

ПРЕДЕЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ОДНО- И ДВУХВОЛНОВОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СУММАРНОГО КОЛИЧЕСТВА ВОДЯНОГО ПАРОВ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Р. А. ЭМИНОВ

Архитектурно-строительный университет,
Баку, Азербайджан, e-mail: eminovramiz@rambler.ru

Основываясь на результатах известных модельных исследований спектральной зависимости отражения радиации перистыми облаками исследована потенциально достижимая точность измерения суммарного количества водяных паров в атмосфере с помощью солнечного фотометра.

Показано, что при наличии перистых облаков максимально возможное отношение сигнала к шуму при солнечно-фотометрических измерениях суммарного количества водяных паров соответствует минимально достижимой погрешности измерений, равной 0,04 – 0,05.

Ключевые слова: суммарное количество водяных паров, солнечный фотометр, перистые облака.

On the basis of results of known model researches of spectral dependence of reflection of radiation with cirrus clouds the limiting achievable accuracy of measurements of total water vapor content in atmosphere carried out with Sun photometers is studied.

It is shown, that upon presence of cirrus clouds the maximal possible value of signal-noise ratio in sun photometric measurements of total content of water vapors minimal reachable value of error of measurements, equal to 0,04 – 0,05.

Key words: total content of water vapors, sun photometric, plumose clouds.

Перистые облака формируются при осаждении водных паров на высоте свыше 5000 м в умеренных регионах и свыше 6600 м – в тропических. Их толщина может достигать 100 – 800 м, они покрывают до 25 % всей поверхности Земли и создают эффект нагрева атмосферы.

Как отмечено в [1], при фотометрических измерениях для устранения быстротечного влияния облаков выполняют трехкратные измерения оптической толщины с интервалом 20 с. Считается, что за такой короткий промежуток времени меняется только оптическая толщина пространственно негомогенных облаков. Проблема возникает при гомогенности перистых облаков. В этом случае неизбежна переоценка действительных значений оптической толщины как аэрозоля, так и водяных паров.

При использовании микроволнового радиометра для калибровки солнечного фотометра среднее квадратическое отклонение результатов измерения уменьшается до 3,5 % [1]. Вместе с тем, подобная калибровка солнечного фотометра, показывающая лишь принципиальную возможность устранения влияния перистых облаков, для практики непригодна.

Существуют, по меньшей мере, шесть типов перистых облаков, различающихся как по виду, так и по степени своей изменчивости. Очевидно, что при отсутствии у исследователей радиозондов и микроволновых радиометров для оперативной перекалибровки показаний солнечного фотометра в каждом случае появления новых перистых облаков, будут возникать существенные погрешности измерений, которые должны быть систематизированы и приведены к минимальной величине.

В целом, перистые облака воздействуют на точность фотометрических измерений за счет отражения части исходной солнечной радиации обратно в космос и из-за ослабления исходной радиации оптической толщиной облака.

При одноволновых измерениях количества водяных паров погрешности, возникающие из-за указанных причин, являются жестко коррелированными и должны быть просуммированы алгебраически.

Классическим методом устранения таких погрешностей является двухволновый метод измерений, выполняемый по следующему алгоритму.

Проводится фотометрическое измерение на длине волны $\lambda_1 = 0,94$ мкм, в результате чего получается величина $I(\lambda_1)$.

Осуществляется фотометрическое измерение на длине волны $\lambda_2 = 0,86$ мкм, итогом служит величина $I(\lambda_2)$.

Вычисляется отношение двух полученных результатов измерений.

Отметим, что соотношение γ двух результатов измерений может быть вычислено как

$$\gamma = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} = \frac{I(\lambda_1)k(\lambda_1)}{I(\lambda_2)k(\lambda_2)} \frac{e^{-[\tau_w(\lambda_1)+\beta(\lambda_1)^{-\alpha}+\tau_c]}}{e^{-[\tau_w(\lambda_2)+\beta(\lambda_2)^{-\alpha}+\tau_c]}}, \quad (1)$$

где $I(\lambda_1)$, $I(\lambda_2)$ – интенсивности внеатмосферных солнечных излучений на длинах волн λ_1 , λ_2 ; $k(\lambda_1)$, $k(\lambda_2)$ – коэффициенты отражения перистых облаков на соответствующих длинах волн; $\tau_w(\lambda_1)$, $\tau_w(\lambda_2)$ – оптические толщины суммарных водяных паров; $\beta(\lambda_1)^{-\alpha}$, $\beta(\lambda_2)^{-\alpha}$ – оптические толщины атмосферного аэрозоля; β – аэрозольная мутность атмосферы; α – показатель Ангстрема; τ_c – оптическая толщина перистых облаков.

