

Вариации интегрального атмосферного влагосодержания, полученные по фазовым измерениям приемников спутниковых навигационных систем

О.Г. Хуторова, В.В. Калинин, Т.Р. Курбангалиев*

Казанский государственный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 19.01.2012 г.

Исследованы вариации интегрального атмосферного влагосодержания, полученные по фазовым измерениям приемников спутниковых навигационных систем. Сравнение с независимыми оценками численных погодных полей реанализа и измерениями солнечного фотометра показали совпадение с относительным отклонением менее 10%. Внутрисезонные процессы с масштабами от 3 до 45 сут вносят существенный вклад в вариации интегрального атмосферного влагосодержания, их амплитуда составляет от 1 до 4 кг/м². Наиболее часто проявляются вариации с периодами от 3 до 10 сут.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, спутниковые навигационные системы, интегральное влагосодержание, синоптические вариации; remote sensing, satellite navigation system, integral water vapour, synoptic variations.

Введение

Одной из величин, представляющих важность как для климатологии, так и для прогнозов радиационного баланса атмосферы регионального масштаба, является интегральное влагосодержание (IWV), равное количеству воды в вертикальном атмосферном столбе с единичной площадью сечения [1, 2]. Водяной пар играет огромную роль в термодинамике атмосферы. Например, для точного прогноза радиационного форсинга необходима информация о влагосодержании атмосферы с высоким пространственно-временным разрешением [2, 3]. Традиционные радиозондовые наблюдения или системы метеорологических спутников такого разрешения не дают.

Одним из распространенных методов дистанционного зондирования интегрального влагосодержания стало использование сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) [4, 5]. Этот способ обладает большими достоинствами: всепогодность, сравнительно невысокая стоимость пользовательской аппаратуры, глобальное покрытие, высокое временное разрешение, большая плотность станций, объединенных в различные сети. Одна из таких сетей станций имеется и в г. Казани [6]. С использованием данных этой сети в настоящей статье показана возможность исследования временных вариаций влагосодержания атмосферы.

В настоящее время с применением различных подходов исследованы вариации влагосодержания различных масштабов. Глобальные процессы динамики влагозапаса по данным спутниковой СВЧ-радиометрии рассмотрены в работе [7], где показана их связь с взаимодействием системы «океан — атмосфера» и циклогенезом. Количественно зависимость атмосферных водных аномалий от циклогенеза по микроволновым измерениям с полярно-орбитальных спутников представлена в [8]. В работе [9] показано, что сильный поверхностный градиент интегрального влагосодержания является хорошим индикатором местоположений фронтов в циклонах умеренных широт над океанами.

С применением GPS исследованы более локальные вариации влагосодержания. Так, например, в [10] дан анализ дневных циклов интегрального влагосодержания в прибрежном городе Марсель, показаны эффекты бризовой циркуляции. В работе [11] рассмотрено распределение интегрального влагосодержания над Китаем по данным сети GPS-станций. Показана годовая, суточная и полусуточная гармоника влагосодержания в разных частях Китая.

В основе определения интегрального влагосодержания из измерений GPS лежит оценка зенитной тропосферной задержки (ZTD) электромагнитных волн, излучаемых спутником. Оценка этой величины определяется разностью измеренного наземным приемником фазового пути сигнала, переданного спутником, и геометрической дальности между спутником и приемником. Поскольку сигнал распространяется в атмосфере, то разность между фазой и геометрической дальностью определяется задержками в тропосфере и ионосфере [12]:

* Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@ksu.ru); Владислав Валерьевич Калинин (vlad-kalinnikov@mail.ru); Тимур Рафаэльевич Курбангалиев (kurbangalievtr@gridcom-rt.ru).

$$\Phi - S = T - I + \varepsilon,$$

где Φ – измеренный фазовый путь от спутника до приемника; S – геометрическая дальность; T – тропосферная задержка; I – ионосферная задержка; ε – ошибки измерения, в том числе фазовая неоднозначность и ошибки за счет ухода часов приемника и спутника [6]. Строго говоря, тропосферная задержка – это устоявшийся термин. На самом деле эта задержка радиосигнала определяется всей нейтральной атмосферой. Вклад тропосферы как самого плотного слоя – более 75%. Необходимая для вычисления геометрической дальности информация об орбитах спутников доступна на сервере Всемирной службы ГНСС [15].

