

УДК 551.506.2

ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ТРОПОСФЕРЫ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ GPS ИЗМЕРЕНИЙ

М. Г. Дембелов¹, Ю. Б. Башкуев¹, А. В. Лухнев², О. Ф. Лухнева², В. А. Саньков² (e-mail:

¹Институт физического материаловедения СО РАН

²Институт земной коры СО РАН

Статья поступила в редакцию 11 января 2016 г., после доработки – 2 марта 2016 г.

Аннотация. Задержка GPS сигналов, которые распространяются сквозь нижнюю нейтральную атмосферу, служит причиной погрешностей в точности GPS позиционирования. Такая задержка приводится к зенитному направлению и называется тропосферной зенитной задержкой. В Байкальском регионе создана непрерывно действующая GPS сеть из 8 постоянных пунктов наблюдения. Результаты обработки первичных GPS данных дают непрерывные атмосферные данные в виде полной тропосферной зенитной задержки (ZTD). Полная тропосферная зенитная задержка является суммой «сухой» или гидростатической (ZHD) и «влажной» (ZWD) компонент. Гидростатическая задержка хорошо моделируется поверхностными барометрическими измерениями в месте приема сигнала. «Влажная» задержка в основном зависит от количества содержания атмосферного водяного пара в тропосфере. Данные по ZWD позволяют выявить количество суммарного водяного пара (IWV) и количество осаждаемой воды (PW) над пунктом измерений.

Ключевые слова: GPS, полная тропосферная зенитная задержка, рефракция, суммарный водяной пар, осаждаемая вода, метеорологические данные.

Abstract: Delay of GPS signals that propagate through the lower neutral atmosphere causes of errors in the accuracy of GPS positioning. This delay can be reduced to the zenith direction and called as a tropospheric delay. The continuously operating GPS network of 8 permanent observation points was created in the Baikal region. The results of primary processing GPS data provide continuous atmospheric data as a total zenith tropospheric delay (ZTD). Total zenith tropospheric delay is the sum of

the "dry" or hydrostatic (ZHD) and "wet" (ZWD) components. Hydrostatic delay will be modeled by surface barometric measurements in the point of signal reception. "Wet" delay mainly depends on the quantity of atmospheric water vapor content in the troposphere. ZWD data allow revealing the amount of integral water vapor (IWV) and the amount of precipitated water (PW) over a measurement point.

Key words: GPS, total zenith tropospheric delay, integrated water vapor, precipitated water, meteorological data.

Введение

Изменение показателя преломления с высотой в нижней нейтральной атмосфере вызывает тропосферную рефракцию или отклонение траектории радиоволн, особенно в диапазоне УКВ. Индекс рефракции радиоволн N , в основном, определяется температурой, давлением и упругостью водяного пара. Распространение сигналов системы позиционирования GPS в тропосфере учитывается тропосферной задержкой сигналов. Полная тропосферная зенитная задержка (ZTD) является одной из наиболее существенных поправок, которые присутствуют при высокоточных геодезических расчетах по GPS данным [1,2]. Водяной пар играет важную роль в атмосферных процессах, это наиболее переменный из всех параметров тропосферы. Распределение водяного пара тесно связано с распределением облаков и дождевых осадков [3]. Параметр ZWD выделяется из полной задержки ZTD, он определяется текущими свойствами тропосферы над каждым GPS приемником. Параметр ZWD практически пропорционален количеству влагозапаса облаков над GPS пунктом, возникает возможность использования сети GPS измерений для постоянного дистанционного зондирования атмосферы. Использование GPS сетей для оперативного прогноза погоды является вполне оправданным, так как в настоящее время продолжают уплотняться постоянно действующие GPS сети, создаваемые для целей исследования геодинамики, ионосферы, геодезии [2], а также использования в реальном времени дифференциального позиционирования воздушных и морских судов. Кроме того, возможно

применение сети непрерывных GPS измерений для представления водяного пара в виде динамической томографии [4].

Количество водяного пара в атмосфере над данной точкой земной поверхности определяется в виде вертикально интегрированной массы водяного пара в расчете на единицу площади (IWV), кг/м². Соответствующая параметру IWV осаждаемая вода определяется в виде колонки жидкой воды (PW), м. Имеет место соотношение $PW = IWV/\rho$, где ρ - плотность жидкой воды, кг/м³.

