

Диагностика содержания атмосферного водяного пара по данным GPS-измерений

М.Г. Дембелов¹, Ю.Б. Башкуев¹, А.В. Лухнев²,
О.Ф. Лухнева², В.А. Саньков^{2*}

¹Институт физического материаловедения СО РАН

670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

²Институт земной коры СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

Поступила в редакцию 22.05.2014 г.

Для изучения геодинамических процессов в Байкальском регионе создана непрерывно действующая GPS-сеть из семи постоянных пунктов наблюдения. Результаты обработки первичных GPS-измерений дают непрерывные атмосферные данные в виде полной тропосферной зенитной задержки, которые могут быть использованы для метеорологических и климатологических исследований. Полная задержка является суммой «сухой», или гидростатической, и «влажной» компонент. Влажная компонента определяет количество суммарного водяного пара и количество осаждаемой воды над пунктом измерений. Таким образом, GPS-измерения дают возможность получения исходных данных для создания новых численных моделей тропосферной зенитной задержки и суммарного осаждаемого водяного пара для задач метеорологии.

Ключевые слова: GPS-измерения, тропосферная зенитная задержка, метеорологические данные, индекс рефракции, атмосферный водяной пар; GPS measurements, troposphere zenith delay, meteorology data, refraction index, atmosphere water vapor.

Введение

Разработка радиоволновых методов исследования радиоклимата и слоистых структур в атмосфере Земли с помощью высокостабильных радиосигналов спутников навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и др.) является актуальной задачей современной радиофизики. Влияние тропосферы на процесс распространения радиоволн проявляется в виде рефракции. Индекс рефракции радиоволн N определяется в основном температурой, давлением и упругостью водяного пара. Сигналы системы позиционирования GPS также испытывают влияние неоднородной тропосферы, распространение в тропосфере учитывается тропосферной задержкой сигналов. Полная тропосферная зенитная задержка (ZTD) — одна из наиболее существенных поправок, которые учитываются при высокоточных геодезических расчетах по GPS-данным с помощью программного пакета GAMIT [1, 2]. Использование методики точной оценки ZTD [3] показало, что ее можно применять в атмосферных и климатологических приложениях.

Сложное распределение облаков и дождевых осадков обусловлено быстрой изменчивостью содержания водяного пара в атмосфере. Температура и влажность, как правило, немонотонно изменяются с высотой [4]. Водяной пар играет важную роль в качестве основного климатического параметра в динамике тепловых процессов, в атмосферных и гидрологических циклах в локальном и глобальном масштабах. Количественная оценка содержания атмосферного водяного пара определяется в суточном ходе по параметру влажной зенитной задержки (ZWD), выявленному по данным GPS-измерений. Параметр ZWD можно выделить из ZTD, учитывая дополнительно только атмосферное давление. В зимнее время года при малом влагосодержании и низкой температуре воздуха значения ZWD минимальны. В летнее время при высоком влагосодержании и высокой температуре воздуха значения ZWD принимают максимальные и более переменные значения. Количество водяного пара в атмосфере над данной точкой земной поверхности определяется в виде вертикально интегрированной массы водяного пара в расчете на единицу площади (IWV). Соответствующая параметру IWV осаждаемая вода определяется в виде колонки жидкой воды (PW).

Цель статьи — на примере пунктов наблюдения ULAZ (г. Улан-Удэ) и IRKT (г. Иркутск) сравнить значения ZTD, полученные по GPS-измерениям и на основе метеорологических данных. Так как величина

* Михаил Георгиевич Дембелов (mdembelov@yandex.ru); Юрий Буддич Башкуев (buddich@mail.ru); Андрей Викторович Лухнев (loukhnev@crust.irk.ru); Ольга Федоровна Лухнева (olgal@crust.irk.ru); Владимир Анатольевич Саньков (sankov@crust.irk.ru).

ZWD практически пропорциональна влагосодержанию в тропосфере, то это дает возможность использовать GPS-сети для дистанционного зондирования атмосферы в интересах метеорологии и климатологии.

1. Индекс рефракции и тропосферная зенитная задержка

Используемый в радиометеорологии индекс рефракции N в тропосфере подчиняется закону аддитивности и записывается в виде суммы «сухой» и «влажной» составляющих:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{k_1}{T} p + \frac{k_2}{T^2} e, \quad (1)$$

где n – коэффициент преломления; $k_1 = 77,6$ – первая рефракционная константа, К/мбар (1 мбар = 10^2 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, 6].

