

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.506.2

Оценка определения влагосодержания тропосферы по данным GPS-наблюдений, радиозондирования и измерений радиометром водяного пара

М.Г. Дембелов, Ю.Б. Башкуев*

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

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

Проведено сравнение данных по влагосодержанию тропосферы, полученных по результатам мониторинга глобальной навигационной спутниковой системой GPS, радиозондирования и измерений радиометром водяного пара (РВП) в пунктах постоянных наблюдений IRKM (Иркутск, 52°13' с.ш., 104°19' в.д., $h = 511$ м) и BADG (Бадары, N51°46' с.ш., 102°14' в.д., $h = 838$ м). Выполнено сравнение значений полной зенитной тропосферной задержки для пункта BADG, полученных в результате обработки первичных GPS-данных программными пакетами GAMIT и Bernese, а также временных рядов влагосодержания тропосферы, полученных в пункте IRKM по GPS-наблюдениям и данным радиозондирования и в пункте BADG по GPS-наблюдениям и измерениям РВП в течение 2020 г. Представлено обоснование использования GPS-метода для получения непрерывных данных о влагосодержании тропосферы на создаваемой сети в Байкальском регионе.

Ключевые слова: GPS-измерения, радиозондирование, радиометр водяного пара, зенитная тропосферная задержка, метеорологические данные, влагосодержание тропосферы; GPS measurements, radio sounding, water vapor radiometer, zenith tropospheric delay, meteorological data, tropospheric moisture content.

Введение

На распространение сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS сквозь нейтральную атмосферу Земли в основном оказывает влияние изменчивость ее показателя преломления. Одной из причин погрешностей измерения расстояния от спутника до приемника является задержка сигнала в нижней части атмосферы. Ее принято называть тропосферной задержкой. Тропосферная задержка заметно снижает точность определения местоположения системой GPS, особенно высоты. Но именно она позволяет использовать GPS-сигналы для исследования физических свойств нижней части атмосферы.

Модели тропосферной задержки сигналов на основе приземных метеорологических данных дают возможность численной коррекции погрешностей GPS-измерений и, следовательно, повышают точность позиционирования.

Существенную роль в атмосферных процессах в широких пространственных и временных масштабах играет влажность воздуха. Это сильно изменчивый параметр. Ограниченная (в пространстве и времени) точность наблюдений за влажностью может привести к погрешностям при численном прогнозировании погоды. Ежегодно увеличивающаяся плотность сети постоянных GPS-измерений может суще-

ственно повысить точность наблюдений в нижней части атмосферы. В работе [1] впервые предложено использовать измерения тропосферной задержки для изучения влагосодержания атмосферы.

Основные положения интерпретации метеорологических, радиометрических и GPS-методов были развиты в классических работах [1–5] еще в конце XX в. Из них следует возможность мультисенсорного анализа водяного пара над различными регионами земного шара [6–18]. Вопросы комплексирования методов его определения (мультисенсорный анализ) становятся актуальными в последнее время [6–10]. Учет содержания водяного пара – важной физической субстанции на радиотрассах «спутник – приемник» – необходим для расчетов пространственно-энергетических характеристик спутниковых радиоканалов. Методика комплексирования подробно описана в работах [7–18]. Она основана на следующих способах определения содержания водяного пара в тропосфере: 1) расчет по формулам Саастамоине-на [3]; 2) измерения радиометром водяного пара (РВП) в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн [5]; 3) GPS-методы анализа водяного пара [1]. Комплексирование этих методов позволяет повысить качество GPS-измерений. В целом результаты многолетних GPS-измерений и комплексирование метеорологических и радиофизических методов в дециметровом и сантиметровом/миллиметровом диапазонах радиоволн дают ряд новых возможностей в исследовании тропосферы, ионосферы, геодинамики, климатических, гидрологических процессов, выпадении атмосферных осадков и др.

* Михаил Георгиевич Дембелов (mdembelov@mail.ru); Юрий Буддич Башкуев (buddich@mail.ru).