1. Индекс рефракции и тропосферная зенитная задержка

Тропосферная задержка определяется коэффициентом преломления среды n . При этом восприимчивость смеси сухого воздуха и водяного пара равна сумме восприимчивости отдельных газов смеси, пропорциональных их парциальным давлениям. Закону аддитивности также соответствует и широко используемый в радиометеорологии индекс рефракции

$$N = (n - 1) \cdot 10^5 = \frac{k_1}{T} p + \frac{k_2}{T^2} e = N_T + N_e,$$
 где N_T - индекс рефракции для сухого воздуха, зависящий от изменений температуры и давления воздуха; N_e - индекс рефракции для водяного пара; $k_1 = 77,6$ - первая рефракционная константа, К/мбар (1 мбар = 10² Н/м²); $k_2 = 3,73 \cdot 10^5$ - вторая рефракционная константа, К²/мбар; T - абсолютная температура, К; p - атмосферное давление, мбар; e - упругость водяного пара, мбар [5]. Для средних летних условий в г. Улан-Удэ $T = 290^\circ\text{K}$; $p = 950$ мбар; $e = 12$ мбар. Для зимы $T = 53^\circ\text{K}$; $p = 965$ мбар; $e = 1$ мбар. В районе г. Улан-Удэ в среднем у земной поверхности $n = 1,0003014$ и $N = 301,4$. В целом «влажная» составляющая вносит меньший вклад в полный индекс рефракции, особенно в зимний период. «Сухая» компонента составляет определяющую часть параметра N .

Полная тропосферная зенитная задержка ZTD также является суммой «сухой» (гидростатической) (ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих. Полная задержка пути сигнала от GPS спутника до приемной антенны (ZTD) равна

разности геометрического расстояния от реального пути сигнала в атмосфере:

$$ZTD = \int_{\text{Атмосф}} n(h)dh - \int_{\text{Вакуум}} dh, \text{ где } h - \text{высота вертикального интегрирования.}$$

В таком случае компоненты зенитной задержки могут быть получены посредством интегрирования по вертикальному профилю соответствующих значений индексов рефракции $N_T(h)$ и $N_e(h)$:

$$ZHD = 10^{-6} \int_0^{\infty} N_T(h)dh, \quad (1)$$

$$ZWD = 10^{-6} \int_0^{\infty} N_e(h)dh, \quad (2)$$

Интегрирование для водяного пара ограничивается верхней частью тропосферы, т.е. примерно до 12 км, а для сухого воздуха интегрирование может быть продолжено и в область нижней стратосферы.

2. Вертикальные профили тропосферной рефракции и формулы для ZTD

Если атмосфера находится в состоянии гидростатического равновесия, то компоненты ZHD и ZWD в зависимости от высоты хорошо моделируются с использованием данных приземного давления и температуры. Вертикальный профиль полной рефракции хорошо аппроксимируется экспоненциальной формулой [6,7]:

$$N(h) = N_0 \exp(-\beta h), \quad (3)$$

где N_0 – индекс рефракции на поверхности Земли; β , км^{-1} – скорость убывания индекса рефракции при изменении высоты h , км. Параметр β в формуле (3) определяется по результатам измерений N методом наименьших квадратов. Также вертикальный профиль рефракции можно выразить в виде суммы (модель Хопфильда) [8]:

$$N(h) = N_T \left(1 - \frac{h}{h_D}\right)^4 + N_e \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4. \quad (4)$$

Здесь $h_D = 40136 + 148,72 \cdot t$ - эффективная высота гидростатической компоненты, м; t - поверхностная температура, °С. Параметр h_W является максимальной высотой над уровнем моря, где может присутствовать водяной пар, т.е. это высота тропосферы, принятая равной 12 км. Индексы рефракции N_T и N_e определяются на поверхности Земли. Для пункта наблюдения Усть-Баргузин, который расположен на берегу оз. Байкал в средней его части, параметр β для летних условий равен 0,126, для зимних - 0,135, для весенних и осенних - 0,13. На рис. 1 показаны треугольниками численные значения высотных профилей, полученные по данным метеорологических радиозондов и их аппроксимации, построенные по формулам (3) и (4) для п. Усть-Баргузин за 26 января и 12 июля 2015 г. Из сравнения графиков видно, что оба метода аппроксимации примерно с одинаковой погрешностью описывают вертикальные профили индекса рефракции $N(h)$ для зимних и летних условий. Отметим, что формула (4) является более удобной для практического использования при расчетах высотной зависимости индекса рефракции $N(h)$, так как позволяет производить расчеты по результатам приземных метеорологических данных температуры, давления и влажности на конкретной метеостанции. Она, в отличие от формулы (3) не имеет параметра β , зависящего от сезона [8]. В то же время сезонные значения параметров N_0 и β в формуле (3) позволяют также получать вполне достоверные данные по индексу рефракции $N(h)$ в течение всего года. Систематизация параметра β в разные сезоны года для конкретного пункта наблюдения в виде таблицы позволит с достаточно высокой точностью рассчитывать высотные профили $N(h)$ без использования данных метеорологических радиозондирований. При распространении УКВ радиоволн в тропосфере знание измеренного значения N_0 и соответствующего текущему сезону значения β позволяет ввести поправку на рефракцию и выявить угол истинной рефракции в точке источника излучения [6,7].

