

# ГНСС-МОНИТОРИНГ ТРОПОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ОПАСНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Хуторова О.Г., Маслова М.В., Хуторов В.Е., Корчагин Г.Е.

Казанский федеральный университет, Россия

e-mail: Olga.Khutorova@kpfu.ru, maryamaslova1861@mail.ru, pri870@yandex.ru, gkorch@mail.ru

В работе рассматривались характеристики атмосферы, такие как интегральное влагосодержания и градиентные параметры зенитной тропосферной задержки сигналов спутниковых навигационных систем в условиях опасных конвективных явлений. Использовались выборка событий опасных конвективных явлений, вблизи станций в Республике Татарстан, Самарской и Московской области за 2003-2023 гг. Обнаружено, что в условиях опасных явлений сильно возрастает неоднородность поля зенитной тропосферной задержки спутниковых сигналов, что проявляется в увеличении ее градиентных параметров и их флуктуаций, а также в росте интегрального влагосодержания атмосферы и его суточной изменчивости. Наиболее сильно меняется интенсивность флуктуаций интегрального влагосодержания, если станция расположена не далее 20 км от опасного явления, что объясняется характерными размерами конвективных ячеек.

Изменение климата приводит к росту числа опасных явлений, связанных с атмосферной конвекцией, таких как сильный ветер, шторм, крупный град, ливни и грозы. Поэтому актуальной задачей при их прогнозировании является анализ атмосферной влажности [1]. Одним из инструментов всепогодного мониторинга тропосферы служат глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), по сигналам которых восстанавливают интегральное влагосодержание атмосферы и параметры ее неоднородной структуры [2-6].

Длинные ряды данных интегрального влагосодержания атмосферы  $IWV$  и градиентных параметров зенитной тропосферной задержки радиосигналов, которые представлены в виде вектора, задаваемый величиной  $dZTD$  и направлением  $A_{dZTD}$ , рассчитанные по ГНСС-наблюдениям сети приемников высокоточного позиционирования в Республике Татарстан и IGS-GNSS [7], с временным разрешением от 5 минут сопоставлялись с наблюдениями опасных явлений, выбранных из Европейской базы данных о суровой погоде (European Severe Weather Database) [8]. Всего использовались наблюдения пятнадцати станций в Республике Татарстан, Самарской и Московской области за 2003-2023 годы.

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  $dZTD$  и среднеквадратичные отклонения угла градиентного параметра  $A_{dZTD}$  характеризуют интенсивность атмосферных мезомасштабных

неоднородностей. Сформированы выборки этих характеристик для суток проявления каждого из типов опасных явлений и общая выборка для периода с 15 апреля по 15 октября за все годы.

Критерии Стьюдента, ANOVA и Краскела-Уоллеса показали, что распределения всех исследуемых параметров при опасных явлениях и среднемноголетние значительно различаются.

Далее мы исследовали различия распределений интегрального влагосодержания и вектора градиентных параметров ZTD для различных типов опасных явлений. Все статистические критерии показали, что распределения при таких явлениях как смерч, шторм и сильный порыв ветра статистически не различаются, поэтому далее мы эти явления рассматриваем в совокупности. Так же мы объединили распределения интегрального влагосодержания и градиентных параметров ZTD при крупном граде, молниях и ливнях принадлежат к одной генеральной совокупности, возможно из-за невысокой статистики выборок, собранных для событий молнией и ливней.

И наоборот, обнаружено, что выборки интегрального влагосодержания, его внутрисуточной изменчивости, флуктуаций направления градиента ZTD при сильных ветрах (вместе со штормами и смерчами) и крупном граде (вместе с молниями и ливнями) принадлежат к разным совокупностям. Величина градиента ZTD не показала различий распределений этих выборок. Скорее всего величина градиента отражает характерные флуктуации плотности воздуха при формировании конвективных ячеек, которые имеют одинаковый характерный масштаб при глубокой конвекции, сопровождаемой разными типами опасных явлений [9].

