

## К ВОПРОСУ О GPS ИЗМЕРЕНИЯХ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ОСАЖДАЕМОЙ ВОДЫ

Р. А. Эминов, Э. И. Магеррамов

Национальное аэрокосмическое агентство, Азербайджан, г. Баку

Получена 7 июля 2012 г.

**Аннотация.** Показано, что существующие методики GPS измерений общего количества осаждаемой воды не учитывают закономерность изменения оптической толщины облаков нижнего яруса в зависимости от географической широты. Получены формулы для вычисления общего количества осаждаемой воды при проведении GPS измерений в условиях преобладания облаков нижнего яруса в зависимости географической широты.

**Ключевые слова:** общее количество осаждаемой воды, влажная задержка, облака, GPS измерения, атмосфера, оптическая толщина.

**Abstract:** It is shown, that existing methods of GPS measurements of total amount of precipitable water doesn't accounted for regularities of variation of low clouds optical depth depending on latitude. The formulas for calculation of total amount of precipitable water during GPS measurements in condition of low clouds prevalence in dependence of latitude are given.

**Keywords:** total amount of precipitable water, wet delay, clouds, GPS measurements, atmosphere, optical depth.

Как отмечено в работе [1], поля влажности в тропосфере имеют высокую степень временной и пространственной изменчивости. Наземные методы измерения влажностных параметров с помощью радиозондов имеют ограниченное применение из-за трудоемкости их реализации, а спутниковые измерения ограничиваются верхней и средней тропосферой. Наземные измерения с помощью солнечных фотометров подвержены влиянию атмосферного аэрозоля и требуют тщательную калибровку этих приборов. С

учетом вышесказанного возможность измерения общего количества осаждаемой воды в атмосфере с помощью GPS технологий вызывает несомненный интерес. Осуществление измерений с помощью наземных метеорологических GPS сетей (не подверженных влиянию облаков и дождей) позволяет получить информацию с высоким временным разрешением. Хорошо известно, что разные атмосферные факторы воздействуют на сигналы GPS навигационных систем с частотой 1,2 – 1,5 ГГц, вызывая их временную задержку. Эта задержка, пересчитанная в зенитном направлении называется зенитной тропосферной задержкой и физически отображает то время, которое затрачивается на прохождение волной того приращения маршрута прохождения волны, которая возникает из-за рефракции лучей. Эта задержка обычно делится на сухую гидростатическую зенитную задержку, которую можно отнести в разряд систематических погрешностей и влажностную тропосферную задержку.

В целом, зенитная тропосферная задержка  $ZTD$  может быть выражена следующей формулой [1]

$$ZTD = f_1(\varphi, H)P_s + f_2(T_m)PW, \quad (1)$$

где  $\varphi$  - широта;  $H$  - высота GPS антенны;  $P_s$  - поверхностное давление;  $PW$  - общее количество осаждаемой воды;  $T$  - колонная средняя температура, взвешенная по содержанию водяных паров.

Если учесть, что величина  $T_m$  может быть определена по значению температуры на поверхности  $T_s$ , то проведя измерения  $P_s$  и  $T_s$  средствами метеостанций, а также вычислив величину зенитной тропосферной задержки  $ZTD$ , можно определить значение  $PW$ , величина которой имеет интервал значений 0-70 мм.

Как было показано в работе [2], зависимость между общим количеством осаждаемой воды и зенитной влажной задержкой  $ZWD$  может быть выражена следующим выражением

$$ZWD = (a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_s - T_{av} ; \\ T_{av} &= 283,49 \text{ К}; \\ a_0 &= 6,458 \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}; \\ a_1 &= -1,78 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ К}^{-1}; \\ a_2 &= -2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ К}^{-2}. \end{aligned}$$

Проанализируем влияние облаков на точность измерений общего количества осаждаемой воды с помощью GPS.

Известно [3], что задержка из-за влияния облаков может быть вычислена по формуле

$$\tau_{z.m.} = 1,45 \cdot 10^{-3} \int_0^{z_{max}} CW \cdot \rho_{air} dz, \quad (3)$$

где  $CW$  - водное содержание облаков (кг/кг) в атмосфере;  $\rho_{air}$  - плотность воздуха.

Посмотрим как изменяется водное содержание облаков в зависимости от температуры и географической широты.

