

Изменчивость полей атмосферного влагосодержания по данным зондирования сигналами GPS-ГЛОНАСС в окрестностях г. Казани

О. Г. Хуторова, В. Е. Хуторов, В. В. Дементьев,
А. С. Близоруков, Г. Е. Корчагин

Казанский федеральный университет, Казань, 420008, Россия
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

По данным зондирования сигналами GPS-ГЛОНАСС определены характеристики временных рядов интегрального влагосодержания атмосферы в окрестностях г. Казани. Амплитуда годового хода интегрального влагосодержания составляет 10,2 мм осадённой воды. Основной вклад в дисперсию вариаций интегрального влагосодержания вносят сезонные вариации — 63 %; мезомасштабные процессы дают около 7 %, синоптические процессы — 22 %, доля линейного тренда составляет менее 1 %. Вейвлет-анализ рядов интегрального влагосодержания атмосферы за 2009–2015 гг. показал, что интенсивность синоптических и мезомасштабных вариаций для всех исследуемых параметров модулируется гармониками годового хода, причём максимум изменчивости наблюдается в летний период. Обнаружена межгодовая изменчивость как синоптических, так и мезомасштабных вариаций интегрального влагосодержания атмосферы.

Ключевые слова: GPS, влагосодержание

Одобрена к печати: 17.05.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-252-260

В последнее время получило развитие направление GPS-метеорологии, использующее сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для оценки интегрального влагосодержания атмосферы (*IWV*, integrated water vapour) с высоким пространственно-временным разрешением.

Дистанционное зондирование атмосферы сигналами спутников глобальных навигационных систем — современная, активно развивающаяся отрасль, позволяющая осуществлять всепогодный мониторинг атмосферы с большим временным и пространственным разрешением, что даёт возможность исследовать ранее слабо изученные атмосферные процессы. Большая часть программ атмосферного мониторинга, разрабатываемых на данный момент международным научным сообществом, предусматривает использование GPS-сигналов, что также свидетельствует о востребованности развития этой технологии. В США, Японии, Китае, Западной Европе много исследований посвящено дистанционному зондированию тропосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Показано, что сигналы ГНСС можно использовать для исследования атмосферных процессов. Во всех работах применяется один общепризнанный подход, разработанный впервые в работе (Bevis, Businger, 1992).

В основе дистанционного зондирования лежит оценка зенитной тропосферной задержки (*ZTD*, zenith troposphere delay) электромагнитных волн, излучаемых спутником. Оценка этой величины определяется разностью измеренного наземным приёмником фазового пути сигнала, переданного спутником, и геометрической дальности между спутником и приёмником. Поскольку сигнал распространяется в атмосфере, то разность между фазовым путём и геометрической дальностью определяется задержками в тропосфере и ионосфере (Guochang, 2007).

Измеренная наземным приёмником фаза сигнала, излучённого навигационным спутником, несёт в себе информацию, характеризующую состояние атмосферы. Эта информация определяется индексом рефракции, который, в свою очередь, связан с метеорологическими

параметрами: парциальным давлением газов P , температурой T , парциальным давлением водяного пара e (Guochang, 2007):

$$N = A1 \cdot \frac{P}{T} + A2 \cdot \frac{e}{T} + A3 \cdot \frac{e}{T^2}. \quad (1)$$

Первое слагаемое пропорционально плотности атмосферы, а второе и третье определяет влажность. В эксперименте по измерениям приёмника оценивается параметр, характеризующий состояние тропосферы, — зенитная тропосферная (полная) задержка ZTD , которая может быть определена через интеграл от индекса рефракции (Bevis, Businger, 1992):

$$ZTD = \int_{\text{Приёмник}}^{\text{Спутник}} N \cdot 10^{-6} ds. \quad (2)$$

Интеграл берётся от высоты антенны приёмника до высоты антенны спутника в зенитном направлении. Этот параметр традиционно измеряется в единицах длины (Guochang, 2007). В силу того что индекс рефракции экспоненциально падает с высотой, основной вклад в ZTD вносит тропосфера. Подставив выражение (1) в уравнение (2) можно увидеть, что ZTD представляет собой сумму задержек, вызванных сухими газами ZHD (zenith hydrostatic delay) и водяными парами ZWD (zenith wet delay). Первое слагаемое определяется интегрированием по высоте плотности воздуха, его можно вычислить по приземным значениям температуры и давления, а из ZWD можно получить интегральное влагосодержание атмосферы (Хуторова и др., 2012).