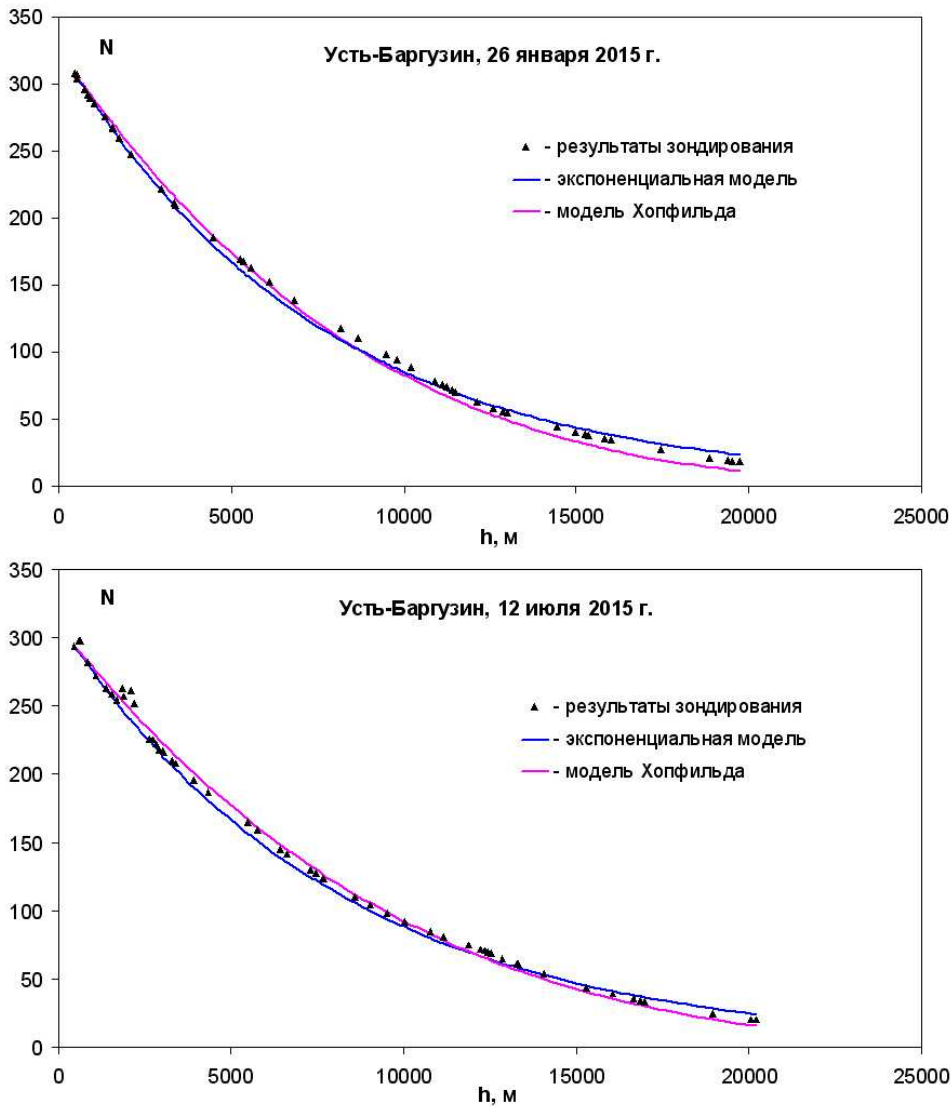


Рис. 1. Сравнительные высотные профили индекса рефракции для пункта наблюдения Усть-Баргузин в зимних и летних условиях.

Представляя ZTD в виде суммы формул (1) и (2), учитывая соответствующие компоненты индекса рефракции в выражении (4) и выполнив интегрирования для каждой компоненты, выражение для полной тропосферной задержки записывается в виде суммы [9]:

$$ZTD = ZHD + ZWD = 2 \cdot 10^{-7} N_T h_D + 2 \cdot 10^{-7} N_e h_W . \quad (5)$$

Формулу для вертикального профиля (3) также можно использовать в виде суммы гидростатической и влажной компонент:

$$N(h) = N_T \exp(-\beta_D h) + N_e \exp(-\beta_W h) . \quad (6)$$

Здесь β_D – скорость убывания индекса рефракции для сухого воздуха, β_W – скорость убывания индекса рефракции для водяного пара. Значения β_D и β_W зависят от местоположения пункта наблюдения на Земле. Для широт Байкальской зоны значение β_D приблизительно равно $5/h_D$, величина β_W приблизительно равна 0,5. Подобно формуле (5), выполнив интегрирование, можно записать выражение для полной тропосферной задержки в виде:

$$ZTD = ZHD + ZWD = 10^{-6} N_T \left(-\frac{1}{\beta_D} \right) + 10^{-6} N_e \left(-\frac{1}{\beta_W} \right). \quad (7)$$

Формулы (5) и (7) связывают индексы рефракции для сухого воздуха и водяного пара с соответствующими параметрами ZHD и ZWD.

