

## Некоторые закономерности процессов синоптического и мезомасштаба в тропосфере, полученные с помощью сети приемников спутниковых навигационных систем

О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, В.Е. Хуторов\*

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

Поступила в редакцию 20.01.2014 г.

Представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости тропосферы с помощью сети приемников глобальных спутниковых навигационных систем. По экспериментальным данным сети приемников, разнесенных на расстояния от 1 до 35 км, получены оценки сезонной изменчивости интенсивности мезомасштабных вариаций и суточной динамики мезомасштабных неоднородностей, рассчитаны горизонтальные структурные функции зенитной тропосферной задержки. Обнаружена связь с полями влажности, давления и скорости ветра.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование тропосферы, интегральное влагосодержание, мезомасштабные возмущения, синоптические процессы; remote sensing of troposphere, integral moisture, mesoscale disturbances, synoptic processes.

В последнее время появляются работы, в которых показана актуальность выявления закономерностей возникновения и развития мезомасштабных процессов в атмосфере. Например, в [1] утверждается, что использование в расчетах заниженных или завышенных значений содержания  $H_2O$  в атмосфере приводит к ошибкам при расчете потоков нисходящей радиации, которые могут достигать десятков процентов. В работе [2] представлен алгоритм моделирования распространения лазерных пучков на атмосферных трассах, учитывающий рефракцию и фокусировку пучка на мезомасштабных неоднородностях. Ранее было обнаружено, что мезомасштабные процессы в приземном слое вносят существенный вклад в дисперсию атмосферных примесей [3]. В [4] показано, что мезомасштабные процессы, в том числе их проявление в массовой концентрации аэрозоля, модулируются сезонными и синоптическими процессами.

В настоящей статье ставится задача исследования мезомасштабной изменчивости тропосферы с помощью сети приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНС). Метод дистанционного зондирования тропосферы сигналами ГЛОНАСС и GPS в последнее время применяется для определения интегрального влагосодержания и других параметров атмосферы [5, 6], что связано с такими преимуществами данной технологии, как наличие плотной сети наземных станций, круглосуточная запись

измерений с высоким временным разрешением, независимость от погодных условий. Ведутся исследования по ассимиляции данных GPS в негидростатические мезомасштабные погодные поля с целью улучшения качества прогнозов погоды [7]. Мы используем фазовые измерения сети Казанского федерального университета [8].

Измеренная наземным приемником фаза сигнала, излученного навигационным спутником, несет 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  $e$  [9]:

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

Первое слагаемое пропорционально плотности атмосферы, а второе и третье определяются влажностью. В эксперименте по измерениям приемника оценивается параметр, характеризующий состояние тропосферы – зенитная тропосферная (полная) задержка (ZTD), которая может быть найдена через интеграл от индекса рефракции [5]:

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

Интеграл берется от высоты антенны приемника до высоты антенны спутника в зенитном направлении.

\* Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@ksu.ru); Герман Михайлович Тептин; Владислав Евгеньевич Хуторов.

Этот параметр традиционно измеряется в единицах длины [9]. В силу того что индекс рефракции экспоненциально падает с высотой, основной вклад в ZTD вносит тропосфера. Подставив (1) в (2), можно увидеть, что ZTD представляет собой сумму задержек, вызванных сухими газами (ZHD) и водяными парами (ZWD). Первое слагаемое определяется интегрированием по высоте плотности воздуха, его можно определить по приземным значениям температуры и давления, а из ZWD получить интегральное влагосодержание атмосферы [6].

В настоящей статье мы будем оперировать полной задержкой радиосигналов ГНСС, чтобы учитывать как вариации влажности, так и возможные вариации плотности. Дополнительно для расчета ZHD и ZWD привлекались данные метеостанции Росгидромета [10]. Все параметры получены на сети станций г. Казани.

Пример полученных рядов ZTD и ZHD приведен на рис. 1.