В работе [6] показана возможность восстановления атмосферных профилей и суммарного влагосодержания с использованием GPS, радиозатменных наблюдений, микроволновых спутниковых наблюдений ATOVS (The Advanced Television and Infra-red Operational Vertical Sounder), данных радиозондирования и реанализа численного прогнозирования погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Для проверки этой возможности в Швейцарии выполнены наблюдения за уровнем влагосодержания на основе данных микроволнового РВП и станций швейцарской наземной группы GNSS с 1995 по 2018 г. [7].

Сезонные и суточные вариации суммарного влагосодержания атмосферы над северо-востоком Сибири получены по данным ГНСС [8]. В трех северных пунктах наблюдался асимметричный годовой ход суммарного влагосодержания. В работе [9] проведено сравнение рядов интегрального содержания водяного пара за 2015–2017 гг. на восьми парных станциях ГНСС и солнечных фотометрах сети AERONET в Европе. Стандартное отклонение летом составляет 1,31–1,64 мм, зимой снижается до 0,49–0,86 мм. Связь интенсивных атмосферных осадков с изменениями уровней осаждаемой воды (PW) по данным GPS-измерений рассмотрено в работе [10]. Во всех упомянутых работах отмечена большая роль GPS-измерений.

GPS-измерение представляет собой удобный метод получения данных о влагосодержании нижней части атмосферы, в том числе для целей прогнозирования погоды и климата [5]. GPS-приемники имеют небольшие размеры, потребляют очень мало энергии и выполняют измерения, на которые не влияют атмосферные осадки и наличие облачности. GPS-измерения не определяют вертикальные профили температуры, давления и влажности воздуха, как, например, данные метеорологического радиозондирования. Но они позволяют получать временные ряды данных с интервалом ~ 5 мин и меньше, тогда как запуски радиозондов выполняются лишь два раза в сутки. Байкальская сеть постоянных GPS-наблюдений в настоящее время состоит из девяти пунктов и их количество продолжает увеличиваться.

На РВП-измерения влагосодержания атмосферы сильно влияют атмосферные осадки и облака. Кроме того, сеть пунктов радиозондирования на территории России довольно редкая. Количество пунктов РВП-наблюдений незначительно; практически отсутствует доступ к данным сети Интернет. В Байкальском регионе непрерывные РВП-измерения выполняются только в пунктах BADG (Бадары) с 2019 г. и IRKM (Иркутск) с 2021 г. Таким образом, восточные районы России и, в частности, Байкальский регион не имеют развитой сети измерений для комплексирования рассмотренных выше методов.

Цель работы заключается в оценке достоверности определения уровней суммарного влагосодержания тропосферы методом постоянных GPS-наблюдений на создаваемой в Байкальском регионе сети путем сравнения с данными радиозондирования и измерениями РВП. Для полноценного обоснования

методики непрерывного наблюдения важным является возможность использования открытых источников данных приземной метеорологии, радиозондирования, ATOVS, РВП, GPS и др.

Тропосферная задержка и влагосодержание нижней атмосферы по данным GPS-измерений

Зондирование атмосферы методом GPS-измерений дает возможность непрерывно получать значения полной зенитной тропосферной задержки (ZTD) и суммарного влагосодержания нижней атмосферы. При GPS-измерениях возникают погрешности, которые можно описать фазовой задержкой сигнала Φ , определяемой выражением [19]:

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

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 [20]; ε – различные приборные шумы.

Значения STD получаются в результате вычета других компонент фазовой задержки, приведенных в формуле (1). Наклонная тропосферная задержка STD связана с полной зенитной тропосферной задержкой (ZTD) соотношением $ZTD = \text{STD}/m(\theta)$, где $m(\theta)$ – функция отображения, зависящая от угла места спутника над плоскостью горизонта θ [21].

