



<https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0430>

STUDY OF THE MOISTURE CONTENT OF THE TROPOSPHERE OVER THE ULAB (ULAANBAATAR) MONITORING STATION USING GPS MEASUREMENT, RADIO SOUNDING AND SURFACE METEOROLOGY DATA

M. G. Dembelov, Yu. B. Bashkuev

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The water vapor content is calculated in a conditional vertical column to the tropopause level from remote sensing data on the lower atmosphere. The calculations are based on GPS measurements, surface meteorological data and vertical meteorological profiles produced by radiosondes. A total zenith tropospheric delay (ZTD) is estimated as a difference between an estimated straight line, along which the GPS signal propagates in vacuum, and a length of the path between the signal source and the receiver, which is refracted in the real medium. A direct correlation is noted between changes in the 'wet' component of the tropospheric delay of the GPS signal and variations in the moisture content of the troposphere. A 'wet' component value of the tropospheric delay can be converted with a very high confidence into a value of integral water vapor above the observation point. In order to determine the integral water vapor amounts over the ULAB (Ulaanbaatar) permanent GPS monitoring station, empirical equations were used for the linear regressions of the ratios of surface temperature and mean weighted temperature for the water vapor elasticity using the data of radiosondes launched in the city of Ulaanbaatar and Muren settlement. We studied the features of the dynamics of variations in the integral water vapor, surface values of atmospheric pressure, air temperature and precipitation volumes over the ULAB station, using the data of July 2016.

Key words: GPS measurements; meteorological data; tropospheric delay of signals; integral water vapor; precipitation

Статья публикуется по материалам доклада, сделанного авторами на XII Российско-Монгольской международной конференции «Солнечно-земные связи и геодинамика Байкало-Монгольского региона» (1–5 октября 2018 г., г. Иркутск)

RESEARCH ARTICLE

Received: February 1, 2019
Revised: June 14, 2019
Accepted: July 2, 2019

For citation: Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., 2019. Study of the moisture content of the troposphere over the ULAB (Ulaanbaatar) monitoring station using GPS measurement, radio sounding and surface meteorology data. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 621–629. doi:10.5800/GT-2019-10-3-0430.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НАД ПУНКТОМ НАБЛЮДЕНИЯ ULAB (УЛАН-БАТОР) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ, РАДИОЗОНДИРОВАНИЙ И ПРИЗЕМНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

М. Г. Дембелов, Ю. Б. Башкуев

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Аннотация: Рассматривается определение содержания водяного пара в условном вертикальном столбе до уровня тропопаузы с использованием дистанционного зондирования нижней части атмосферы методом GPS-измерений приземных метеорологических параметров, а также вертикальных метеорологических профилей, полученных посредством запусков радиозондов. Полная тропосферная зенитная задержка является разностью между предполагаемой прямой линией, по которой GPS-сигнал распространяется в вакууме, и преломленной в реальной среде длиной пути от источника до приемника. Отмечена прямая связь изменений «влажной» компоненты тропосферной задержки сигнала GPS с вариациями влагосодержания тропосферы. Данные по «влажной» компоненте тропосферной задержки могут быть преобразованы с очень высокой достоверностью в данные по суммарному водяному пару над пунктом наблюдения. С целью определения уровня суммарного водяного пара над пунктом постоянных GPS-наблюдений ULAB (Улан-Батор) определены эмпирические выражения для линейных регрессий соотношений приземной температуры и средневзвешенной температуры по упругости водяного пара с применением данных запусков радиозондов в г. Улан-Баторе и п. Мурэн. Рассмотрены особенности динамики вариаций суммарного водяного пара, приземных значений атмосферного давления, температуры воздуха и количества выпавших атмосферных осадков над пунктом наблюдений ULAB в июле 2016 г.

Ключевые слова: GPS-измерения; метеорологические данные; тропосферная задержка сигналов; суммарный водяной пар; атмосферные осадки

1. ВВЕДЕНИЕ

Сигналы системы позиционирования GPS помимо ионосферы испытывают влияние нижней нейтральной части атмосферы, распространение в ней учитывается тропосферной задержкой сигналов. Влияние тропосферы на процесс распространения радиоволн проявляется в виде рефракции. Индекс рефракции радиоволн N в основном определяется температурой, давлением и упругостью водяного пара. Полная тропосферная зенитная задержка (ZTD) является одной из наиболее существенных поправок, которые учитываются при высокоточных геодезических расчетах по GPS-данным с помощью программного пакета GAMIT [King, Bock, 1999; Sankov et al., 2014]. Использование методики точной оценки ZTD сделало возможным ее применение для атмосферных и климатологических приложений.

