



## ГЕОГРАФИЯ

УДК 621.1:551.509

### Полуэмпирический метод определения относительной влажности воздуха по результату солнечно-фотометрических измерений осажденных водяных паров

Х. Г. Асадов, С. Н. Абдуллаева, А. Д. Алиева

Асадов Хикмет Гамид оглы, доктор технических наук, профессор, Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

Абдуллаева Севиндж Новруз гызы, кандидат технических наук, доцент, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

Алиева Амида Джабраиль гызы, кандидат технических наук, заведующий отделом, Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

Статья посвящена предлагаемому полуэмпирическому методу определения относительной влажности воздуха по результату измерений осажденных водяных паров с помощью солнечного фотометра. Анализ известного метода Батлера позволил предсказать возможность наличия экстремума в функциональной зависимости осажденных водяных паров от относительной влажности на поверхности земли. Регрессионные уравнения в виде квадратичных многочленов, известных для разных зон исследуемого региона, позволили вывести квадратное уравнение для любой из них на основе результатов предварительно проводимых измерений. Получено также уравнение для вычисления относительной влажности на уровне земли при известной измеренной величине осажденных водяных паров.

**Ключевые слова:** солнечный фотометр, водяные пары, относительная влажность, измерения, дистанционное зондирование, метод Батлера.

Поступила в редакцию: 05.03.2020 / Принята: 12.04.2020 / Опубликовано: 31.08.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

**Semi-Empirical Method for Determination of Air Relative Humidity on Results of Sun-Photometric Measurements of Precipitated Water Vapors**

H. H. Asadov, S. N. Abdullayeva, A. D. Aliyeva

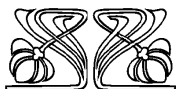
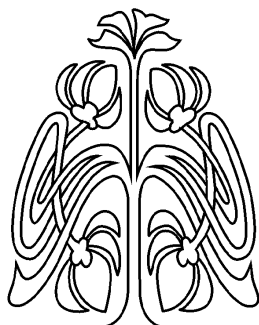
Hikmat H. oglu Asadov, <https://orcid.org/0000-0001-1052-1185>, National Aerospace Agency, 1 S. S. Akhundov St., Baku AZ1115, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

Sevindj N. gizi Abdullayeva, <https://orcid.org/0000-0002-1053-8125>, Azerbaijan State University of Oil and Industry, 20 Azadlig Ave., Baku AZ1010, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

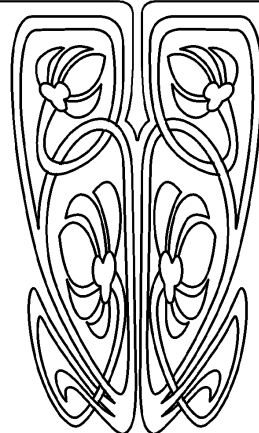
Amida D. gizi Aliyeva, <https://orcid.org/0000-0003-3856-1914>, National Aerospace Agency, 1 S. S. Akhundov St., Baku AZ1115, Azerbaijan, asadzade@rambler.ru

The paper is devoted to suggested semi-empirical method for determination of air relative humidity based on results of measurements of precipitated water vapors using sun photometers. The analysis of known Butler method make it possible to predict the presence of extremes in functional dependence of precipitated water vapors on relative humidity on the earth surface. Regression equations in the form of quadratic algebraic units, known for different zones of the researched region enable to obtain the quadratic equation for any zone of the researched region on the basis of preliminary held measurements. The equation for calculation of relative humidity at the earth level depending on measured value of precipitated water vapors is obtained.