Полная зенитная тропосферная задержка представляет собой сумму «сухой», или гидростатической, (ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих. При этом «влажная» составляющая вносит значительно меньший вклад в полную задержку, особенно зимой. Для моделирования ZHD и ZWD на основе приземных метеорологических данных наиболее точными являются формулы Саастамонена [3]:

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

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

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

Влагосодержание в атмосфере представляется вертикально интегрированной массой водяного пара на единицу площади (IWV, кг/м²) или высотой, которая равна высоте колонки, соответствующей осажденной жидкой воде, (PW, м). Очевидно, что $PW = IWV/\rho$, где ρ – плотность воды, кг/м³. Влагосодержание тропосферы над пунктом наблюдения в виде IWV можно определить с помощью «влажной» тропосферной задержки ZWD по формуле [22, 23]:

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

где $k_2 = 3,73 \cdot 10^5$ – рефракционная константа, К²/мбар [4]; $R_W \approx 4,6$ – газовая постоянная для водяного пара, Дж·К⁻¹·кг⁻¹; T_m – «средневзвешенная температура» по упругости водяного пара в условном вертикальном столбе над пунктом наблюдения, определяется отношением интегралов [1]:

$$T_m = \frac{\int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T} dh}{\int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh}. \quad (5)$$

По результатам обработки данных радиозондирования (2825 запусков аэрозондов) в пункте аэрологических наблюдений Ангарск в течение 2017–2020 гг. определена линейная регрессия для параметра T_m в виде зависимости от приземной температуры воздуха T : $T_m = 75,5 + 0,7T$.

Вблизи точки наблюдения BADG отсутствует пункт запусков аэрозондов, поэтому для определения T_m применялись высотные тропосферные профили из архива ATOVS (ready.arl.noaa.gov). Архивные данные хранятся в формате GDAS с временным шагом 3 ч. Влагосодержание вычислялось по GPS-измерениям с интервалом не меньше 3 ч по формуле (5) с использованием данных ATOVS. Отметим, что сайт NOAA не разрешает внешний

доступ к высотным профилям программным способом. Поэтому для удобства расчетов определена регрессия между T_m и приземной температурой воздуха T по 1464 высотным тропосферным профилям ATOVS для 2020 г.: $T_m = 61,4 + 0,77T$.

Как правило, для расчетов используются приземные метеорологические данные ближайших к пункту наблюдения метеостанций Росгидромета, расположенных на некотором удалении и на другой высоте относительно уровня моря. Такое расположение метеостанций заметно увеличивает точность (примерно на 2%) определения влагосодержания по GPS-данным. Мы выбирали приземные метеорологические данные метеостанций, расположенных в непосредственной близости к пунктам GPS-наблюдений IRKM и BADG, с частотой 10 мин в каждом пункте наблюдения. Например, ближайшей к пункту BADG является метеостанция Кырен, удаленная на 11 км и расположенная на 86 м ниже относительно уровня моря.

Для обработки GPS-данных используется программный пакет GAMIT [24] – универсальный пакет в первую очередь для оценки точности координат станции и скорости ее относительного движения, а также для выявления ионосферных и тропосферных задержек сигналов. Также в Международной службе IGS (International GNSS Service) применяется программный пакет Bernese; данные по тропосферной задержке являются одним из продуктов для пользователей [25]. Зенитная тропосферная задержка определяется для каждой из ~360 станций глобальной сети в PPP-режиме (Precise Point Positioning) с интервалом 5 мин. Оба программных пакета дают возможность получения непрерывных данных по полной зенитной тропосферной задержке и ее горизонтальным градиентам.

Нами создан специальный FTP-сайт с доступом к результатам постоянных GPS-наблюдений ключевых пунктов в Байкальском регионе. На рис. 1 представлены временные ряды ZTD, упругости водяного