Сложное распределение облаков и дождевых осадков обусловлено быстрой изменчивостью содержания водяного пара в атмосфере. Температура и влажность, как правило, немонотонно изменяют-

ся с высотой. Водяной пар играет важную роль в качестве основного климатического параметра в динамике тепловых процессов, в атмосферных и гидрологических циклах в локальном и глобальном масштабе. 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 полной тропосферной зенитной задержки ZTD, учитывая дополнительно только атмосферное давление. В зимнее время года при малом влагосодержании и низкой температуре воздуха значения ZWD минимальны. В летнее время при высоких уровнях влагосодержания и температуры воздуха ZWD принимают максимальные и более вариабельные значения. В теплое время года, когда среднесуточная температура воздуха выше 0 °C, значения суммарного водяного пара могут быть выявлены из измеренных посредством GPS-значений ZWD по методу MOPS [MOPS, 1998] без использования каких-либо метеорологических данных. Количество водяного пара в атмосфере над данной точкой земной по-

верхности 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). Значения IWV, выявленные посредством GPS-измерений, наряду с приземными значениями температуры воздуха и атмосферного давления, могут служить индикаторами предпосылок выпадения атмосферных осадков [Marchenko et al., 2012].

В рамках проблемы возможного строительства гидросооружений на реке Селенге и ее притоке Орхон [Levi, Miroshnichenko, 2017] рассмотрена связь суммарных годовых атмосферных осадков в пределах монгольской части водосбора р. Селенги в ключевых пунктах наблюдения с водностью реки в пункте Мостовой (нижняя часть русла, 15 км от г. Улан-Удэ).

2. ТРОПОСФЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАД ПУНКТОМ ПОСТОЯННЫХ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ ULAB (УЛАН-БАТОР)

Использование метода GPS позволяет определять параметр ZTD, имеющий приложение в задачах метеорологии и климатологии [Walpersdorf et al., 2001]. Известно, что ZTD является суммой «сухой», или гидростатической (ZHD), и «влажной» (ZWD) составляющих. При этом атмосферный водяной пар оказывает существенное влияние на скорость распространения GPS-сигналов, а также на существенные временные вариации значений ZTD. В целом же, ZWD вносит значительно меньший вклад в общее значение ZTD, особенно в зимнее время года.

Для моделирования тропосферной зенитной задержки над г. Улан-Батором использованы данные постоянных GPS-измерений в пункте наблюдения ULAB, расположенного на территории обсерватории Института астрономии и геофизики МАН, а также данные приземных и вертикальных метеорологических измерений. Данные вертикальных измерений представляют собой результаты радиозондирования, регулярно выполняемых Аэрологической службой Национального агентства по метеорологии и мониторингу окружающей среды Монголии.

Антенна станции ULAB работает с углом отсечки относительно горизонта 10° . Зона GPS-наблюдений для оценки тропосферных параметров представляет собой конус с образующей 68 км при высоте границы тропосферы и тропопаузы 12 км. GPS-сигнал передается от спутника к наземному приемнику, при этом он «просвечивает» атмосферу Земли, где замедляется и отклоняется от прямой линии. Для пункта ULAB, расположенного на высо-

те относительно уровня моря 1599 м, ZTD изменится примерно от 6 до 8 нс по времени (1.8–2.4 м или 10–12 фазовых циклов на частоте $L1=1575.42$ МГц) в зависимости от метеоусловий и времени года. При изменении угла расположения спутника α относительно зенитного направления тропосферная задержка увеличивается примерно как секанс α , поэтому задержка на частоте $L1$ с углом α равным 70° может достигать от 30 до 36 циклов.

На рис. 1 показаны обработанные за весь 2016 г. данные изменения ZTD для постоянных пунктов наблюдения IRKM (Иркутск), ULAZ (Улан-Удэ), BADG (Бадары), ULAB (Улан-Батор) и LHAS (Лхаса), расположенных на разных высотах над уровнем моря (IRKM – 496 м, ULAZ – 514 м, BADG – 838 м, ULAB – 1599 м, LHAS – 3500 м). С учетом того, что $ZTD=ZHD+ZWD$, отсутствующие данные по ZTD для пункта наблюдения ULAB в летний и осенний периоды были успешно восстановлены с использованием приземных метеорологических данных посредством известной расчетной модели Саастамоинена [Saastamoinen, 1972]:

$$ZHD = 0.002277 p/f(\varphi, h_s), \quad (1)$$

$$ZHD = 0.002277e(1255/T + 0.05)/f(\varphi, h_s). \quad (2)$$

Здесь $f(\varphi, h_s) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028h_s$, где φ – географическая широта расположения приемника в градусах; h_s – высота приемника над уровнем моря, км. Приземные метеорологические параметры: p – атмосферное давление, мбар; e – упругость водяного пара, мбар; T – температура воздуха, К.