Для расчета параметров ZHD и ZWD по метеоданным наиболее популярной является модель Саастамойнена [4,10]:

$$ZHD = \frac{0,002277 p}{f(\varphi, h_s)}; \quad ZWD = \frac{0,002277 e \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right)}{f(\varphi, h_s)}. \quad (8)$$

Здесь T – температура в месте приема, К; $f(\varphi, h_s) = 1 - 0,00266 \cos 2\varphi - 0,00028 h_s$, где φ – географическая широта местоположения приемника в градусах; h_s – высота приемника над уровнем моря, км. Для всех пунктов Байкальского региона неучет величины $f(\varphi, h_s)$ в соотношениях (8) не превышает 0,08%, поэтому ей можно пренебречь. При моделировании гидростатической задержки ZHD по формуле (8) практически можно учитывать только атмосферное давление, что значительно упрощает определение параметра ZWD по GPS измерениям посредством вычитания ZHD из ZTD [11].

Помимо формулы (8) для определения ZHD в теплое время года вполне приемлемо использовать не учитывающую никаких метеорологических данных модель MOPS, которая подробно описана в работе [12]. Данный метод учитывает лишь высоту приемной антенны над уровнем моря, географические долготу и широту, и номер дня года. На рис. 2 представлены графики значений

ZTD, выявленных в результате обработки GPS измерений в 2014 г. для пунктов ULAZ (г. Улан-Удэ, 525 метров над уровнем моря), IRKM (г. Иркутск, 450 метров над уровнем моря) и ULAB (г. Улан-Батор, 1300 метров над уровнем моря). Здесь же представлены графики значений ZHD, рассчитанные по формуле (7) и по модели MOPS [12] в теплое время года для этих же пунктов наблюдения.

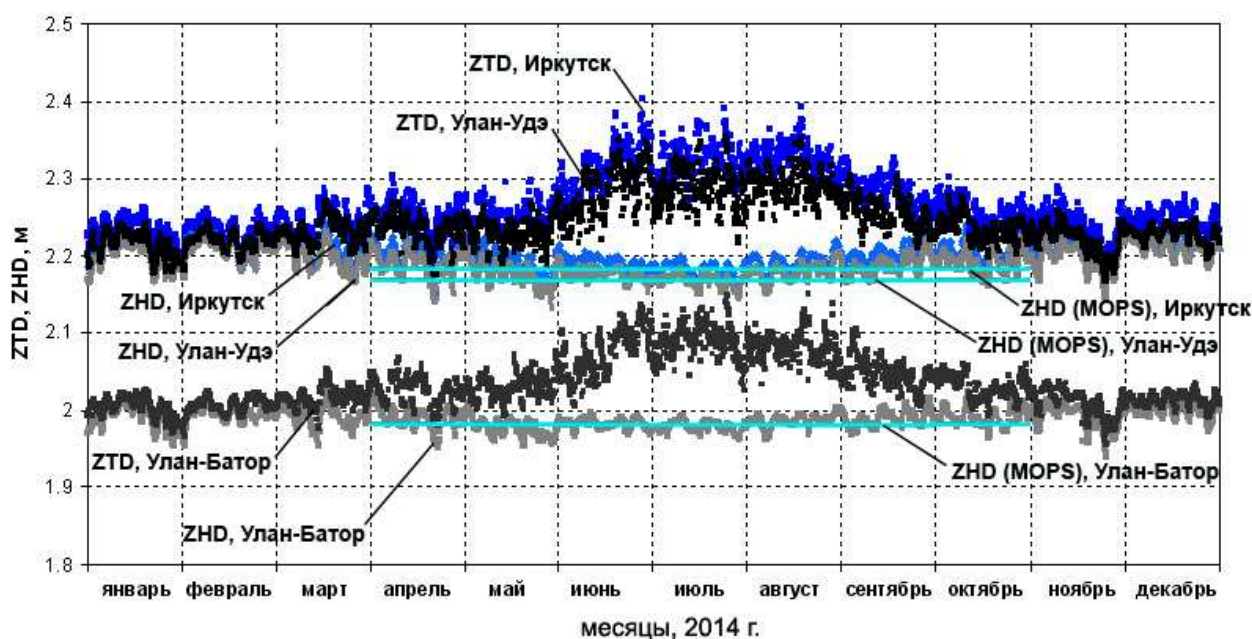


Рис. 2. Графики значений ZTD по результатам GPS измерений для пунктов наблюдения ULAZ (г. Улан-Удэ), IRKM (г. Иркутск) и ULAB (г. Улан-Батор) и значений ZHD, рассчитанных по формуле (7) и по модели MOPS в теплое время года.

На рис. 3 в качестве примера показаны сравнительные графики «влажной» составляющей тропосферной задержки ZWD, выявленной по GPS измерениям и по метеорологическим данным по формуле (7) в пункте наблюдения ULAZ в теплый промежуток времени 2012 года (апрель-октябрь). В первом случае «влажная» компонента ZWD определена путем вычитания рассчитанных значений гидростатической составляющей ZHD по методу MOPS [12] из значений полной тропосферной задержки ZTD, полученных в результате обработки данных GPS измерений. Коэффициент взаимной корреляции двух графиков составил 0,93.