Большая часть современных работ посвящена сравнению интегрального влагосодержания из аэрологических и ГНСС-измерений для разных географических регионов: Австралии и Антарктиды (Glowacki, Penna, 2006), Швеции (Ning et al., 2012), Италии (Morland et al., 2009; Racione et al., 2002), США (Ware et al., 2001), Китая (Guoping et al., 2007), Индии (Raju et al., 2002). Полученные стандартные отклонения составляют от 1 до 4 мм осаждённой воды. Аналогичные оценки точности получаются при сравнении GPS-оценок и данных радиометров (Raju et al., 2002; Sarucci et al., 2007). То есть можно считать, что данные ГНСС-мониторинга вполне достоверны.

В Казани разработан программно-аппаратный комплекс для мониторинга измерений и прогнозирования термодинамики атмосферы с высоким временным и пространственным разрешением. В состав комплекса входит сеть приёмников сигналов GPS-ГЛОНАСС и метеостанции. Было показано, что с помощью томографического подхода можно восстановить высотный профиль коэффициента преломления в нижних слоях атмосферы и его пространственно-временные вариации (Низамеев, Тептин, 2013; Khutorova et al., 2016). Пространственные поля индекса рефракции позволяют оперативно получать метеоусловия на различных территориях, где установлены приёмные антенны глобальных навигационных систем. Показано, что усвоение данных GPS-мониторинга в численных моделях атмосферы улучшает качество прогноза метеопараметров (Khutorova et al., 2012; Boniface, 2009).

В настоящей работе были построены длинные ряды интегрального влагосодержания атмосферы, рассчитанные по ежесекундным наблюдениям ГНСС-приёмника в г. Казани (Хуторова и др., 2012) и Республике Татарстан (Калинников и др., 2012). По приземным измерениям относительной влажности и температуры оценивалось парциальное давление водяного пара e .

Мы исследовали вариации интегрального влагосодержания и сравнили их с вариациями приземного парциального давления водяного пара, измеренного в тех же пунктах с той же временной дискретностью. Обнаружено, что сезонные, синоптические и даже мезомасштабные вариации интегрального и приземного влагосодержания синхронны. Пример сравнения приведён на *рис. 1* (см. с. 254). Видно, что в течение месяца наблюдений вариации IWV и парциального давления когерентны. Этот факт позволяет предположить, что основные закономерности вариаций интегрального и приземного влагосодержания также будут сходными.

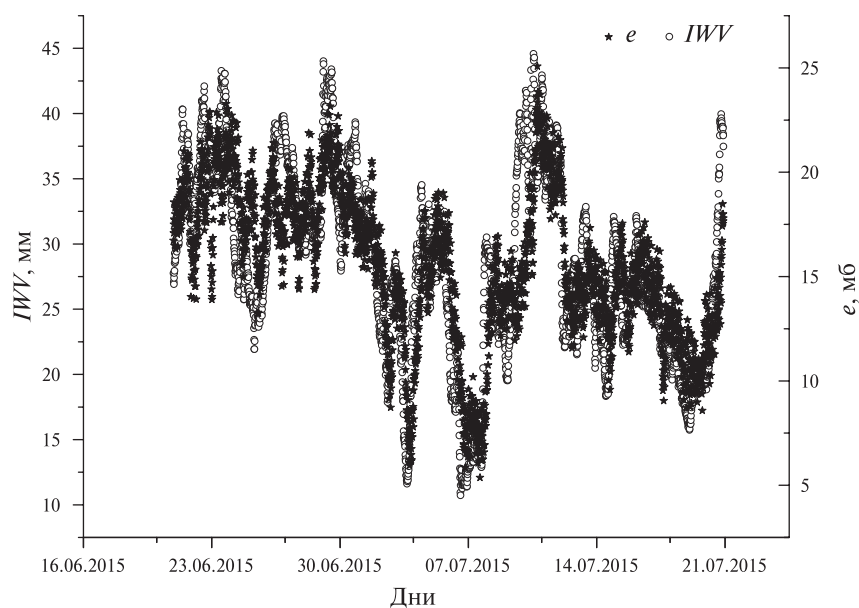


Рис. 1. Синхронность изменчивости интегрального и приземного влагосодержания (г. Звенигород)

