

Экспериментальная оценка параметров алгоритма расчета влажностной тропосферной задержки и их влияние на точность расчета

© Г. Н. Ильин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Алгоритм вычисления влажностной тропосферной задержки (ВТЗ) по данным радиометра водяного пара (РВП) содержит ряд параметров, рассчитываемых на основе определенных моделей. При сравнении вычисленных по исходному алгоритму значений ВТЗ с опорным рядом ВТЗ, полученным из полных тропосферных задержек, рассчитываемых международной службой IGS (International GNSS Service), проявляется увеличение среднего значения разности ВТЗ в летнее время до 6 мм относительно зимнего. Анализ данных РВП показал, что использование в алгоритме расчета ВТЗ-коэффициентов, значения которых найдены экспериментально, позволило практически парировать данный эффект.

В работе представлена методика определения коэффициентов, вид их зависимости от интегрального содержания водяного пара в атмосфере, а также результаты сравнения ВТЗ РВП с опорным рядом на примере обсерваторий РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Ключевые слова: радиометр водяного пара, атмосфера, радиояркостьная температура, тропосферная задержка, ГНСС.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.50.36-43>

Введение

Алгоритм вычисления ВТЗ базируется на результатах измерений радиояростной температуры (РЯТ) излучения атмосферы, которые получены с помощью РВП. Измерения проведены на двух частотах в окрестностях линии излучения водяного пара 22.235 ГГц [1]. По измеренным значениям РЯТ вычисляются интегральные коэффициенты поглощения радиосигнала (оптическая толщина) $\tau(\vartheta_1)$, $\tau(\vartheta_2)$ на рабочих частотах РВП. Далее составляется система уравнений, связывающая посредством определяемых (расчетных) коэффициентов значения поглощения в водяном паре с интегральным влагосодержанием (ИВС) в вертикальном атмосферном столбе единичной площади Q (г/см²), водностью облаков W (кг/м²) [2, 3]:

$$\begin{aligned}\Delta\tau(\vartheta_1) &= \varphi(\vartheta_1) \cdot Q + \Psi_w(\vartheta_1, T_0) \cdot W \\ \Delta\tau(\vartheta_2) &= \varphi(\vartheta_1) \cdot Q \cdot K_1 + \Psi_w(\vartheta_2, T_0) \cdot W,\end{aligned}\tag{1}$$

где

$\Delta\tau(\vartheta_{1,2})$ — удельные коэффициенты поглощения в водяном паре (Неп);

$\Delta\tau(\vartheta_{1,2}) = \tau(\vartheta_{1,2}) - \tau_{02}(\vartheta_{1,2})$;

$\varphi(\vartheta_1)$ — частотно-зависимый удельный коэффициент поглощения в водяном паре (Неп·см²/г);

$\Psi_w(\vartheta_{1,2}, T_0)$ — удельные коэффициенты поглощения в капельной воде (Неп·м²/кг);

K_1 — отношение поглощения в водяном паре на частотах РВП;

T_0 — температура окружающей среды, К;

$\tau_{O_2}(\vartheta_{1,2})$ — поглощение, обусловленное атмосферным кислородом, текущие значения которого оцениваются по приземным метеопараметрам согласно [4];

Коэффициенты $\varphi(\vartheta_1)$, K_1 — константы, функция $\Psi_w(\vartheta_{1,2}, T_0)$ предполагаются известными. По найденным из (1) значениям Q и W рассчитываются значения ВТЗ [3].

Очевидно, что разности оптических толщин в левой части (1) зависят от используемой в расчетах модели поглощения радиосигнала в атмосферном кислороде, а также включают в себя ошибки измерения РЯТ, связанные, например, с конструктивными особенностями радиометрических блоков РВП. Эти ошибки обусловлены зависимостью шумовой температуры входного СВЧ-тракта РВП от температуры окружающей среды [5]. Подобная зависимость может быть связана с недостаточно эффективной работой системы термостабилизации входного тракта СВЧ-блоков РВП, что приводит к необходимости межсезонного мониторинга одного из важнейших параметров алгоритма расчета ВТЗ — калибровочного сигнала радиометрического блока. Учет при расчете ВТЗ зависимости калибровочных сигналов от температуры окружающей среды существенно улучшает согласие значений ВТЗ с опорным рядом [6].

