Зондирование мезомасштабной структуры тропосферы в периоды прохождения атмосферных фронтов

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

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

В настоящее время для дистанционного зондирования влагосодержания атмосферы используют данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), что позволяет исследовать структуру как неоднородностей тропосферы, так и её динамики практически одновременно с измерениями принятого сигнала. Наземные наблюдения сигналов ГНСС в Казани и окрестностях используются для выявления закономерностей пространственной мезомасштабной структуры тропосферы в периоды прохождения атмосферных фронтов. Для оценки влияния проходящего фронта на распределение водяного пара в атмосфере было отобрано несколько сотен событий атмосферных фронтов, проходящих через пункт наблюдения, среди которых представлены фронты холодного и тёплого типа, фронты окклюзии и стационарные. Пространственный разнос станций и высокое временное разрешение временных рядов позволяют зафиксировать перемещение возмущений, связанных с атмосферным фронтом. Обнаружено, что на поле интегрального влагосодержания (integrated water vapour — IWV) оказывает воздействие смена воздушных масс и атмосферные фронты. Показано увеличение интенсивности мезомасштабных неоднородностей в периоды прохождения атмосферных фронтов до высоты 2500 м от поверхности. В период прохождения тёплого атмосферного фронта синхронно с изменением давления увеличивается IWV. При прохождении холодного фронта IWV, напротив, падает. Пространственный разнос сети станций позволяет проследить изменчивость поля IWV на мезомасштабном уровне. Часто при прохождении атмосферного фронта IWV и его зональный и меридиональный градиенты испытывают резкий скачок, после которого наблюдаются затухающие квазипериодические флуктуации IWV. Изменчивость поля IWV проявляется во все сезоны года, но при положительных температурах она усиливается.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, водяной пар, погодные фронты

Одобрена к печати: 18.10.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-254-262

Введение

Радиоизмерения с применением сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) задействованы в значительном количестве отраслей человеческой деятельности благодаря общедоступности, высокой точности и большому временному разрешению. С ростом требований к точности подобных наблюдений возникает необходимость учитывать эффекты, которыми из-за малого влияния на конечный результат ранее можно было пренебречь (Orlanski, 1975). К таким эффектам можно отнести микро- и мезомасштабные неоднородности нейтральной атмосферы, которые приводят к неоднородности индекса рефракции и фазовым флуктуациям радиоволн дециметрового диапазона (Khutorova et al., 2017). Зондирование этих неоднородностей с помощью сети наземных ГНСС-приёмников показало, что флуктуации поля интегрального влагосодержания в летний период могут достигать до 6,7 мм осаждённой воды, а горизонтальные градиенты отражают сезонную и межгодовую изменчивость синоптических процессов (Хуторова и др., 2018).

Основной показатель влияния нейтральной атмосферы на распространение спутниковых сигналов — это зенитная тропосферная задержка (zenith tropospheric delay — ZTD) (Bevis, Businger, 1992), которая в значительной мере зависит от метеорологических процессов, протекающих в нейтральных слоях атмосферы. ZTD может быть определена через интеграл от индекса рефракции (Khutorova et al., 2011):

$$ZTD = \int_{\text{приёмник}}^{\text{спутник}} N \cdot 10^{-6} \text{ ds.}$$
 (1)

ZTD состоит из двух компонент: влажной (zenith wet delay — ZWD) и сухой (zenith hydrostatic delay — ZHD) задержки, так как индекс рефракции можно разложить на две составляющие — гидростатическую, зависящую от плотности воздуха, и влажную, зависящую от парциального давления водяного пара. Основной вклад в общую задержку вносит сухая составляющая (~2300 мм) (Santerre, 1989). Однако ZHD достаточно стабильна и может быть с высокой точностью смоделирована по известным значениям приземных метеопараметров (Bevis, Businger, 1992).