Известно, что климат каждого конкретного региона характеризуется величинами метеопараметров. Обычно для исследования используют длинные ряды температуры и осадков. Содержание водяного пара также характеризует климат. В работах (Калинников и др., 2012; Khutorova et al., 2011) показано, что интегральное влагосодержание атмосферы, получаемое по данным ГНСС-зондирования, является важной характеристикой климата территорий.

Синхронно с интегральным влагосодержанием в тех же пунктах оценивалось парциальное давление водяного пара e измерениями относительной влажности и температуры. Все исследуемые ряды приведены к временному разрешению в 5 мин.

Мы оценили вклады в общую дисперсию вариаций интегрального и приземного влагосодержания процессов различного масштаба. Для этого путём цифровой фильтрации выделили несколько групп процессов: среднее и линейный тренд, сезонные вариации, синоптические процессы, мезомасштабные процессы. Результаты представлены в табл. 1. Коэффициенты детерминации линейного тренда показали, что он составляет не более 0,7% от общей дисперсии.

Так как сезонные вариации обусловлены ходом метеопараметров из-за вращения Земли вокруг Солнца, то их можно описать суммой годовой и полугодовой гармоник. Для их фильтрации применялся гармонический анализ.

Таблица 1. Характеристики рядов интегрального (IWV) и приземного (парциальное давление e) влагосодержания. Средняя амплитуда вариаций различных процессов и их дисперсия

| | IWV | | e | |
|---------------------------------------|-------------|----------------------------|---------------|------------------------------|
| | Среднее, мм | Дисперсия, мм ² | Среднее, мбар | Дисперсия, мбар ² |
| Статистические характеристики | 13,3 | 82,2 | 8,2 | 23,6 |
| Линейное возрастание (в год) | 0,4 | 0,5 | 0,1 | 0,1 |
| Сезонные процессы (годовая гармоника) | 10,2 | 52,0 | 5,6 | 13,5 |
| Синоптические процессы | 17,9 | 18,0 | 2,3 | 4,6 |
| Мезомасштабные процессы | 4,5 | 5,1 | 1,1 | 1,2 |