Ионосферная задержка исключается в силу своей зависимости от частоты сигнала, а наблюдения ведутся на двух частотах [6, 12]. Тропосферная задержка T при малых углах места радиотрасс «спутник – антенна» может достигать нескольких десятков метров. При вертикальной трассе (угол места равен 90°) зенитная тропосферная задержка ZTD минимальна, ее значение меняется в пределах 1,9–2,8 м [12]. В нашу задачу входит оценка зенитной тропосферной задержки по совокупности измерений приемником фазовых путей с множества спутников за относительно небольшой промежуток времени в несколько минут.

Для оценки тропосферной компоненты используются картирующие функции, зависящие от зенитного угла радиотрассы. При малых зенитных углах картирующая функция обратно пропорциональна косинусу зенитного угла. Применение этих функций корректирует искривление радиолуча в тропосфере при больших зенитных углах [4]. В нашем исследовании в качестве таковой выступает картирующая функция Чао [16]. Кроме этой функции существует множество других разновидностей картирующих функций, коэффициенты которых зависят от координат приемной станции и от приземных метеорологических параметров [16]. Однако функция Чао является достаточно точной для решения задачи оценивания ZTD [4]. Через картирующую функцию разность тропосферной задержки радиоволн, принятых антенной приемника с двух спутников ГНСС, выразится следующим образом:

$$\Delta T = ZTD(m(z^1) - m(z^2)).$$

Здесь z^1 и z^2 – зенитные углы первого и второго спутников относительно приемной станции; m – картирующая функция.

Система уравнений, построенных по измерениям, собранным на каждом пятнадцатиминутном интервале со всех синхронно видимых спутников, решается методом наименьших квадратов. По остаточным разностям нами находятся дисперсии этих пятнадцатиминутных оценок [17]. Полученные оценки мы сглаживаем с помощью фильтра Калмана.

Дальнейшим шагом является преобразование ZTD в интегральное влагосодержание IWV. Поскольку ZTD представляет собой сумму задержек, вы-

званных сухими газами и водяными парами, то она может быть представлена в виде [16]:

$$ZTD = ZHD + ZWD = A \int_T^P dh + B \int_T^e \frac{e}{T^2} dh,$$

где ZHD и ZWD – задержки электромагнитных волн, которые определяются влиянием неполярных газов атмосферы (сухая задержка) и влиянием водяного пара (влажная); P и T – давление и температура сухого воздуха; e – парциальное давление паров воды; A и B – константы. Интеграл берется по высоте, начиная от высоты приемной антенны. Так как первое слагаемое определяется интегрированием по высоте плотности сухого воздуха, которая хорошо восстанавливается по ее приземным значениям, то сухая задержка вычисляется с высокой точностью по модели Саастамойнена [4, 16], используемой в качестве входных данных приземное давление и координаты приемной антенны. Разность ZTD и ZHD дает значение влажной задержки. Интегральное влагосодержание атмосферы прямо пропорционально влажной тропосферной задержке радиоволн, коэффициент преобразования зависит от температуры, измеряемой метеостанцией на поверхности Земли [4, 16].

Одним из вопросов, рассматриваемых в настоящей статье, является верификация полученных этим методом оценок интегрального влагосодержания относительно других технологий. Верификация осуществляется путем сравнения рядов IWV, полученных с помощью ГНСС, с рядами IWV, взятыми из данных численных погодных полей реанализа NCEP/NCAR и данных сети AERONET.

Для временного ряда, полученного в г. Казани, верификация определения интегрального влагосодержания проводилась по данным численных погодных полей реанализа NCEP/NCAR [13]. Вычисление интегрального влагосодержания по погодным полям основано на интегрировании парциальной плотности водяного пара по высоте.

Нами были обработаны измерения за 2010–2011 гг., собранные на одной из станций ГНСС в Казани. Часть ряда представлена на рис. 1 вместе с его амплитудным вейвлет-спектром.

Полученный ряд значений IWV для Казани был сопоставлен с данными численных погодных полей. Статистика сравнения приведена в таблице.