Произведена оценка статистических характеристик интегрального влагосодержания атмосферы, градиентных параметров зенитной тропосферной задержки в зависимости от расстояния между координатами отмеченного опасного погодного явления и пунктом наблюдения (ГНСС станцией). Выбор расстояния до станции основывались на выделении влияния конвективных процессов, соответствующих  $\gamma$ -мезомасштабу (пространственный масштаб до 20 км) и  $\beta$ -мезомасштабным флуктуациям (20-200 км) [10].

В табл. 1 представлены различия характеристик измеряемых ГНСС параметров для событий опасных явлений и соответствующих им значения медианных величин интегрального влагосодержания атмосферы, его суточной изменчивости, величины градиента и флуктуаций градиента зенитной тропосферной задержки.

Все опасные явления проявляются в данных мониторинга увеличением интегрального влагосодержания атмосферы на 6-10 мм осажденной воды, величины градиента на 0,5 мм и флуктуаций угла градиента зенитной тропосферной задержки на 4-10 градусов.

Таблица 1 Разница характеристик ГНСС параметров для событий опасных явлений в сравнении с многолетними данными

	Расстояние антенны до ОЯ $D \leq 20$ км (Сильный ветер)	Расстояние антенны до ОЯ $20 \text{ km} < D \leq 200$ км (Сильный ветер)	Расстояние антенны до ОЯ $D \leq 20$ км (град, ливень, гроза)	Расстояние антенны до ОЯ $20 \text{ km} < D \leq 200$ км (град, ливень, гроза)
Рост медианного значения среднесуточного IWV, мм	6	6	10	6
Рост медианного значения максимального за сутки градиента dZTD, мм	0,5	0,4	0,2	0,2
Рост медианного значения внутрисуточных флуктуаций $\sigma_{A\_dZTD}, ^\circ$	10	8	7	4
Число событий	40	181	17	126

Вариации IWV особенно заметно, если опасные явления наблюдается не далее 20 км от станции. Значение величины градиента ZTD и его флуктуации менее чувствительны к расстоянию до опасных явлений, но также показывают усиление неоднородностей атмосферы при опасных явлениях. Эти две характеристики свидетельствуют о возрастании атмосферных флуктуаций, по всей вероятности, связанных с формированием 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

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при опасных явлениях в условиях глубокой конвекции сильно возрастает не только влагосодержание атмосферы. С помощью зондирования тропосферы ГНСС сигналами фиксируется рост интенсивности мезомасштабных неоднородностей, что проявляется в увеличении величины вектора градиентного параметра флуктуаций угла зенитной тропосферной задержки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Наиболее сильно меняется величина градиента зенитной тропосферной задержки ГНСС сигналов, особенно, если станция расположена не далее 20 км от опасного явления, что объясняется размерами конвективных ячеек. Но даже при расположении станции на расстояниях до 200 км от опасных явлений наблюдается эффект роста атмосферных флуктуаций по сравнению со среднемноголетними данными. Таким образом, опасные конвективные процессы в летний период объективно отражаются в измеряемых характеристиках неоднородной структуры атмосферы при ГНСС мониторинге.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-27-00222 (<https://rscf.ru/project/23-27-00222>). (проект 23-27-00222).

1. *Алексеева А. А.* Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 1. С. 5-15.
2. *Bevis M., S. Businger, T. A.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. №. D14. P. 15787-15801.
3. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* Global Positioning System. Theory and Practice. Springer-Verlag: Wien - New York, 1994. 356 p.
4. *Xu G.* GPS. Theory, algorithms and applications. Berlin: Springer. 2007. 340 p.
5. *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. V. 70. N 1. P. 1-18.
6. *Хуторова О.Г., Маслова М.В., Хуторов В.Е.* Проявление конвективных процессов в рядах интегрального влагосодержания атмосферы по многолетним данным мониторинга тропосферы сигналами спутниковых навигационных систем в г. Казани // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 271-281
7. IGS-GNSS [Электронный ресурс]. URL: <https://igs.org/> (дата обращения: 05.03.2024)
8. *Dotzek N., Groenemeijer P., Feuerstein B., Holzer A.M.* Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. // *Atmos. Res.*, 2009. V. 93, P. 575–586
9. *Вельтищев Н. Ф., Степаненко В. М.* Мезометеорологические процессы : учебное пособие М.: МГУ, 2007. 126 с.

10. *Orlanski I.* A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1975. V.56. №. 5. P. 527–530.