

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.2>

УДК: 538.566

ЗЕНИТНАЯ ТРОПОСФЕРНАЯ ЗАДЕРЖКА ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОМЕТРОМ ВОДЯНОГО ПАРА В ПУНКТЕ BADG (БАДАРЫ, РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

М. Г. Дембелов

**Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, г. Улан-Удэ, ул.
Сахьяновой, 6**

Статья поступила в редакцию 31 ноября 2021 г.

Аннотация. Выполнено сравнение значений полной зенитной тропосферной задержки (ZTD), выявленных по данным наблюдений спутниковой навигационной системы GPS и измерений микроволновым радиометром водяного пара (МРВП) в пункте постоянных измерений BADG, расположенного на территории обсерватории Института прикладной астрономии РАН «Бадары». GPS антенна, прибор МРВП и метеостанция расположены в непосредственной близости друг от друга. Это значительно повлияло на точность обработанных данных. Отличия значений полной зенитной тропосферной задержки, полученных по GPS наблюдениям и измерениям микроволновым радиометром водяного пара, проанализированы с точки зрения средних и стандартных отклонений и коэффициента взаимной корреляции. Сравнение результатов за 2020 г. показало очень хорошее согласие. В летнее время среднее отклонение разницы данных ZTD по GPS и МРВП наблюдениям составило около 0,63% от среднего летнего значения ZTD, коэффициент взаимной корреляции между данными составил $K = 0,85$. В зимнее время среднее отклонение разницы составило около 0,21% от среднего зимнего значения ZTD, коэффициент взаимной корреляции между данными составил $K = 0,93$. Показана высокая

степень достоверности данных по ZTD и влагосодержанию тропосферы, полученных методом постоянных GPS измерений.

Ключевые слова: GPS измерения, тропосферная задержка, радиометр водяного пара, влагосодержание тропосферы

Abstract. A comparison was carried out of the values of the total zenith tropospheric delay (ZTD) revealed from the observations of the GPS satellite navigation system and measurements by a microwave radiometer of water vapor (MRWV) at the BADG permanent measurement point located on the territory of the “Badary” Observatory of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences. GPS antenna, MRWV device and meteorological station are located in close proximity to each other. This significantly affected the accuracy of the processed data. The differences in the values of the total zenith tropospheric delay obtained from GPS observations and measurements with a microwave radiometer of water vapor are analyzed in terms of mean and standard deviations and the coefficient of cross-correlation. Comparison of the results for 2020 year showed very good agreement. In summer, the BIAS of the difference between the ZTD data from GPS and MRWV observations is about 0.63% of the average summer ZTD value, the cross-correlation coefficient between the data is $K = 0.85$. In winter, the BIAS of the difference was about 0.21% of the average winter value of ZTD, the cross-correlation coefficient between the data is about $K = 0.93$. A high degree of reliability of data on ZTD and tropospheric moisture content obtained by continuous GPS measurements is shown.

Key words: GPS measurements, tropospheric delay, microwave water vapor radiometer, tropospheric moisture content

Введение.

Спутниковая система глобального позиционирования GPS активно используется в решении задач, связанных с зондированием атмосферы. Измеряемая псевдодальность от спутника до приемника, расположенного на земной поверхности, помимо реального расстояния учитывает погрешности, связанные с орбитальной ошибкой, многолучевостью, шумовым эффектом

приемника и др. [1]. Существенными причинами погрешности являются задержки сигналов в нижней нейтральной части атмосферы [2]. Тропосферной задержкой принято считать задержку сигналов в нижней нейтральной части атмосферы, она является функцией давления, температуры и упругости водяного пара. В зенитном направлении она принимает минимальное значение и носит название полная зенитная тропосферная задержка (ZTD). Гидростатическую («сухую») составляющую полной зенитной тропосферной задержки (ZHD) можно определить по приземным значениям атмосферного давления [3]. Негидростатическая компонента тропосферной задержки практически пропорциональна содержанию водяного пара, она именуется «влажной» тропосферной задержкой.

GPS наблюдение позволяет непрерывно получать данные о зенитной тропосферной задержке сигналов (ZTD) [4, 5]. Это очень удобный в практическом отношении метод наблюдения, поскольку он не требует существенных энергозатрат, не подвержен погодным аномалиям (шторм, сильный дождь, низкие температуры), приемники имеют портативный размер. В отличие от аэрологических наблюдений зондирование атмосферы методом GPS измерений не позволяет получать вертикальные тропосферные профили. Зато GPS метод позволяют получать непрерывные временные ряды данных, запуски же радиозондов выполняются, как правило, только два раза в сутки.

Суммарное влагосодержание в виде водяного пара в условном вертикальном столбе (IWV) в основном определяется в тропосфере. Измерение микроволновыми радиометрами водяного пара это наиболее точный метод определения IWV. Успешное использование МРВП сильно зависит от наличия атмосферных осадков и облаков, наиболее достоверные измерения получаются в безоблачную погоду. Значения IWV также определяются посредством запусков радиозондов, которые в первую очередь используются для измерений метеорологических параметров на разных высотных уровнях. Радиозондирования и измерения МРВП могут быть использованы для независимой проверки полученных данных по ZTD посредством GPS измерений.

1. Тропосферная задержка по данным GPS измерений и приземной метеорологии

Зондирование атмосферы сигналами глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) позволяет непрерывно получать значения полной зенитной тропосферной задержки и суммарного влагосодержания нижней атмосферы. Фазовая задержка Φ сигналов GPS в виде интеграла фазового показателя преломления учитывает физические свойства ионосферы и нижней нейтральной атмосферы. Она представляется следующим выражением [6, 7]:

$$\Phi = \Phi_0 + r + I + STD + \Delta r + c(\Delta t_{rec} + \Delta t_{sat} + \Delta t_{rel}) + \varepsilon, \quad (1)$$

где Φ_0 – фазовая константа; r – расстояние от спутника до приемника; I – ионосферная задержка; STD – наклонная тропосферная задержка; Δr – дополнительные поправки к расстоянию, связанные с позиционированием; c – скорость света; Δt_{rec} – ошибки часов приемника; Δt_{sat} – ошибки часов спутника; Δt_{rel} – релятивистская поправка ко времени, связанная с замедлением времени на Земле [8]; ε – различные приборные шумы.

Для определения значения STD из полной фазовой задержки Φ вычитаются все оставшиеся компоненты фазовой задержки из формулы (1). Наклонная задержка STD связана с полной зенитной тропосферной задержкой ZTD соотношением $ZTD=STD/m(\theta)$, где $m(\theta)$ – функция отображения, которая зависит от угла места спутника над плоскостью горизонта θ [9].

Полная зенитная тропосферная задержка представляет собой сумму «сухой» или гидростатической (ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих. «Влажная» компонента (ZWD) вносит значительно меньший вклад в общее значение ZTD , в зимнее время года она близка нулю. Для моделирования параметров ZHD и ZWD по приземным метеорологическим данным наиболее точными являются формулы Саастамоинена [3]:

$$ZHD = \frac{0,002277p}{f(\varphi, h_s)}, \quad (2)$$

$$ZWD = \frac{0,002277e}{f(\varphi, h_s)} \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right). \quad (3)$$

Здесь p – атмосферное давление, мбар; T – температура, К; e – упругость водяного пара, мбар; $f(\phi, h_s) = 1 - 0,00266 \cdot \cos 2\phi - 0,00028 \cdot h_s$, где ϕ – географическая широта расположения приемника в градусах; h_s – высота приемника над уровнем моря, км. Для пункта BADG можно принять $f(\phi, h_s) \approx 1$.

Для обработки первичных GPS данных используется программный пакет GAMIT [10], это универсальное средство обработки данных в первую очередь для точного позиционирования точки наблюдения и скорости ее геодинамики [11]. С целью получения полной геодинамической картины в Байкальском регионе создана и продолжает уплотняться сеть постоянных высокоточных GPS наблюдений. В результате обработки данных программа GAMIT попутно выдает ионосферные и тропосферные зенитные задержки сигналов. Полная зенитная тропосферная задержка и ее горизонтальные градиенты выделяются в виде отдельных файлов в универсальном формате.

2. Измерения микроволновым радиометром водяного пара

Микроволновый радиометр водяного пара, установленный на территории обсерватории «Бадары» Института прикладной астрономии РАН, позволяет в непрерывном режиме получать данные о суммарном влагосодержании тропосферы и водозапасе облаков. GPS наблюдения и измерения водяного пара в пункте BADG выполняются практически в одном месте (рис. 1). МРВП измеряет яркостную температуру излучения тропосферы на двух частотах $20,70 \pm 0,25$ ГГц и $31,40 \pm 0,25$ ГГц. Радиометрический метод зондирования тропосферы определяет уровни влажности воздуха и влагозапас облаков по измерениям характеристик нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в микроволновом диапазоне частот [12]. Зондирование атмосферы всегда выполняется в зенитном направлении.



Рис. 1. (а) Расположение пункта наблюдения BADG (Бадары) ($N51^{\circ}46'$, $E102^{\circ}14'$, $h=838$ м). (б) Схема расположения GPS антенны (BADG) и микроволнового радиометра водяного пара (MPВП) на территории обсерватории Института прикладной астрономии РАН «Бадары».

Осаждаемый уровень воды (PW , м) представляет собой такое количество воды, которое может быть сконденсировано из всего водяного пара, содержащегося в условном столбе с высотой на уровне атмосферы на единицу площади. Отметим, что $PW = IWV/\rho$, где ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$. «Влажная» компонента тропосферной задержки ZWD определяется по значениям уровня влагосодержания тропосферы IWV над пунктом наблюдения по формуле [13, 14]:

$$ZWD = 10^{-6} \frac{k_2 R_W}{T_m} IWV, \quad (4)$$

где $k_2=3,73 \cdot 10^5$ – рефракционная константа, $\text{К}^2/\text{мбар}$ [2]; $R_W \approx 4,6$ – газовая постоянная для водяного пара, $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$; T_m – «средневзвешенная температура» по упругости водяного пара в условном вертикальном столбе над пунктом приема [2].

2. Сравнение с данными измерений радиометра водяного пара

На рис. 2 представлены сравнительные графики измеренных уровней суммарного влагосодержания в виде осаждаемой воды PW , полученной по данным GPS наблюдений и измерений радиометром водяного пара в пункте BADG (Бадары) в течение 2020 г. Наблюдаемые вертикальные «выбросы» данных соответствуют периодам выпадения атмосферных осадков. Для замещения удаленных значений с «выбросами» применяется простая интерполяция. В некоторые дни не выполнялись измерения MPВП, наиболее

продолжительные интервалы пропусков данных наблюдаются с 20 по 29 мая, с 1 по 15 октября и с 21 по 28 октября. Значения IWV рассчитывались по измеренным GPS данным по тропосферной задержке по формуле (4). Линейная регрессия зависимости «средневзвешенной температуры» в вертикальном столбе T_m от приземной температуры T для пункта BADG получена по данным зондирований ATOVS [15]: $T_m = 61,4 + 0,77 \cdot T$.

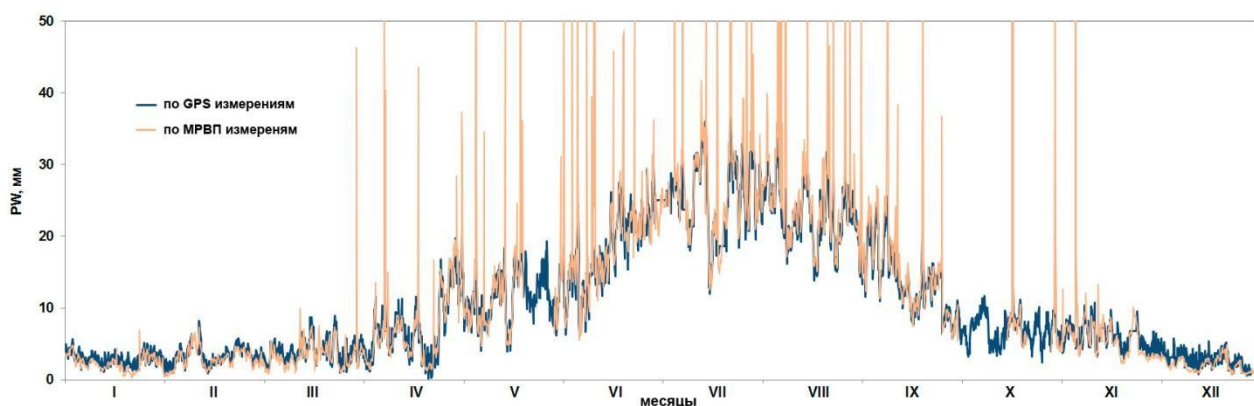


Рис. 2. Графики измеренных уровней влагосодержания тропосферы по GPS измерениям и по результатам наблюдения микроволновым радиометром водяного пара в течение 2020 г. над пунктом BADG (Бадары).

Для оценки сравнения значений по тропосферной задержке для данных по влагосодержанию, полученных методом МРВП, также использована формула (4). Предварительно в данных по влагосодержанию (МРВП) были исключены «выбросы». К полученным значениям ZWD добавлялись значения ZHD, рассчитанные по формуле (2) с использованием приземных данных по атмосферному давлению. На рис. 3а приведены сравнительные графики значений полной зенитной тропосферной задержки, полученных по GPS и МРВП измерениям в течение 2020 г. Ниже на рис. 3б представлены графики годовых вариаций упругости водяного пара (б) и атмосферного давления (в). Наблюдается очень высокий уровень коэффициента взаимной корреляции между годовыми данными по ZTD, полученным по GPS измерениям, и по упругости водяного пара в теплое время года ($K = 0,93$) и по атмосферному давлению в холодное время года ($K = 0,95$). Таким образом, полная зенитная тропосферная задержка в зимнее время может моделироваться приземным

атмосферным давлением, а в летнее время – приземным значением упругости водяного пара.

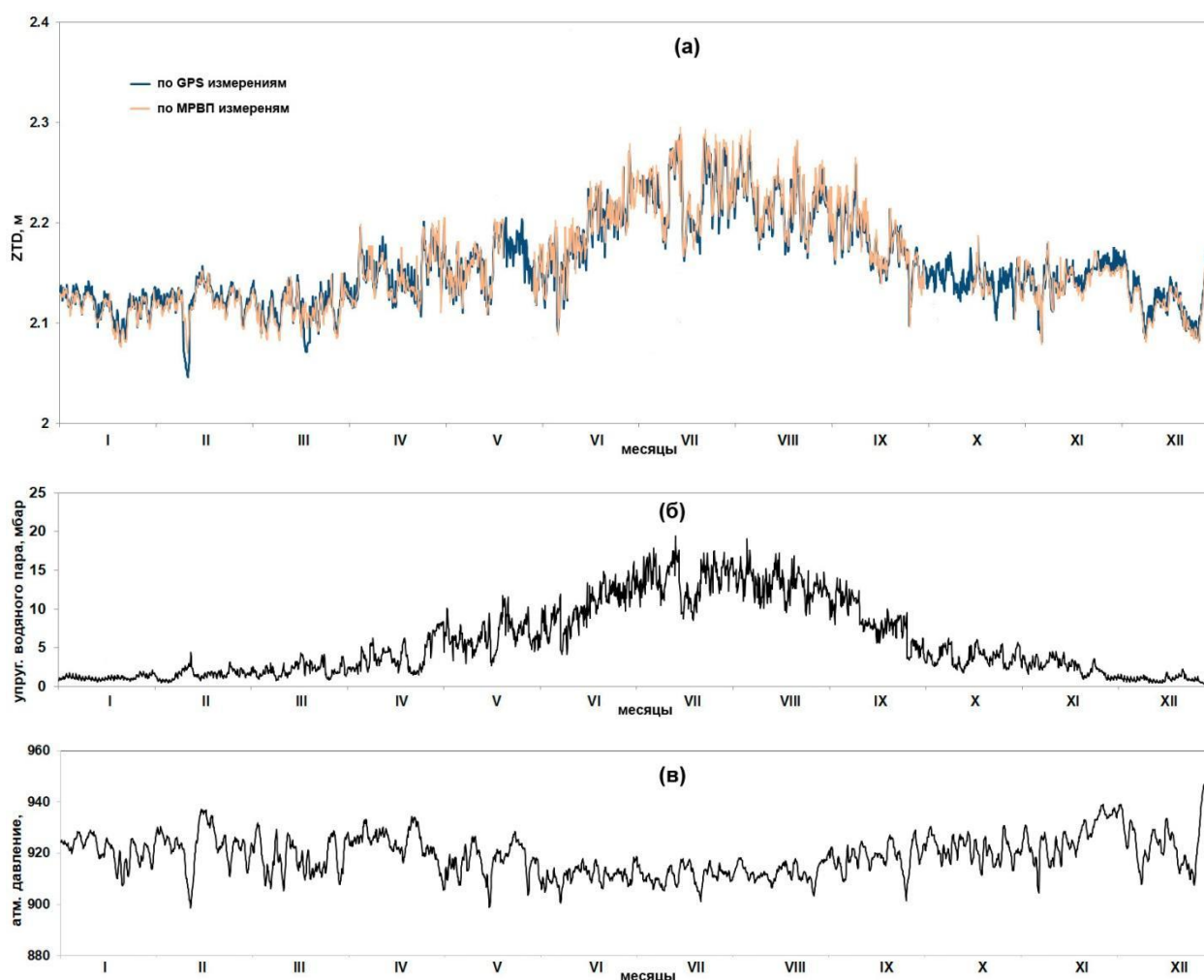


Рис. 3. (а) Графики изменений значений полной зенитной тропосферной задержки, выявленных по GPS измерениям и по результатам наблюдений МРВП в течение 2020 г. над пунктом ВADG (Бадары). (б) График изменения упругости водяного пара. (в) График изменения атмосферного давления.

Коэффициент взаимной корреляции между данными по GPS и МРВП измерениям (рис. 3а) в летнее время составил $K = 0,85$, в зимнее время составил $K = 0,93$. В летнее время среднее отклонение разницы представленных данных (GPS-МРВП) составило 0,014 м, СКО составило 0,031 м. В зимнее время среднее отклонение разницы составило 0,0045 м, СКО составило 0,0057 м. На рис. 4 представлена гистограмма разницы $ZTD(GPS) - ZTD(МРВП)$. В интервал $\pm 0,008$ м попадает 68% результатов, а в интервал $\pm 0,016$ м попадает 90% результатов. Сравнение значений ZTD, полученных по независимым GPS и МРВП измерениям, подтверждает надежность использования постоянных GPS

наблюдений для целей непрерывного определения тропосферной задержки и влагосодержания нижней части атмосферы.

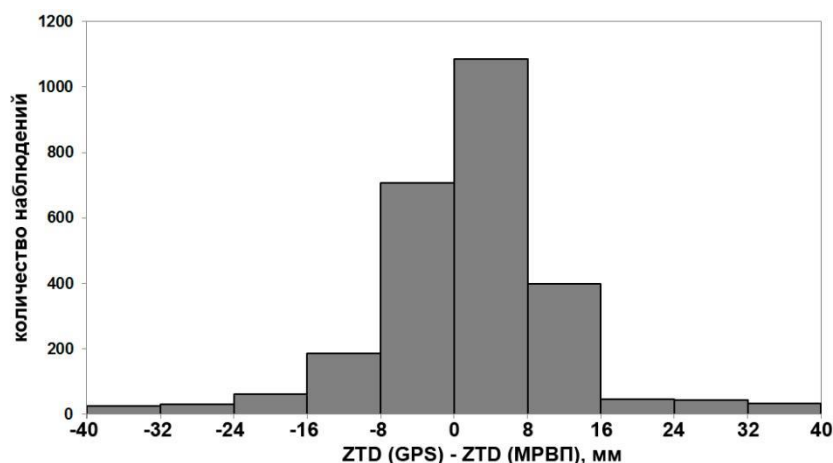


Рис. 4. Гистограмма разницы ZTD (GPS) – ZTD (MPBP).

Заключение.

Получены ряды значений ZTD в пункте BADG (Бадары) по независимым GPS и MPBP измерениям за 2020 г. Измеренные значения ZTD в летнее время хорошо коррелируют с вариациями упругости водяного пара, а в зимнее время хорошо коррелируют с вариациями атмосферного давления. Сравнение полученных годовых изменений полной зенитной тропосферной задержки разными методами показало очень хорошее согласие в течение всего 2020 г. В летнее время среднее отклонение разницы составило 0,014 м или 0,63% от среднего летнего значения ZTD, коэффициент взаимной корреляции между данными оставил $K = 0,85$. В зимнее время среднее отклонение разницы составило 0,0045 м или 0,21% от среднего зимнего значения ZTD при взаимной корреляции между данными $K = 0,93$. Вариации значений ZTD значительно увеличиваются в летние месяцы, когда в тропосфере наблюдается высокая влажность, и поля влажности имеют высокую временную изменчивость.

Сравнительные примеры показывают, что GPS наблюдения столь же надежны, как и запуски радиозондов и измерения РВП. При этом погрешности измерений имеют небольшую и стабильную относительную величину. Это также подтверждает возможность использования данных GPS измерений для

определения суммарного влагосодержания нижней части атмосферы с целью изучения региональных климатических особенностей.

Автор выражает благодарность заведующему Отделением астрономических наблюдений Института прикладной астрономии РАН Ильину Геннадию Николаевичу за предоставление данных измерений радиометром водяного пара на обсерватории «Бадары».

Финансирование.

Работа выполнена по бюджетному проекту ИФМ СО РАН № 0270-2021-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

Литература

1. Herring T.A. Geodesy by radiointerferometry: The application of Kalman filtering to the analysis of VLBI data. *Journal of Geophysical Research*. 1990. V.95. P.12561–12581.
2. Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes A., Ware R. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*. 1992. V.97. P.15787–15801.
3. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellite. *International Symposium on the Use of Artificial Satellite*. Washington. 1971. P.247–251.
4. Zhang F., Jean-Pierre Barriot G.X., Hopuare M. Modeling the slant wet delays from one GPS receiver as a series expansion with respect to time and space: Theory and an example of application for the Tahiti Island. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. V.58. P.7520–7532. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2975458>
5. Haase J., Ge M., Vendel H. Calais E. Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the western Mediterranean. *Journal of*

- Applied Meteorology. 2003. V.42. P.1547-1548. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042)
6. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS: principles and applications. Boston/London. Artech house. 2005. 723 p.
 7. Куницын В. Е., Нестеров И.А., Терешин Н.А. Анализ влагосодержания атмосферы по данным приемников GPS. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/12/text.pdf>
 8. Ashby N. Relativity in the global positioning system. Living Review in Relativity. 2003. V.6. No.1. P.1-42. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>
 9. Niell A.E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wave lengths. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1996. V.101, No.B2. P.3227-3246.
 10. King R.W., Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 9.9. Cambridge. Massachusetts Institute of Technologies. 1999.
 11. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Леви К.Г., Ашурков С.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Современные движения земной коры монголо-сибирского региона по данным GPS-геодезии. Доклады Академии наук. 2003. Т.392. №6. С.792-795.
 12. Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Результаты микроволнового эксперимента: перспективы радиометра водяного пара. Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. №670. С.150-153.
 13. Likhneva O.F., Dembelov M.G., Likhnev A.V., The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data. Geodynamics and tectonophysics. 2016. V.7. No 4. P.545-553. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222>
 14. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В., Лухнева О.Ф., Саньков В.А. Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений. Оптика атмосферы и океана. 2015. Т.28. №2. С.172-177. <https://doi.org/10.1134/S1024856015040053>

15. Кашкин В.Б., Владимиров В.М., Клыков А.О. Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS по спутниковым данным ATOVS. Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27. № 7. С.615-621.
<https://doi.org/10.1134/S1024856015010066>

Для цитирования:

Дембелов М.Г. Зенитная тропосферная задержка по данным GPS наблюдений и измерений радиометром водяного пара в пункте Badg (Бадары, Республика Бурятия). *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.2>