Используя формулы Саастамоинена (1) и (2), можно по данным атмосферного давления с довольно высокой точностью определить параметры ZHD и ZWD. Сравнение значений ZTD, полученных экспериментально посредством GPS и рассчитанных по формулам (1) и (2), дает высокую степень совпадения результатов на доверительном уровне 95 % [Dembelev et al., 2015]. Для определения ZHD, особенно в теплое время года, можно успешно использовать модель MOPS [MOPS, 1998], которая вообще не учитывает никаких метеорологических данных. Данный метод учитывает лишь высоту приемной антенны над уровнем моря, географическую долготу и широту и номер дня года. Значения ZWD могут быть определены из измеренных значений ZTD вычитанием из них величин гидростатической задержки ZHD, рассчитанной по модели MOPS. На рис. 2 для пункта наблюдения ULAB за 2016 г. показаны графики измеренных значений ZTD, рассчитанных значений ZHD по модели Саастамоинена с использованием метеоданных, значений ZHD, полученных по модели MOPS, а также

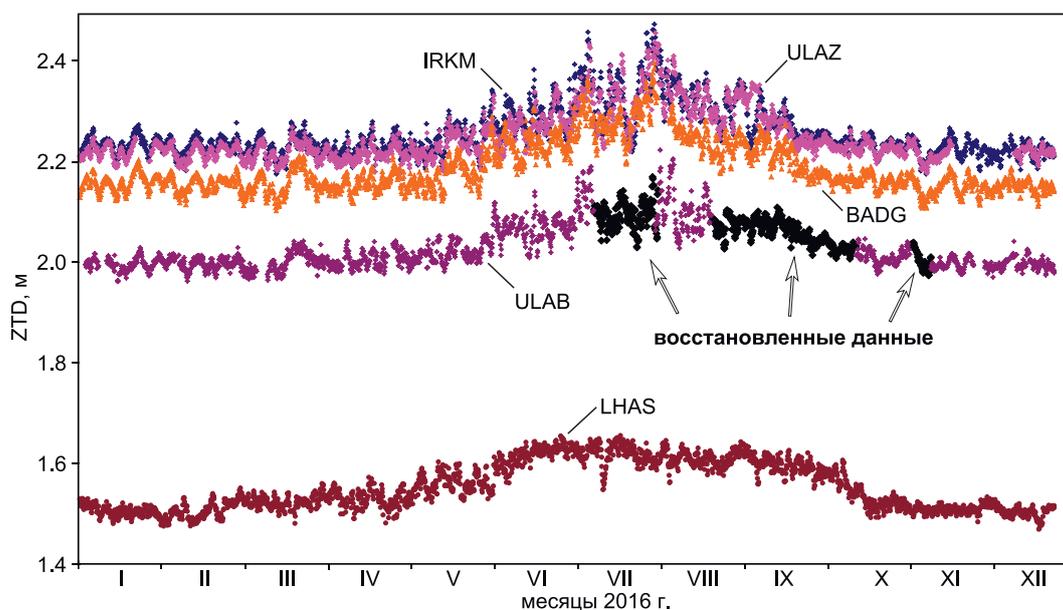


Рис. 1. Сравнительные графики уровней годовых изменений измеренных значений ZTD для пунктов наблюдения ULAZ, IRKM, BADG, ULAB и LHAS, расположенных на разной высоте над уровнем моря. Черным цветом выделены восстановленные данные ZTD для пункта ULAB.

Fig. 1. Comparison of annual variations in the ZTD values measured at ULAZ, IRKM, BADG, ULAB and LHAS GPS-monitoring stations located at different altitudes. Reconstructed ZTD values for the ULAB station are shown in black.