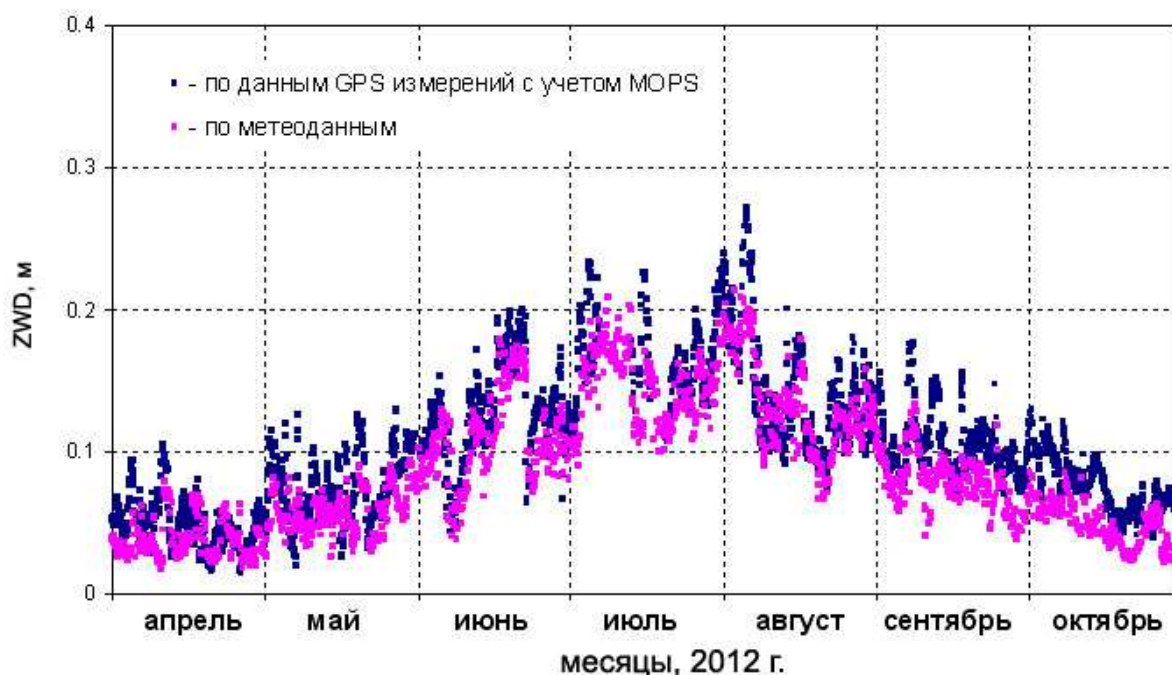


Рис. 3. Графики «влажной» зенитной задержки ZWD для пункта ULAZ, полученные по GPS измерениям и рассчитанные по метеоданным.

3. Связь суммарного водяного пара в тропосфере с параметром ZWD

Приведенные сравнительные графики значений ZWD по GPS измерениям и по метеоданным подтверждают возможность в летнее время года обходиться без использования метеорологических данных для выявления «влажной» тропосферной задержки. Суммарный водяной пар (IWV) в атмосфере над данной точкой земной поверхности определяется в виде вертикально интегрированной массы водяного пара в расчете на единицу площади. Соответствующая суммарному водяному пару высота колонки жидкой воды (PW), м, которая может быть осаждена, находится из соотношения

$$PW = IWV / \rho, \quad (9)$$

где ρ - плотность воды, кг/м³.

Параметр ZWD в формуле (2) записывается с учетом выражения для N_e в виде:

$$ZWD = 10^{-6} k_2 \int_0^{\infty} \frac{e}{T^2} dh, \quad (10)$$

Параметр «средневзвешенной температуры» T_m над пунктом приема сигнала вводится в виде отношения [4,5]:

$$T_m = \frac{\int_0^{\infty} \frac{e}{T} dh}{\int_0^{\infty} \frac{e}{T^2} dh}. \quad (11)$$

Тогда выражение (10) с учетом отношения (11) можно записать в виде:

$$\text{ZWD} = 10^{-6} \frac{k_2}{T_m} \int_0^{\infty} \frac{e}{T} dh \quad (12)$$

Для нормальных атмосферных условий можно записать выражение для специальной газовой постоянной для водяного пара R_w [4]:

$$\frac{eV}{mT} = \frac{e}{\rho_{wv} T} = R_w. \quad (13)$$

Здесь ρ_{wv} – плотность водяного пара, кг/м^3 ; $R_w \approx 4,6 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$. Учитывая соотношение (13) и определение для суммарного пара $\text{IWV} = \int_0^{\infty} \rho_{wv} dh$, формула (12) запишется как:

$$\text{ZWD} = 10^{-6} \frac{k_2}{T_m} R_w \text{IWV}. \quad (14)$$

На рис. 4 приведены линейные регрессии соотношений приземной температуры (T) и средневзвешенной температуры (T_m), определенной по данным вертикальных зондирований атмосферы (до 35 км от земной поверхности) и рассчитанной по формуле (10), для пунктов Усть-Баргузин, Ангарск за 2014 и 2015 гг. и среднеширотной области континентальной части Северной Америки (от 27° до 65° с.ш.) [4]. Показано, что «средневзвешенная температура» до высоты верхней тропосферы над пунктом измерений может быть выявлена по данным приземной температуры воздуха.