Формулу (1) можно записать как $N = N_{DRY} + N_{WET}$, где $N_{DRY} = \frac{77,6}{T} p$ – индекс рефракции для сухого воздуха, зависящий от изменения температуры и давления воздуха, $N_{WET} = \frac{3,73 \cdot 10^5}{T^2} e$ – индекс рефракции для водяного пара. На рис. 1 показан годовой ход параметров N , N_{DRY} и N_{WET} для г. Улан-Удэ за 2012 г. В целом «влажная» составляющая N_{WET} вносит значительно меньший вклад в определение индекса рефракции (коэффициент преломле-

ния), особенно в зимний период. «Сухая» компонента N_{DRY} составляет определяющую часть индекса рефракции.

По формуле (1) находится индекс рефракции N , если известны температура, давление и упругость водяного пара над пунктом приема GPS-сигналов. Из формулы для N следует, что ZTD также является суммой «сухой» (ZHD) и «влажной» (ZWD) составляющих. Полная задержка пути сигнала от GPS-спутника до приемной антенны равна разности геометрического расстояния от реального пути сигнала в атмосфере: $ZTD = \int_{\text{Атмосфера}} n(h) dh - \int_{\text{Вакуум}} dh$. Сле-

довательно, компоненты зенитной задержки могут быть получены посредством интегрирования по вертикальному профилю соответствующих индексов рефракции [3]:

$$ZHD = 10^{-6} \int_{h_S}^{\infty} N_D(h) dh; \quad (2)$$

$$ZWD = 10^{-6} \int_{h_S}^{\infty} N_W(h) dh, \quad (3)$$

где h_S – высота антенны над уровнем моря, км; N_D , N_W – зависящие от высоты индексы рефракции сухого воздуха и водяного пара. Отметим, что интегрирование для водяного пара может быть ограничено верхней частью тропосферы, т.е. примерно до 11000–12000 м, а для сухого воздуха интегрирование может быть продолжено и в область тропопаузы.