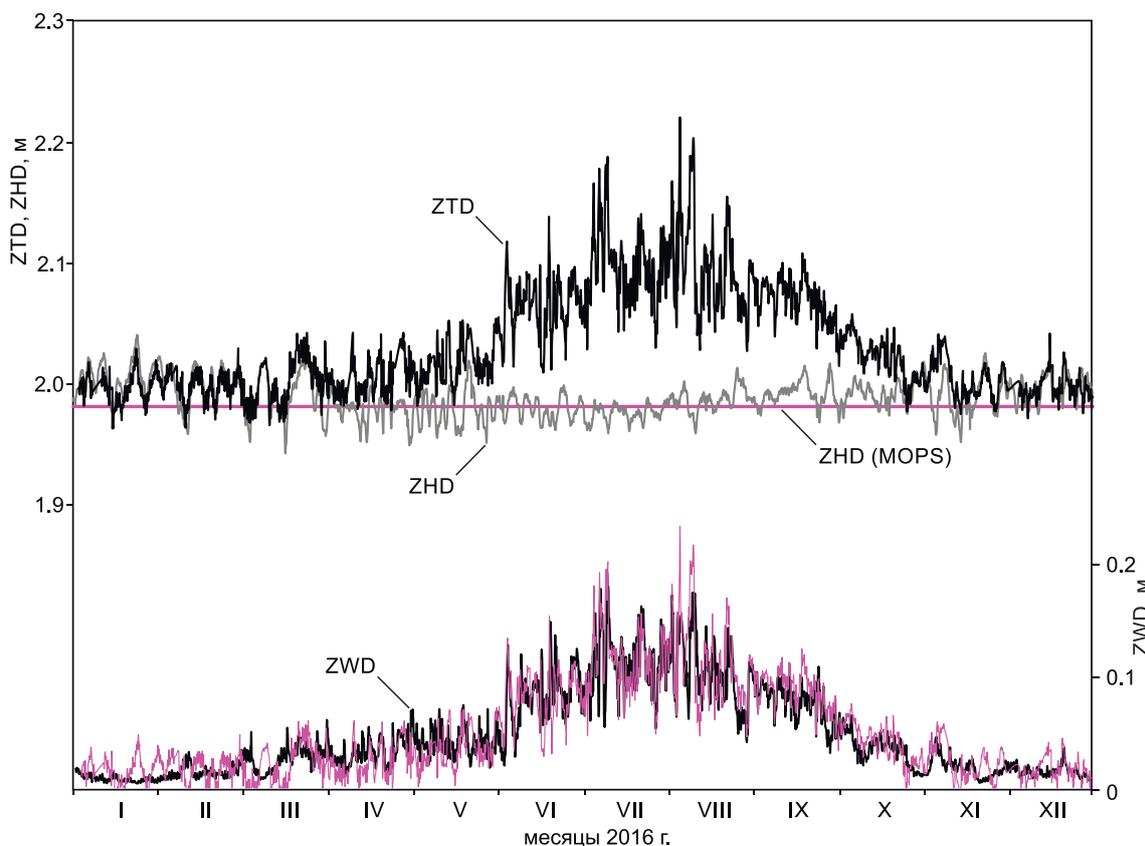


Рис. 2. Графики годовых измеренных значений ZTD, а также рассчитанных разными способами значений ZHD и ZWD для пункта наблюдения ULAB.

Fig. 2. Curves of annual measured ZTD values, and ZHD and ZWD values calculated by different methods for the ULAB station.