Как показано в работе [4], в результате проведенных исследований выявлено, что логарифмическая производная оптической толщины низковысотных облаков  $\tau_{cl}$  по температуре имеет двухполярную величину. В пределах географических широт от  $-40$  до  $+40$ , указанная производная имеет отрицательную величину, изменяющуюся от  $0$  до  $-0,17$ . Следовательно, для местности с широтой  $\varphi$  имеем

$$\frac{d \ln \tau_{cl}}{dT} = -a_1 \text{ если } -40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ, \quad (4)$$

$$\frac{d \ln \tau_{cl}}{dT} = -a_2 \text{ если } -40^\circ \geq \varphi \geq 40^\circ. \quad (5)$$

Соответствующий график зависимости  $\frac{d \ln \tau_{cl}}{dT}$  от  $\varphi$  показано на рис. 1.

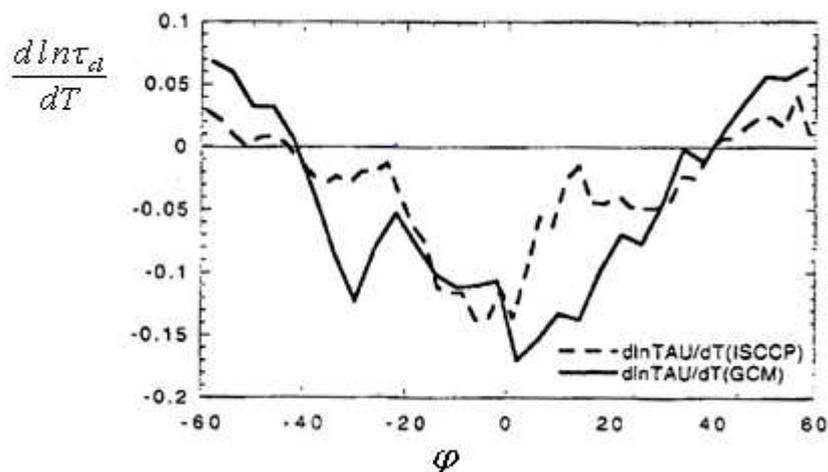


Рис. 1. Распределение логарифмической производной оптической толщины низковысотных облаков от температуры по разным широтам.

Отметим, что низковысотными облаками считаются те облака, которые находятся на высоте до 2,5 км, к которым относятся:

- слоисто-кучевые облака;
- слоистые облака;
- слоисто-дождевые облака.

Согласно [4], оптическая толщина облаков  $\tau_{cl}$  определяется как

$$\tau_{cl} = \frac{3 dz \cdot CW'}{2 \rho_w R_e}, \quad (6)$$

где  $CW'$  - водность облаков в  $\text{г/м}^3$ ;  $dz$  - физическая толщина облака;  $\rho_w$  - плотность жидкой воды;  $R_e$  - эффективный радиус водных капель.

С учетом выражений (4), (5) и (6) получим

$$\frac{d \ln \left[ \frac{3 dz \cdot CW'}{2 \rho_w R_e} \right]}{dT} = \begin{cases} -b_1 & \text{при } -40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ \\ -b_2 & \text{при } -40^\circ \geq \varphi \geq 40^\circ \end{cases}. \quad (7)$$

Интегрирование выражения (7) дает

$$CW = \frac{1}{k} e^{-a_1 T} \quad \text{при } -40^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ, \quad (8)$$

$$CW = \frac{1}{k} e^{-a_2 T} \quad \text{при } -40^\circ \geq \varphi \geq 40^\circ, \quad (9)$$

Установим следующую связь между водным содержанием облаков  $CW$  (кг/кг) и водностью  $CW'$  (г/м<sup>3</sup>)

$$CW = \chi \cdot CW'. \quad (10)$$

С учетом выражений (3), (8), (9), (10) имеем

$$\tau_{z.m.} = \frac{1,45 \cdot 10^{-3}}{k} \cdot \chi \int_0^{z_{max}} e^{-b_1 T} \cdot \rho_{air} dz = \frac{1,45 \cdot 10^{-3} \cdot \chi \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0}{k}, \quad (11)$$

где

$$\rho_0 = \int_0^{z_{max}} \rho_{air} \cdot dz. \quad (12)$$

Дифференцируя выражения (11) по  $T$  получим

$$\frac{d\tau_{z.m.}}{dT} = - \frac{b_1 \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} \chi \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0}{k}. \quad (13)$$