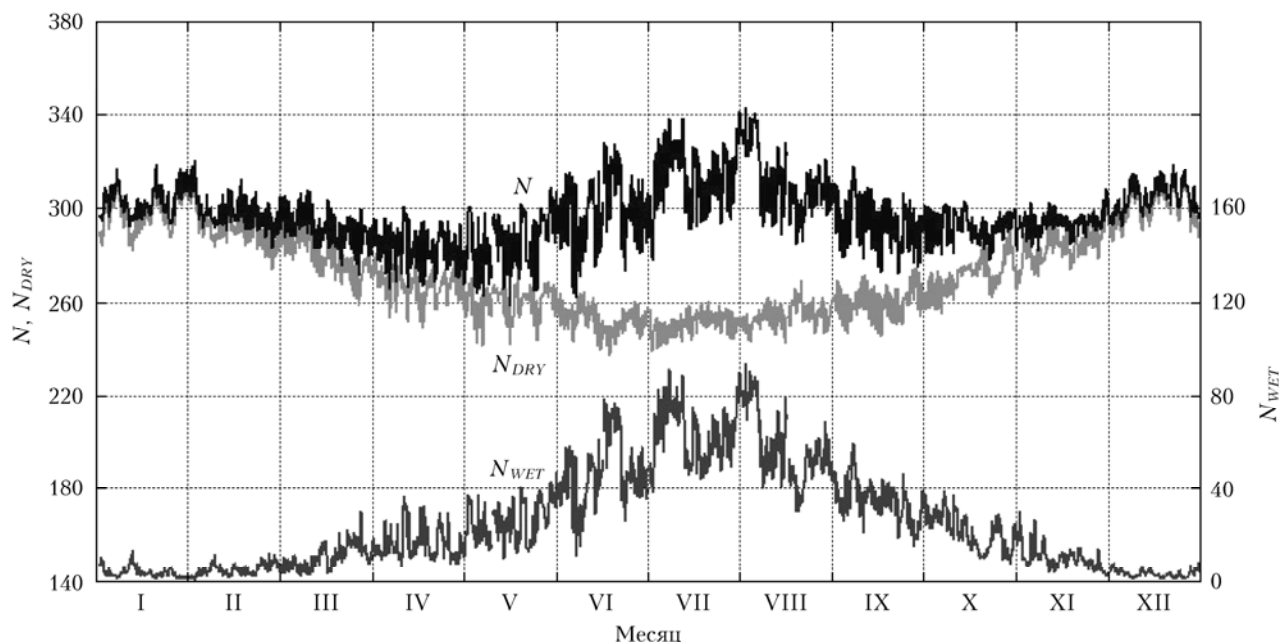


Рис. 1. Значения N , N_{DRY} и N_{WET} по месяцам 2012 г. для г. Улан-Удэ

2. Формулы для определения суммарного пара и осаждаемой воды

Параметр ZHD хорошо моделируется в предположении, что атмосфера находится в состоянии гидростатического равновесия. Такое моделирование возможно с использованием данных приземного давления и температуры. В работе [7] теоретически предложено гидростатический профиль рефракции выразить в виде модели

$$N_D = N_{DRY}(1 - h/h_D)^4. \quad (4)$$

Здесь $h_D = 40136 + 148,72t$ – эффективная высота гидростатической компоненты, м; t – приземная температура воздуха, °C. Высота h может изменяться от 0 до h_D . Подставив выражение (4) в формулу (2) и выполнив интегрирование, получим соотношение для сухой зенитной задержки

$$ZHD = 2 \cdot 10^{-7} N_{DRY} h_D. \quad (5)$$

Аналогично записывается выражение для индекса рефракции водяного пара в виде $N_W = N_{WET} \times (1 - h/h_W)^4$, которое подставляется в интеграл (3), и получается следующее соотношение:

$$ZWD = 2 \cdot 10^{-7} N_{WET} h_W, \quad (6)$$

(параметр h_W является максимальной высотой над уровнем моря, на которой может присутствовать водяной пар, т.е. это высота тропосферы).

Формулы (5) и (6) связывают индексы рефракции для сухого воздуха и водяного пара с параметрами ZHD и ZWD соответственно. В настоящее время для расчета этих параметров по метеоданным

наиболее распространенной и достаточно точной является модель J. Saastamoinen [6, 8, 9]:

$$ZHD = \frac{0,002277p}{f(\varphi, h_S)}; \quad (7)$$

$$ZWD = \frac{0,002277e \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right)}{f(\varphi, h_S)}, \quad (8)$$

где $f(\varphi, h_S) = 1 - 0,00266\cos^2\varphi - 0,00028h_S$, φ – географическая широта расположения приемника, град. Для пунктов ULAZ и IRKT знаменатель $f(\varphi, h_S)$ в формулах (7) и (8) равен приблизительно 1,00054, и в расчетах ZHD и ZWD его учет не превышает 0,08%, поэтому им можно пренебречь. Отметим, что в отличие от формулы (5) в формуле (7) нет зависимости от температуры, что значительно упрощает определение параметра ZWD по GPS-измерениям с учетом лишь приземного атмосферного давления в пункте приема по формуле $ZWD = ZTD - ZHD$.

На рис. 2 показан для сравнения годовой ход ZWD по GPS-измерениям с учетом приземного атмосферного давления и рассчитанных по формуле (6) для пункта ULAZ в 2012 г. Коэффициент взаимной корреляции приведенных на рис. 2 данных составил 0,955.

Для определения точности моделей вычисления ZTD как сумм ZHD и ZWD по формулам (5)–(8) рассчитаны разности модельных значений ZTD по метеоданным и значений ZTD, полученных по GPS-измерениям на пунктах ULAZ и IRKT.

На рис. 3 приведены временные ряды за 2012 г. $ZTD_C - ZTD$ и $ZTD_X - ZTD$, где ZTD_C – модельная полная тропосферная зенитная задержка по формулам J. Saastamoinen (7) и (8), ZTD_X – модельная