ZWD имеет зависимость от интегрального влагосодержания (integrated water vapour — IWV) — содержания водяного пара в вертикальном атмосферном столбе (обычно измеряется в килограммах на квадратный метр или в миллиметрах осаждённой воды, т.е. высотой столба жидкой воды сечением $1\,\mathrm{m}^2$, который образовался бы, если сконденсировать весь водяной пар в соответствующем атмосферном столбе). Эту зависимость можно записать (Mendes, 1999):

$$IWV = \frac{ZWD}{\left(0,10631 + \frac{1732,83}{a + bT_s}\right)},$$
 (2)

где a = 50,4, b = 0,789 — это коэффициенты Мендеса (Santerre, 1989), а T_s — значение приземной температуры в точке наблюдения.

Неоднородная структура тропосферы вносит ошибки в измерения точных координат приёмника, её обычно учитывают вводом горизонтальных градиентных параметров тропосферной задержки и определяют по спутниковым измерениям в одной точке наблюдения (Dach et al., 2015). Вводя зенитный угол в качестве параметра картирующей функции и используя разложение Тейлора первого порядка, получают следующее уравнение для наклонных тропосферных задержек (slant tropospheric delay — STD), соответствующих сигналам ГНСС с разных направлений от разных спутников (Rothacher et al., 1998):

$$STD^{i}(t^{i}, A^{i}, z^{i}) = ZTD^{i}(t)m(z^{i}) + {}^{N}ZTD(t)\frac{\partial m}{\partial z}\cos(A^{i}) + {}^{E}ZTD(t)\frac{\partial m}{\partial z}\sin(A^{i}), \tag{3}$$

где N ZTD — меридиональный градиентный параметр на станции наблюдений; E ZTD — зональный градиентный параметр; A^{i} — азимут направления на спутник; i — номер спутника; m — картирующая функция; z — зенитный угол для наблюдения (Meindl et al., 2004).

Современные исследования показывают связь неоднородной структуры полей интегрального влагосодержания атмосферы и горизонтальных градиентных параметров, опирающихся на спутниковые измерения ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования). Так, в работе (Elgered et al., 2019) были исследованы коэффициенты корреляции между тропосферными градиентными параметрами, полученными с помощью спутниковых наблюдений, данными метеорологического анализа модели ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), а также данными радиометров водяного пара (water vapor radiometers — WVR). Отмечается, что усреднённые за месяц значения градиентов в восточном и северном направлениях дают коэффициенты корреляции до 0,9 по сравнению с градиентами, рассчитанными на основе ECMWF, и до 0,8 при сравнении с влажными градиентами, полученными с помощью WVR.

Таким образом, синоптические процессы, смена воздушных масс, безусловно, должны отражаться в результатах дистанционного зондирования с высоким временным разрешением. В работе (Khutorova et al., 2018) показано, что изменчивость полей давления и температуры влияет на интенсивность мезомасштабной динамики тропосферы, отраженной в флуктуациях

зенитной тропосферной задержки. Соответственно, полученные с помощью дистанционного зондирования параметры могут быть использованы для уточнения прогноза полей метеопараметров. Например, в исследовании (Li et al., 2015) отмечено, что тропосферные градиенты высокого разрешения, основанные на спутниковых наблюдениях нескольких навигационных систем, хорошо согласуются с результатами мезомасштабного численного моделирования и радиометрическими наблюдениями. С помощью ГНСС выделялись острые пики влагосодержания, которые были связаны с синоптическими фронтами (Boniface et al., 2009).

В настоящей работе нами было проведено исследование неоднородностей атмосферы в моменты прохождения атмосферных фронтов над пунктом спутниковых наблюдений с помощью оценки значений интегрального влагосодержания и горизонтальных градиентных параметров зенитной тропосферной задержки в зависимости от типа атмосферного фронта.