Статистика сравнения рядов IWV, полученных с помощью радиоизмерений приемника ГНСС, и численных погодных полей реанализа для Казани

Сезон	Среднее отклонение, кг/м ²	Стандартное отклонение, кг/м ²	Коэффициент корреляции
Осень	–0,73	2,17	0,87
Зима	0,26	1,52	0,88
Весна	–0,88	2,61	0,91
Лето	–3,34	3,65	0,87

Как видно из таблицы, наибольшие взаимные расхождения значений интегрального влагосодержания

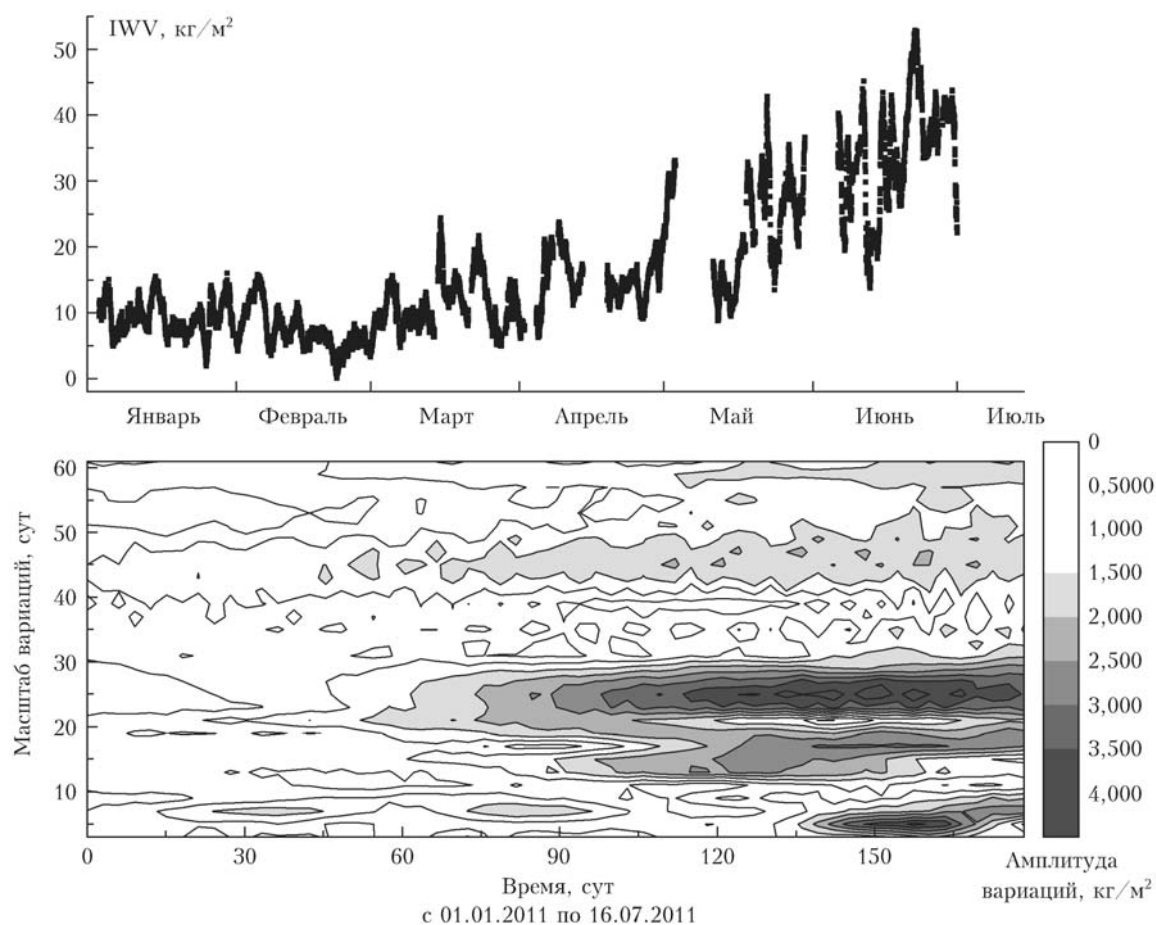


Рис. 1. Временной ряд интегрального влагосодержания атмосферы, полученный по измерениям приемника ГНСС в г. Казани, и его амплитудный вейвлет-спектр

наблюдаются в летний период. Близкие по величине расхождения между оценками IWV из GPS-измерений и из численных погодных полей были выявлены при подобных сравнениях в разных частях света [18–20]. В этих работах указывается отсутствие ярко выраженной зависимости наблюдаемых средних отклонений от широты и высоты GPS-станции, однако стандартные отклонения в целом убывают с ростом высоты наблюдений [19, 20]. Также обнаружено, что средние отклонения имеют сезонный ход с максимумом в летние месяцы [20]. Кроме того, в качестве причин расхождений называется неточность самих погодных полей [18]. В любом случае, по данным для г. Казани во все сезоны взаимные отклонения оценок не превышают 10% средних значений интегрального влагосодержания. Как видно из рис. 1, летом интегральное влагосодержание в несколько раз превышает зимние значения.