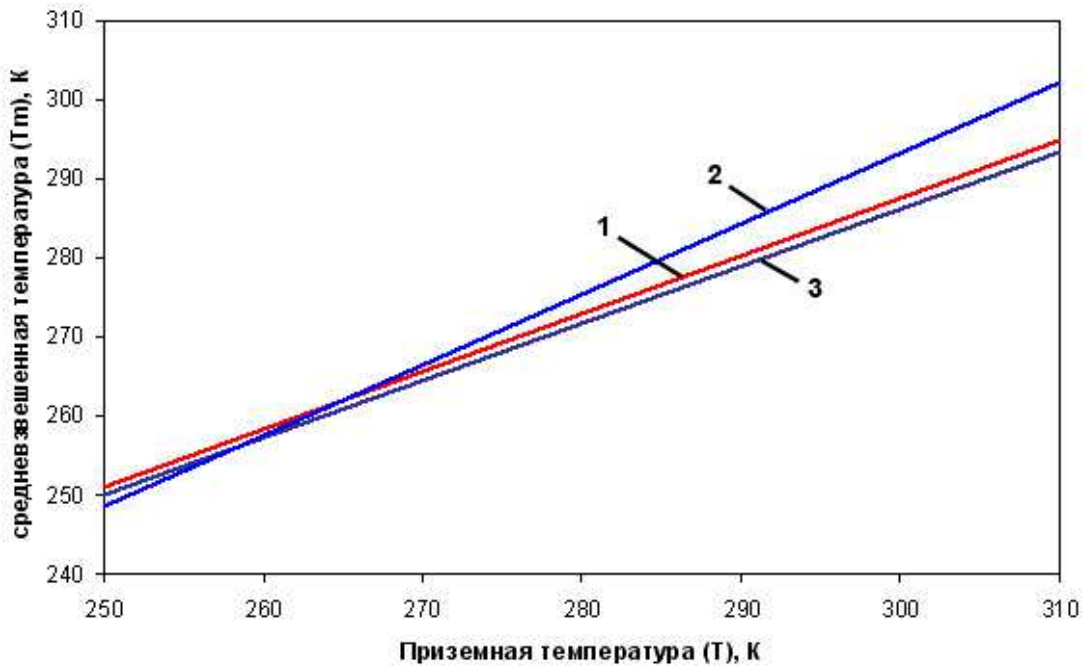


Рис. 4. Соотношение параметров T и T_m , выявленных по данным метеорологических зондирований:

1 - Ангарск ($T_m=67,7+0,73\cdot T$)

2 - Усть-Баргузин ($T_m=31,14+0,87\cdot T$)

3 - по данным работы [4] ($T_m=70,2+0,72\cdot T$).

На рис. 5 показаны сравнительные графики изменения влагосодержания тропосферы в виде уровня осаждаемой воды (PW) над пунктом ULAZ (Улан-Удэ) в теплое время года по метеорологическим данным, учитывающим приземную температуру и упругость водяного пара, и по обработанным данным GPS измерений. Коэффициент взаимной корреляции приведенных графиков составил 0,88. В среднем отличие данных по суммарному водяному пару составило $3,4 \text{ кг/м}^2$. В работе [11], где сравниваются значения суммарного водяного пара (IWV), выявленные из данных GPS измерений и рассчитанные по формулам Саастомоинена (9), дается оценка точности влагосодержания на уровне $3,7 \text{ кг/м}^2$ в теплое время года. При этом не учитывалась зависимость значения средневзвешенной температуры тропосферного столба от приземной температуры, параметр T_m принимался равным 260°К .