Исходные данные

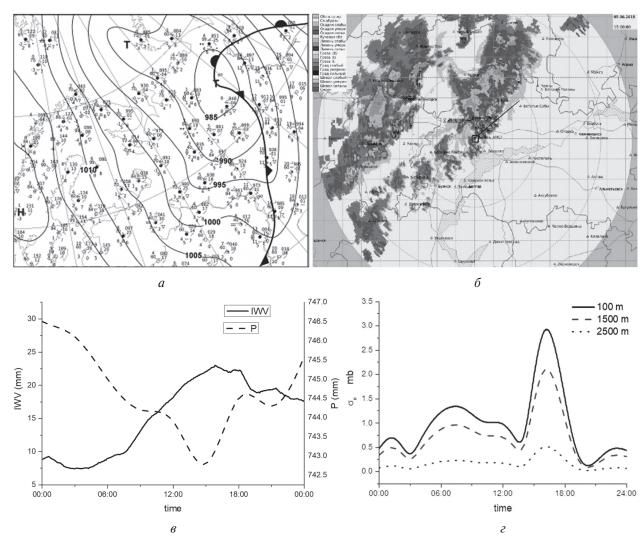
В работе были использованы данные спутниковых наблюдений со станций Казанского федерального университета в Казани и её окрестностях. Нами были получены и обработаны исходные данные 30-секундных наблюдений формата RINEX с 2013 по 2018 г. Результатом обработки стали данные ZTD и её горизонтальные градиенты: меридиональный (юг – север) и зональный (запад – восток). Временная дискретизация полученных данных составляет 15 мин. При оценке этих параметров тропосферы обычно задают маску углов места радиотрасс (Mendes, 1999). В нашем случае минимальный угол возвышения был 10°. Учитывая факт, что 90 % водяного пара находится до высоты 3–4 км от поверхности, горизонтальный пространственный охват территории зондирования будет менее 40 км, что значительно меньше ширины атмосферного фронта, которая может достигать 1000 км (Шакина, 2014). Для анализа полученных данных, а также для преобразования тропосферной задержки в интегральное влагосодержание из архивов метеоданных были взяты приземные значения таких метеопараметров, как температура и атмосферное давление (Булыгина и др., 2004). Все метеоданные были приведены к моментам спутниковых измерений и высоте спутниковой станции. Были получены ряды интегрального влагосодержания атмосферы.

Данные о прохождении фронта над точкой спутниковых наблюдений, а также классификации этого фронта брались с официального сайта Свободного университета Берлина (Freie Universität Berlin, https://www.fu-berlin.de/). Они представлены в виде метеорологической карты Европейской части континента с дискретизацией в 24 ч на момент 00:00 UTC. Из собранного материала были отобраны даты, в которые зафиксировано прохождение фронта через Казань.

Результаты и обсуждение

Мы рассмотрели изменчивость неоднородной структуры тропосферы в течение суток на примере одного события фронта 05.06.2018 подробно. На карте погоды отмечен фронт, проходящий через пункт наблюдения (рис. 1a, см. с. 257). Более точную привязку ко времени дают данные метеорологического радара Росгидромета, полученные из открытых источников (https://meteoinfo.ru) — их можно видеть на рис. 16, который отражает облачные структуры, связанные с фронтальной конвекцией. На рис. 1в изображён ход приземного атмосферного давления, там же показана изменчивость интегрального влагосодержания атмосферы. Видно, что рост давления, начавшийся около 15:00 UTC, сопровождается сначала ростом, а потом падением интегрального влагосодержания, что свидетельствует о смене воздушной массы.

Мезомасштабная сеть станций в окрестности Казани и методика радиотомографии тропосферы (Dementev et al., 2018) позволили получить изменчивость профиля парциального давления водяного пара и оценить его флуктуации — среднеквадратическое отклонение на нескольких высотных уровнях (рис. 1г). Видно, что изменчивость парциального давления водяного пара в приземном слое самая сильная, тем не менее некоторое усиление флуктуаций можно заметить и на высоте 2500 м. Пик флуктуаций (15:00—18:00 UTC) совпадает с прохождением фронтальной облачности и осадков, видимых на радаре.