Еще один метод верификации интегрального влагосодержания основан на данных солнечных фотометров. В настоящее время существует международная сеть станций AERONET, на которых выполняются измерения спектральных оптических толщ аэрозоля в различных диапазонах длин волн. По данным оптической толщи восстанавливается интегральное влагосодержание [14]. К недостаткам исследования

интенсивности вариаций влагосодержания по данным сети AERONET можно отнести перерывы в измерениях, вызванные облачностью, и отсутствие ночных измерений [22].

Для сопоставления GPS IWV с данными AERONET нами были дополнительно обработаны результаты за апрель и май 2010 г. со станции ZWE2 сети Всемирной службы ГНСС [15]. Она находится в г. Звенигороде, где также имеется станция сети AERONET. Сравнение IWV за апрель–май 2010 г. по данным GPS и AERONET представлено на рис. 2.

Статистика сравнения дает среднее отклонение 1,84 кг/м², стандартное отклонение 1,52 кг/м² и корреляцию 0,97. Согласие двух экспериментальных методов еще лучше, чем с данными реанализа. Таким образом, оценки IWV, полученные с помощью ГНСС, хорошо согласуются как с численными погодными полями, так и с фотометрическими измерениями сети AERONET.

В целях выявления особенностей временных вариаций интегрального влагосодержания атмосферы использовалась методика, в основе которой лежит исследование квазипериодических процессов с помощью вейвлет-преобразования. Вейвлет-анализ становится обычным инструментом для анализа локализованных вариаций энергии временных рядов [21, 22].

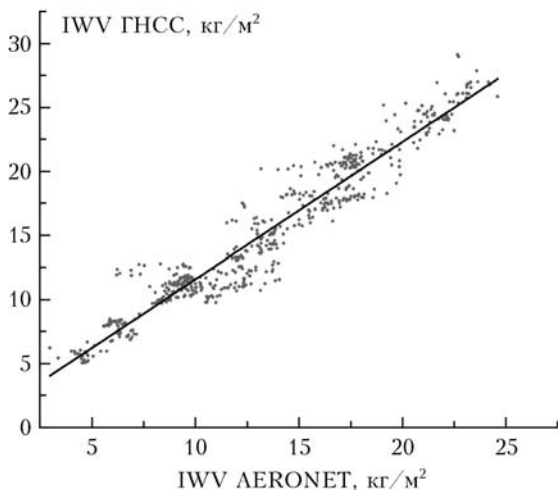


Рис. 2. Сравнение оценок интегрального влагосодержания, полученных из измерений приемника ГНСС и по данным пункта AERONET (Звенигород, апрель–май 2010 г.)

Раскладывая временные ряды в пространстве «частота – время», можно определить и доминирующие моды изменчивости и то, как они меняются во времени.

В работе мы использовали материнскую функцию Морле. Амплитудный вейвлет-спектр Морле характеризует изменение во времени относительного вклада периодических компонент различного масштаба в исследуемый сигнал, т.е. в каждый момент времени мы можем оценить интенсивность вариаций IWV всех исследуемых временных масштабов. При такой интерпретации возможно рассмотрение математических моделей физических процессов различного масштаба, оказывающих влияние на вариации IWV. Фазовый вейвлет-спектр также необходимо учитывать при анализе стабильных колебаний, в этом случае распределение фазового спектра, соответствующего данной периодичности, – узкое, в обратном случае – почти равномерное [22].

Для временного ряда IWV был построен амплитудный вейвлет-спектр, пример которого представлен на рис. 1, по уровню значимости которого определялись периоды вариации. Во всех вейвлет-спектрах выделяются значимые периодичности разной интенсивности в диапазоне временных масштабов от 3 до 60 сут. В данном спектре интересны проявления длительно существующих периодичностей с временными масштабами 25 и 45 сут, первая наблюдается с марта по июнь, а вторая в течение всего первого полугодия 2011 г. (см. рис. 1). Для дальнейшей работы отбирались участки, где амплитуда квазипериодических вариаций для максимума спектра превышает уровень значимости с вероятностью не менее 80%, а фаза вариаций постоянна или меняется незначительно. Выделенные события были сгруппированы по временному масштабу и датам. Согласно этой методике были выявлены квазипериодические вариации по измерениям станции ГНСС в Казани с октября 2010 по июль 2011 г. Обнаружено около 40 случаев проявления стабильных квазипериодических вариаций интегрального влагосодержания, удовлетворяющих обоим критериям, – превышения амплитуды над уровнем значимости в совокупности

с узким фазовым спектром выявленной моды. Эти события, как показывают работы [21, 22], значимые квазипериодические вариации интегрального влагосодержания со стабильным фазовым спектром, наблюдаются одновременно в пунктах, разнесенных на тысячи километров, и их можно отнести к проявлению планетарных волн.