Как показал анализ полученных с помощью РВП данных, «модельные» значения коэффициентов $\varphi(\vartheta_1)$, K_1 целесообразно использовать в качестве первого приближения в алгоритме расчета ВТЗ, поскольку, как показало сравнение измеренных значений ВТЗ с опорным рядом ВТЗ, их расхождение в летний период достигает 67 мм [7]. Для устранения данного эффекта необходимо разработать методику коррекции коэффициентов в алгоритме расчета ВТЗ. Более точные значения коэффициентов поглощения, учитывающие реальные параметры РВП и места его размещения, следует определять на основе экспериментальных данных. В работе приводится методика оценки коэффициентов $\varphi(\vartheta_1)$, K_1 и влияние полученных оценок на точность расчета ВТЗ.

Методика экспериментального определения коэффициентов

Методика экспериментального определения коэффициентов (1) основана на сравнении результатов радиометрических измерений ИВС с опорным рядом, который принято считать наиболее точным.

Для обсерваторий РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» существует возможность построения опорного ряда ИВС (Q_s) на основе данных о полной тропосферной задержке (ZPD, tropospheric zenith path delay), публикуемых международной ГНСС-службой (IGS, International GNSS Service) [8]. Воспользуемся опорным рядом для оценки коэффициента $\varphi(\vartheta_1)$.

Текущие значения Q_s (г/см²) вычислялись стандартным способом [3, 9]:

$$Q_s = (ZPD - DPD) / \left(0.109 + \frac{1730}{T_m} \right), \quad (2)$$

где DPD (dry troposphere path delay, см) — «сухая» или гидростатическая компонента тропосферной задержки, вычисленная согласно [10];

T_m (К) — средневзвешенная (по высотному распределению абсолютной влажности) температура тропосферы, параметризованная по данным температурного профилера в виде линейной функции приземной температуры воздуха [3].

Тогда в условиях ясной атмосферы (когда можно полагать $W \approx 0$) в соответствии с (1):

$$\varphi(\vartheta_1) \approx \frac{\Delta\tau(\vartheta_1)}{Q_s} \quad (3)$$

С целью максимально точного определения поглощения радиосигнала на частотах РВП и минимизации влияния ошибок измерения РЯТ, связанных с особенностями конструкции РВП, в расчетах учитывалась зависимость калибровочного сигнала от температуры, найденная по результатам обработки разрезов атмосферы.

На рис. 1. в качестве примера представлена зависимость $\Delta\tau(\vartheta_1)$ от Q_s для обсерватории «Зеленчукская», полученная на основе данных РВП и ГНСС 2018 г.