© Асадов Х. Г., Абдуллаева С. Н., Алиева А. Д., 2020



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ





**Keywords:** sun photometer, water vapors, relative humidity, measurements, remote sensing, Butler method.

Received: 05.03.2020 / Accepted: 12.04.2020 / Published: 31.08.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-3-152-156>

## Введение

Относительная влажность воздуха, температура и давление являются показателями, влияющими на жизнь и деятельность населения всей планеты. При решении задач измерения влажности воздуха необходимо учесть тот факт, что степень насыщения воздуха водяным паром зависит от температуры. В ненасыщенном водяном паре рост температуры приводит к увеличению количества молекул воды. При достижении температуры воздуха точки росы водяные пары приходят в насыщенное состояние. Относительная влажность воздуха определяется по формуле

$$f = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – абсолютная влажность воздуха, т. е. количество водяного пара, содержащегося в одном кубическом метре при текущей температуре;  $\rho_0$  – то количество пара, которое необходимо для насыщения кубического метра воздуха при той же температуре.

Для измерения влажности используются такие приборы, как гигрометры точки росы, психрометры, электролизные гигрометры, гигрометры инфракрасного излучения, электрические гигрометры с проводящей пленкой, волосяные гигрометры, гигрометры с биморфным элементом и др. Погрешность таких приборов обычно достигает  $\pm(2,5)$  процентов.

Указанные приборы обычно имеют простую конструкцию, работают в ограниченном диапазоне температуры и обладают некоторой инерционностью. Вышеотмеченное указывает на необходимость поиска новых путей измерения относительной влажности воздуха. Одним из альтернативных путей измерения влажностных показателей являются дистанционные методы, в частности метод использования солнечных фотометров.

Настоящая статья посвящена теоретическим вопросам разработки метода определения относительной влажности воздуха на поверхности земли на основе результатов солнечно-фотометрических измерений.

## Базовые положения измерения показателей водяного пара с помощью солнечных фотометров

Согласно [1], солнечно-фотометрический метод основан на взаимодействии энергии элек-

тромагнитных лучей Солнца с составляющими атмосферы.

На длине волн 940 нм результат измерения водяных паров вычисляется по формуле

$$V(940 \text{ нм}) = V_0(940 \text{ нм}) \times d^{-2} [\exp(-m_r \cdot \delta_{\text{atm}}(940 \text{ нм}))] \cdot T_w(940 \text{ нм}), \quad (2)$$

где  $V(940 \text{ нм})$  – оптический поток на входе фотометра на длине волны 940 нм;  $V_0(940 \text{ нм})$  – оптический поток на внешней границе атмосферы;  $d$  – расстояние между Землей и Солнцем в астрономических единицах;  $m_r$  – относительная оптическая масса;  $\delta_{\text{atm}}(940 \text{ нм})$  – оптическая толщина атмосферы за исключением водяных паров;  $T_w(940 \text{ нм})$  – пропускание водяных паров.

Отметим, что, согласно исследованиям, проведенным в международной наземной измерительной сети AERONET, показатель  $T_w(940 \text{ нм})$  вычисляется по следующей формуле [2–4]:

$$T_w(940 \text{ нм}) = \exp(-a(m_w \cdot PWV)^b), \quad (3)$$

где  $m_w$  – относительная оптическая воздушная масса водяных паров;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от длины волны, состояния атмосферы; конструктивных показателей солнечного фотометра [5];  $PWV$  – осажденный водяной пар, мм.

Показатели  $PWV$  и  $RH$  (относительная влажность) связаны через формулу [6]

$$PWV = \int_0^z \rho_v(z) dz, \quad (4)$$

где  $\rho_v(z)$  – абсолютная влажность на высоте  $z$ , определяемая по формуле

$$\rho_v(z) = \frac{217 \cdot RH(z) \cdot e(z, T)}{T}, \quad (5)$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $RH$  – относительная влажность;  $e(z, T)$  – давление насыщенного пара, мб.

## Предлагаемый метод

Полуэмпирический метод измерения относительной влажности воздуха на поверхности земли основывается на методе измерения осажденных водяных паров Батлера. Согласно [7, 8], по методу Батлера показатель  $PWV$  может быть определен по следующей упрощенной формуле:

$$PWV \approx \frac{P_0}{3T_0}, \quad (6)$$

где  $PWV$  – осажденный водяной пар, мм;  $P_0$  – парциальное давление водяных паров на поверхности, мб;  $T_0$  – абсолютная температура в Кельвинах.