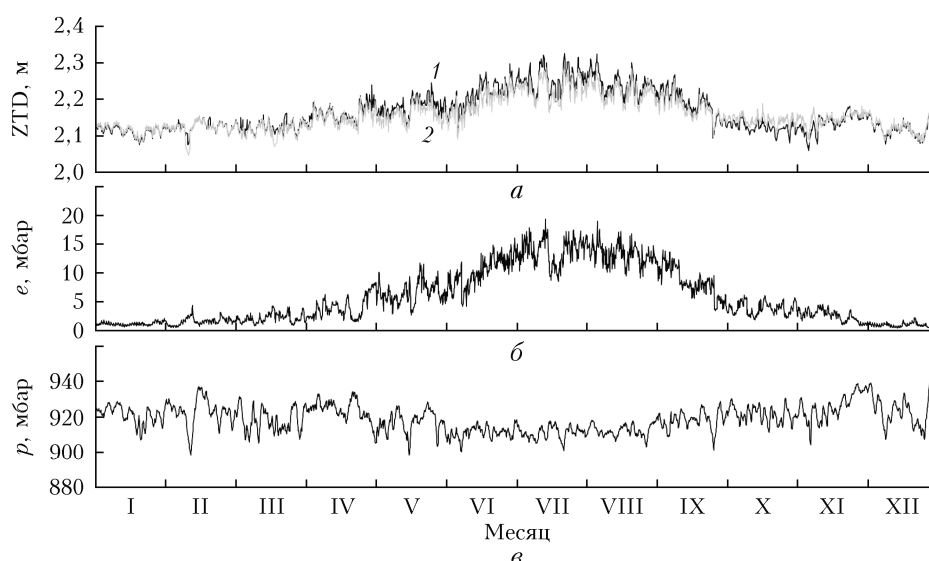


Рис. 1. Годовые ряды: *a* – полной зенитной тропосферной задержки, полученные при обработке GPS-данных программными пакетами GAMIT (1) и Bernese (2); *b* – упругости водяного пара; *c* – атмосферного давления. Измерения выполнены в пункте наблюдения BADG (Бадары) с 1 января по 31 декабря 2020 г.

пара и атмосферного давления для пункта наблюдения BADG за 2020 г. Графики на рис. 1, *a* позволяют сравнить годовые вариации ZTD, полученные в результате обработки первичных GPS-данных программными пакетами GAMIT [24] и Bernese [26]. Значения ZTD зимой ниже, чем в летние месяцы. В течение года значения ZTD колеблются в пределах ~15–100 мм в зависимости от времени года, в среднем – ~40–50 мм. Сильные колебания в основном связаны с «влажной» компонентой, хотя ZWD составляет ~5% от общей задержки. Для станции, расположенной на большей высоте над уровнем моря, характерна меньшая изменчивость ZTD. Сравнение графиков на рис. 1, *a* показывает очень высокий уровень взаимной корреляции данных ($K = 0,97$), стандартное отклонение (СКО) разницы двух графиков составило 7 мм. На рис. 1, *б* и *в* виден высокий уровень взаимной корреляции между изменениями ZTD (GAMIT) и упругости водяного пара в летнее время ($K = 0,95$), а также между изменениями ZTD (GAMIT) и атмосферного давления зимой ($K = 0,93$). Таким образом, полная зенитная тропосферная задержка в зимнее время может моделироваться приземным атмосферным давлением, а в летнее – приземным значением упругости водяного пара.

Сравнение с данными радиозондирования

Запуски радиозондов являются одним из основных оперативных источников информации о метеорологических параметрах на разных высотах, в том числе о влажности воздуха. Они могут быть использованы для независимой проверки оценок ZTD по GPS-измерениям. Сеансы радиозондирования выполняются на территории России Аэрологической службой Росгидромета на сети, состоящей в настоящее время примерно из 115 пунктов. В большинстве случаев пункты GPS-измерений и запусков радиозондов не совпадают. Аэрологическая станция Ангарск расположена на расстоянии ~42 км от пункта постоянных GPS-измерений IRKM. Разница в высоте расположения над уровнем моря обоих пунктов наблюдения не превышает 60 м. Это может по-

влиять на соответствие значений IWV, но не более чем на 0,5%. При анализе учитывались только профили радиозондов с максимальной высотой запусков более 20 км.

Гидростатическая компонента задержки ZHD очень близка к рассчитанным по формуле Саастамойнена [3]. При выводе формул (2) и (3) предполагалось, что температурный профиль представляет собой стандартный градиент, водяной пар имеет свойства идеального газа и находится в состоянии термодинамического равновесия, атмосферное давление моделируется барометрической формулой с учетом температуры воздуха [27]. Формула (2) для расчета ZHD на основе значений приземного давления используется для определения влагосодержания из GPS-данных (ZTD).