 $Puc.\ 1.$ Прохождение холодного фронта через Казань 5 июня 2018 г.: a — карта изобар с отмеченным фронтом; δ — данные доплеровского метеорадара; ϵ — поведение IWV и приземного атмосферного давления в момент прохождения фронта через пункт наблюдения в Казани; ϵ — интенсивность флуктуаций парциального давления водяного пара на различных высотных уровнях, полученная с помощью ГНСС-радиотомографии

Обнаружено, что в моменты прохождения атмосферного фронта усиливаются флуктуации влагосодержания в атмосфере. Во-первых, меняется средний уровень влагосодержания, что, очевидно, вызвано сменой воздушных масс при прохождении фронта. Во-вторых, часто наблюдаются квазипериодические флуктуации как IWV, так и градиентных параметров ZTD. Причиной флуктуаций может являться наличие когерентных структур, связанных с возникновением внутренних гравитационных волн (Куличков и др., 2017).

В силу высокой скорости перемещения фронтальной поверхности графики влагосодержания, наблюдаемого на станциях Казани, практически совпадают. При большем пространственном разносе станций можно оценить скорость и направление движения фронтальной поверхности. На рис. 2 приведён пример изменчивости интегрального влагосодержания и градиентных параметров зенитной тропосферной задержки. Наиболее яркая картина изменчивости видна на графике IWV, влагосодержание последовательно начинает нарастать

сначала на станции Казань, потом в Чистополе (107 км от Казани к юго-востоку), затем в Альметьевске (115 км от Чистополя к юго-востоку). Скорость перемещения фронтальной поверхности — около 30 км/ч. Возмущения в поле зенитной тропосферной задержки распространяются преимущественно с запада на восток примерно с той же скоростью, что можно оценить по локальным экстремумам на графике зонального градиентного параметра.

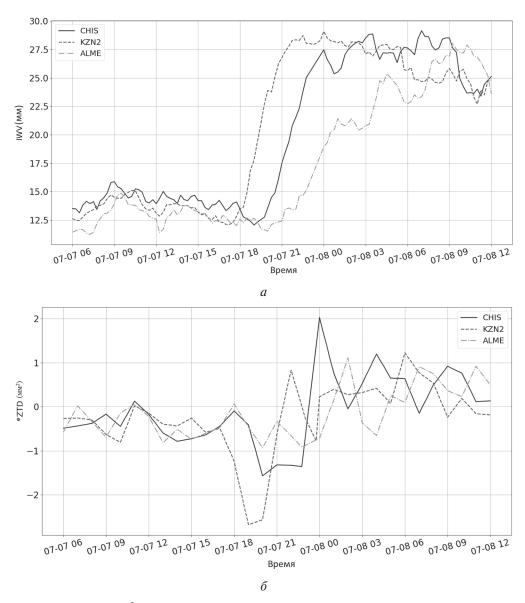


Рис. 2. Изменчивость IWV и e ZTD при прохождении фронта окклюзии через города Казань (KZN2), Чистополь (CHIS), Альметьевск (ALME) 7—8 июля 2015 г.: a — интегральное влагосодержание; δ — зональный градиентный параметр

Для статистического анализа было отобрано 351 событие атмосферных фронтов, проходящих через пункт наблюдения, среди которых наиболее часто были представлены фронты холодного типа — 144, тёплого — 116, менее часто встречающиеся фронты окклюзии и стационарные — 71 и 20 событий соответственно.

Для количественной оценки влияния проходящего фронта на мезомасштабные флуктуации в атмосфере оценивалось среднеквадратическое отклонение интегрального влагосодержания и градиентные параметры зенитной тропосферной задержки в скользящем окне шириной 6 ч. Такое окно позволяет выделить флуктуации γ -мезомасштаба (временной масштаб до 2 ч) и короткопериодной части β -мезомасштабных флуктуаций (Orlansky, 1975).

Результаты, усреднённые в зависимости от типа проходящего атмосферного фронта, представлены в maбл. 1, 2.

