

## МОНИТОРИНГ ТРОПОСФЕРЫ СИГНАЛАМИ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ОПАСНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

О.Г. Хуторова, М.В. Мещерова, В.Е. Хуторов

Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18  
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru

**Аннотация.** В работе выявлена значимая изменчивость характеристик атмосферы, связанная с опасными конвективными явлениями. Обнаружено, что в условиях опасных явлений растет интегральное влагосодержание атмосферы и его внутрисуточная изменчивость, усиливается неоднородность поля зенитной тропосферной задержки спутниковых сигналов, что проявляется в увеличении ее градиентных параметров и их флуктуаций. Наиболее сильно меняется интенсивность флуктуаций интегрального влагосодержания, если станция расположена не далее 20 км от опасного явления, что объясняется размерами конвективных ячеек.

**Ключевые слова:** ГНСС - метеорология, дистанционное зондирование тропосферы

## THE TROPOSPHERE MONITORING BY SIGNALS FROM A SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS RECEIVERS AND DANGEROUS CONVECTIVE PHENOMENA

O.G. Khutorova, M.V. Meshcherova, V.E. Khutorov

**Abstract.** The work revealed significant variability of atmospheric characteristics associated with dangerous convective phenomena. It was found that under conditions of dangerous phenomena, the integral water vapor of the atmosphere and its intra-day variability increase, the inhomogeneity of the field of zenith tropospheric delay of satellite signals increases, which is manifested in an increase in its gradient parameters and their fluctuations. The intensity of fluctuations of the integral water vapor changes most strongly if the station is located no further than 20 km from the dangerous phenomenon, which is explained by the size of convective cells.

**Keywords:** remote sensing; troposphere; satellite navigation systems; convection; atmospheric instability.

### Введение

Опасные метеорологические явления могут приводить к сильным экономическим потерям и даже потерям человеческих жизней, в связи, с чем актуализируется задача их прогнозирования [1]. В связи с изменением климата в различных регионах наблюдается рост числа опасных явлений, связанных с атмосферной конвекцией – это сильный ветер, крупный град, ливни и грозы. Многими авторами отмечается, что тенденции увеличения количества экстремальных событий будут сохраняться [2].

В настоящее время методы прогнозирования используют численные модели и алгоритмы нейронных сетей. Прогноз опасных метеорологических явлений весьма сложен, для повышения точности желательно использовать все имеющиеся данные наблюдений, включая технологии дистанционного зондирования [2,3]. Наиболее трудно прогнозировать точные координаты возникновения опасных явлений, например, ураганного ветра [3]. Необходимо корректно диагностировать наличие конвекции и ее интенсивности для более объективной оценки условий возникновения опасных явлений. Очень важной характеристикой в этих задачах является атмосферное влагосодержание как показатель конвекции [4]. Одним из инструментов мониторинга этого параметра служат глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), по сигналам которых восстанавливают не только интегральное влагосодержание атмосферы, но и параметры ее неоднородной структуры с временным разрешением до 5 минут [5].

Неоднородную структуру тропосферы при оценке тропосферной задержки обычно характеризуют по спутниковым измерениям в одной точке наблюдения с помощью оценки горизонтальных градиентных параметров тропосферной задержки [6]. Анализируя сигналы ГНСС, принятые от разных спутников и поступившие из разных направлений, вводят зенитный угол в качестве параметра отображающей функции. Для дальнейших вычислений применяют разложение Тейлора и учитывают члены первого порядка. Таким образом, получают

уравнение, которое будет описывать наклонные тропосферные задержки STD с учетом горизонтальной неоднородности тропосферы

### Основные результаты

Рассчитывались длинные ряды интегрального влагосодержания и градиентных параметров ZTD по ГНСС-наблюдениям сети приемников высокоточного позиционирования в Республике Татарстан и IGS-GNSS. Всего использовалось наблюдения тринадцати станций в Республике Татарстан и Московской области за 2013-2023 годы.

Вблизи от этих среднеширотных ГНСС-станций произведена выборка событий опасных конвективных явлений. Оценивались внутрисуточные средние значения IWV, его внутрисуточная изменчивость dIWV – отношение внутрисуточного роста влагосодержания к минимальному IWV в процентах, эти величины характеризуют мощность конвективных процессов. Максимальные за сутки значения величины градиента ZTD и среднеквадратичные отклонения угла градиентного параметра AdZTD характеризуют интенсивность атмосферных мезомасштабных неоднородностей.