На рис. 2 приведены временные ряды влагосодержания тропосферы в виде PW за 2020 г. Значения определены по результатам обработки GPS-измерений программным пакетом GAMIT и данных радиозондирования. Коэффициент взаимной корреляции между рядами PW в течение всего года равен 0,82, стандартное отклонение разницы данных составило 4,5 мм. СКО разницы растет с 2,5 мм в зимнее время до 5,8 мм в летнее. Этот рост связан с увеличением влажности воздуха в теплое время года и естественной изменчивостью полей водяного пара. СКО в летнее время составляет примерно 16% от среднего летнего значения суммарного водяного пара для Иркутска. Это существенно выше заданной погрешности измерений датчиками влажности радиозондов, которая составляет 5%.

Наиболее вероятная причина такого сезонно-зависимого разброса значений СКО – пространственная изменчивость полей влажности. В периоды высокой влажности распределение водяного пара более неоднородно. Кроме того, горизонтальные движения воздушных масс могут приводить к большему расхождению между точками измерений GPS и радиозондами. Вариативность данных, полученных по GPS-измерениям, выше, чем у РВП. Это означает, что GPS-измерения более чувствительны к тропосферным неоднородностям, и это может быть использовано для уточнения данных о полях влагосодержания тропосферы.

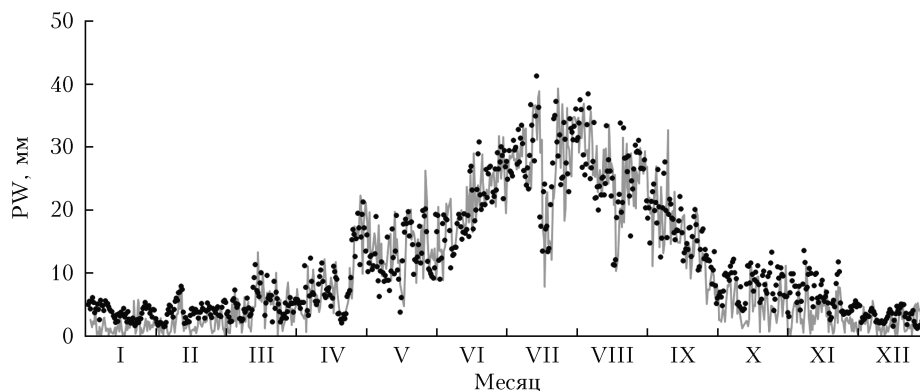


Рис. 2. Годовые ряды значений влагосодержания тропосферы над пунктом наблюдения IRKM (Иркутск) по результатам GPS-измерений (кривая) и данным радиозондирования (точки) за 2020 г.

Сравнение с данными измерений радиометром водяного пара

В работе [28] впервые показано удовлетворительное согласие между уровнями влагосодержания тропосферы, измеренными РВП и полученными из обработки GPS-данных с точностью $\sim 1 \text{ кг/м}^2$. РВП, установленный на обсерватории «Бадары» Института прикладной астрономии РАН, позволяет получать данные о суммарном влагосодержании тропосферы и водозапаса облаков. Он измеряет яркостную температуру излучения тропосферы на двух частотах: $20,70 \pm 0,25$ и $31,40 \pm 0,25$ ГГц. Радиометрический метод позволяет определять профили влажности и температуры атмосферы, водности облаков в тропосфере на основе измерений характеристик нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в микроволновом диапазоне [29]. Это наиболее точный метод определения влагосодержания тропосферы и водозапаса облаков.

На рис. 3 приведены временные вариации суммарного влагосодержания в виде PW в пункте BADG

(Бадары) и измеренных значений водозапаса облаков в 2020 г. К сожалению, имеют место пропуски РВП-измерений, наиболее заметные с 20 по 29 мая и с 1 по 15 октября. На графике 1 рис. 3, *a* наблюдаются вертикальные «выбросы» данных, которые соответствуют периодам выпадения атмосферных осадков. При удалении «выбросов» значения можно восстановить по формулам (2)–(4) с использованием метеорологических данных.