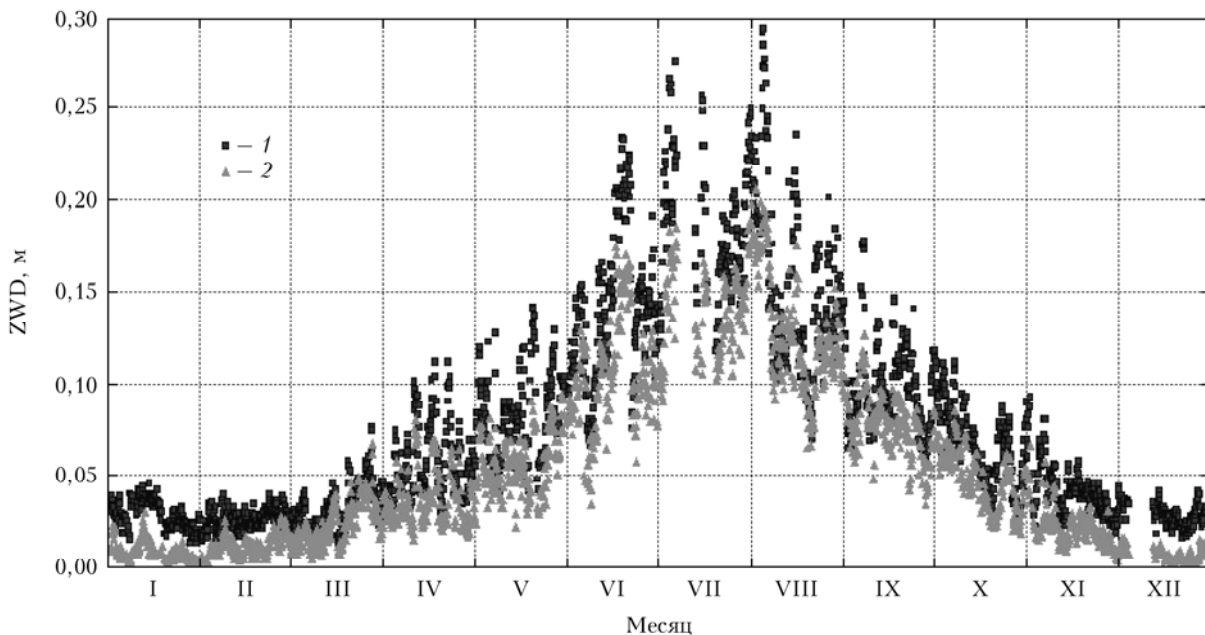


Рис. 2. Годовой ход параметра ZWD на станции ULAZ: 1 – по данным GPS-измерений с учетом приземного атмосферного давления; 2 – по метеорологическим данным, учитывающим приземную температуру и упругость водяного пара