Обнаружено, что в исследуемом временном ряду преобладают волновые вариации с периодами от 3 до 10 сут, которые характерны для волн Россби. Однако более мощными, хотя и более редкими являются вариации с периодами от 10 до 45 сут. Такая же закономерность была обнаружена во внутрисезонных вариациях аэрозольной оптической толщи по измерениям солнечных фотометров [21]. В [23] по синхронным наблюдениям примесей и метеопараметров в пространственно разнесенных пунктах обнаружено, что энергетика, фазовые скорости и дисперсионные соотношения волн Россби (периоды в основном менее 10 сут) и волн Кельвина (преобладающие периоды более 8 сут) существенно различаются. Из рис. 1 видно, что амплитуды вариаций в течение времени существования растут от 1 иногда до 4 кг/м². Для дальнейшего анализа амплитуды вариаций усреднялись в течение времени существования вариации. На рис. 3 представлены гистограммы средних амплитуд и длительностей обнаруженных вариаций.

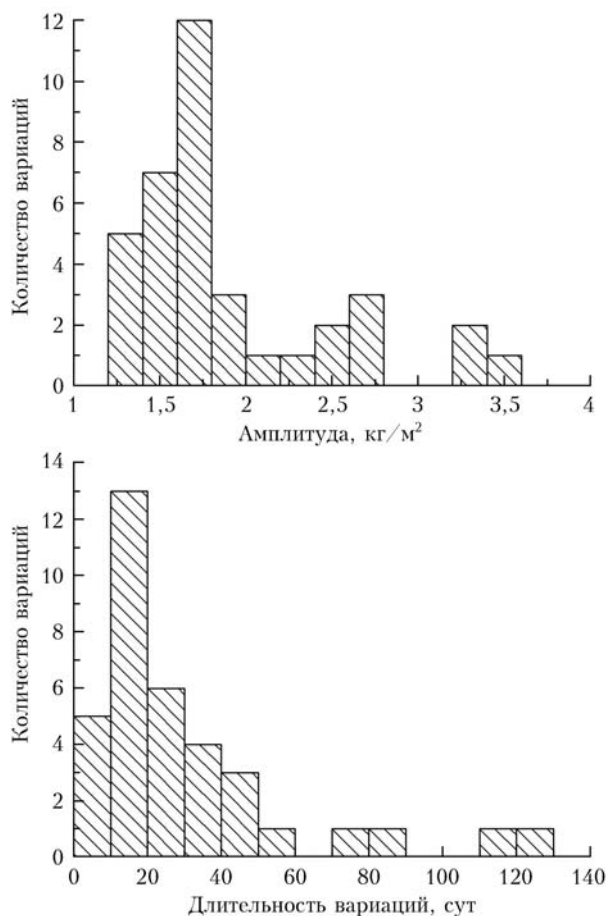


Рис. 3. Гистограммы амплитуд и длительности внутрисезонных квазипериодических вариаций интегрального влагосодержания атмосферы

Преобладают вариации с интенсивностью до $1,5 \text{ кг/м}^3$ и длительностью до 40 сут, что соответствует наиболее вероятным значениям от 2 до 8 их периодов. Средняя амплитуда вариаций в 1,5 раза больше в мае–июле, чем в ноябре–марте, что объясняется увеличением содержания водяного пара в атмосфере.

Сезонных зависимостей длительности существования и временных масштабов вариаций выявлено не было.

Авторы выражают признательность Б. Холбену и М.А. Свириденкову за возможность использования данных Звенигородской станции AERONET.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Государственный контракт № П162).