Таблица 1. Значения средней дисперсии интегрального влагосодержания (IWV) в зависимости от типа атмосферного фронта

Тип фронта	σ² _{IWV} , мм²
Холодный	2,59
	2,30
Окклюзии	2,57
Стационарный	1,59

Таблица 2. Значения средней дисперсии горизонтальных градиентных параметров ZTD (mm^2) в зависимости от типа атмосферного фронта

Тип фронта	Меридиональный (<i>N</i>) Зональный (<i>E</i>)	
Холодный	0,17	0,17
Тёплый	0,14	0,12
Окклюзии	0,15	0,14
Стационарный	0,19	0,15

Из всей выборки событий наибольшее значение дисперсии IWV достигло 61,4 мм² осаждённой воды и наблюдалось в момент перед прохождением холодного фронта. В среднем значения дисперсии интегрального влагосодержания при прохождении холодного фронта падают в 1,5—2 раза, а потом растут снова. И наоборот, после прохождения тёплых фронтов и фронтов окклюзии флуктуации IWV, как правило, падают. Наименьшие флуктуации интегрального влагосодержания отмечаются при стационарном типе фронта. Практически все максимумы дисперсии градиентных параметров ZTD при всех типах фронтов наблюдаются в моменты подхода атмосферного фронта к пункту наблюдений. Максимальное значение дисперсии градиентных параметров составило 0,31 мм² для меридиональной и 0,2 мм² для зональной составляющей при прохождении тёплого атмосферного фронта.

Сравнение сезонных значений горизонтальных градиентов показало, что они значительно зависят от сезона года. В летний и в меньшей степени весенний периоды разброс значений градиента больше, чем в зимний и осенний (maбл. 3).

Таблица 3. Значения медианных и максимальных дисперсий горизонтальных градиентных параметров ZTD (мм²) при прохождении атмосферных фронтов в зависимости от сезона

Сезон	Медиана		Максимум	
	N	E	N	E
Зима	0,05	0,03	0,30	0,30
Весна	0,07	0,04	0,74	0,50
Лето	0,13	0,12	0,68	0,57
Осень	0,07	0,05	0,42	0,53

Обнаружена явная сезонная зависимость. Максимальные значения дисперсии горизонтальных градиентов тропосферной задержки достигают $0,74 \text{ мm}^2$ для меридионального градиента весной и $0,57 \text{ мm}^2$ для зонального градиента в летний период. Это объяснятся более мощными конвективными процессами и большим содержанием водяного пара в атмосфере.

Заключение

Хорошо известно, что задача прогнозирования атмосферных фронтов в настоящее время плохо автоматизируется и требует квалифицированного ручного постпроцессинга результатов моделирования (Шакина, 2014). Существует вероятность, что дистанционное ГНСС-зондирование может стать дополнительным инструментом мониторинга интегрального влагосодержания с высоким временным разрешением и последующим оперативным усвоением данных. Результаты работы показали, что эта технология позволяет оценить как динамику интегрального влагосодержания, так и флуктуации в тропосфере в момент прохождения атмосферного фронта.

Данные ГНСС за 2013-2016 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. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 17-05-00863).