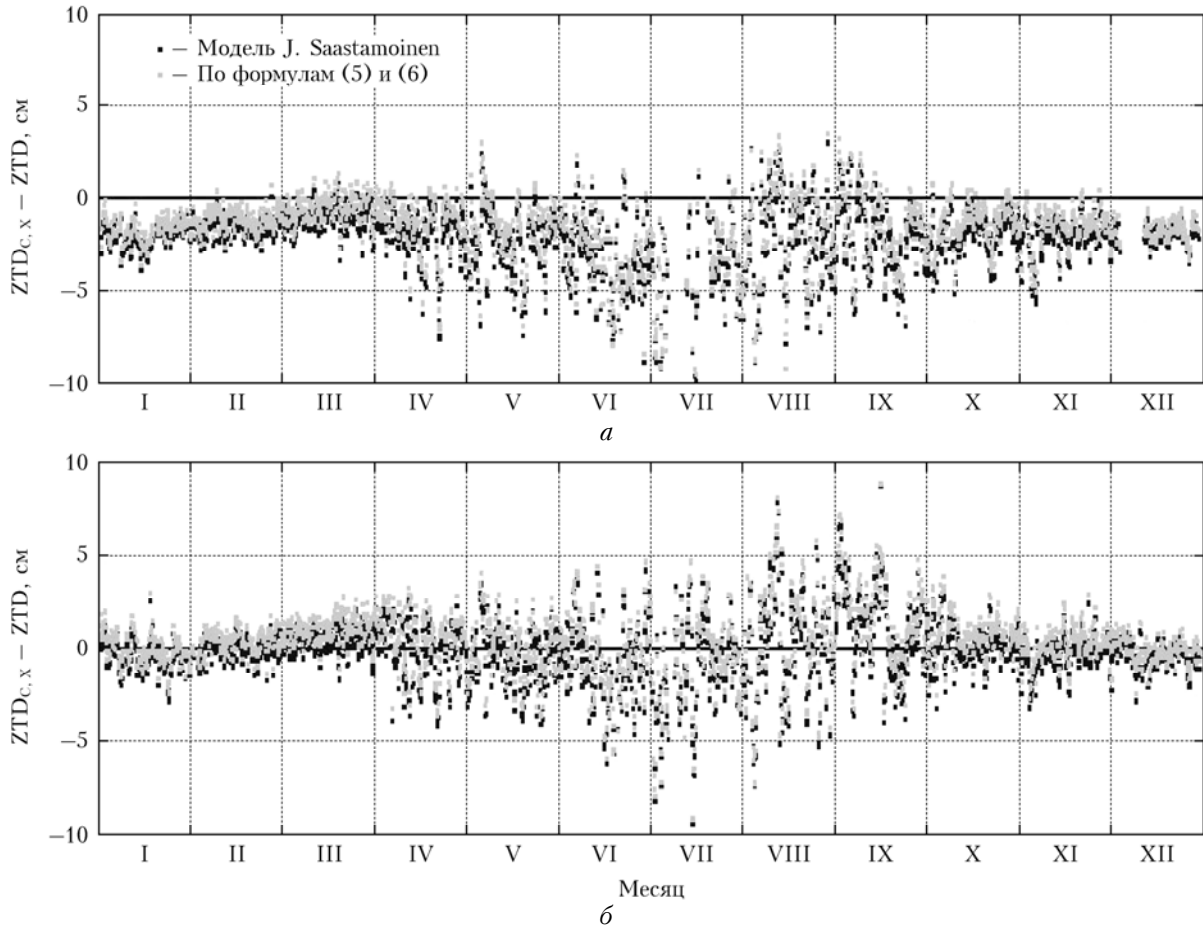


Рис. 3. Временные ряды для пунктов ULAZ (а) и IRKT (б) разностей $ZTD_C - ZTD$ и $ZTD_X - ZTD$

полная тропосферная зенитная задержка по формулам (5) и (6). Для пункта ULAZ средние отклонения составили соответственно $-2,76$ и $-2,29$ см, а для пункта IRKT $-0,26$ и $0,75$ см. В летнее время максимальный разброс отклонений достигает 10 см для обоих пунктов измерений и при этом находится в пределах 4,2% относительно значений ZTD по GPS-данным. Можно сказать, что формулы для расчета параметра ZTD на основе метеорологических данных обеспечивают вполне удовлетворительную точность, причем взаимная корреляция данных ZTD_C и ZTD_X для обоих пунктов измерений составляет практически единицу.

Формулу (3) для параметра ZWD можно записать с учетом выражения для N_{WET} в виде

$$ZWD = 10^{-6} k_2 \int_{h_S}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh. \quad (9)$$

В работах [3, 6, 8] рассматривается параметр «средневзвешенной температуры» T_m над пунктом приема сигнала как отношение

$$T_m = \frac{\int_{h_S}^{\infty} \frac{e}{T} dh}{\int_{h_S}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh}.$$

С учетом параметра T_m и соотношения для нормальных атмосферных условий $e/(\rho_{WV}T) = R_W$, где ρ_{WV} – плотность водяного пара, $\text{кг}/\text{м}^3$; $R_W \approx 4,6$ – газовая постоянная для водяного пара, $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$, формула (9) запишется

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

Здесь $\text{IWV} = \int_{h_S}^{\infty} \rho_{WV} dh$ – суммарный водяной пар

в расчете на единицу площади. Осаждаемая вода определяется в виде колонки жидкой воды PW, м. Имеет место соотношение $\text{PW} = \text{IWV}/\rho$, где ρ – плотность жидкой воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В работе [6] после анализа 8718 профилей метеорологических радиозондов по высотной зависимости параметров e и T в широтном диапазоне от 27 до 65° приводится эмпирическая формула для параметра T_m в виде $T_m = 70,2 + 0,72T$. То есть «средневзвешенная температура» до высоты верхней тропосферы над пунктом измерений может быть выявлена лишь по данным приземной температуры воздуха.

