \exp(2m_a \beta \lambda^{-\chi})}{2R_\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (15)$$

From equality (15), we can calculate T, at which, for a given value of  $\lambda$ , the parameter  $T_{1, \text{KB}}$  would reach its maximum value. In this case, the value of  $\lambda$  can be

chosen as  $\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ .

$$T_{\text{opt}} = \frac{hc}{2k \cdot \ln \left[ \frac{16R_\lambda \cdot \pi hc}{\lambda \gamma_0 \exp(2m_a \cdot \beta \lambda^{-\chi})} \right]} \quad (16)$$

Thus, for given values  $\lambda$ ,  $\chi_0$ ,  $m_a$ ,  $\beta$ ,  $\chi$ , the optimal temperature of the emitter in the proposed ground-based altitude method can be calculated using formula (16).

## CONCLUSION

Thus, the absence in many zones of the planet of automated stations for measuring the moisture content of air of the international network AERONET induces the need to develop and use simple sun photometers. The devices can be built based on two LED light emitters operating in the mode of narrow-spectrum photodetectors. Such LED-photometers make it possible to measure the moisture content in the surface layer of the atmosphere in the evening and at night using a thermal emitter installed at a high-altitude object. An optimization problem has been defined and solved, which makes it possible to determine the optimal dependence of the initial optical radiation on the wavelength at which the atmospheric transmission in the near-ground atmosphere reaches its maximum. Comparison of the revealed optimal dependence with the analytical expression of Planck's law made it possible to calculate the expression for determining the optimal temperature of the external radiator.

## AUTHOR

Mammadova Ulker Fizuli gyzy, Postgraduate, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan. Area of interest: sun photometer, optical transmission of the atmosphere.

20–23 ОКТЯБРЯ 2020  
МОСКВА, ВДНХ, ПАВИЛЬОН № 55, 57



**SAY** **FUTURE**  
M O S C O W

[WWW.SAY-FUTURE.RU](http://WWW.SAY-FUTURE.RU)

[WWW.INTERPOLITEX.RU](http://WWW.INTERPOLITEX.RU)



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1430 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)



Стоимость 1430 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)



Стоимость 1056 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.firstmile.ru](http://www.firstmile.ru)



Стоимость 1287 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость 1716 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.ru](http://www.stankoinstrument.ru)