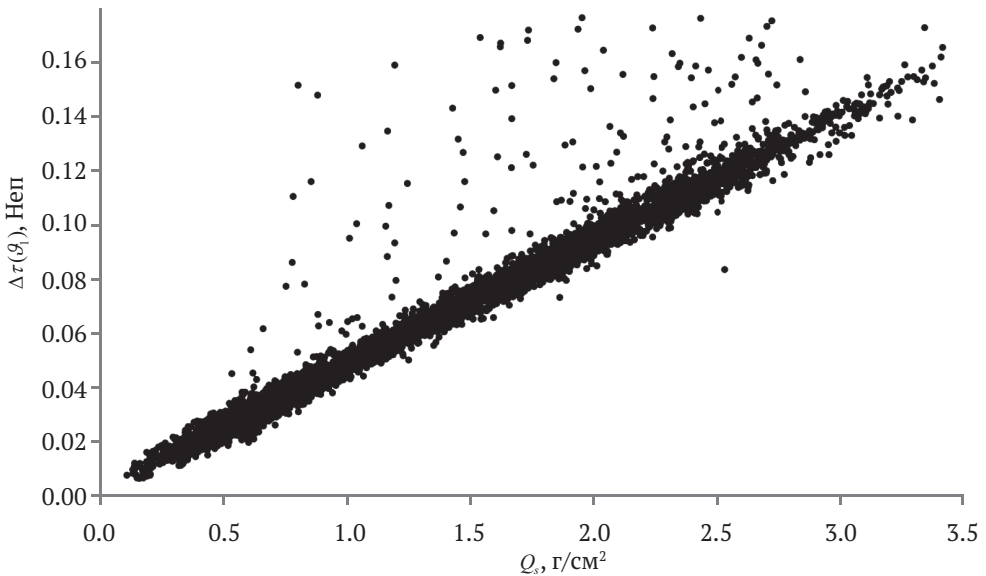


Рис. 1. Обсерватория «Зеленчукская», зависимость поглощения $\Delta\tau(\vartheta_1)$ от Q_s

Из приведенного графика следует, что зависимость поглощения в водяном паре от ИВС в «сухой» период аппроксимируется прямой, а искомый коэффициент принимает постоянное значение: $\varphi(\vartheta_1) \approx 0.0468$. Найденное значение коэффициента используется в алгоритме расчета ВТЗ.

Аналогичным образом полагая $W = 0$, из (1) можно найти $K_1(Q_s)$:

$$K_1(Q_s) = \Delta\tau(\vartheta_2) / \Delta\tau(\vartheta_1) = 1 - \frac{\Delta\tau(\vartheta_1) - \Delta\tau(\vartheta_2)}{\varphi(\vartheta_1) \cdot Q_s} \quad (4)$$

На рис. 2 приведена зависимость $K_1(Q_s)$, построенная по результатам измерений РВП 2018 г. в обсерваториях «Зеленчукская» (слева) и «Бадары» (справа), проведенных в условиях малооблачной сухой погоды; зависимость удовлетворяет формальному критерию: $W < 0.1 \text{ кг/м}^2$.

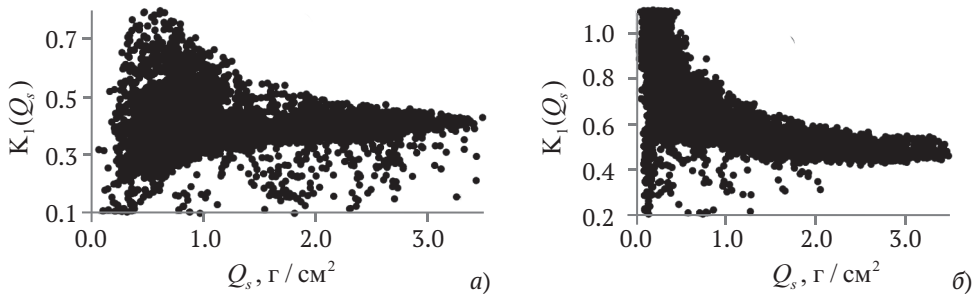


Рис. 2. Зависимость K_1 от ИВС ГНСС, обсерватории: а – «Зеленчукская», б – «Бадары», 2018 г.

Из рис. 2 видно, что при значениях $Q_s > 1 \text{ г/см}^2$, характерных для летнего периода, среднее значение K_1 практически не изменяется (см. табл.), в отличие от зимнего периода времени, когда $Q_s < 1 \text{ г/см}^2$. Обычно в алгоритме расчета ВТЗ K_1 полагается константой [2, 3]. Зависимость $K_1(Q_s)$ параметризуется в виде полинома третьей/четвертой степени. Кривая вписывается в основной массив точек, а выпадающие точки игнорируются. Найденная зависимость $K_1(Q)$ заносится в модель расчета ВТЗ. Таким образом, в РВП расчет параметров Q , W и ВТЗ происходит за две итерации. На первом шаге находится значение ВТЗ, когда $K_1 = \text{const}$. А на втором – по найденному на первом шаге Q с использованием параметризованной зависимости $K_1(Q)$ рассчитывается уточненное значение ВТЗ.