По длинным рядам за 2009–2012 гг. были сделаны оценки вклада сезонных и синоптических вариаций в общую дисперсию ZTD, ZHD и ZWD. Результаты и средние значения исследуемых величин даны в табл. 1.

Сравнительный анализ показал следующее. Сезонные вариации наблюдаемой ZTD практически полностью определяются сезонными вариациями интегрального влагосодержания атмосферы, что можно видеть при сравнении рядов полной и гидростатической тропосферной задержки на рис. 1 и четвертого столбца табл. 1. Вторыми по интенсивности являются синоптические вариации, именно они дают наибольшую изменчивость ZTD и интегрального влагосодержания атмосферы. Из табл. 1 видно, что интенсивность вариаций плотности и влажности близка по величине и, соответственно, их вклад в синоптические вариации ZTD можно считать сравнимым. Однако зимой, при отрицательной температуре в тропосфере, водяной пар «вымораживается» и синоптические

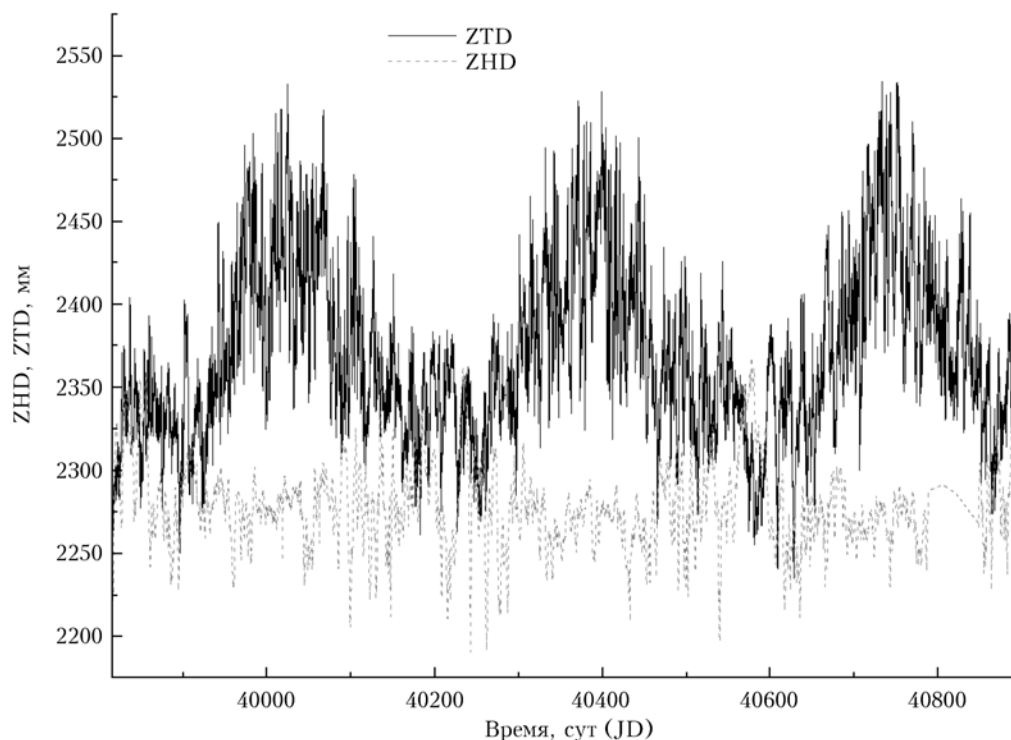


Рис. 1. Временной ряд зенитной полной тропосферной задержки сигналов ГНСС (ZTD) и зенитной гидростатической задержки ZHD, полученный по измерениям приемника ГНСС в г. Казани (2009–2011 гг.)

Таблица 1

**Интенсивность и доли в дисперсии вариаций полной, гидростатической и влажной задержек сигналов ГНСС по данным сети станций в г. Казани (2009–2011 гг.)**

Параметр, мм	Среднее, мм	Дисперсия, мм <sup>2</sup>	Доля сезонных вариаций	Интенсивность сезонных вариаций, мм	Доля синоптических вариаций	Интенсивность синоптических вариаций, мм	Доля внутрисуточных вариаций
1	2	3	4	5	6	7	8
ZTD	2367	2605,8	0,39	53	0,46	26	0,15
ZHD	2279	654,1	0,07	11	0,81	21	0,12
ZWD	91	3757,1	0,38	46	0,50	34	0,12

вариации рефракции в тропосфере определяются в основном изменчивостью плотности.