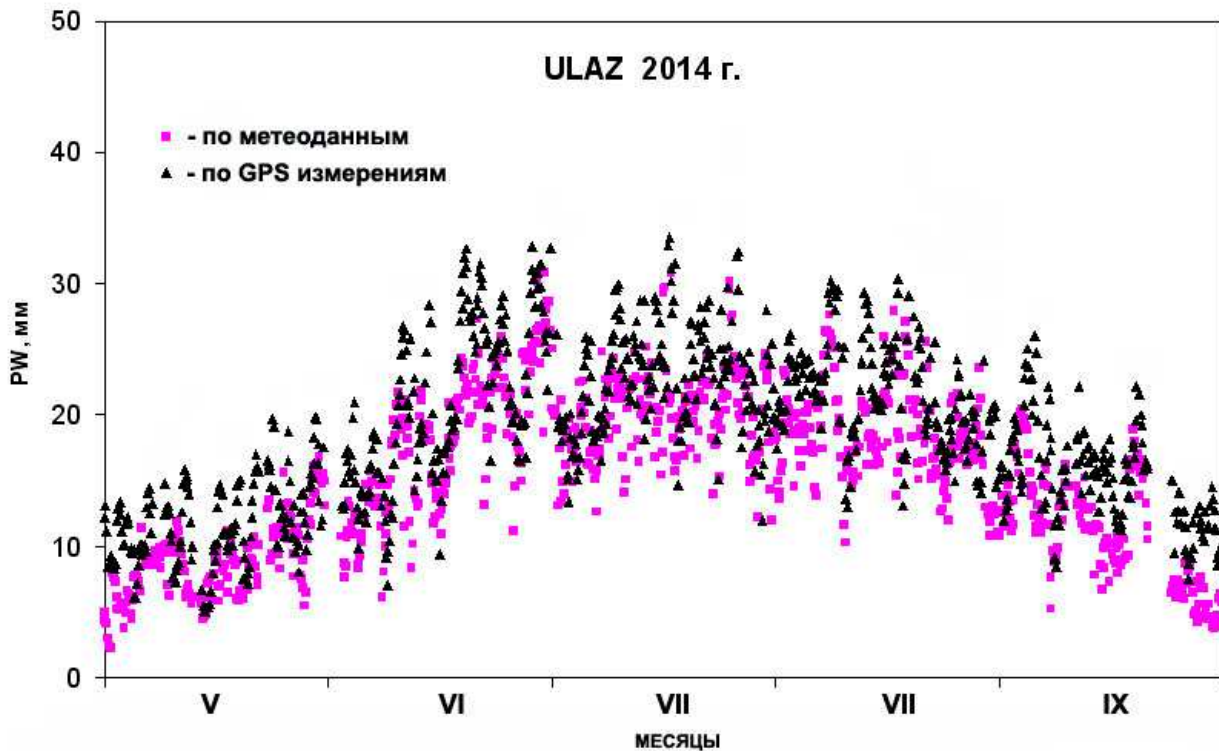


Рис. 5. Графики изменения влагосодержания тропосферы в виде уровня осаждаемой воды (PW) над пунктом ULAZ с мая по сентябрь 2014 г. по метеорологическим данным и по данным GPS измерений.

4. Практические результаты

Таким образом, по формуле (14) можно рассчитывать суммарный водяной пар (IWV) над пунктом GPS измерений. В теплое время года текущая величина измеренного значения ZWD практически пропорциональна текущему уровню влагосодержания, данный факт дает возможность метеорологам использовать GPS сети для дистанционного зондирования атмосферы.

По обработанным данным GPS измерений за весь 2014 г. в пункте наблюдения ULAB (г. Улан-Батор) выявлен годовой ход параметра ZTD. Значения ZWD выявлены путем вычитания значений ZHD, рассчитанных по модели MOPS [12], из данных по ZTD. По формулам (9) и (14) определены значения уровней осаждаемой воды (PW) в пункте наблюдения ULAB. На рис. 5 показаны значения влагосодержания тропосферы в масштабе осаждаемой воды (PW) и уровни атмосферных осадков, накопленных за текущие 6 часов

наблюдений в г. Улан-Батор (www.rp5.ru). Высокий уровень PW не всегда вызывает выпадение осадков из-за недостаточности в том момент степени насыщения паров. Повышение уровня влагосодержания соответствует выпадениям осадков, как правило, при резком понижении температуры воздуха и наличии восходящих потоков воздушных масс [13]. На рис. 6 довольно четко можно наблюдать соответствие выпадения осадков повышению уровня влагосодержания и резкому понижению приземной температуры.