Известно, что τ_c не зависит от длины волны [2]. В то же время согласно [3, 4] коэффициент отражения или альbedo однократного рассеяния зависит от нее. Например, как показали результаты проведенных в [4] модельных исследований, относительное отражение перистых облаков k зависит как от их оптической толщины, так и от длины волны, т. е. $k = k(\tau, \lambda)$.

На основе графических данных [4] в первом приближении, приняв линейный вид зависимости от длины волны, можно вычислить, что отношение приращений $k' = \Delta k / \Delta \lambda$ при $\Delta \lambda = 0,08$ мкм, составляет

$$|k'| = 0,022/0,9. \quad (2)$$

Если в первом приближении $k(\lambda)$ представить в виде линейной функции, с учетом $\lambda_1 - \lambda_2 = 0,08$ мкм получим

$$\frac{k(\lambda_1)}{k(\lambda_2)} = \frac{k(\lambda_2)}{k(\lambda_2)} - \frac{0,08|k'|}{k(\lambda_2)}. \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) имеем

$$\frac{k(\lambda_1)}{k(\lambda_2)} = 1 - \frac{0,022 \cdot 0,08}{0,9 \cdot k(\lambda_2)},$$

где $k(\lambda_2) = k(\lambda_1) - 0,18|k'| = 4,2 - (0,022/0,9) \cdot 0,18 = 3,76$.

Следовательно,

$$\frac{k(\lambda_1)}{k(\lambda_2)} = 1 - \frac{0,022 \cdot 0,08}{3,76} = 0,948.$$

Таким образом, спектральная зависимость коэффициента отражения перистых облаков приводит к относительной погрешности отношения $k(\lambda_1)/k(\lambda_2)$, равной 0,052, по сравнению с идеальным случаем безоблачного неба, когда $k(\lambda_1)/k(\lambda_2) = 1$.

Рассмотрим, к какой погрешности измерения суммарной величины водяных паров может привести указанная выше погрешность.

В идеализированном случае отсутствия атмосферного аэрозоля из (1)

$$\gamma_n = \frac{I_0(\lambda_1)k(\lambda_1)}{I_0(\lambda_2)k(\lambda_2)} e^{-[\tau_w(\lambda_1) - \tau_w(\lambda_2)]}. \quad (4)$$

Приняв $\tau_w(\lambda_2) = 0$, из (4) получим

$$\tau_w(\lambda_1) = \frac{\ln I_0(\lambda_1)k(\lambda_1)}{\gamma_n I_0(\lambda_2)k(\lambda_2)} = \ln \frac{\ln I_0(\lambda_1)}{\gamma_n I_0(\lambda_2)} + \ln 0,948. \quad (5)$$

Итак, с учетом (5) достижимая минимальная погрешность измерения оптической толщины водяных паров из-за воздействия перистых облаков может быть оценена как

$$\delta_{\min} = \frac{\ln 0,948}{\ln [I_0(\lambda_1)/\gamma_n I_0(\lambda_2)]}. \quad (6)$$

Следовательно, формула (6) позволяет оценить относительную минимально достижимую погрешность измерения оптической толщины водяных паров в атмосфере, обусловленную влиянием водяных паров.

С учетом того, что $\ln 0,948 = -0,0426$, максимально достижимое отношение сигнала к шуму при измерении суммарного количества паров воды не может превышать $\psi_{\max} = \tau_w(\lambda_1)_{\max}/0,0426$, что при $\tau_w(\lambda_1)_{\max} = 1$ соответствует $\psi_{\max} \approx 24$, т. е. потенциальная относительная погрешность таких измерений будет ограничена величиной 0,04 – 0,05.

Таким образом, на основе результатов известных модельных исследований спектральной зависимости отражения радиации перистыми облаками исследована потенциально достижимая точность измерения суммарного количества водяных паров в атмосфере с помощью солнечного фотометра. Показано, что при наличии перистых облаков

максимально возможное отношение сигнала к шуму при солнечно-фотометрических измерениях не превышает 24, что соответствует минимально достижимой относительной погрешности измерений, равной 0,04 – 0,05.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Halothore R. N. e. a.** Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. [электрон. ресурс]. <http://www.ecd.bnl.gov/abstracts/water940.pdf> (дата обращения 20.02.2012 г.)
2. **McGill M. e. a.** Cloud Physics Lidar: instrument description and initial measurement results // Appl. Opt. 2002. V. 41. N 18. P. 3725 – 3734.
3. **Wyser K., Ping Yang.** Average ice crystal size and bulk short-wave single-scattering properties of cirrus clouds. [электрон. ресурс]. http://geotest.tamu.edu/userfiles/229/wyser_yang.pdf (дата обращения 20.02.2012 г.)
4. **Barkey B., Liou K. N.** Visible and near infrared reflectances measured from laboratory ice clouds // Appl. Opt. 2008. V. 47. N 13. P. 2533 – 2540.

Дата принятия 20.03.2012 г.