Количество водяного пара в атмосфере над данной точкой земной поверхности определяется в виде

вертикально интегрированной массы водяного пара в расчете на единицу площади. Таким образом, формула (10) дает возможность определять над GPS-пунктом суммарный водяной пар (IWV), который соответствует влагозапасу облаков, а также потенциальный уровень осаждаемой воды, имеющейся в облаках. В теплое время года ZTD пропорциональна количеству дождевых осадков над GPS-пунктом, при этом возникает возможность использования в метеорологии данных GPS/ГЛОНАСС сети для дистанционного зондирования атмосферы.

3. Численные результаты

На рис. 4 приведены временные ряды измеренных значений ZTD и PW для пунктов ULAZ и IRKT

в 2012 г., а также уровни количества осадков, накопленных за предыдущие 6 ч на каждом из пунктов наблюдений. Коэффициент взаимной корреляции данных по ZTD и PW для пункта ULAZ за период с начала мая до конца сентября равен 0,86. Как видно на рис. 4, высокие интенсивности осадков сопровождаются увеличением уровней ZTD и PW, которые пропорциональны влагосодержанию в тропосфере. Отметим, что увеличение значений ZTD и PW не всегда связано с выпадением осадков. Одна из причин заключается в том, что высокие уровни ZTD, особенно в летнее время, означают высокое влагосодержание в тропосфере, в результате которого могут выпасть осадки, но степень насыщения паров еще недостаточна. Тем не менее наблюдается некоторое соответствие повышения уровней ZTD и PW выпадению осадков.