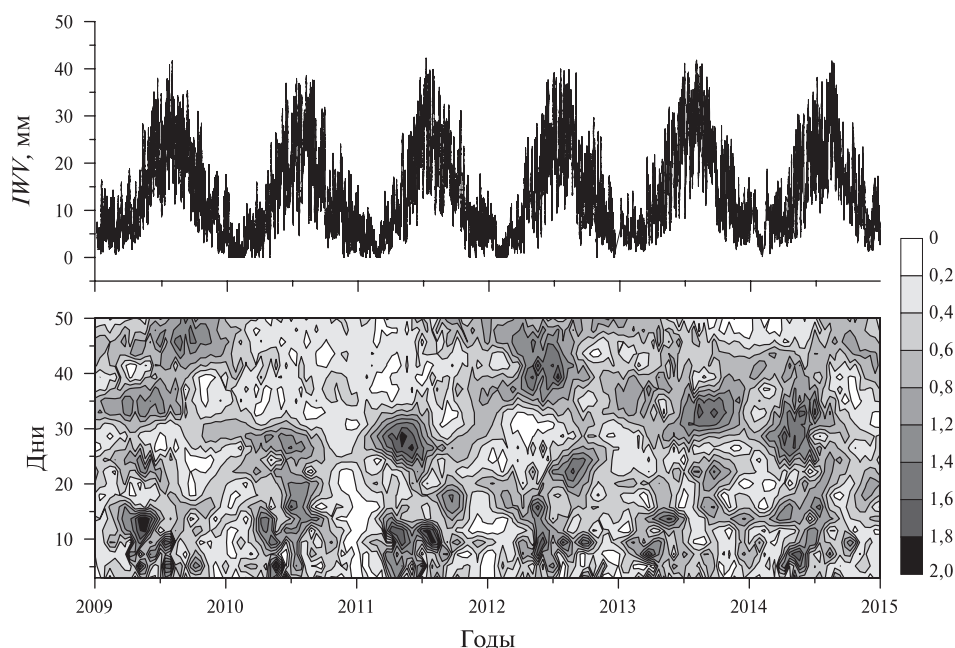


Рис. 2. Ряд интегрального влагосодержания атмосферы и его вейвлет-спектр по измерениям приёмников ГНСС в г. Казани 2009–2012 гг.

Коэффициенты детерминации линейного тренда показали, что в семилетних рядах он составляет не более 0,3 % от общей дисперсии. Гармонический анализ позволил выделить сумму годовой и полугодовой гармоник, при этом коэффициент детерминации показал, что их вклад в общую дисперсию влагосодержания составил от 62 %. Фильтрация межгодовых и сезонных вариаций в рядах среднесуточных значений позволила оценить долю синоптических вариаций в общей дисперсии — 22 %. Вклад мезомасштабных вариаций с периодами от 10 мин до 10 ч был оценён путём фильтрации с помощью скользящего среднего и достиг 7 %. Закономерности оказались сходными для интегрального и приземного влагосодержания. Межгодовые вариации присутствуют также в изменчивости интенсивности синоптических процессов.

По длинным временным рядам сделаны оценки спектра периодов мезомасштабных, синоптических, сезонных и межгодовых вариаций атмосферного влагосодержания.

На рис. 2 представлен фрагмент ряда интегрального влагосодержания атмосферы и его амплитудный вейвлет-спектр, полученный с помощью материнской функции Морле для г. Казани за 2009–2015 гг. Вейвлет-анализ позволяет изучить изменчивость спектра флуктуаций IIV во времени.

Синоптические флуктуации поля IIV составляют в среднем 2–5 мм осадённой воды, иногда они достигают 12 мм. В спектрах синоптических вариаций присутствуют значимые моды 3–4, 7–10, 11–14, 20–30 и 40–45 сут. По приведённым на рис. 2 графикам видно, что интенсивность синоптических вариаций для всех исследуемых параметров модулируется гармониками годового хода (в летний период IIV изменяется значительно сильнее). Обнаружено, что в исследуемых временных рядах преобладают квазипериодические вариации с временными масштабами от 3 до 10 сут, которые характерны для волн Россби. Однако более мощными, хотя и более редкими, являются вариации с периодами от 15 до 45 сут. Амплитуды вариаций IIV за время существования увеличиваются с 1 кг/м^2 иногда до 4 кг/м^2 . Выявлено, что интенсивность синоптических процессов в рядах интегрального влагосодержания меняется год от года.

Дистанционное зондирование тропосферы с помощью наземных ГНСС-наблюдений позволяет получить не только сезонные вариации рядов интегрального влагосодержания, но и его суточную изменчивость. Суточные амплитуды интегрального влагосодержания в Австралии составляют 1–2 мм (Glowacki, Penna, 2006), в Китае — 0,7 мм (Shuanggen et al.,

2000), на Балтике — от 0,05 мм зимой до 0,32 мм летом (Jakobson et al., 2009), в Швейцарии — 0,3 мм (Morland et al., 2009).

Однако изменчивость водяного пара исследовалась только в виде среднего суточного хода, хотя временное разрешение рядов ГНСС-зондирования позволяет исследовать более тонкие особенности. В настоящей работе была поставлена задача оценки мезомасштабных вариаций влагосодержания атмосферы.