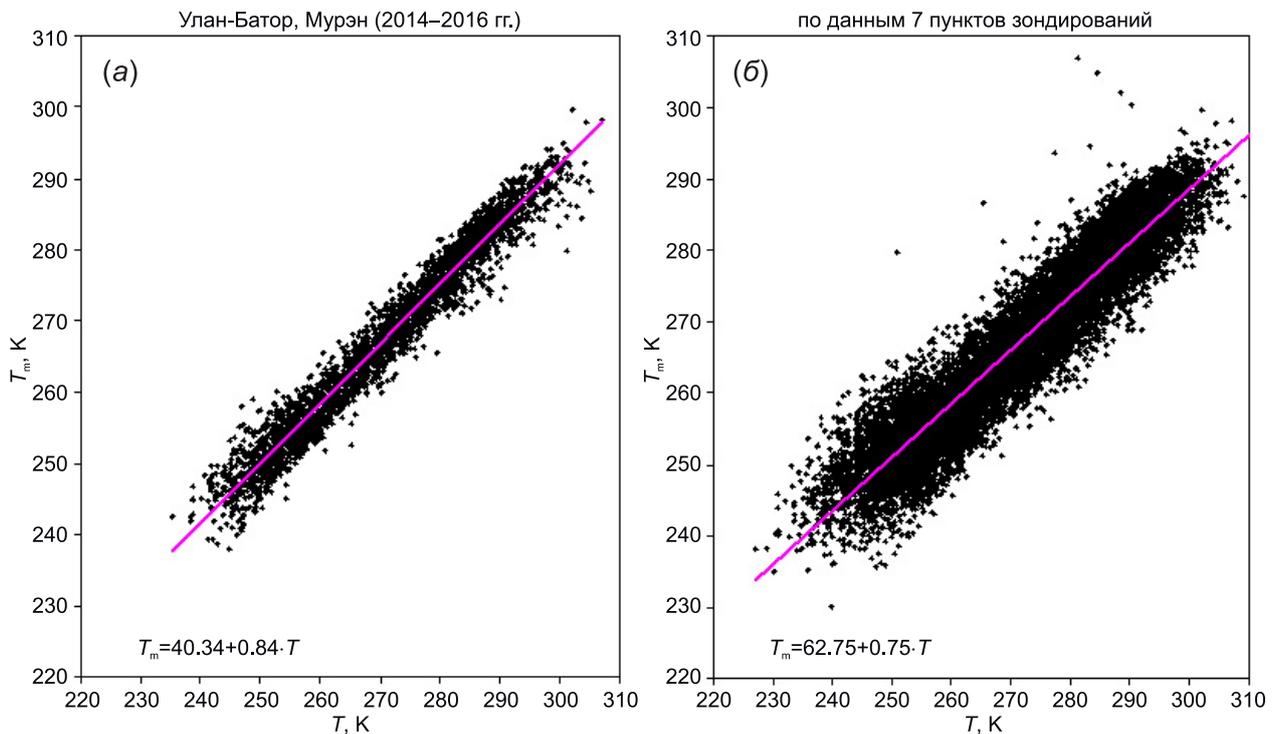


Рис. 3. Соотношения параметров T и T_m , выявленных по данным метеорологических зондирований в г. Улан-Баторе и п. Мурэн (а) и в семи региональных пунктах наблюдения (б) за 2014–2016 гг.

Fig. 3. Ratios of parameters T and T_m , determined from meteorological sounding data for the city of Ulaanbaatar and Muren settlement (а) and seven regional monitoring stations (б) for the period of 2014–2016.

графики значений ZWD, рассчитанных по модели Саастамоинена (черный цвет) и графики значений ZWD, полученных с использованием модели MOPS (розовый цвет). Сравнительные нижние графики на рис. 2 показывают хорошее совпадение значений ZWD, рассчитанных по формуле Саастамоинена (2) и полученных с использованием модели MOPS, для теплого времени года. Коэффициент взаимной корреляции приведенных на графике данных по ZWD за период май – сентябрь 2016 г. составил 0.91.

Количество водяного пара в атмосфере над пунктом наблюдения, как правило, определяется в виде вертикально интегрированной массы водяного пара в расчете на единицу площади или в виде высоты, эквивалентной колонке жидкой воды в тропосфере. В первом случае речь идет о суммарном водяном паре (IWV, кг/м²), если определяется масса пара на единицу площади, во втором случае – о возможном количестве осаждаемой воды (PW, м), получаемого из данного количества суммарного водяного пара. $PW = IWV / \rho$, где ρ – плотность воды, кг/м³. ZWD практически пропорциональна уровню влагосодержания над GPS-пунктом, данный факт дает возможность метеорологам использовать GPS-сети для дистанционного зондирования атмосферы [Walpersdorf et al., 2001; Haase et al., 2003].

Суммарный водяной пар (IWV) связан с влажной компонентой тропосферной задержки ZWD соотношением [Lukhneva et al., 2016; Dembelov et al., 2017]:

$$IWV = 10^6 \frac{T_m}{k_2 R_W} ZWD, \quad (3)$$

где $k_2 = 3.73 \cdot 10^5$ – рефракционная константа, К²/мбар; $R_W \sim 4.6$ – газовая постоянная для водяного пара, Дж·К⁻¹кг⁻¹; T_m – средневзвешенная температура по упругости водяного пара в условном вертикальном столбе над пунктом приема. Параметр T_m определен для северной части территории Монголии по формуле (9), приведенной в работе [Lukhneva et al., 2016], с использованием результатов запусков метеорологических радиозондов в г. Улан-Баторе и п. Мурэн за 2014–2016 гг. На рис. 3 показана линейная регрессия соотношения приземной температуры (T) и средневзвешенной температуры (T_m) в виде эмпирического выражения: $T_m = 40.34 + 0.84 \cdot T$. Здесь же приведена выявленная линейная регрессия с учетом набора метеорологических данных семи региональных пунктов запусков радиозондов (Улан-Батор, Мурэн, Ангарск, Красный Чикой, Усть-Баргузин, Чита, Борзя) за тот же период: $T_m = 62.75 + 0.75 \cdot T$ [Dembelov et al., 2017].