На рис. 4, *a* приведено сравнение значений PW, полученных в результате 2531 GPS- и РВП-измерений в течение 2020 г. Сплошная линия показывает линейную регрессию данных. Коэффициент взаимной корреляции между данными с учетом удаленных «выбросов» равен 0,91. Среднее отклонение и СКО разницы представленных данных равны, соответственно, 0,12 и 1,6 мм в течение всего года. СКО составило 0,9 мм в зимнее время и 2,2 мм в летнее. При отдельном рассмотрении дневных (14:00 LT) и ночных (02:00 LT) значений PW в течение года среднее отклонение и СКО разницы составили, соответственно, 0,15 и 1,81 мм днем и 0,08 и 1,38 мм ночью. Закономерно, что в ночное

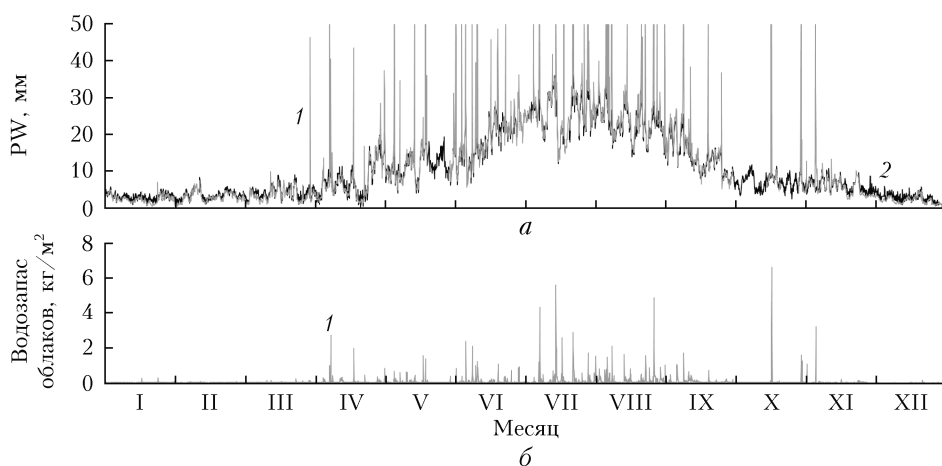


Рис. 3. Временные ряды: *a* – влагосодержания тропосферы, *б* – водозапаса облаков по данным РВП (1) и результатам обработки GPS-измерений с помощью пакета Bernese (2)

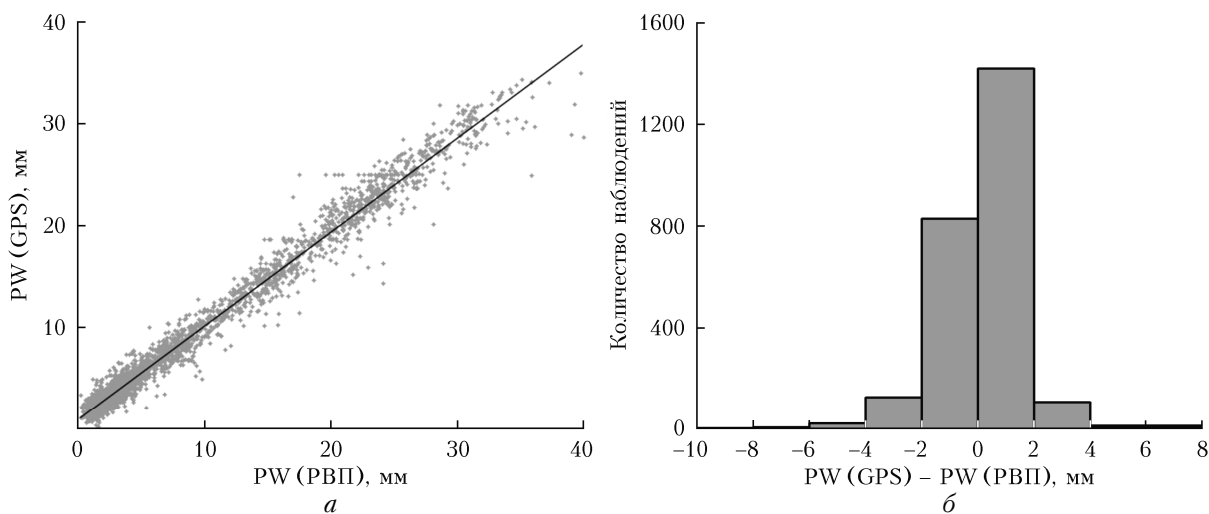


Рис. 4. Суммарное влагосодержания в виде PW по данным GPS-наблюдений в сравнении с измерениями РВП (*a*) и гистограмма их разницы (*б*)

время, когда уровень влагосодержания нижней части атмосферы заметно понижается, точность измерений PW повышается.

