

## ВЛИЯНИЕ ПЕРЕНОСА ВОДЯНОГО ПАРА С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

**Калинников В.В.<sup>1</sup>, Устинов А.В.<sup>2</sup>, Загретдинов Р.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>2</sup>АО «Институт Гидропроект»

В настоящее время для мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений (ГТС) все чаще применяются средства спутниковых радионавигационных измерений (ГНСС) [1]. Поскольку в районах ГТС имеются сильные неоднородности подстилающей поверхности (границы суша — водная поверхность водохранилища), то можно ожидать достаточно существенного снижения точности спутникового мониторинга. При прохождении над водной поверхностью воздушная масса получает дополнительный приток водяного пара. Оказываясь затем над прибрежными ГНСС станциями, она должна вызывать увеличение влажной составляющей тропосферной рефракции радиосигналов ГНСС. Изменения влажности воздуха в приземном слое при прохождении неоднородной подстилающей поверхности упрощенно моделируются следующим образом [2]:

$$\delta e(h) = e''(h) - e'(h) = (e''_0 - e'_0) \cdot M$$

где  $e'_0$  и  $e''_0$  — давление водяного пара на нулевой высоте около старой и новой подстилающих поверхностей [гПа],  $e'(h)$  и  $e''(h)$  — давление водяного пара на высоте  $h$  над старой и новой подстилающими поверхностями [гПа],  $M$  — коэффициент трансформации воздушной массы, который зависит от расстояния, пройденного воздушной массой над новой подстилающей поверхностью, а также от высоты и скорости ветра [2]. Зная распределение давления водяного пара  $e(h)$  [гПа] и температуры  $t(h)$  [°C] на удалении от водохранилища, можно найти фоновое значение влажной части зенитной тропосферной задержки радиоволн  $ZWD$  и дополнительную задержку, вызванную локальными неоднородностями  $\delta ZWD$  [3]:

$$ZWD = 10^{-6} \cdot \int_0^H \left( \left( k_2 - k_1 \cdot \frac{M_w}{M_d} \right) \cdot \frac{e(h)}{t(h) + 273.15} + k_3 \cdot \frac{e(h)}{(t(h) + 273.15)^2} \right) \cdot dh$$

$$\delta ZWD = 10^{-6} \cdot \int_0^H \left( \left( k_2 - k_1 \cdot \frac{M_w}{M_d} \right) \cdot \frac{\delta e(h)}{t(h) + 273.15} + k_3 \cdot \frac{\delta e(h)}{(t(h) + 273.15)^2} \right) \cdot dh$$

где  $k_1=77.60$  К/гПа,  $k_2=69.4$  К/гПа,  $k_3=370100$  К<sup>2</sup>/гПа,  $M_d=0.0180152$  кг/моль,  $M_w=0.0289644$  кг/моль,  $\delta e$  – локальное отличие давления водяного пара от фонового значения [гПа],  $h$  – текущая высота [м],  $H \approx 50$  м – высота приземного слоя. Рассмотрим далее конкретный пример моделирования для тропосферных задержек для гидроаккумулирующей станции Загорская ГАЭС-2 (ЗаГЭАС-2). Эта станция имеет приблизительные координаты  $56.5^\circ$  с.ш. и  $38.1^\circ$  в.д. Верхний бассейн имеет форму неправильного овала, вытянутого вдоль линии восток-запад. Длина верхнего бассейна составляет около 4 км, ширина варьируется от 250 до 1000 м. Непосредственно на водоприемнике у восточного окончания верхнего бассейна установлена станция спутникового мониторинга VPPS. На расстоянии 450 м в юго-восточном направлении от нее находится базовая станция GPS3. В качестве исходных фоновых значений давления водяного пара, температуры и скорости ветра на нулевой высоте были использованы их средние июльские значения за 2006-2016 гг на ближайшей метеостанции в г. Дмитров. Для поверхности водохранилища давление водяного пара на нулевой высоте было принято равным давлению насыщения при температуре воды  $22^\circ\text{C}$ . На рисунке 1 показан рассчитанный суточный ход  $ZWD+\delta ZWD$  на базовой станции и станции мониторинга, а также суточный ход фонового значения  $ZWD$ . Амплитуда и фаза суточного хода  $\delta ZWD$  обусловлены периодичностью направления скорости ветра, формой водохранилища и расстоянием до берега.

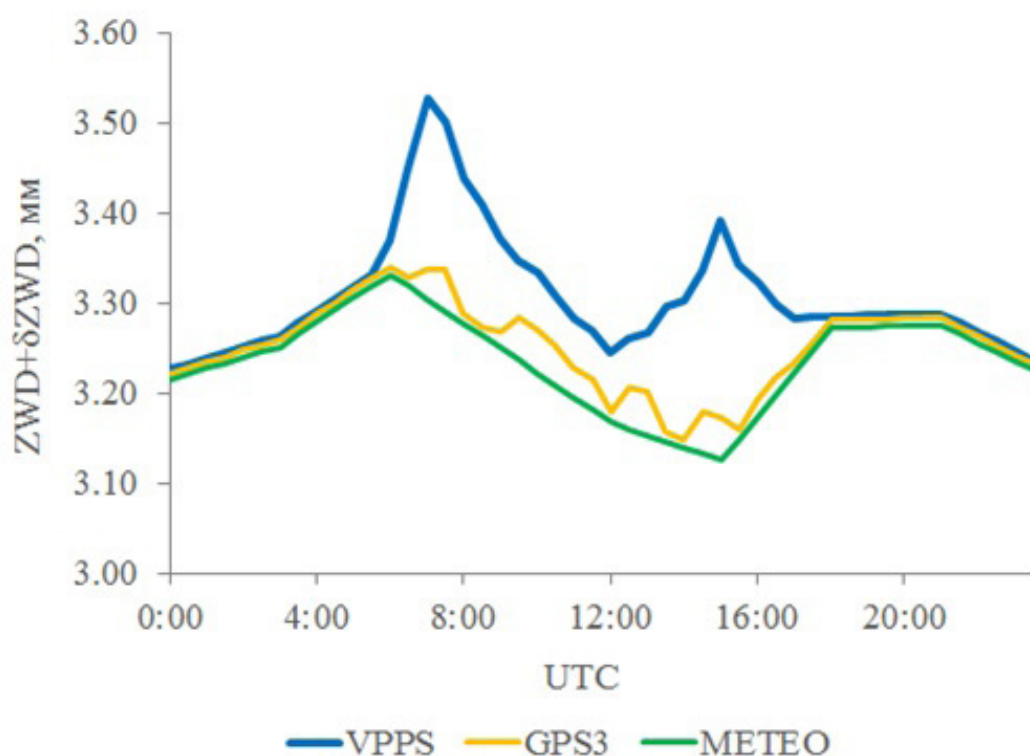


Рис. 1. Средний суточный ход фоновых значений ZWD в приземном слое в июле по данным метеостанции (METEO); Суммарный суточный ход ZWD и  $\delta ZWD$  на базовой станции (GPS3) и станции мониторинга (VPPS)

Хорошо видно, что у станции на водоприемнике VPPS в промежутки времени, когда ветер дует со стороны верхнего бассейна, величина  $\delta ZWD$  сильно отклоняет суммарную влажную задержку от фонового значения, тогда как на базовой станции суммарная влажная задержка почти не отличается от фоновой. Ошибки координат станции мониторинга, вызванные этими неоднородностями, определяются подстановкой  $\delta ZWD$  на VPPS и GPS3 в уравнения двойных разностей фазовых измерений радиосигналов ГНСС, записанных за часовой интервал времени [4]. Далее эти уравнения решаются относительно координат станции мониторинга. При этом вклад в ошибки координат зависит как от собственно величин  $\delta ZWD$ , так и от геометрии навигационных спутников. На рисунке 2 показан пример расчета ошибок координат, вызванных наличием  $\delta ZWD$ . Геометрия спутников восстанавливалась с помощью альманаха системы GPS за 1 июля 2016 г.

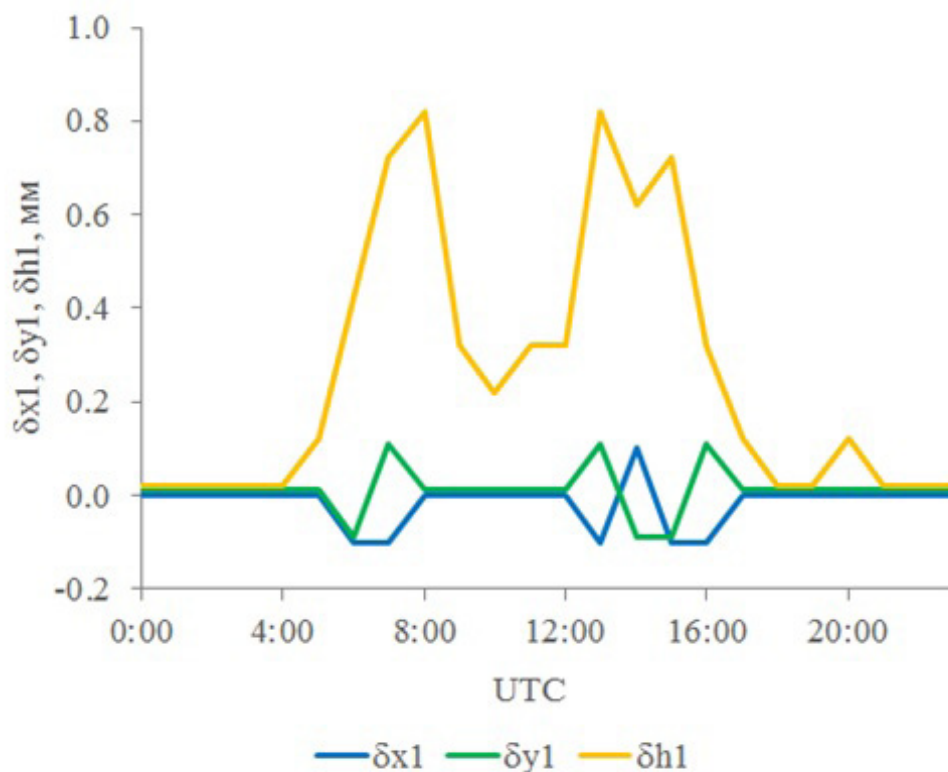


Рис. 2. Ошибки координат станции мониторинга VPPS, вносимые локальными неоднородностями, представленные топоцентрической системе отсчета

Очевидно, что наибольшую величину имеет высотная ошибка  $\delta h_1$ , достигающая 0.8 мм. При этом ее суточный ход в целом повторяет суточный ход  $\delta ZWD$  на станции VPPS. Ошибки координат в северном  $\delta x_1$  и восточном

$\delta y_1$  направлениях значительно меньше, не превышают 0.1 мм. Отметим, что требования к точности определения осадок и горизонтальных смещений гидротехнических сооружений устанавливаются программой натуральных наблюдений в соответствии с рекомендациями пособий [5, 6] и составляют для бетонных сооружений на сжимаемом основании 2 мм по высоте и 2 мм в плане. Полученные из моделирования влажных тропосферных задержек в приземном слое величины ошибок по высоте достигают 40% от нормативно допустимых. При этом следует отметить, что в данной работе использовались неоднородности поля водяного пара, рассчитанные по усредненным за 10 лет метеопараметрам. Мгновенные их значения могут существенно отличаться от средних, что будет приводит к большим ошибкам координат, возможно даже превышающим нормативные допуски. Соответственно представляется целесообразным использование в ГНСС мониторинге автоматизированных метеостанций. Это позволит в будущем отслеживать беспокойные атмосферные условия и сообщать оператору о промежутках времени, когда данные спутникового мониторинга содержат повышенные ошибки. Кроме того, локальные метеоданные позволят более точно выполнять моделирование атмосферных неоднородностей, тем самым повышая точность ГНСС мониторинга. Особенно это касается периодических ошибок, источниками могут являться суточные вариации содержания водяного пара в атмосфере, особенно хорошо выраженные в летний период [7].

#### Литература

Устинов А.В. Технология спутникового геодезического мониторинга гидротехнических сооружений, Гидротехническое строительство, 2014, №6, С. 39 – 43.

Динамическая метеорология, под ред. Лайхтмана Д.Л., Л: Гидрометеиздат, 1976, 608 с.

Mendes V.B. Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques, Tech. Report № 199, Brunswick: UNB, 1999, 353 p.

Xu G. GPS. Theory, algorithms and applications, Berlin: Springer, 2007, 340 p.

П-648. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами. Минэнерго СССР. Гидропроект им. С.Я. Жука, М.: Энергия, 1980.

П 83-2001. Рекомендации по анализу данных и проведению натуральных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин, СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2001.

Kalinnikov, V.V., Khutorova, O.G. Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia, Ann. Geophys., 2017, Vol. 35, P. 453-464.