В работах [3, 4] показано, что удачным методом оценки интенсивности нестационарных атмосферных флуктуаций, особенно мезомасштабных, является вейвлет-анализ с материнской функцией Морле. Применяя вейвлет-преобразование, мы получили из рядов ZTD ряды интенсивности вариаций с временными масштабами от 15 мин до 24 ч. По этим рядам сделаны оценки сезонной изменчивости интенсивности мезомасштабных вариаций (периоды от 15 мин до 16 ч) и суточного хода (период 24 ч). Для удобного сравнения в табл. 2 приведены уровни интенсивности мезомасштабных  $A_m$  и суточных вариаций  $A_{24}$  для каждого сезона относительно среднего уровня этих вариаций за весь исследуемый период, а также максимальные и среднесезонные значения отношения интенсивности мезомасштабных вариаций к величине суточного хода.

Таблица 2

Относительные интенсивности внутрисуточных вариаций ZTD к их среднему уровню и уровню суточного хода

Сезон	$A_m$	$A_{24}$	Среднее $A_m/A_{24}$	Максимальное $A_m/A_{24}$
Зима	0,87	0,610	0,471	23,0
Весна	0,92	0,930	0,328	9,8
Лето	1,21	1,380	0,291	16,9
Осень	0,98	1,088	0,301	23,7

Видно, что наибольшая интенсивность как мезомасштабных, так и суточных вариаций зенитной тро-

посферной задержки радиосигналов ГНСС достигается в летний период, минимальная – в зимний. Весной и осенью уровень вариаций всех масштабов практически соответствует среднегодовому. Интересно, что в среднем интенсивность мезомасштабных процессов относительно величины суточного хода составляет 30–50%, однако максимальные соотношения интенсивности мезомасштабных процессов в несколько раз могут превышать величину суточного хода в отдельные моменты времени. То есть вынужденные колебания атмосферной рефракции (суточный ход метеопараметров) и мезомасштабная динамика, как и следовало ожидать, обусловлены разными причинами.

Мы сравнивали изменчивость интенсивности отдельно мезомасштабных процессов  $\gamma$ -мезомасштаба (временной масштаб до 2 ч) и  $\beta$ -мезомасштаба (временной масштаб от 2 до 20 ч) в зависимости от приземных метеопараметров. За 3 года получены следующие закономерности.

Как правило, в любой сезон явное влияние на интенсивность всех внутрисуточных вариаций ZTD оказывает понижение атмосферного давления, например при прохождении циклона, наблюдается рост интенсивности вариаций как  $\gamma$ -, так и  $\beta$ -мезомасштабов в среднем на 15%, а амплитуда суточного хода увеличивается на 50%. Например, из рис. 2 видно, что при понижении давления возрастает средний уровень мезомасштабных флуктуаций (суммарная), хорошо заметный даже с учетом его сильной суточной изменчивости.

Зимой наблюдаются увеличение интенсивности процессов  $\gamma$ -мезомасштаба в среднем на 20% и снижение