Т а б л и ц а

Значения коэффициентов алгоритма расчета ВТЗ

Наименование пункта	$\varphi(\vartheta_1)$	$K_1(\text{лето})$
«Зеленчукская»	0.0468	0.38
«Бадары»	0.0476	0.48
«Светлое»	0.0435	0.43

Расчет зависимости $K_1(Q)$, выполненный в соответствии со стандартной моделью затухания в атмосферных газах [4], показал увеличение значения коэффициента K_1 на ~5 % в зимний период по отношению к летнему значению. Отличие экспериментальных данных от стандартной модели для обсерватории «Зеленчукская» (Рис. 2) связано, по-видимому, с точностью модели поглощения в кислороде и возрастающими (при малых Q) ошибками измерения поглощения в водяном паре. Экспериментально найденные значения коэффициентов $\varphi(\vartheta_1)$ и K_1 (лето), представленные в таблице, и вид зависимости $K_1(Q_s)$ (см. рис. 2) отличаются для различных образцов РВП.

Оценка точности расчетов ВТЗ

Рассмотрим влияние уточненных значений коэффициентов на расчетные значения ВТЗ на примере данных РВП обсерватории «Бадары» за 2018 г. С этой целью построим разность значений ВТЗ, полученных РВП стандартным способом с использованием постоянных значений $\varphi(\vartheta_1)$, K_1 (лето) и с учетом параметризованной зависимости $K_1(Q)$ (рис. 3). Из рис. 3 видно, как сказывается на ВТЗ различие летнего и зимнего значений K_1 . В летний период разность ВТЗ минимальна. В зимний период поправка времени к значениям ВТЗ может достигать 2–3 мм (при увеличении K_1 ВТЗ также увеличивается). В результате согласованность с опорным рядом ВТЗ соответственно улучшается.

Точность расчета ВТЗ РВП оценим по результатам сравнения с опорным рядом ВТЗ ГНСС. На рис. 4 представлены разности ВТЗ РВП и ГНСС, рассчитанные стандартным методом, при постоянных значениях коэффициентов $\varphi(\vartheta_1)$, K_1 (лето) и калибровочном сигнале. В этом случае на кривой разности значений ВТЗ наблюдается характерный «изгиб», приходящийся на летние месяцы. В зимний период просматривается постоянное отрицательное смещение основного массива точек.

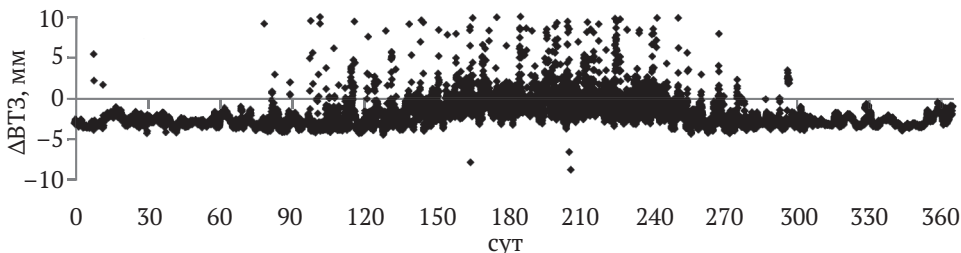


Рис. 3. Обсерватория «Бадары», 2018 г.; Δ ВТЗ — разность значений ВТЗ РВП и опорного ряда при условии $K_1 = \text{const}$ и $K_1 = K_1(Q)$

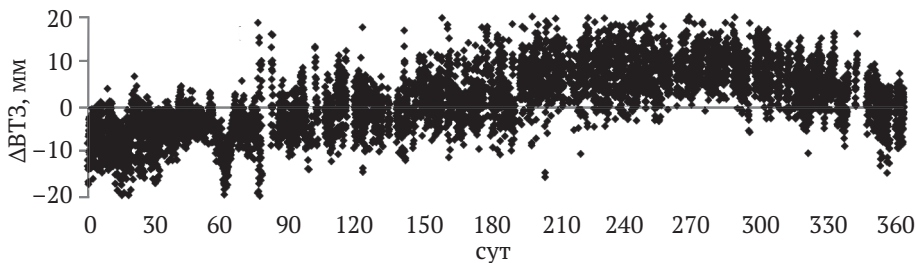


Рис. 4. Обсерватория «Бадары», 2018 г.; Δ ВТЗ — разность значений ВТЗ РВП и опорного ряда при постоянных значениях коэффициентов; интервал осреднения — 60 мин

Учет в алгоритме расчета ВТЗ экспериментально найденной температурной зависимости калибровочного сигнала, о чем говорилось выше, позволил практически устранить «летний» изгиб, а параметризованная зависимость $K_1(Q)$ уменьшила разность ВТЗ в зимний период. Результат сравнения ВТЗ с учетом экспериментальных данных приведен на рис. 5.

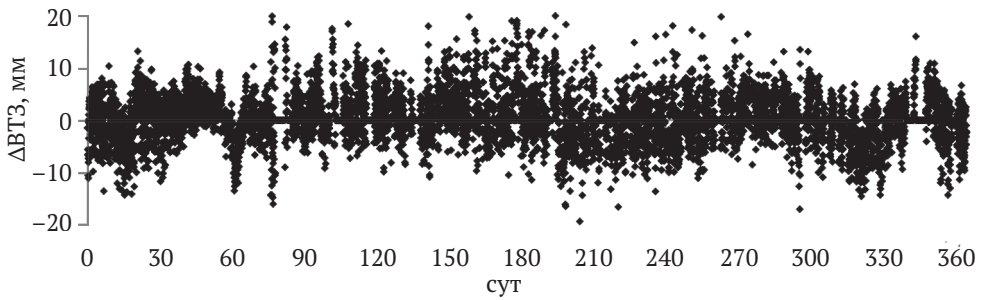


Рис. 5. Обсерватория «Бадары», 2018 г; $\Delta ВТЗ$ — разность значений ВТЗ РВП и опорного ряда; коэффициенты алгоритма — «экспериментальные»; интервал осреднения — 60 мин

Из рис. 5 видно, что использование экспериментальных значений коэффициентов существенно улучшает согласованность значений ВТЗ РВП с опорным рядом на сезонных интервалах времени. В отличие от рис. 4, на рис. 5 отсутствует явно выраженное сезонное смещение. Среднее значение разности ВТЗ, определяемое на сезонных интервалах времени, близко к нулю. Следует отметить, что основной массив точек на рис. 5, полученный в условиях отсутствия осадков, укладывается в диапазон значений ± 15 мм. Выбросы за пределы указанного интервала относятся к неблагоприятным атмосферным условиям в виде дождевых осадков или мокрого снега. В обозначенные периоды точность определения ВТЗ резко падает, вплоть до неприемлемых значений (более 20 мм), которые должны исключаться из рассмотрения.

На суточных временных интервалах (рис. 6) разность значений ВТЗ РВП и ГНСС демонстрирует наличие относительно короткопериодических вариаций (нижняя кривая). По сравнению с ВТЗ РВП (сплошная кривая), данные вариации порождаются в том числе значительной случайной ошибкой ВТЗ опорного ряда (пунктирная кривая вверху). Среднее значение и СКО разности ВТЗ (нижняя кривая) составляют в приведенном примере 1.1 мм и 3.8 мм соответственно. В другие периоды времени среднее значение может изменяться в интервале $\pm(5-6)$ мм, а СКО разности сохраняется на уровне ~ 4 мм (рис. 5). Приведенные оценки справедливы при отсутствии осадков. Причина возникновения короткопериодических вариаций (несколько суток) требует дополнительного изучения.