Гистограмма разницы $PW(GPS) - PW(PВП)$ на рис. 4, б показывает, что 88% результатов попадает в интервал ± 2 мм. Такое хорошее совпадение подтверждает надежность использования постоянных GPS-измерений для практически непрерывного определения влагосодержания тропосферы.

Заключение

Атмосферный водяной пар играет важную роль в явлениях, связанных с глобальным и региональными гидрологическими циклами и изменением климата. В восточных районах России пространственно-временные вариации тропосферного водяного пара недостаточно изучены из-за очень редкой сети постоянно действующих станций GPS-ГЛОНАСС и отсутствия долговременных рядов наблюдений осаждаемого водяного пара с высоким временным разрешением. Исследование атмосферного водяного пара с использованием GPS-ГЛОНАСС спутников, работающих в дециметровом диапазоне радиоволн на радиотрассах «спутник – приемник», является новым прикладным направлением. Оно имеет и большое фундаментальное значение, связанное с поиском новых физических моделей для создания современных радиосистем, работающих в космосе. Разработка моделей тропосферы для расчетов космических радиолиний – сложная задача из-за многообразия геофизических факторов, влияющих на условия нижней атмосферы. Основной трудностью для разработки численных моделей является отсутствие достаточно объема экспериментальных данных.

Использование тропосферных данных сети постоянных GPS-наблюдений в Байкальском регионе позволит решить следующие задачи, связанные с изучением нижней части атмосферы:

- 1) определение PW по приземным метеорологическим данным с использованием сезонных изменений вертикальных профилей температуры воздуха;
- 2) выделение облачной составляющей тропосферной задержки из «влажной» составляющей ZWD;
- 3) определение многолетнего тренда суммарного влагосодержания тропосферы;
- 4) изучение свойства углов рефракции GPS-сигналов в тропосфере в разные сезоны;
- 5) определение особенностей поведения PW в разное время суток.

Авторы выражают благодарность заведующему Отделением астрономических наблюдений Института прикладной астрономии РАН Ильину Геннадью Николаевичу за предоставление данных измерений радиометром водяного пара на ст. Бадары.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2020-787 на реализацию крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

1. *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 // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 15787–15801.
2. *Hopfield H.S.* Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74, N 18. P. 4487–4499.
3. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellite // *Int. Sympos. on the Use of Artificial Satellite.* Washington. 1971. P. 247–251.
4. *Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E., Elgered G.* Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // *Radio Sci.* 1985. V. 20. P. 1593–1607.
5. *Elgered G., Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I.* Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 6541–6555.
6. *Zhang Q., Ye J., Zhang S., Han F.* Precipitable water vapor retrieval and analysis by multiple data sources: Ground-based GNSS, radio occultation, radiosonde, microwave satellite, and NWP reanalysis data // *J. Sensors.* 2018. V. 2018. Article ID 3428303.
7. *Bernet L., Brockmann E., Clarmann T., Kampfer N., Mahieu E., Matzler C., Stober G., Hocke K.* Trends of atmospheric water vapour in Switzerland from ground-based radiometry, FTIR and GNSS data // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 19. P. 11223–11244.
8. *Калинников В.В., Хуторова О.Г.* Поле интегрального влагосодержания над северо-востоком Сибири по данным радионизмерений глобальных навигационных спутниковых систем // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 10. С. 5–15.
9. *Калинников В.В., Хуторова О.Г.* Валидация интегрального содержания водяного пара по данным наземных измерений // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2019. Т. 55, № 4, С. 58–63.
10. *Benevides P., Catalao J., Miranda P.M.A.* On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the now-casting of rainfall // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2015. N 15. P. 2605–2616.
11. *Zhang F., Barriot J.-P., Xu G., Hopuare M.* Modeling the slant wet delays from one GPS receiver as a series 376 expansion with respect to time and space: Theory and an example of application for the Tahiti island // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020. V. 58. P. 7520–7532.
12. *Yang P., Zhao Q., Li Z., Yao W., Yao Y.* High temporal resolution global PWV dataset of 2005–2016 by using a neural network approach to determine the mean temperature of the atmosphere // *Adv. Space Res.* 2021. V. 67. P. 3087–3097.
13. *Zhu D., Zhang K., Yang L., Wu S., Li L.* Evaluation and calibration of MODIS near-infrared precipitable water vapor over China using GNSS observations and ERA-5 reanalysis dataset // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 2761.
14. *Sun Z., Zhang B., Yao Y.* Improving the estimation of weighted mean temperature in China using machine learning methods // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 1–18.
15. *Baltink H.K.* Integrated atmospheric water vapor estimates from a regional GPS network // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N D3. P. 4025. DOI: 10.1029/2000jd000094.
16. *Suresh Raju C., Saha K., Thampi B.V., Parameswaran K.* Empirical model for mean temperature for Indian zone and estimation of precipitable water vapor from ground based GPS measurements // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25. P. 1935–1948.