Пространственные характеристики мезомасштабных процессов определялись по данным сети высокоточного позиционирования Республики Татарстан (СВТП РТ). Входящие в СВТП РТ пункты покрывают область протяжённостью примерно 300 км по линии восток — запад и 100 км в направлении север — юг. Средняя точка сети имеет широту 55,54° с. ш. и долготу 50,99° в. д. Для измеренных на каждой станции значений интегрального влагосодержания можно составить уравнения вида:

$$I WV(x, y) = I WV(x_0, y_0) + \frac{\partial I WV}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial I WV}{\partial y}(y - y_0), \quad (3)$$

где x и y — северная и восточная координата станции; $I WV(x, y)$ — измеренное на станции значение интегрального влагосодержания, x_0 и y_0 — координаты средней точки сети; $I WV(x_0, y_0)$ — $I WV$ на средней точки сети; $\partial I WV/\partial x$ и $\partial I WV/\partial y$ — меридиональный и зональный градиенты $I WV$. Уравнения составляются для значений $I WV$, измеренных одновременно на всех станциях, и решаются совместно методом наименьших квадратов. Таким образом, определяются средние для сети значения градиентов и интегральное влагосодержание.

Мы провели для каждого месяца расчёты средних значений интегрального влагосодержания, средних и максимальных (по модулю) значений горизонтальных градиентов, а также вычислили максимальные пространственные среднеквадратические отклонения интегрального влагосодержания для периода 2011–2016 гг. Результаты представлены в *табл. 2* и *3*. Как видно из таблиц, наиболее сухая атмосфера была в феврале, а наиболее влажная — в июле. Среднеквадратическое отклонение влагосодержания над рассматриваемой областью показывает, что пространственные флуктуации в тёплое время года в 1,5–2 раза больше, чем зимой. Наиболее сильными в спектрах как парциального давления водяного пара, так и интегрального влагосодержания являются сезонные вариации. Их амплитуды для нескольких пунктов приведены в *табл. 2*. Меридиональный градиент в холодное время меньше в несколько раз, чем в тёплое время, что естественно в силу малого содержания водяного пара в тропосфере при отрицательных температурах. Наибольшее по модулю значение достигается в августе, при этом отрицательные величины меридионального градиента указывают на общую закономерность распределения интегрального влагосодержания — убывание с возрастанием широты.

Максимальные мгновенные пространственные градиенты, как правило, значительно больше, чем среднемесячные. Особенно большие значения градиентов случаются в мае и в летние месяцы, когда они достигают величин 7–12 мм/100 км.

Мезомасштабные флуктуации поля $I WV$ составляют в среднем 1–2 мм осадённой воды, иногда они достигают 7 мм. Таблица 3 показывает, что вариации мезомасштабных полей интегрального влагосодержания непостоянны год от года.

Работы (Журавлева, Фирсов, 2005; Хуторова, Тептин, 2009) демонстрируют актуальность выявления закономерностей возникновения и развития мезомасштабных процессов в атмосфере. Так, в статье (Журавлева, Фирсов 2005) показано, что использование в вычислениях заниженных или завышенных значений содержания H_2O в атмосфере приводит к ошибкам при расчёте потоков нисходящей радиации, которые могут достигать десятков процентов. Ранее было доказано, что мезомасштабные вариации влажности в приземном слое вносят существенный вклад в изменчивость атмосферных примесей (Хуторова, Тептин, 2009).

Данные ГНСС по Республике Татарстан за 2011–2015 гг. собраны за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Таблица 2. Поле интегрального влагосодержания над территорией Республики Татарстан. Среднемесячное IWV (2013–2016). Флуктуации поля IWV

| Месяц | IWV , мм | Макс. δIWV , мм |
|-------|------------|-------------------------|
| 1 | 5,9 | 3,9 |
| 2 | 4,5 | 2,2 |
| 3 | 5,4 | 3,7 |
| 4 | 7,5 | 5,6 |
| 5 | 13,6 | 5,9 |
| 6 | 10,6 | 5,2 |
| 7 | 9,7 | 4,9 |
| 8 | 10,9 | 6,7 |
| 9 | 9,1 | 5,4 |
| 10 | 8,2 | 4,8 |
| 11 | 6,3 | 4,2 |
| 12 | 5,7 | 3,8 |

Таблица 3. Максимальные горизонтальные градиенты IWV (мм/100 км)

| Год | Месяц | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 2011 | 4,6 | 3,2 | 4,6 | 8,7 | 10,2 | 10,0 | 7,5 | 13,7 | 7,7 | 5,6 | 4,4 | 5,2 |
| 2012 | 1,3 | 4,0 | 6,3 | 4,6 | 4,3 | 6,1 | 6,8 | 7,7 | 6,1 | 9,4 | | |
| 2013 | 6,9 | 4,4 | 4,1 | 7,0 | 13,5 | 12,9 | 7,1 | 9,6 | 6,9 | 6,6 | 5,8 | 5,4 |
| 2014 | 5,7 | 5,0 | 6,1 | 7,7 | 13,6 | 9,9 | 10,9 | 10,2 | 10,1 | 9,8 | 7,3 | 6,7 |
| 2015 | 5,0 | 4,2 | 5,9 | 7,8 | | 9,1 | 11,2 | 12,9 | 10,2 | 8,3 | 5,9 | 5,1 |

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00863).

Литература

1. Журавлева Т. Б., Фирсов К. М. Об изменчивости радиационных характеристик при вариациях водяного пара в атмосфере в полосе 940 нм: результаты численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 9. С. 777–784.
2. Калинин В. В., Хуторова О. Г., Тептин Г. М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // Известия РАН. ФАО. 2012. Т. 48. № 6. С. 705–713.
3. Низамеев А. Р., Тептин Г. М. Анализ восстановления вертикального профиля индекса рефракции в тропосфере по сигналам спутников глобальных навигационных систем // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 6. С. 413–421.
4. Хуторова О. Г., Тептин Г. М. Исследование мезомасштабных волновых процессов в приземном слое по синхронным измерениям атмосферных параметров и примесей // Изв. РАН. ФАО. 2009. Т. 45. № 5. С. 588–596
5. Хуторова О. Г., Калинин В. В., Курбангалиев Т. Р. Вариации интегрального атмосферного влагосодержания, полученные по фазовым измерениям приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 529–533
6. Bevis M., Businger S. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. No. D14. P. 15787–15801.
7. Boniface K., Ducrocq V., Jaubert B. G. Impact of high-resolution data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecasting // Annales Geophysicae. 2009. V. 27. P. 2739–2753.

8. *Faccani C., Ferretti R.* Impact of a high density GPS network on the operational forecast // *Advances in Geosciences*. 2005. V. 2. P. 73–79.
9. *Glowacki J., Penna N. T.* Validation of GPS based estimates of integrated water vapour for the Australian region and identification of diurnal variability// *Australian Meteorological Mag.* 2006. V. 55. P. 131.
10. *Guochang X.* GPS. Theory, Algorithms and Applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
11. *Guoping L., Dingfa H., Biquan L.* Experiment on Driving Precipitable Water Vapor from Ground-based GPS Network in Chengdu Plain // *Geo-spatial Information Science*. 2007. V. 10. P. 181–185.
12. *Jakobson E., Ohvri H., Elgered G.* Diurnal Variability of Precipitable Water in the Baltic Region, Impact on the Transmittance of the Direct Solar Radiatio // *Boreal Environment Research*. 2009. V. 14. P. 45–55.
13. *Khutorov V. E., Teptin G. M., Khutorova O. G., Zhuravlev A. A.* Variability of the Tropospheric-Delay Temporal Structure Function of Radio Signals from the Global Navigation Satellite Systems Versus Tropospheric Surface Layer Parameters // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2016. V. 59. No. 5. P. 1–9.
14. *Khutorova O. G., Teptin G. M., Vasil'ev A. A., Khutorov V. E., Shlychkov A. P.* Passive sounding of the radiowaves refraction index structure in the troposphere by the set of satellite navigation system receivers in Kazan city // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011 V. 54. No. 1. P. 1–7.
15. *Khutorova O. G., Teptin G. M., Khutorov V. E., Kalinnikov V. V., Kurbangaliev T. R.* Variability Of GPS-Derived Zenith Tropospheric Delay And Some Result Of Its Assimilation Into Numeric Atmosphere Model // *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. 2012. P. 940–943.
16. *Khutorova O. G., Teptin G. M., Khutorov V. E., Dementyev V. V., Zhikh S. S., Krasnov V. I.* Automatic complex for modeling and forecasting atmospheric processes // *Proc. SPIE. 21st Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2015. V. 9680. P. G1–G4.
17. *Morland J., Collaud Coen M., Hocke K.* Tropospheric water vapour above Switzerland over the last 12 years // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. V. 9. P. 5975–5988.
18. *Ning T., Haas R., Elgered G., Willn U.* Multi-technique comparisons of 10 years of wet delay estimates on the west coast of Sweden // *J. Geodesy*. 2012. V. 7. No. 86. P. 565.
19. *Pacione R., Fionda E., Ferrara R.* Comparison of Atmospheric Parameters Derived from GPS, VLBI and a Ground-based Microwave Radiometer in Italy // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2002. V. 27. P. 309–316.
20. *Raju S., Saha K., Bijoy V. T.* Measurement of Integrated Water Vapor over Bangalore Using Ground Based GPS Data // *Proc. URSI General Assembly 2005. New Delphi*. 2005. P. 20–24.
21. *Sapucci L., Machado L., Monico J.* Intercomparison of Integrated Water Vapor Estimates from Multisensors in the Amazonian Region // *J. Atmospheric And Oceanic Technology*. 2007. V. 24. P. 1880–1894.
22. *Shuanggen J., Li Z., Choa J.* Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2000. V. 47. P. 3008–3015.
23. *Ware R. H., Fulker D. W., Stein S.* Real-time national GPS networks for atmospheric sensing // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001. V. 63. No. 12. P. 1315–1330.

Atmospheric moisture content variability from GPS-GLONASS data near the Kazan city

**O. G. Khutorova, V. E. Khutorov, V. V. Dementiev,
A. S. Blizorukov, G. E. Korchagin**

*Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru*

Using the GPS-GLONASS signals, the characteristics of time series of the integrated water vapor in the Kazan city area were determined. The annual amplitude of integrated water vapor is 10.2 mm of precipitated water. The main contribution, up to 63 % to the integrated water vapor variations dispersion, is provided by seasonal variations; mesoscale processes provide about 7 %, synoptic processes — 22 %, the linear trend — less than 1 %. Wavelet analysis of the integrated water vapor series for 2009–2015 showed, that the intensity of synoptic and mesoscale variations for all the investigated

parameters is modulated by the annual variation harmonics, with the maximum of the variability observed in the summer period. The interannual variability is found both in synoptic and mesoscale variations of the integrated moisture content.