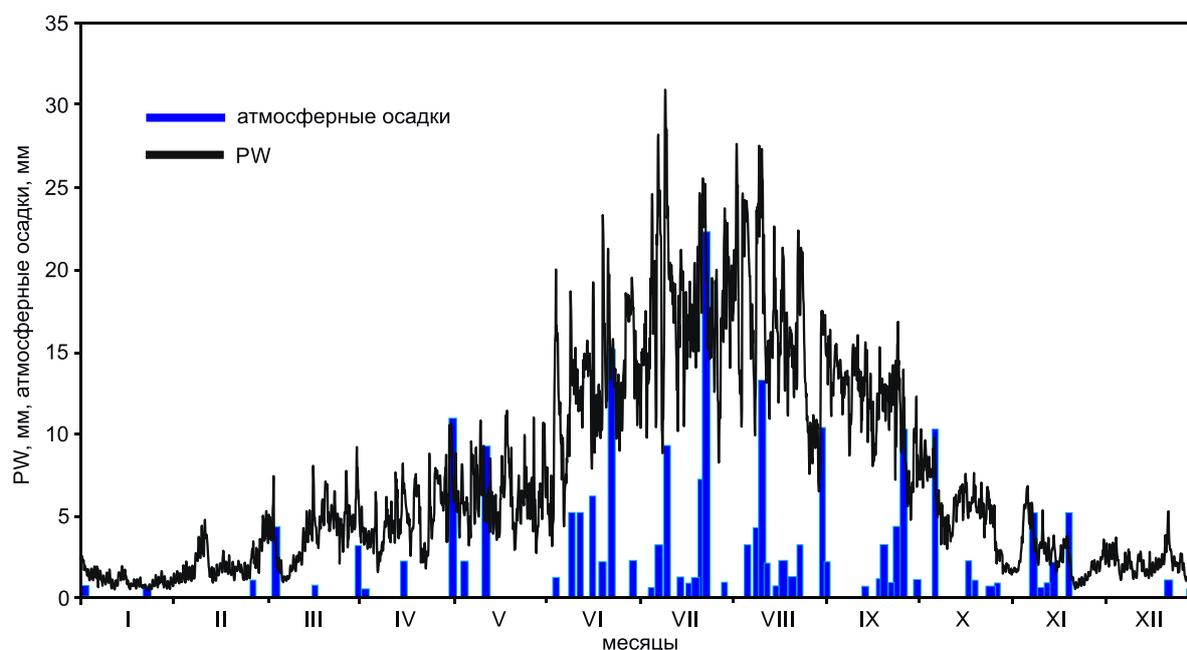


Рис. 4. Вариации влагосодержания PW и уровни накопленных за шесть часов от текущей временной отсечки атмосферных осадков в г. Улан-Баторе за 2016 г.

Fig. 4. Variations in moisture content PW and precipitation amounts accumulated within six hours from the current time cutoff in Ulaanbaatar (2016).

3. СВЯЗ ВЫПАДЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ С ВАРИАЦИЯМИ ЗНАЧЕНИЙ СУММАРНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРОПОСФЕРЫ, ПРИЗЕМНЫХ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

На рис. 4 для пункта ULAB в 2016 г. приведены временные ряды значений суммарного водяного пара в виде осаждаемой воды (PW), рассчитанных по формуле (3) с учетом измеренных значений ZWD и с учетом полученной регрессии $T_m = 40.34 + 0.84 \cdot T$ для г. Улан-Батора и п. Мурэн. Здесь же приведены уровни количества осадков, выпавших в течение шести предыдущих часов. Как видно на рис. 4, высокая интенсивность осадков сопровождается предварительным увеличением уровня влагосодержания в тропосфере PW.

В работе [Marchenko et al., 2012] подробно описаны все возможные факторы, влияющие на процесс осадкообразования. Указано, что обильное выпадение осадков в основном связано с повышенным количеством влагосодержания воздушной массы и наличием восходящих воздушных потоков. Нами рассмотрено сравнение уровней выпавших атмосферных осадков с изменениями значений приземного атмосферного давления, приземной температуры и суммарного влагосодержания тропосферы над г. Улан-Батором в период с 15 по 31 июля 2016 г. (рис. 5). Влагосодержание воздушной массы определялось в виде количества PW, м, которое со-

ответствует количеству влаги в условном вертикальном тропосферном «столбе». Значения приземного атмосферного давления и приземной температуры выбраны на сайте «Расписание погоды» (<http://www.rp5.ru>). На рис. 5 можно наблюдать выпадение сильных осадков во второй половине дня 22 июля 2016 г. Выпадению осадков предшествовали резкое падение атмосферного давления, существенное падение дневной температуры воздуха, а также повышение уровня суммарного влагосодержания с дальнейшим его уменьшением в результате выпадения сильных осадков. Уменьшение приземной температуры, как и резкое падение атмосферного давления, может служить индикатором наличия восходящих воздушных потоков [Marchenko et al., 2012]. Восходящие и нисходящие потоки связаны с вертикальным градиентом атмосферного давления. На рис. 5 отмечены минимумы в изменении значений приземного атмосферного давления 17 и 22 июля. Минимуму 17 июля соответствовали повышенное значение температуры и относительно низкий уровень суммарного влагосодержания, поэтому в течение следующих суток не произошло существенных выпадений осадков. Минимуму 22 июля соответствовали пониженное значение дневной температуры и повышенный уровень суммарного влагосодержания тропосферы. Как следствие, во второй половине суток 22 июля имели место сильные атмосферные осадки.