При этом парциальное давление может быть вычислено по формуле

$$P_0 = (2,409 \cdot 10^{12})(RH)(\theta^4) \cdot e^{-22,640}, \quad (7)$$



где 
$$\theta = \frac{300}{T_0} \quad (8)$$

Заявленный полуэмпиризм предлагаемого метода позволяет нам воспользоваться результатами экспериментальных исследований зависимости относительной влажности от температуры, изложенных в многочисленных публикациях (см, например: [9, 10]).

В качестве примера на рис. 1 приведены экспериментально снятые кривые взаимосвязанного изменения температуры и относительной влажности во времени [10].

Общий вид кривых, представленных на рис. 1, позволяет нам в первом приближении аппроксимировать функциональную связь между  $RH$  и  $T_0$  следующим образом:

$$T_0 = A - k \cdot RH, \quad (9)$$

где  $A = \text{const}$ ;  $k = \text{const}$ .

С учетом (6)–(9) нетрудно получить следующее выражение:

$$PWV = a_1 \cdot RH \frac{a_2^4}{(A - kRH)^3} \cdot e^{-\frac{a_2}{A - kRH}}, \quad (10)$$

где  $a_1 = 0,803 \cdot 10^{12}(300)^4$ ;  $a_2 = 22,64$ .

Как видно из выражения (10), существует две тенденции изменения  $PWV$  от  $RH$ . При росте  $RH$

увеличивается общий множитель, стоящий перед экспонентой. Одновременно происходит уменьшение самой экспоненты. Следовательно, можно ожидать наличие максимума в функциональной зависимости  $PWV$  от  $RH$ .

Отметим, что такое предположение вполне оправдывает себя на практике. Графики зависимости показателя  $PWV$  от относительной влажности воздуха на поверхности земли представлены на рис. 2 [11].

В работе [11] также приведены аналитические формулы регрессионных кривых, показанных на рис. 2, а, б соответственно:

$$PWV = -0,026(RH)^2 + 4,06(RH) - 108,50, \quad (11)$$

$$PWV = -0,056(RH)^2 + 9,33(RH) - 334,20. \quad (12)$$

Обобщая результаты, полученные в [11], можно предположить, что в общем случае регрессионная зависимость между  $PWV$  и  $RH$  может быть выражена в следующем виде:

$$PWV = d_1(RH)^2 + d_2(RH) + d_3, \quad (13)$$

где  $d_1, d_2, d_3$  – постоянные величины, подлежащие определению.

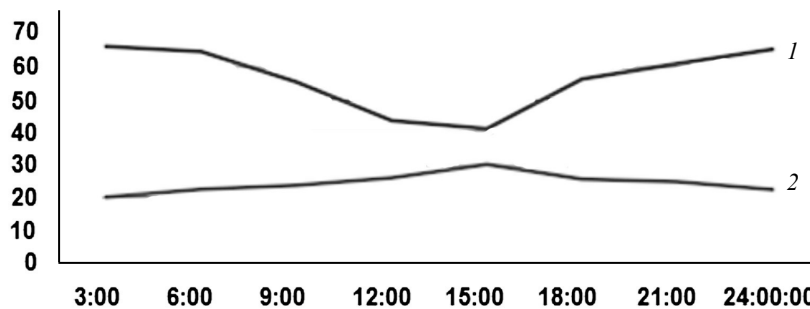


Рис. 1. Кривые экспериментально установленных величины относительной влажности (1) и температуры (2) [10]. На оси абсциссы указано время дня, а на оси ординаты – температура в Цельсиях и относительная влажность в процентах