В качестве сигнатуры опасного явления распределения всех исследуемых характеристик исследовались с помощью критериев Краскела –Уоллиса вместе с критериями Стьюдента и ANOVA.

Построены эмпирические распределения интегрального влагосодержания атмосферы, полученные для событий опасных явлений вблизи ближайших среднеширотных -станций приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Исследовались статистические характеристики внутрисуточных средних значений интегрального влагосодержания, его внутрисуточная изменчивость. На рис.1 представлены распределения IWV и dIWV, полученные по многолетним данным и для сравнения распределения IWV и dIWV для всех суток, когда наблюдались какие-либо из опасных явлений. Видно, что при опасных конвективных явлениях наблюдается увеличение интегрального влагосодержания атмосферы по сравнению с многолетними данными. Кроме того, при опасных явлениях увеличивается интенсивность внутрисуточной изменчивости интегрального влагосодержания атмосферы.

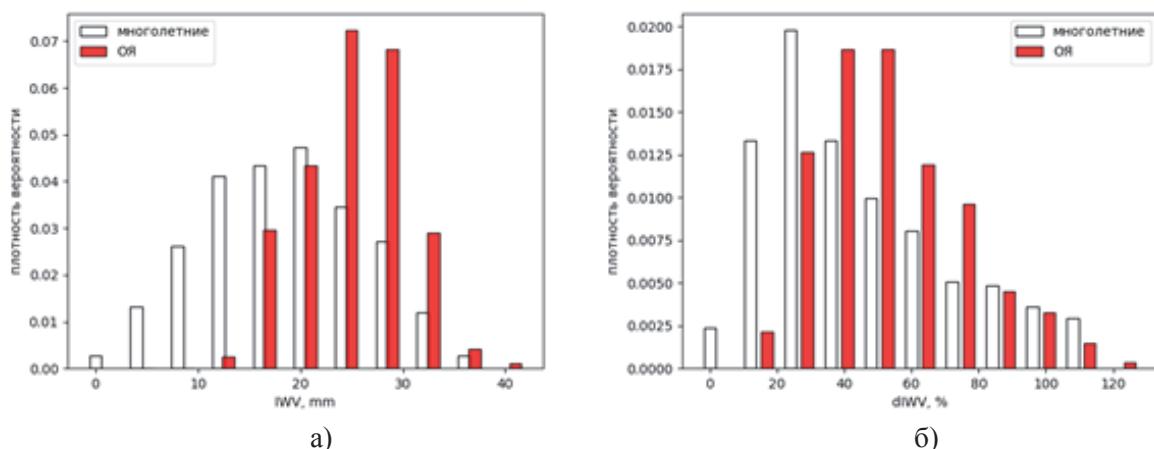


Рис. 1. Распределения характеристик атмосферы, полученные по многолетним данным и для всех суток, когда наблюдались какие-либо из опасных явлений (ОЯ) а) среднесуточное интегральное влагосодержание атмосферы IWV б) рост влагосодержания в течение суток dIWV

Построены эмпирические распределения градиентных параметров зенитной тропосферной задержки, полученные для событий опасных явлений вблизи ближайших среднеширотных ГНСС-станций.

На рис. 2 представлены распределения величины градиента dZTD и среднеквадратических отклонений AdZTD, полученные по многолетним данным и для сравнения распределения тех же параметров для всех суток, когда наблюдались какие-либо из опасных явлений. Видно, что опасные явления проявляются в данных ГНСС мониторинга увеличением интенсивности

мезомасштабных неоднородностей, о чем свидетельствует увеличение величины градиента зенитной тропосферной задержки и флюктуаций его направления.