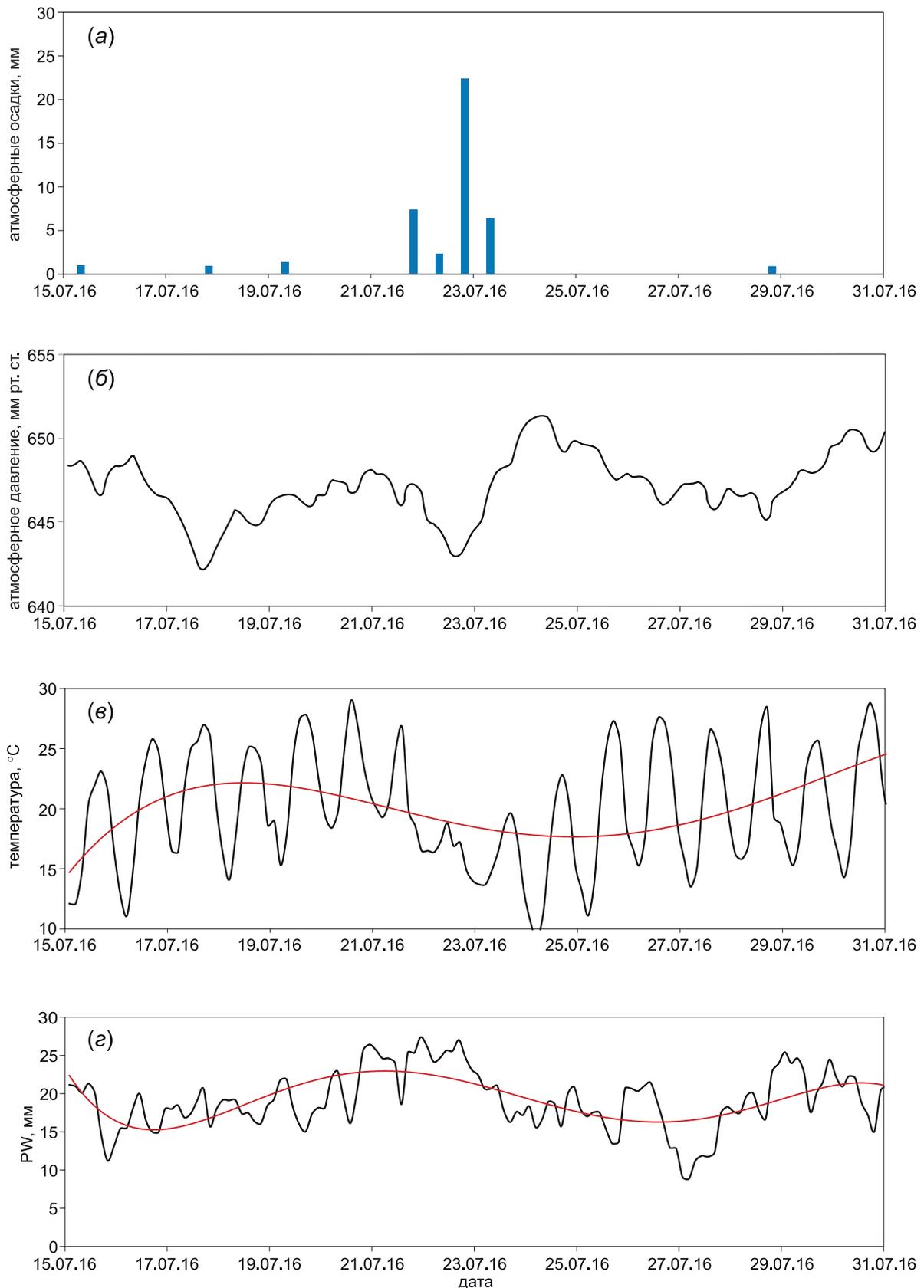


Рис. 5. Сравнительные графики изменения уровней накопленных за 12 часов атмосферных осадков (а), приземного атмосферного давления (б), приземной температуры (в) и влагосодержания тропосферы (г) для г. Улан-Батора с 1 по 15 июля 2016 г. Розовым цветом показаны линии тренда температуры и влагосодержания.

Fig. 5. Comparison of the precipitation amount accumulated within 12 hours (а), surface atmospheric pressure (б), surface temperature (в) and the moisture content of the troposphere (г) for the city of Ulaanbaatar from July 01 to 15, 2016. Temperature and moisture content trends are shown in pink.

Таким образом, наиболее весомыми условиями выпадения сильных осадков являются повышенный уровень влагосодержания тропосферы, интенсивные восходящие потоки (падение вертикального градиента давления), а также предварительное уменьшение значений приземного давления и приземной температуры воздуха. GPS-измерения позволяют непрерывно определять величину суммарного влагосодержания, которая имеет приложения в задачах метеорологии и климатологии. Например, определение влагосодержания тропосферы с помощью GPS-метода практикуется в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды [Walpersdorf et al., 2001].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены значения суммарного водяного пара над пунктом постоянных GPS-измерений ULAB в теплое время года с применением метода MOPS без использования метеорологических данных, за исключением периодов с отсутствием GPS-данных. Использование данных запусков метеорологических радиозондов для вертикального профилирования в пунктах Улан-Батор и Мурэн в течение 2014–2016 гг. позволило получить общую линейную регрессию соотношений приземной тем-

пературы T и «средневзвешенной» температуры T_m по вертикальным значениям упругости водяного пара для территории северной части Монголии с целью определения суммарного влагосодержания.