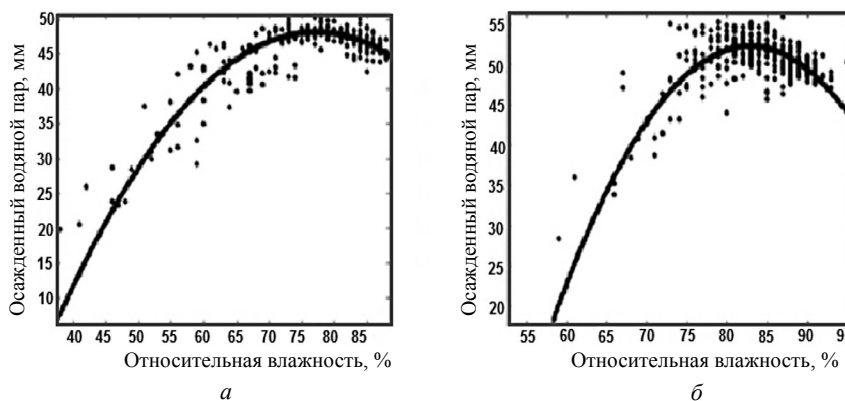


Рис. 2. Регрессионные кривые зависимости  $PWV$  от относительной влажности в центральном регионе (а) и южном (б) [11]



Для определения коэффициентов  $d_i$ ,  $i = 1, 3$  для любой исследуемой зоны предлагается следующая методика.

В течение дня с интервалом 2–3 часа три раза осуществляются измерения  $PWV$  и  $RH$ . На основании их результатов составляется система уравнений:

$$PWV_1 = d_1 RH_1^2 + d_2 RH_1 + d_3, \quad (14)$$

$$PWV_2 = d_1 RH_2^2 + d_2 RH_2 + d_3, \quad (15)$$

$$PWV_3 = d_1 RH_3^2 + d_2 RH_3 + d_3. \quad (16)$$

Решение системы уравнений (14)–(16) алгебраическим методом относительно неизвестных  $d_1, d_2, d_3$  позволяет определить их значения, которые укажем как  $d_{10}, d_{20}, d_{30}$ .

Следовательно, для конкретно исследуемой зоны можно получить следующее регрессионное уравнение в виде многочлена

$$PWV_0 = d_{10} RH^2 + d_{20} RH + d_{30}. \quad (17)$$

Представим (17) в виде квадратного уравнения

$$RH^2 + \frac{d_{20}}{d_{10}} RH + \frac{d_{30} - PWV_0}{d_{10}} = 0. \quad (18)$$

Решение (18) имеет вид

$$RH = -\frac{d_{20}}{2d_{10}} + \sqrt{\frac{d_{20}^2}{4d_{10}^2} - \frac{d_{30} - PWV_0}{d_{10}}}. \quad (19)$$

Таким образом, (19) является предлагаемой формулой для определения относительной влажности воздуха на уровне земли при известной измеренной величине осадженного водяного пара  $PWV_0$ .

### Обсуждение полученных результатов

Таким образом, предложен метод определения относительной влажности на поверхности земли при известном измеренном значении осадженных водяных паров. Предлагаемый метод основан на методе Батлера, позволяющем вычислить показатель  $PWV$  при заданных значениях абсолютной температуры воздуха и парциального давления водяных паров на поверхности земли. Анализ базовых уравнений этого метода позволил предположить, что зависимость  $PWV$  от  $RH$  может иметь экстремальный характер. В процессе поиска результатов известных аналогичных экспериментальных исследований обнаружен факт наличия такой экстремальной зависимости. Форма известных регрессионных уравнений, полученных при исследовании указанной зависимости в виде квадратичного многочлена для

разных зон региона, позволила установить на основе предварительно проводимых измерений  $PWV$  и  $RH$  общую зависимость между  $PWV$  и  $RH$  в виде квадратичного многочлена, преобразованного далее в квадратное уравнение.

Решение этого уравнения дает расчетную формулу для вычисления  $RH$  при известном измеренном значении осадженных водяных паров.