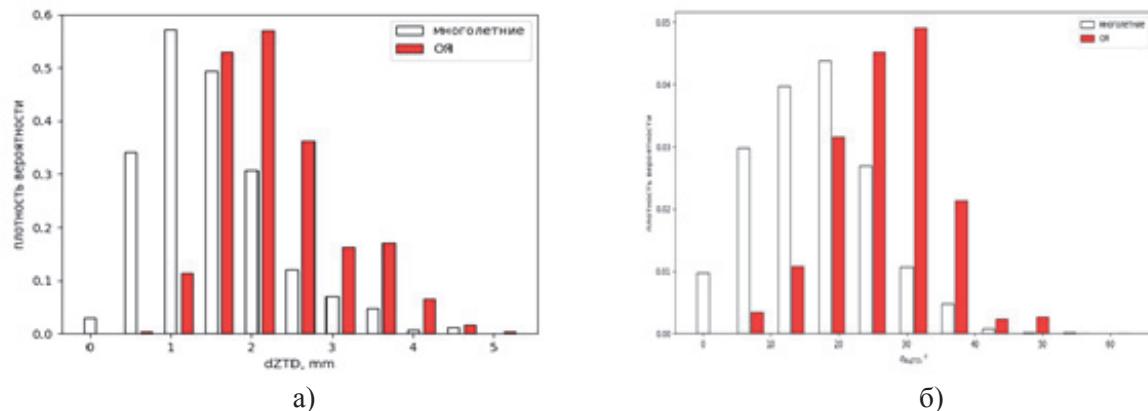


Рис. 2. Распределения характеристик атмосферы, полученные по многолетним данным и для всех суток, когда наблюдались какие-либо из опасных явлений (ОЯ) а) величина вектора градиентных параметров  $dZTD$  б) среднеквадратическое отклонение направления вектора градиентных параметров  $\sigma_{AdZTD}$

Таблица 1. Характеристики ГНСС параметров атмосферы для событий опасных явлений в сравнении с многолетними данными

	Средне-многолетние данные	Расстояние антенны до ОЯ $D \leq 20$ км (сильный ветер)	Расстояние антенны до ОЯ $20 \text{ км} < D \leq 200$ км (сильный ветер)	Расстояние антенны до ОЯ $D \leq 20$ км (град, ливень, гроза)	Расстояние антенны до ОЯ $20 \text{ км} < D \leq 200$ км (град, ливень, гроза)
Медианное значение среднесуточного IWV, мм	19	25	25	29	25
Изменчивость IWV за сутки,	28%	54%	46%	51%	48%
Медианное значение максимального градиента $dZTD$ ,	1,6	2,1	2	1,8	1,8
Медианное значение внутрисуточных флюктуаций $\sigma_{A\_dZTD}$ , °	19	29	27	26	23
Число событий		30	161	10	106

### Заключение

Обнаружено, что в летний период в условиях глубокой конвекции, но в отсутствии опасных явлений интегральное влагосодержание, полученное с помощью ГНСС мониторинга в

Поволжском регионе, значимо меняет распределение среднечасовых значений IWV, значение интегрального влагосодержания увеличивается в среднем на 12 мм при увеличении восходящей вертикальной скорости до 40 м/с. Особенно заметны вариации IWV, если опасные явления наблюдается не далее 20 км от станции, внутрисуточный рост IWV составляет 50% и выше. Значение величины вектора градиента ZTD и флюктуации его направления менее чувствительны к расстоянию до опасных явлений, но также показывают усиление неоднородностей атмосферы при опасных явлениях по сравнению с многолетними данными. Величина вектора градиентных параметров и флюктуации его направления - критерий неоднородной структуры тропосферы, их рост свидетельствует формировании конвективных ячеек. Слабая зависимость вектора градиентных параметров от расстояния между опасным явлением и станцией мониторинга объясняется тем, что, как правило, при глубокой конвекции образуется не одна ячейка, а протяженные мезомасштабные конвективные структуры, связанные с прохождением атмосферного фронта. Соответственно, на расстояниях 20-200 км до станции конвективных ячеек может быть несколько, что отражается как на флюктуациях угла вектора градиентного параметра ZTD, так и на его величине.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-27-00222). Данные ГНСС-мониторинга собраны по программе стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

#### Список литературы

1. Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н., Мартынова Ю.В. Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири. // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 02. – С. 136–142.
2. Сумак Е.Н., Семенова И.Г. Циклоническая активность и повторяемость опасных явлений погоды над территорией Беларуси // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2019. № 2. – С. 79–93.
3. Алексеева, А. А. Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 1. – С. 5–15.
4. Krinitkiy M., Sprygin A., Elizarov S., Narizhnaya A., Shikhov A., Chernokulsky A. Towards the Accurate Automatic Detection of Mesoscale Convective Systems in Remote Sensing Data: From Data Mining to Deep Learning Models and Their Applications // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15. – N. 14. – P. 3493.
5. Lasota E., Slavchev M., Guerova G., Rohm W., Kaplon J. Combined Space- and Ground-Based GNSS Monitoring of Two Severe Hailstorm Cases in Bulgaria // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2022. –Vol. 39. – P. 649–665.
6. Barindelli S., Realini E., Venuti G., Fermi A., Gatti A. Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers // Earth, Planets and Space. – 2018. – Vol. 70. – N 1. – P. 1–18.