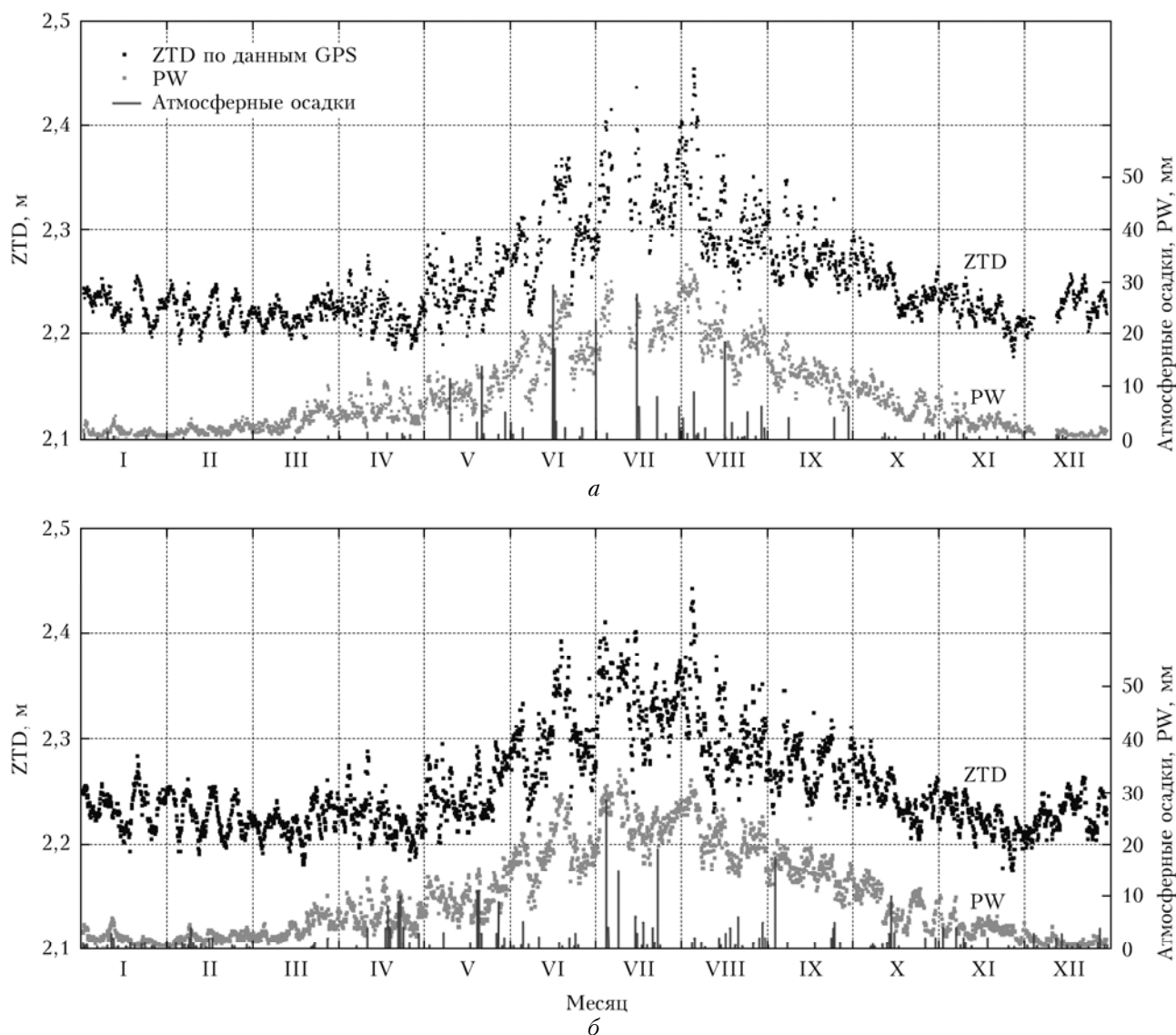


Рис. 4. Временные ряды ZTD и PW для пунктов GPS-измерений ULAZ (а) и IRKT (б) и уровни 6-часовых накоплений атмосферных осадков за 2012 г.

Заключение

Определены количественные характеристики ZTD и PW для GPS-станций ULAZ и IRKT. Установлено, что в теплое время года (май–сентябрь) эти данные имеют высокий коэффициент взаимной корреляции, достигающий 0,86. В более холодное время года (октябрь–апрель) существенную роль в формировании ZTD начинает играть атмосферное давление, которое в это время характеризуется большей вариативностью. С использованием данных по приземному давлению, определяемому на расположенной вблизи GPS-приемника метеостанции, значения ZTD легко пересчитываются в значения ZHD и ZWD. Сравнение вариаций ZTD, PW и атмосферных осадков в течение всего 2012 г. на пунктах ULAZ и IRKT показало закономерный рост уровней ZTD и PW накануне выпадения осадков. Широкое использование GPS-данных позволяет улучшить систему краткосрочного прогноза погоды, а также проводить фундаментальные исследования в области атмосферной циркуляции, гидрологического цикла и глобального изменения климата. Для этих целей на юге Восточной Сибири создается более плотная сеть постоянно действующих GPS-станций [2, 10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Бурятия в рамках научного проекта № 1205-98051-р_Сибирь_а.

1. King R.W., Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS. Analysis Software. Release 10.0. Mass. Inst. of Technol. and University of California, San-Diego, 2002. 206 p.
2. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной

коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS-геодезии // Геол. и геофиз. 2013. Т. 54, № 11. С. 1814–1825.

3. Davis J., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on the estimates on baseline lengths // Radio Sci. 1985. V. 20, N 6. P. 1593–1607.
4. Хуторова О.Г., Васильев А.А., Хуторов В.Е. О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети GPS-ГЛОНАСС // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 510–514.
5. Гомбоев Н.Ц., Цыдытов Ч.Ц. Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов. Новосибирск: Наука, 1985. 126 с.
6. Bevis M., Businger S., Herring T., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // J. Geophys. Res. D. 1992. V. 97, N 14. P. 15787–15801.
7. Hopfield H.S. Two quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // J. Geophys. Res. 1969. V. 74, N 18. P. 4487–4499.
8. 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. B. 1991. V. 96, N 4. P. 6541–6555.
9. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Geophys. Monogr. Ser. AGU. Washington. D.C. 1972. V. 15. P. 247–251.
10. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Добрынина А.А., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физ. Земли. 2014. № 6. С. 70–79.

M.G. Dembelov, Yu.B. Bashkuev, A.V. Loukhnev, O.F. Loukhneva, V.A. San'kov. Diagnostics of the content of atmospheric water vapor according to data of GPS measurements

A continuous GPS network consisting seven permanent points of observation is created for the study of the geodynamic processes in the Baikal region. The results of processing the primary GPS data provide continuous atmospheric data in the form of total zenith troposphere delay, which can be used for meteorological and climatological studies. The total delay is the sum of “dry” or hydrostatic and wet components. The wet component determines the integrated amount of water vapor and quantily of precipitated water above the point of measurement. Thus, GPS measurements provide the possibility of obtaining initial data for development of new numerical models of zenith troposphere delay and integrated precipitated water vapor for the problems of meteorology.