Литература

- 1. *Булыгина О. Н.*, *Веселов В. М.*, *Разуваев В. Н.*, *Александрова Т. М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014620549. Per. 10.04.2014. URL: http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных.
- 2. *Куличков С. Н.*, *Голикова Е. В.*, *Чунчузов И. П.*, *Перепелкин В. Г.*, *Буш Г. А.*, *Гордин В. А.* Исследования внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в московском регионе // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 455—469.
- 3. *Хуторова О. Г., Хуторов В. Е., Дементьев В. В., Близоруков А. С., Корчагин Г. Е.* Изменчивость полей атмосферного влагосодержания по данным зондирования сигналами GPS-ГЛОНАСС в окрестностях г. Казани // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 252—260.
- 4. *Шакина Н. П.* Выделение зон атмосферных фронтов как задача постпроцессинга результатов численного прогноза // Метеорология и гидрология. 2014. № 1. С. 5—20.
- 5. *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.
- 6. *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.
- 7. *Dach R.*, *Lutz S.*, *Walser P.*, *Fridez P.* User manual of the Bernese GNSS Software. Version 5.2. Bern: AIUB, 2015. 884 p.
- 8. *Dementev V. V.*, *Khutorova O. G.*, *Khutorov V. E.*, Hardware-software system for monitoring of atmospheric water vapor structure in the city of Kazan // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 211. No. 1. 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012074.
- 9. *Elgered G.*, *Ning T.*, *Forkman P.*, *Haas R.* On the information content in linear horizontal delay gradients estimated from space geodesy observations // Atmospheric Measurement Techniques. 2019. V. 12. P. 3805–3823.
- 10. *Khutorova O. G.*, *Teptin G. M.*, *Vasiliev A. A.*, *Khutorov V. E.*, *Shlychkov A. P.* Passive sounding of the radio-waves 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.
- 11. *Khutorova O. G.*, *Khutorov V. E.*, *Blizorukov A. S.*, *Teptin G. M.* GPS Signals Phase Fluctuations Caused by Atmospheric Integral Water Vapor Mesoscale Variability // Progress in Electromagnetics Research Symp.: proc. Saint Petersburg, 2017. P. 3551–3555.
- 12. *Khutorova O. G.*, *Khutorov V. E.*, *Blizorukov A. S.*, *Dementiev V. V.* Variability of atmospheric integral water vapor content as dependent on synoptic processes // 24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. SPIE. 2018. V. 10833. 108337Y. DOI: 10.1117/12.2504385.
- 13. Li X., Zus F., Lu C., Ning T., Dick G., Ge M., Wickert J., Schuh H. Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 4173–4181.
- 14. *Meindl M.*, *Schaer S.*, *Hugentobler U.*, *Beutler G.* Tropospheric gradient estimation at code: Results from global solutions // J. Meteorological Society of Japan. 2004. V. 82. P. 331–338.

- 15. *Mendes V. B.* Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. Brunswick: UNB, 1999. 353 p.
- 16. *Orlanski I*. A rational subdivision of scales for atmospheric processes // Bull. American Meteorological Society. 1975. V. 6. No. 5. P. 527–530.
- 17. *Rothacher M.*, *Springer T.A.*, *Schaer S.*, *Beutler G.* Processing strategies for regional GPS networks // Intern. Association of Geodesy Symposia. 1998. V. 118. P. 93–100.
- 18. *Santerre R*. GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning. Brunswick: UNB, 1989. 203 p.

Mesoscale tropospheric structure sensing during weather front passage

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

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan 420008, Russia E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

Currently, data from global navigation satellite systems (GNSS) are used for remote sensing of atmospheric water vapor which allows us to study the structure of both inhomogeneity of the troposphere and its dynamics almost simultaneously with measurements of the received signal. Ground-based observations of signals from global satellite navigation systems in Kazan and its environs are used to identify patterns of the spatial mesoscale structure of troposphere during periods of atmospheric fronts passage. To assess the effect of the passing front on the distribution of water vapor in the atmosphere, several hundred events of atmospheric fronts passing through the observation point were selected, among which cold and warm fronts, occlusion fronts, and stationary ones were presented. The spatial separation of the stations and the high temporal resolution of the time series make it possible to record the movement of disturbances associated with atmospheric front. It was found that the change in air masses and atmospheric fronts affects the field of integral water vapor (IWV). An increase in the intensity of mesoscale inhomogeneity during periods of passage of atmospheric fronts to a height of 2500 m from the surface is shown. During the passage of a warm atmospheric front, the IWV increases simultaneously with a change in pressure. When passing a cold front, on the contrary, the IWV decreases... The spatial separation of the network of stations makes it possible to trace the variability of the water vapor field at the mesoscale level. Often during the passage of the atmospheric front, IWV and its zonal and meridional gradients experience a sharp jump, after which damped quasiperiodic fluctuations of IWV are observed. The variability of IWV field manifests itself in all seasons of the year, but at positive temperatures it intensifies.