1. *Тверской Н.П.* Курс метеорологии (физика атмосферы). Л.: Гидрометеоздат, 1962. 700 с.
2. *Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В.* Космическая дистанционная индикация облаков и влагосодержания атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.
3. *Чеснокова Т.Ю., Журавлева Т.Б., Воронина Ю.В., Скляднева Т.К., Ломакина Н.Я., Ченцов А.В.* Моделирование потоков солнечного излучения с использованием высотных профилей концентрации водяного пара, характерных для условий Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 11. С. 969–975.
4. *Schuler T.* On ground-based GPS tropospheric delay estimation. Munchen: University of Munchen, 2001. 364 p.
5. *Grove-Rasmussen J.* Atmospheric water vapor detection using satellite GPS profiling. Copenhagen: Danish Meteorological Institute, 2002. 107 p.
6. *Хуторова О.Г., Васильев А.А., Хуторов В.Е.* О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS-ГЛОНАСС // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 6. С. 510–514.
7. *Астафьева Н.М., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Внутри- и междугодовые изменения влагозапаса тропосферы по данным спутникового мониторинга Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 2, вып. 4. С. 20–26.
8. *McMurdie L.A., Katsaros K.B.* Satellite-derived integrated water vapor and rain intensity patterns indicators for rapid cyclogenesis // *Weather and Forecasting*. 1996. V. 11, iss. 2. P. 230–245.
9. *Katsaros K.B., Bhatti I., McMurdie L.A., Petty G.W.* Identification of atmospheric fronts over ocean with microwave measurements of water vapor and rain // *Weather and Forecasting*. 1989. V. 4, iss. 4. P. 449–460.
10. *Bastin S., Champollion C., Block O. et al.* Diurnal cycle of water vapor as documented by a dense GPS network in a coastal area during ESCOMPTE IOP2 // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2007. V. 46, iss. 2. P. 167–182.
11. *Shuanggen J., Li Z., Choa J.* Integrated water vapor field and multiscale variations over China from GPS measurements // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2008. V. 47, iss. 11. P. 3008–3015.
12. *Guochang X.* GPS. Theory, Algorithms and Applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
13. *NOAA Earth System Research Laboratory.* URL: <http://www.esrl.noaa.gov>
14. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
15. *Всемирная служба ГНСС.* URL: <http://igs.cbn.nasa.gov/>
16. *Mendes V.* Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. Brunswick: University of New Brunswick, 1999. 353 p.
17. *Маркузе Ю.И.* Основы метода наименьших квадратов и уравнительных вычислений. М.: МИИГАиК, 2005. 288 с.
18. *Glowacki J., Penna N.T., Bourke W.P.* Validation of GPS-based estimates of integrated water vapour for the Australian region and identification of diurnal variability // *Australian Meteorol. Mag.* 2006. V. 55, N 2. P. 131–148.
19. *Chen Q., Song S., Heise S., Liou Y., Zhu W., Zhao J.* Assessment of ZTD derived from ECMWF/NCEP data with GPS ZTD over China // *GPS solution*. 2011. V. 15, N 4. P. 415–425.
20. *Vedel H., Mogensen K.S., Huang X.Y.* Calculation of zenith delays from meteorological data. Comparison of NWP model, radiosonde and GPS delays // *Phys. Chem. Earth*. 2001. V. 26, N 6–8. P. 497–502.
21. *Кабанов Д.М., Курбангалiev Т.Р., Рассказчикова Т.М., Сакерин С.М., Хуторова О.Г.* Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 8. С. 665–674.
22. *Хуторова О.Г.* Методика исследования влияния планетарных волн на вариации аэрозольной оптической толщины // *Оптика атмосф. и океана*. 2009. Т. 22, № 4. С. 392–396.
23. *Хуторова О.Г., Теттин Г.М., Александровская О.С.* Динамика и энергетика внутрисезонных атмосферных процессов по наземным и аэрологическим измерениям // *Оптика атмосф. и океана*. 2006. Т. 19, № 6. С. 536–541.

O.G. Khutorova, V.V. Kalinnikov, T.R. Kurbangaliev. Variations of atmospheric integrated humidity from phase measurements of satellite navigation systems receivers.

In this paper we studied variations of atmospheric integral water vapor obtained by the phase measurement of satellite navigation system receivers. Comparison with the numerical weather reanalysis fields and solar photometer measurements showed agreement with a relative deviation of less than 10%. Intraseasonal processes with scales from 3 to 45 days significantly contribute to variations in atmospheric integral water vapor content; its amplitude is $1\text{--}4 \text{ кг/м}^2$. Variations with periods from 3 to 10 days are the most often.