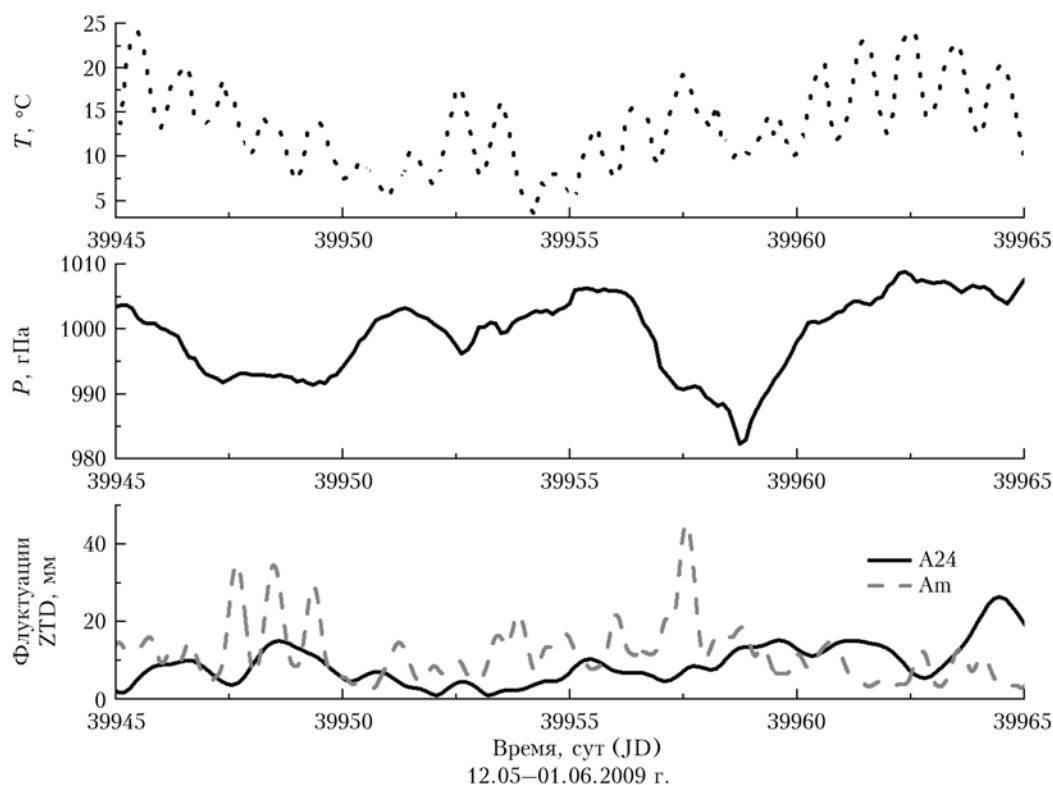


Рис. 2. Ряды приземной температуры  $T$ , давления  $P$ , амплитуды суточного хода  $A_{24}$  и интенсивности мезомасштабных флуктуаций зенитной тропосферной задержки сигналов ГНСС

интенсивности  $\beta$ -мезомасштаба на 15% при положительных значениях приземной дневной температуры. При этом наблюдается также рост амплитуды суточного хода ZTD, который можно объяснить увеличением концентрации водяного пара. Значительное увеличение приземного парциального давления водяного пара (до 18 мбар) совпадает со значительным (до 40%) ростом амплитуды вариаций  $\gamma$ -мезомасштаба, суточный ход и амплитуда вариаций  $\beta$ -мезомасштаба увеличиваются всего лишь на 15%.

Иногда зимой рост меридиональной скорости ветра совпадает с увеличением интенсивности мезомасштабных флуктуаций на 15–20%. Причем северный ветер совпадает с увеличением амплитуды вариаций  $\gamma$ -мезомасштаба, а южный – с ростом интенсивности вариаций  $\beta$ -мезомасштаба.

Усиление с мая по сентябрь юго-западного ветра иногда совпадает с увеличением амплитуды вариаций  $\gamma$ -мезомасштаба на 20–30% и  $\beta$ -мезомасштаба на 40%. Летом повышение температуры часто происходит одновременно с увеличением интенсивности процессов как  $\gamma$ -, так и  $\beta$ -мезомасштабов на 20%.

На рис. 2 можно видеть сильные суточные вариации интенсивности мезомасштабных процессов, синхронные суточному ходу температуры. Возможно, такой суточный ход объясняется усилением конвекции. Для оценки суточной динамики мезомасштабных неоднородностей по экспериментальным данным сети приемников, разнесенных на расстояния от 1 до 35 км, рассчитаны горизонтальные структурные функции ZTD и построен их суточный ход.