17. *Mekik C., Deniz I.* Modelling and validation of the weighted mean temperature for Turkey // *Meteorol. Appl.* 2017. V. 24. P. 92–100.
18. *Zhang F., Barriot J.-P., Xu G., Hopuare M.* Analysis and comparison of GPS precipitable water estimates between two nearby stations on Tahiti island // *Sensors*. 2019. V. 19. P. 1–26.
19. *Kaplan E., Hegarty C.* Understanding GPS: Principles and applications. Boston/London: Artech house, 2005. 723 p.
20. *Ashby N.* Relativity in the global positioning system // *Living Rev. Relativity*. 2003. V. 6, N 1. P. 1–42.
21. *Niell A.E.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wave lengths // *J. Geophys. Res: Solid Earth*. 1996. V. 101, N B2. P. 3227–3246.
22. *Lukhneva O.F., Dembelov M.G., Lukhnev A.V.* The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data // *Geodyn. Tectonophys.* 2016. V. 7, N 4. P. 545–553.
23. *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 атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 2. С. 172–177; *Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Lukhnev A.V., Lukhneva O.F., San'kov V.A.* Diagnostics of atmospheric water vapor content according to GPS measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 4. P. 291–296.
24. *King R.W., Bock Y.* Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 9.9. Mass. Inst. of Technol. 1999. Cambridge.
25. URL: <http://www.igs.org/products> (last access: 10.08.2021).
26. *Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M.* Bernese GPS software version 5.0. Astronomical Institute, University of Bern. Bern. 2007.
27. *Кашкин В.Б., Владимиров В.М., Клыков А.О.* Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS по спутниковым данным ATOVS // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 7. С. 615–621; *Kashkin V.B., Vladimirov V.M., Klykov A.O.* Zenith tropospheric delay of GLONASS/GPS signals on the basis of ATOVS satellite data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 68–73.
28. *Rocken C., Ware R., Van Hove T., Solheim F., Alber C., Johnson J.* Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2631–2634.
29. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваяев Д.М., Щукин Г.Г.* Результаты микроволнового эксперимента: перспективы радиометра водяного пара // *Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2019. № 670. С. 150–153.

M.G. Dembelov, Yu.B. Bashkuev. Estimation of the moisture content of the troposphere derived from GPS observations, radiosonde data, and measurements with a water vapor radiometer.

The comparison of data on the moisture content of the troposphere obtained from GPS satellite monitoring, radiosondes, and water vapor radiometer measurements at permanent observation points IRKM (Irkutsk, 52°13' N, 104°19' E, $h = 511$ m) and BADG (Badary, 51°46' N, 102°14' E, $h = 838$ m) is presented. Values of the total zenith tropospheric delay for the BADG observation point derived from processing of the primary GPS data with the GAMIT and Bernese software packages are compared. Time series of tropospheric moisture content for the IRKM station derived from GPS observations and radio soundings and for the BADG station found from GPS observations and water vapor radiometer measurements during 2020 are analyzed and compared. The use of the GPS method for monitoring the moisture content of the troposphere at the network being created in the Baikal region has been substantiated.