Keywords: GNSS, GLONASS, GPS, ZTD, IWV, water vapor, weather fronts

Accepted: 18.10.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-254-262

References

- 1. Bulygina O. N., Veselov V. M., Razuvaev V. N., Aleksandrova T. M., *Opisanie massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrakh na stantsiyakh Rossii* (Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at the stations of Russia), Certificate of state registration of date base No. 2014620549 (RU), Reg. 10.04.2014, available at: http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#opisanie-massiva-dannykh.
- 2. Kulichkov S. N., Golikova E. V., Chunchuzov I. P., Perepelkin V. G., Bush G. A., Gordin V. A., Issledovaniya vnutrennikh gravitatsionnykh voln ot atmosfernykh frontov v moskovskom regione, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 4, pp. 455–469.
- 3. Khutorova O. G., Khutorov V. E., Dementiev V. V., Blizorukov A. S., Korchagin G. E., Izmenchivost' polei atmosfernogo vlagosoderzhaniya po dannym zondirovaniya signalami GPS-GLONASS v okrestnostyakh

- g. Kazani (Atmospheric moisture content variability from GPS-GLONASS data near the Kazan city), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 252–260.
- 4. Shakina N. P., Vydelenie zon atmosfernykh frontov kak zadacha postprotsessinga rezul'tatov chislennogo prognoza (Isolation of zones of atmospheric fronts as a task of postprocessing the results of numerical forecast), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 1, pp. 5–20.
- 5. Bevis M., Businger S., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophysical Research*, 1992, Vol. 97, No. D14, pp. 15787–15801.
- 6. 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, Vol. 27, pp. 2739–2753.
- 7. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P., *User manual of the Bernese GNSS Software*, Version 5.2, Bern: AIUB, 2015, 884 p.
- 8. Dementev V.V., Khutorova O.G., Khutorov V.E., Hardware-software system for monitoring of atmospheric water vapor structure in the city of Kazan, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Vol. 211, No. 1.
- 9. Elgered G., Ning T., Forkman P., Haas R., On the information content in linear horizontal delay gradients estimated from space geodesy observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, Vol. 12, pp. 3805–3823.
- 10. Khutorova O. G., Teptin G. M., Vasiliev 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.
- 11. Khutorova O. G., Khutorov V. E., Blizorukov A. S., Teptin G. M., GPS Signals Phase Fluctuations Caused by Atmospheric Integral Water Vapor Mesoscale Variability, *Progress in Electromagnetics Research Symp.*, Proc., Saint Petersburg, 2017, pp. 3551–3555.
- 12. Khutorova O. G., Khutorov V. E., Blizorukov A. S., Dementiev V. V., 24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Proc. SPIE, 2018, Vol. 10833, 108337Y, DOI: 10.1117/12.2504385.
- 13. Li X., Zus F., Lu C., Ning T., Dick G., Ge M., Wickert J., Schuh H., Retrieving high-resolution tropospheric gradients from multiconstellation GNSS observations, *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, pp. 4173–4181.
- 14. Meindl M., Schaer S., Hugentobler U., Beutler G., Tropospheric gradient estimation at code: Results from global solutions, *J. Meteorological Society of Japan*, 2004, Vol. 82, pp. 331–338.
- 15. Mendes V.B., *Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques*, Brunswick: UNB, 1999, 353 p.
- 16. Orlanski I., A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. American Meteorological Society*, 1975, Vol. 56, No. 5, pp. 527–530.
- 17. Rothacher M., Springer T.A., Schaer S., Beutler G., Processing strategies for regional GPS networks, *Intern. Association of Geodesy Symposia*, 1998, Vol. 118, pp. 93–100.
- 18. Santerre R., GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning, Brunswick: UNB, 1989, 203 p.