### Основные выводы

Анализ известного метода Батлера позволил предсказать возможность наличия экстремума в функциональной зависимости осадженных водяных паров от относительной влажности на поверхности земли.

Известные регрессионные уравнения в виде квадратичных многочленов, полученных для разных зон исследуемого региона, позволили вывести квадратное уравнение на основе результатов предварительных измерений в этих зонах.

Получено уравнение для вычисления относительной влажности на уровне земли в зависимости от измеренной величины осадженных водяных паров.

### Библиографический список

1. Falaiye O. A., Abimbola O. J., Pinker R. T., Perez-Ramirez D., Willoughby A. A. Multi-technique analysis of precipitable water vapor estimates in the sub-Sahel West Africa // *Heliyon*. 2018. № 4. e00765. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00765
2. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A. AERONET-a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. Vol. 66. P. 1–16.
3. Reagan J. A., Thome K., Herman B., Gall R. Water vapor measurements in the 0.94 micron absorption band: calibration, measurements and data applications // *IEEE 87CH2434-9: Proc. Int. Geosci. Remote. Sens. Symp.* // *J. Appl. Meteorol.* 1987. Vol. 2. P. 776–779.
4. Bruegge C. J., Conel J. E., Green J. S., Margolis J. S., Holm R. G., Toon G. Water vapor column abundance retrievals during FIFE // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 759–768.
5. Smirnov A., Holben B. N., Eck T. F., Dubovik O., Slutsker I. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database // *Remote. Sens. Environ.* 2000. Vol. 73. P. 337–349.
6. Maghrabi A., Al Dajani H. M. Estimation precipitable water vapour using vapour pressure and air temperature in an region in central Saudi Arabia // *J. of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*. 2013. Vol. 14, № 1. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jaubas.2012.11.001
7. Castilla R. M., Plando F. R. P., Vallar E. A., Galvez M. C. D., Morris V. R. Characterization of columnar water vapor measurements and its comparison with model estimates and surface meteorological parameters over manila, philippiness // *Proceedings of the 35th Asian Conference on Remote*



Sensing, Asian Association of Remote Sensing. Myanmar, 2014. P. 231–243.

8. Raj P. E., Devara P. C. S., Saha S. K., Sonbawne S. M., Dani K. K., Pandithurai G. Temporal variations in sun photometer measured precipitable water in near IR band and its comparison with model estimates at a tropical Indian station [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/atm/v21n4/v21n4a1.pdf> (дата обращения: 25.10.2019).

9. Wood W. H., Marshall S. J., Fargey Sh. E. Daily measurements of near-surface humidity from a mesonet in the foothills of the Canadian Rocky Mountains, 2005–2010 [Электронный

ресурс] // Earth Syst. Sci. Data. 2019. № 11. P. 23–34. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-23-2019> (дата обращения: 25.10.2019).

10. Valsson Sh., Bharat Dr. A. Impact of Air Temperature on relative Humidity – A study [Электронный ресурс] // Architecture, Time Space and People. 2011. February. P. 38–40. URL: [https://www.coa.gov.in/show\\_img.php?fid=98](https://www.coa.gov.in/show_img.php?fid=98) (дата обращения: 25.10.2019).

11. Abimbola O. J., Falaiye O. A. Estimation of precipitable water vapour in Nigeria using surface meteorological data // Ife Journal of Science. 2016. Vol. 18, № 2. P. 541–549.

---

**Образец для цитирования:**

Асадов Х. Г., Абдуллаева С. Н., Алиева А. Д. Полуэмпирический метод определения относительной влажности воздуха по результату солнечно-фотометрических измерений осажженных водяных паров // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-3-152-156>

**Cite this article as:**

Asadov H. H., Abdullayeva S. N., Aliyeva A. D. Semi-Empirical Method for Determination of Air Relative Humidity on Results of Sun-Photometric Measurements of Precipitated Water Vapors. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 152–156 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-3-152-156>

---