Физический смысл структурной функции есть среднее квадрата флуктуаций исследуемой вели-

ны в области соответствующих пространственных или временных масштабов в процессах со стационарным приращением [11]:

$$D_{ZTD}(r) = \langle (ZTD(r + \Delta r) - ZTD(r))^2 \rangle. \quad (3)$$

Здесь оцениваемая величина представлена в виде функции,  $r$  – аргумент этой функции.

Выбран летний период времени, так как летом усиление мезомасштабных вихрей за счет конвекции должно проявиться сильнее [12]. Подобраны периоды наблюдений, для которых отсутствуют фронты, четко проявляется суточный ход метеопараметров. Пример изменчивости структурной функции зенитной тропосферной задержки сигналов ГНСС в течение суток представлен на рис. 3. Тоновая шкала – величина структурной функции,  $m^2$ .

Видно, что максимального значения структурные функции достигают в дневное время, в то время как минимальные значения наблюдаются в утреннее и вечернее время. Неравномерный рост структурной функции с увеличением масштаба свидетельствует о присутствии когерентных структур. Такое поведение структурной функции означает, что в дневные часы увеличивается дисперсия индекса рефракции в горизонтальном направлении в области масштабов порядка десятков километров. Мы предполагаем, что это связано с ростом конвективной неустойчивости в дневные часы [12]. Анализ данных метеостанции показал, что в дневные часы средняя скорость ветра возросла до 4 м/с, в то время как в утренние и ночные она была около 1 м/с. Это косвенно подтверждает наши предположения об усилении гидродинамической неустойчивости атмосферы в дневной период

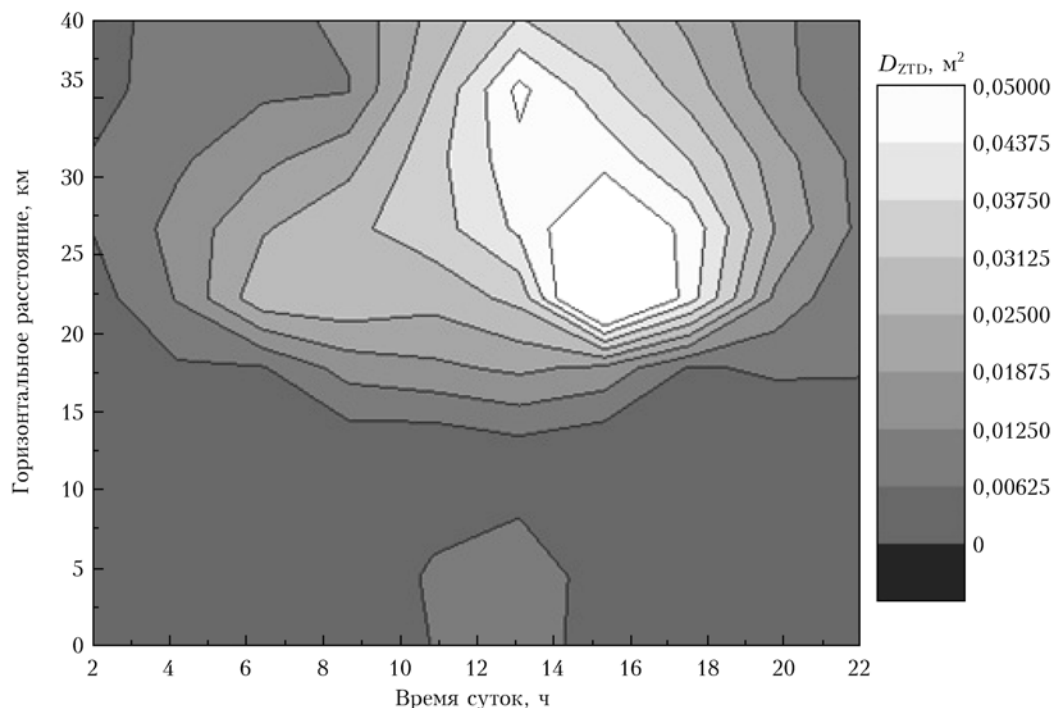


Рис. 3. Суточные вариации структурной функции зенитной тропосферной задержки сигналов ГНСС в области пространственных масштабов от 0,8 до 40 км 23 августа 2009 г.