Keywords: GPS, integrated water vapor

Accepted: 17.05.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-252-260

References

1. Zuravleva T. B., Firsov K. M., Ob izmenchivosti radiatsionnykh kharakteristik pri variatsiyakh vodyanogo para v atmosfere v polose 940 nm: rezul'taty chislennogo modelirovaniya (On the variability of radiation characteristics in the variation of water vapor in the atmosphere in the 940 nm band: the results of numerical simulation), *Optika atmosfery i okeana*, 2005, Vol. 18, No. 9, pp. 777–784.
2. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G., Teptin G. M., Determination of troposphere characteristics using signals of satellite navigation systems, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, Vol. 48, No. 6, pp. 631–638.
3. Nizameev A. R., Teptin G. M., Analysis of retrieval of the vertical refractive-index profile in the troposphere using the signals from the global navigation satellite systems, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2013, Vol. 56, No. 6, pp. 371–378.
4. Khutorova O. G., Teptin G. M., An investigation of mesoscale wave processes in the surface layer using synchronous measurements of atmospheric parameters and admixtures, *Izvestiya, atmospheric and oceanic physics*, 2009, Vol. 45, No. 5, pp. 549–556.
5. Khutorova O. G., Kalinnikov V. V., Kurbangaliev T. R., Variations in the atmospheric integrated water vapor from phase measurements made with receivers of satellite navigation systems, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2012, Vol. 25, No. 6, pp. 429–433.
6. Bevis M., Businger S., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 1992, Vol. 97, No. D14, pp. 15787–15801.
7. Boniface K., Ducrocq V., Jaubert B. G., Impact of high-resolution data assimilation of GPS zenith delay on Mediterranean heavy rainfall forecasting, *Ann. Geophys.*, 2009, Vol. 27, pp. 2739–2753.
8. Faccani C., Ferretti R., Impact of a high density GPS network on the operational forecast, *Advances in Geosciences*, 2005, Vol. 2, pp. 73–79.
9. Glowacki J., Penna N. T., Validation of GPS based estimates of integrated water vapour for the Australian region and identification of diurnal variability, *Aust. Meteorol. Mag.*, 2006, Vol. 55, p. 131.
10. Guochang X., *GPS. Theory, Algorithms and Applications*, Berlin: Springer, 2007, 340 p.
11. Guoping L., Dingfa H., Biquan L., Experiment on Driving Precipitable Water Vapor from Ground-based GPS Network in Chengdu Plain, *Geo-spatial Information Science*, 2007, Vol. 10, pp. 181–185.
12. Jakobson E., Ohvri H., Elgered G., Diurnal Variability of Precipitable Water in the Baltic Region, Impact on the Transmittance of the Direct Solar Radiatio, *Boreal Env. Res.*, 2009, Vol. 14, pp. 45–55.
13. Khutorov V. E., Teptin G. M., Khutorova O. G., Zhuravlev A. A., Variability of the Tropospheric-Delay Temporal Structure Function of Radio Signals from the Global Navigation Satellite Systems Versus Tropospheric Surface Layer Parameters, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, Vol. 59, No. 5, pp. 1–9.
14. Khutorova O. G., Teptin G. M., Vasil'ev A. A., Khutorov V. E., Shlychkov A. P., Passive sounding of the radiowaves refraction index structure in the troposphere by the set of satellite navigation system receivers in Kazan city, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2011, Vol. 54, No. 1, pp. 1–7.
15. Khutorova O. G., Teptin G. M., Khutorov V. E., Kalinnikov V. V., Kurbangaliev T. R., Variability of GPS-Derived Zenith Tropospheric Delay and Some Result of its Assimilation into Numeric Atmosphere Model, *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 2012, pp. 940–943.
16. Khutorova O. G., Teptin G. M., Khutorov V. E., Dementyev V. V., Zhikh S. S., Krasnov V. I., Automatic complex for modeling and forecasting atmospheric processes, *Proc. SPIE, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2015, Vol. 9680, pp. G1–G4.
17. Morland J., Collaud Coen M., Hocke K., Tropospheric water vapour above Switzerland over the last 12 years, *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, Vol. 9, pp. 5975–5988.
18. Ning T., Haas R., Elgered G., Willn U., Multi-technique comparisons of 10 years of wet delay estimates on the west coast of Sweden, *J. Geodesy*, 2012, Vol. 7, No. 86, p. 565.

19. Pacione R., Fionda E., Ferrara R., Comparison of Atmospheric Parameters Derived from GPS, VLBI and a Ground-based Microwave Radiometer in Italy, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, Vol. 27, pp. 309–316.
20. Raju S., Saha K., Bijoy V. T., Measurement of Integrated Water Vapor over Bangalore Using Ground Based GPS Data, *Proc. URSI General Assembly*, 2005, New Delphi, pp. 20–24.
21. Sapucci L., Machado L., Monico J., Intercomparison of Integrated Water Vapor Estimates from Multisensors in the Amazonian Region, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2007, Vol. 24, pp. 1880–1894.
22. Shuanggen J., Li Z., Choa J., Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2000, Vol. 47, pp. 3008–3015.
23. Ware R. H., Fulker D. W., Stein S., Real-time national GPS networks for atmospheric sensing, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, Vol. 63, No. 12, pp. 1315–1330.