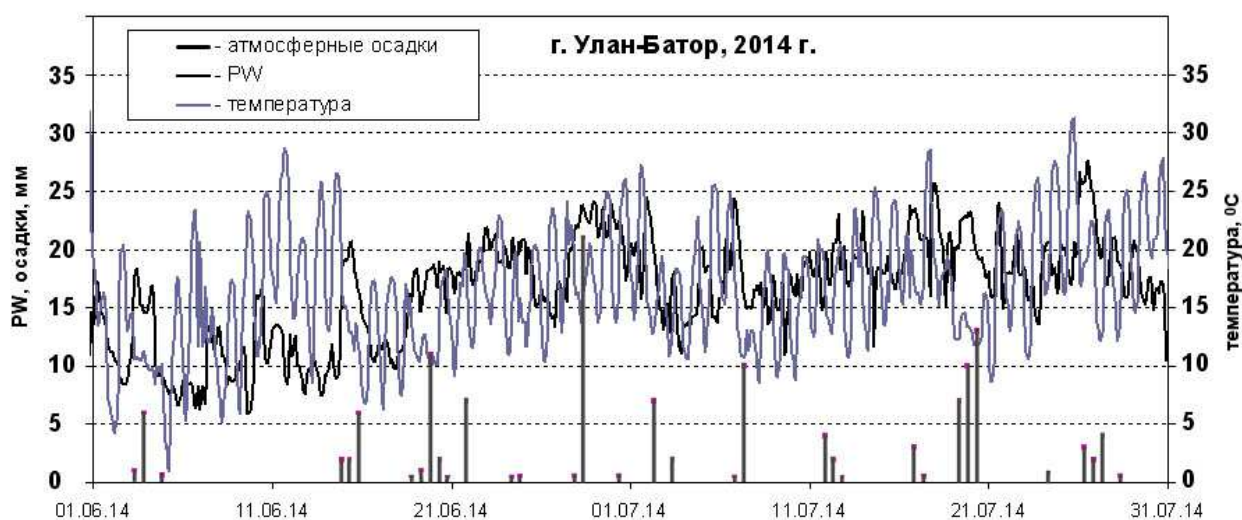


Рис. 6. Графики влагосодержания (PW), уровней накопленных за 6 часов осадков и температурного хода в г. Улан-Батор в июне-июле 2014 г.

5. Заключение

Показано, что применение модели Хопфильда и экспоненциальной модели позволяет рассчитать $N(h)$ до высоты 20 км, а также прогнозировать величину тропосферной зенитной задержки для спутниковых радионавигационных систем. Систематизация параметров для экспоненциальной модели в разные сезоны года для конкретного пункта наблюдения в виде таблицы и создание сезонной и месячной базы данных позволит в дальнейшем с достаточно высокой точностью рассчитывать высотные профили $N(h)$ без использования данных метеорологических радиозондирований.

Приведена методика определения суммарного водяного пара из данных по полной зенитной тропосферной задержке (ZTD), которая выявляется в

результате обработки первичных GPS данных или по метеорологическим данным, по которым вначале определяется индекс рефракции (N). Для выявления «влажной» компоненты из полной тропосферной задержки предложено использовать метод MOPS, который вообще не учитывает никаких метеоданных и позволяет выявить значения по ZWD, IWV и PW с приемлемой точностью.

Рассмотрены статистические результаты вертикального зондирования тропосферы по температуре в п. Ангарск и Усть-Баргузин за 2014 и 2015 года. Определены линейные регрессии соотношений приземной температуры (T) и средневзвешенной температуры (T_m) для обоих пунктов по результатам 2-х летних измерений. Зависимости параметра T_m от приземной температуры позволяют более точно выявлять уровень влагосодержание тропосферы над пунктом наблюдения. В теплое время года точность среднего распределения влагосодержания в пункте ULAZ в 2014 году составила около 3,4 кг/м² или около 17% .

Использование системы глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС) позволит улучшить систему прогноза погоды, проводить исследования по атмосферной циркуляции и гидрологическому мониторингу, а также глобального изменения климата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки РБ в рамках научного проекта № 15-45-04449-р_Сибирь_а.

Литература

1. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., и др. Современные деформации земной коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS геодезии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, - № 11, С. 1814-1825.

2. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., и др. Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физика Земли. 2014. - № 6. С. 70-79.
3. Эминов Р. А., Магеррамов Э. И. К вопросу о GPS измерениях общего количестве осаждаемой воды // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2012. – №7. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/jul12/8/text.pdf>
4. Bevis M. et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // J. of Geoph. Res. vol. 97, no d14, P. 15787-15801. 1992.
5. Davis J. et al. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths // Radio Science, vol. 20, no. 6, P. 1593-1607. 1985.
6. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Особенности рефракции радиоволн в приполярных районах // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. - № 11. с. 1085-1089.
7. Паршуков В.А., Кутуза Б.Г. Астрономическая рефракция в условиях слоистых неоднородностей коэффициента преломления воздуха // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. - № 2. с. 133-151.
8. Hopfield H.S. Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // J. of Geoph. Res. vol. 74, no 18, P. 4487-4499. 1969.
9. Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Лухнев А.В. и др. Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. - № 2. с. 172-177.
10. Saastamoinen, J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. - in: Henriksen, The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophys. Monogr. Ser. AGU. Washington. D.C. 1972. V. 15, P. 247-251.
11. Куницын В. Е., Нестеров И. А., Терешин Н. А. Анализ влагосодержания атмосферы по данным приемников GPS // Журнал радиоэлектроники:

электронный журнал. – 2015. – №6. URL:
<http://jre.cplire.ru/jre/jun15/12/text.pdf>

12. MOPS (1998) Minimum operational performance standards for Global Positioning System/wide area augmentation system airborne equipment. Technical report. Document No. RTCA/DO-229A, June 8, 1998.
13. Марченко О.Ю., Мордвинов В.И., Антохин П.Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенга // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. - № 12. с. 1084-1090.