и, соответственно, увеличении мезомасштабных флуктуаций атмосферной плотности и тропосферной задержки радиоволн.

Обобщая полученные закономерности, можно предположить, что возникновение и развитие мезомасштабных процессов в тропосфере связаны с несколькими причинами.

В теплый период года, как правило в дневные часы, мезомасштабная динамика обусловлена конвекцией, вызванной нагревом подстилающей поверхности [12]. Созданные таким образом потоки воздушных масс образуют тропосферные неоднородности, которые проявляются в пространственно-временной структуре атмосферной плотности и фиксируются.

Кроме того, при положительных приземных температурах воздуха растет количество водяного пара в тропосфере, а его поле существенно неоднородно [6]. Следовательно, увеличивается вклад неоднородностей водяного пара в вариации индекса рефракции, что также может усиливать сезонный ход флуктуаций тропосферной задержки радиоволн.

Влияние поля давления на интенсивность мезомасштабной динамики тропосферы, скорее всего, также связано с комплексным воздействием конвекции и возрастающей концентрации водяного пара в тропосфере. Изменчивость поля давления связана с переносом воздушных масс, которые модулируют как интегральное влагосодержание атмосферы, так и аэрозольную оптическую толщину [13].

Выявленная неоднозначная связь усиления мезомасштабных флуктуаций ZTD с полем скорости ветра требует дальнейших исследований. Можно предположить также влияние орографии на возникновение волновых мезомасштабных процессов, как, например, в [3].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-97054).

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 атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 9. С. 777–784.

2. Колосов В.В., Дудоров В.В., Филимонов Г.А., Панина Е.К., Воронцов М.А. Учет влияния крупномасштабных атмосферных неоднородностей в задаче распространения лазерного излучения на протяженных высотных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1034–1040.
3. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Исследование мезомасштабных волновых процессов в приземном слое по синхронным измерениям атмосферных параметров и примесей // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 5. С. 588–596.
4. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Сезонная изменчивость спектра вариаций атмосферных параметров приземного слоя // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 7. С. 645–647.
5. Калинин В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 705–713.
6. Хуторова О.Г., Калинин В.В., Курбангалiev Т.Р. Вариации интегрального атмосферного влагосодержания, полученные по фазовым измерениям приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 529–533.
7. Khutorova O.G., Tep tin G.M., Khutorov V.E., Kalinikov V.V., Kurbangaliev T.R. Variability of GPS-derived zenith tropospheric delay and some result of its assimilation into numeric atmosphere model // P I E R S Proc. 2012. P. 940–943.
8. Хуторова О.Г., Васильев А.А., Хуторов В.Е. О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS–ГЛОНАСС // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 510–514.
9. Guochang X. GPS. Theory, Algorithms and Applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
10. Сервер «Погода России». URL: <http://meteo.infospace.ru/>
11. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 463 с.
12. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 308 с.
13. Кабанов Д.М., Курбангалiev Т.Р., Рассказчикова Т.М., Сакерин С.М., Хуторова О.Г. Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 665–674.

**O.G. Khutorova, G.M. Tep tin, V.E. Khutorov. Certain regularities of synoptic and mesoscale processes in the troposphere, found with the help of a network of receivers of global positioning systems.**

This paper presents results of the troposphere spatial and temporal variability studies from the network of global satellite navigation system receivers. According to experimental data from GPS receiver network, spaced at distances from 1 to 35 km, the seasonal variability of the intensity of mesoscale variations and daily dynamics of mesoscale inhomogeneity is estimated, horizontal structure functions of zenith tropospheric delay are calculated. A relationship with the fields of humidity, pressure, and wind speed is found.