В формуле (13) переходя от знака дифференциала в приращения получим

$$\Delta_{z.m.} = - \frac{b_1 \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} \chi \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0}{k} \Delta T. \quad (14)$$

С учетом выражений (2) и (14) суммарную задержку определим следующим образом

$$\sum \tau = (a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2) \cdot PW - b_1 \cdot b_{10} \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0 \Delta T, \quad (15)$$

где

$$b_{10} = \frac{1,45 \cdot 10^{-3} \cdot \chi}{k}.$$

Из выражения (15) получаем формулу для вычисления общего количества осаждаемой воды

$$PW = \frac{\sum \tau + b_1 \cdot b_{10} \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0 \Delta T}{a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2}. \quad (16)$$

Таким образом, как видно из формулы (16) зависимость результата измерения общего количества осаждаемой воды от температуры неоднозначна и определяется знаком коэффициента  $b_1$ . Согласно графикам, приведенным на рис. 1 в пределах широт  $-40^\circ \div 40^\circ$  этот коэффициент имеет отрицательное

значение, т.е. формула (16) верна именно в этом диапазоне географических задач. Для широт  $\varphi > 40^\circ$ ;  $\varphi < -40^\circ$  формула (16) приобретает следующий вид

$$PW = \frac{\sum \tau - b_1 \cdot b_{10} \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0 \Delta T}{a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2}. \quad (17)$$

Таким образом, с учетом выражений (15) и (16) результат GPS измерений общего количества осаждаемой воды можно представить в виде

$$PW = PW_1 - \Delta PW_1, \quad (18)$$

где

$$PW_1 = \frac{\sum \tau}{a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2}, \quad (19)$$

$$\Delta PW_1 = \frac{b_1 \cdot b_{10} \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0 \Delta T}{a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2}. \quad (20)$$

Отметим, что формулы (18)-(20) верны для географических широт  $-40^\circ < \varphi < 40^\circ$ .

Для географических широт  $\varphi > 40^\circ$ ;  $\varphi < -40^\circ$  формула (20) приобретает следующий вид

$$\Delta PW_2 = -\frac{b_1 \cdot b_{10} \cdot e^{-b_1 T} \cdot \rho_0 \Delta T}{a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2}. \quad (21)$$

При этом следует иметь в виду, что формулы (18) – (20) верны для случая доминирования в атмосфере облаков нижнего яруса.

Таким образом, можно заключить, что при проведении GPS измерений общего количества осаждаемой воды в широтах  $-40^\circ < \varphi < 40^\circ$  и  $\varphi > 40^\circ$ ;  $\varphi < -40^\circ$  при преобладании в атмосфере облаков нижнего яруса следует ожидать погрешностей измерения с отрицательным знаком и положительным знаком соответственно.

Говоря иными словами в широтах  $\varphi > 40^\circ$ ;  $\varphi < -40^\circ$  следует ожидать завышенные оценки по результатам измерений, а в широтах  $\varphi < 40^\circ$ ;  $\varphi > -40^\circ$  вероятны заниженные оценки.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Показано, что существующие методики GPS измерений общего количества осаждаемой воды не учитывают закономерность изменения оптической толщины облаков нижнего яруса в зависимости от географической широты.

2. Получены формулы для вычисления общего количества осаждаемой воды при проведении GPS измерений в условиях преобладания облаков нижнего яруса в зависимости географической широты.

### **Литература**

1. Macpherson S., Deblonde G., Aparicio J., Casati B. Impact of ground-based observations on the Canadian regional analysis and forecast system. Environment Canada, Dorval, QC, Canada.  
<http://www>.
2. Haase J., Ge M., Vedel H., Calais E. Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the Western Mediterranean. 2002, Bull. At. Meteor. Soc.  
<http://www>.
3. Boccolari M., Fazlagic S., Santangelo R. GPS coordinate estimates by a priori tropospheric delays from NWP using ultra-rapid orbits //Annals of geophysics, 2006, Vol. 49, No. 4/5, pp. 881-889.
4. Tselioudis G., DelGenio A.D., Je W.K., Yao M.-S. Temperature dependence of low optical thickness in the GISS GCM: contributing mechanisms and climate implications // Journal of Climate, 1998, Vol. 11, No. 12, pp. 3268-3281.