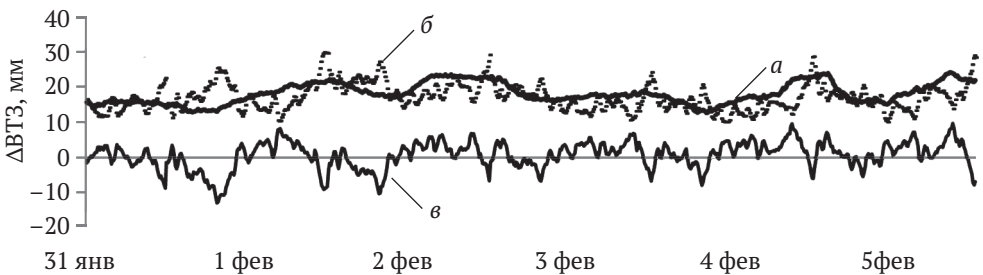


Рис. 6. Обсерватория «Бадары», 2018 г: *a* — ВТЗ РВП; *б* — ВТЗ ГНСС; *в* — разность ВТЗ РВП и ВТЗ ГНСС; интервал осреднения 5 мин

Заключение

Применение в алгоритме расчета ВТЗ экспериментально найденных значений коэффициентов позволило улучшить согласованность ВТЗ РВП с опорным рядом ВТЗ. Практически исключена систематическая разность значений, проявляющаяся на межсезонных интервалах. На коротких временных интервалах разность значений ВТЗ находится на миллиметровом уровне.

В условиях отсутствия жидких осадков абсолютное значение разности ВТЗ РВП и ГНСС находится в пределах 10–15 мм.

Причины возникновения мелкомасштабных вариаций разности ВТЗ РВП и ВТЗ ГНСС на интервале нескольких суток требуют дальнейшего изучения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Литература

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 210–215.
2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. — М.: Наука, 1974. — С. 188.
3. Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом. Известия высших учебных заведений // Изв. вузов. Радиофизика. — Н.Н.,: ННГУ, 2017. — Т. 60, № 4. — С. 326–335.
4. Рек. МСЭ-R P.676-10. Серия Р. Распространение радиоволн // МСЭ. 09.2013. — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-R.pdf (дата обращения 28.12.2018).
5. Быков В. Ю., Дугин М. В., Ильин Г. Н. Анализ вариаций параметров радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46 — С. 108–116.
6. Ильин Г. Н. Калибровочные сигналы радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 57–67.
7. Суворкин В. В., Ильин Г. Н., Курдубов С. Л., Гаязов И. С., Быков В. Ю. О точности определений тропосферной задержки сигнала // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 100–107.
8. Trop_zpd. URL: ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/trop_zpd/2018/ (дата обращения 28.05.2019).
9. Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., Ware R. H. GPS Meteorology: Remote Sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System // Journal of Geophysics, Res. — 1992. — Vol. 97, no. D14. — P.15787–15801.
10. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series /ed. by Henriksen S. W., Mancini A., Chovitz B. H. — 1972. — Vol. 15. — P. 247–251.

Accuracy of Calculations Improved by the Adjusted Parameters for the Algorithm to Calculate the Tropospheric Wet Delay: experimental evaluation

G. N. Ilin

We calculate tropospheric wet delays (TWD) from our water vapor radiometer's (WVR) measurements using an algorithm that requires a number of parameters to have been obtained from a few experimental simulation models. We compared the TWD values obtained from our previously used algorithm and the full TWD reference series that had been published by the International GNSS Service (IGS). It showed us about 6 mm growth in the average TWD difference in summer as compared to its winter figures. This negative effect was removed almost completely by the TWD coefficients which had been calculated experimentally in order to use them in the WVR data analysis algorithm.

Our paper describes the method to produce these coefficients, explains the type of their dependence on the atmospheric integral water vapor content and shows the figures obtained as a result of the WVR's TWD and the IGS reference series compared.

Keywords: water vapor radiometer, radiative brightness temperature, tropospheric delay, GNSS.