Значения IWV, выявленные посредством GPS-измерений, наряду с приземными значениями температуры воздуха и атмосферного давления могут служить индикаторами предпосылок выпадения атмосферных осадков. Установлено, что необходимыми условиями выпадения сильных осадков являются повышенный уровень влагосодержания тропосферы, интенсивные восходящие потоки (падение вертикального градиента давления), а также предварительное уменьшение значений приземного давления и приземной температуры воздуха.

Создание более уплотненной сети постоянных GPS-измерений для целей изучения геодинамических процессов на территории Монголии одновременно позволит регулярно получать данные о тропосферном суммарном влагосодержании с/без использования метеорологических данных.

Учет рассмотренных параметров для локальных пунктов измерений имеет значение для улучшения высокоточной геодезии, выполненной посредством GPS-измерений с последующей обработкой с помощью пакета GAMIT.

5. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Dembelov M.G., Bashkuev Yu.B., Loukhnev A.V., Loukhneva O.F., Sankov V.A., 2017. Determination of humidity of the troposphere by GNSS signals. In: Proceedings of SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104666N (30 November 2017). <https://doi.org/10.1117/12.2288151>.
- Dembelov M.G., Bashkuev Y.B., Likhnev A.V., Likhneva O.F., San'kov V.A., 2015. Diagnostics of atmospheric water vapor content according to GPS measurements. *Atmospheric and Oceanic Optics* 28 (4), 291–296. <https://doi.org/10.1134/S1024856015040053>.
- Haase J., Ge M., Vedel H., Calais E., 2003. Accuracy and variability of GPS tropospheric delay measurements of water vapor in the western Mediterranean. *Journal of Applied Meteorology* 42 (11), 1547–1568. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1547:AAVOGT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1547:AAVOGT>2.0.CO;2).
- King R.W., Bock Y., 1999. Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software, Version 9.9. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. Available from: <http://geoweb.mit.edu/gg/docs.php>.
- Levi K.G., Miroshnichenko A.I., 2017. Cartographic modeling of cascade of reservoirs in the basin of Selenga (Mongolia). Preliminary results. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences* 19, 130–139 (in Russian) [Леви К.Г., Мирошниченко А.И. Картографическое моделирование каскада водохранилищ в бассейне реки Селенги (Монголия). Предварительные результаты // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*. 2017. Т. 19. С. 130–139].
- Likhneva O.F., Dembelov M.G., Likhnev A.V., 2016. The determination of atmospheric water content by the meteorological and GPS data. *Geodynamics and Tectonophysics* 7 (4), 545–553. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222>.
- Marchenko O.Yu., Mordvinov V.I., Antokhin P.N., 2012. Investigation of long-term variability and conditions for formation of precipitation in the Selenga River basin. *Optika Atmosfery i Okeana (Atmospheric and Oceanic Optics)* 25 (12), 1084–1090 (in Russian) [Марченко О.Ю., Мордвинов В.И., Антохин П.Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне реки Селенги // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25. № 12. С. 1084–1090].
- 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.

- Saastamoinen J., 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: S.W. Henriksen, A. Mancini, B.H. Chovitz (Eds.), The use of artificial satellites for geodesy. AGU Geophysical Monograph Series, vol.15, p. 247–251. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>.
- Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnitchenko A.I., Dobrynina A.A., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Dembelov M.G., Calais E., Déverchère J., 2014. Contemporary horizontal movements and seismicity of the south Baikal Basin (Baikal rift system). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50 (6), 785–794. <https://doi.org/10.1134/S106935131406007X>.
- Walpersdorf A., Calais E., Haase J., Eymard L., Desbois M., Vedel H., 2001. Atmospheric gradients estimated by GPS compared to a high resolution numerical weather prediction (NWP) model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* 26 (3), 147–152. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00038-2).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

Михаил Георгиевич Дембелов

канд. физ.-мат. наук, с.н.с.

Институт физического материаловедения СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия✉ e-mail: mdembelov@mail.ruID <https://orcid.org/0000-0002-7281-4252>**Mikhail G. Dembelov**

Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS
6 Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia**Юрий Буддич Башкуев**

докт. техн. наук, профессор, зав. лабораторией

Институт физического материаловедения СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россияe-mail: buddich@mail.ruID <https://orcid.org/0000-0002-7102-3977>**Yuri B. Bashkuev**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory

Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of RAS
6 Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia