

Влияние сильной конвекции в летний период на характеристики атмосферы, полученные по данным ГНСС-мониторинга

О.Г. Хуторова✉, М.В. Маслова, В.Е. Хуторов*

Казанский (Приволжский) федеральный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а

Поступила в редакцию 20.07.2023;
после доработки 25.09.2023;
принята к печати 26.09.2023

В работе решается задача выявления зависимости статистических характеристик измеряемых с помощью ГНСС-приемников параметров атмосферы от показателей конвективных процессов по данным мониторинга в Казани и ее окрестностях за 2013–2021 гг. Для оценки конвективных процессов использовались такие показатели атмосферной неустойчивости, как восходящая вертикальная скорость, параметр генерации вихря, индекс WMAXSHEAR, рассчитанные по данным реанализа ERA5. Показано, что величина градиента зенитной тропосферной задержки ГНСС-сигналов и его флуктуации значимо изменяются в условиях сильной конвекции. Результаты исследования могут быть использованы для разработки методики подспутникового мониторинга конвективных процессов в задачах оперативного прогноза опасных явлений.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, мониторинг тропосферы, атмосферная конвекция, зенитная тропосферная задержка, градиентные параметры; global navigation satellite system, tropospheric monitoring, atmospheric convection, tropospheric zenith delay, gradient parameter.

Введение

В последние годы растет число опасных погодных явлений, таких как штормовые ветры, ливневые осадки, сильные грозы, связанных с мезомасштабными конвективными процессами [1]. Спутниковые данные, которые используются для оценки интегрального влагосодержания атмосферы как показателя интенсивности конвекции, не всегда удовлетворяют требованию оперативности мониторинга. Например, в [2] показано, что низкая частота съемки ограничивает применимость данных MODIS для диагностики условий возникновения сильных шквалов и смерчей. Кроме того, поля водяного пара имеют сильную пространственную изменчивость [3]. В связи с этим зондирование тропосферы с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) может оказаться перспективным методом подспутникового мониторинга мезомасштабных процессов.

Цель работы – выявить глубокую конвекцию в результатах ГНСС-мониторинга тропосферы.

Материалы и методы

С помощью ГНСС зондируют как ионосферу, так и тропосферу. Основная измеряемая характеристика нейтральной неонизированной атмосферы – это зенитная тропосферная задержка спутниковых радиосигналов (ZTD – zenith tropospheric delay), которая рассчитывается по измеряемой наклонной тропосферной задержке (STD – slant tropospheric delay). ZTD зависит от метеорологических параметров и может быть определена через интеграл от индекса рефракции:

$$ZTD = \int_{\text{приемник}}^{\text{спутник}} N \cdot 10^{-6} ds, \quad (1)$$

где ds – элемент пути, по которому проводится интегрирование, $N = n^2 - 1$, n – коэффициент преломления радиоволн вдоль вертикальной трассы распространения сигнала.

Фактически задержка представляет собой дополнительный фазовый путь радиосигнала относительно пути в вакууме и поэтому измеряется в единицах длины, обычно в миллиметрах. ZTD состоит из гидростатической (ZHD – zenith hydrostatic delay) и влажной (ZWD – zenith wet delay) компонент. Индекс преломления воздуха может быть разделен на две составляющие: гидростатическую,

* Ольга Германовна Хуторова (Olga.Khutorova@kpfu.ru); Мария Владимировна Маслова (maryamaslova1861@mail.ru); Владислав Евгеньевич Хуторов (pri870@yandex.ru).

зависящую от плотности воздуха, и влажную, зависящую от парциального давления водяного пара. ZHD вносит основной вклад в общую тропосферную задержку (~ 2300 мм), она является стабильной и может быть точно смоделирована на основе известных значений метеопараметров на поверхности Земли [4].

ZWD определяется парциальным давлением водяного пара в вертикальном столбе атмосферы. При интегрировании по высоте получаем связь с интегральным влагосодержанием атмосферы (IWV – integral water vapor), которое обычно измеряется в $\text{кг}/\text{м}^2$ или миллиметрах осажженной воды [5].

В уравнение оценки зенитной тропосферной задержки по спутниковым измерениям вводят горизонтальные градиентные параметры, которые характеризуют неоднородную структуру тропосферы. Для дальнейших вычислений применяют разложение в ряд Тейлора и учитывают члены первого порядка. Таким образом получают уравнение, которое будет описывать наклонные тропосферные задержки STD с учетом горизонтальной неоднородности тропосферы [6]:

$$\begin{aligned} \text{STD}^i(t, A^i, z^i) = & \text{ZTD}^i(t)m(z^i) + \\ & + {}^n\text{ZTD}(t)\frac{\partial m}{\partial z}\cos(A^i) + {}^e\text{ZTD}(t)\frac{\partial m}{\partial z}\sin(A^i), \quad (2) \end{aligned}$$

где ${}^n\text{ZTD}$ – меридиональный градиентный параметр на станции наблюдений; ${}^e\text{ZTD}$ – зональный градиентный параметр; A^i – азимут направления на спутник; i – номер спутника; m – отображающая функция; z – зенитный угол трассы сигнала от спутника до приемника; t – текущее время.

Современные исследования свидетельствуют о связи неоднородной структуры тропосферы и горизонтальных градиентных параметров. В работах [7, 8] показано, что как зональный, так и меридиональный тропосферные градиентные параметры зенитной задержки хорошо согласуются с результатами мезомасштабного численного моделирования и радиометрическими наблюдениями.

Высокое временное и пространственное разрешение ГНСС-наблюдений позволяет исследовать и проявление конвективных процессов. Как правило, вариации IWV возрастают перед ливнями [9]. Типичные конфигурации мезомасштабных конвективных ячеек отражаются в полях горизонтальных градиентов содержания водяного пара [10]. Плотная сеть станций ГНСС позволила отследить траекторию деречо в Польше, поля градиентных параметров и водяного пара показали мезомасштабные структуры, наблюдавшиеся с помощью микроволнового радиометра и метеорадара [11]. В Техасе использовали сеть станций GPS для мониторинга и отслеживания урагана Харви. ZWD и тропосферные градиенты коррелируют с градиентами водяного пара до и после урагана, а с ветром и градиентами давления – только после [12].

С помощью ГНСС-зондирования определяют самые разные мезомасштабные процессы: внутрисуточный ход влагосодержания атмосферы [13], неоднородности в период прохождения фронтов [14, 15]. В работе [16] обнаружена когерентность мезомасштабных вариаций интенсивности осадков и доступной потенциальной энергии неустойчивости с вариациями зенитной тропосферной задержки сигналов ГНСС. В [17] построена регрессионная модель связи IWV, интенсивности экстремальных осадков и конвективной доступной потенциальной энергии неустойчивости.

В настоящей работе выявляются отличия атмосферных характеристик в период глубокой конвекции над пунктом расположения антенны приемника спутниковых сигналов с помощью оценки флуктуаций горизонтальных градиентных параметров зенитной тропосферной задержки в зависимости от значений конвективных индексов, характеризующих конвекцию и использующихся для прогноза опасных метеорологических явлений.

Зональный и меридиональный горизонтальные градиентные параметры зенитной тропосферной задержки (компоненты вектора градиента ZTD) были преобразованы в величину градиента $d\text{ZTD}$ и направление градиента $A_{d\text{ZTD}}$:

$$\begin{aligned} d\text{ZTD} &= \sqrt{{}^n\text{ZTD}^2 + {}^e\text{ZTD}^2}; \\ A_{d\text{ZTD}} &= \arctan\left(\frac{{}^n\text{ZTD}}{{}^e\text{ZTD}}\right). \quad (3) \end{aligned}$$

По данным сети станций г. Казани и Республики Татарстан за период 2013–2021 гг. были рассчитаны длинные ряды $d\text{ZTD}$ и $A_{d\text{ZTD}}$ с временным разрешением 5 мин. Оценивались внутрисуточные среднеквадратичные отклонения $d\text{ZTD}$ и $A_{d\text{ZTD}}$ как характеристики интенсивности мезомасштабных вариаций тропосферы.

По данным реанализа ERA5, полученным на основе модели Европейского центра прогноза погоды ECMWF [18], были проведены расчеты физических и статистических параметров неустойчивости. Конвективные индексы обычно используются как для оценки вероятности опасных явлений, так и для проверки успешности их прогноза [19–27].

Из множества параметров для оценки вероятности опасных явлений, связанных с развитием конвекции, выбраны комплексные индексы, по которым часто оценивается риск смерчей, ливней и гроз [19, 22, 25].

Восходящая вертикальная скорость (UVV – upward vertical velocity) определяется как [24]:

$$\text{UVV} = \sqrt{2 \cdot \text{CAPE}},$$

где CAPE (convective available potential energy) – доступная потенциальная энергия неустойчивости – представляет собой работу, которую может совершить частица воздуха при адиабатическом подъеме [18]:

$$\text{CAPE} = g \int_{z_{\text{base}}}^{z_{\text{top}}} \frac{T_p - T_v}{T_v} dz.$$

Здесь T_v и T_p – виртуальная температура среды и поднимающейся частицы; g – ускорение свободного падения; z_{base} – высота наиболее неустойчивого слоя ниже уровня 350 гПа; z_{top} – высота уровня модели, где вертикальная скорость уменьшается до нуля. Расчет CAPE делается в предположении, что частицы воздуха не смешиваются с окружающим воздухом; подъем псевдоадиабатический [28].

При $UVV = 40$ м/с поток считается сильным, а 60 м/с – очень сильным. С ростом UVV увеличивается вероятность крупного града [21].

Параметр генерации вихря VGP – это косвенный показатель наклона горизонтального вихря. Он определяется как [23]:

$$VGP = \sqrt{2 \cdot \text{CAPE}} \cdot \text{MLS},$$

где MLS (mid-level shear) – сдвиг ветра в слое 3 км. Сильный сдвиг в этом слое способствует высокой спиральности: чем он больше, тем продолжительнее конвекция.

Комплексный индекс WMAXSHEAR также является отражением глубокой конвекции, учитывает и вертикальный поток, и сдвиг ветра в слое 6 км (DLS – deep layer shear) [25]:

$$\text{WMAXSHEAR} = \sqrt{2 \cdot \text{CAPE}} \cdot \text{DLS}.$$

Индексы UVV , VGP , WMAXSHEAR рассчитывались для координат антенн приемников ГНС в Республике Татарстан по данным ERA5. В связи с тем что пространственное разрешение ERA5 0,25°, для получения этих параметров в точке координат приемника ГНС применялась двумерная линейная интерполяция.

Результаты и обсуждение

За 2013–2021 гг. были рассчитаны длинные ряды всех исследуемых конвективных индексов с временным шагом 1 ч. По каждому из параметров согласно их критическим значениям были сформированы выборки $dZTD$ и A_{dZTD} , которые характеризовали условия слабой и сильной конвекции. Мы сравнивали распределения выборок характеристик градиента тропосферной задержки попарно

для каждого индекса. Выборки составлялись только для условных периодов наблюдений с 15 апреля по 15 сентября.

Критерий Пирсона показал, что распределения характеристик горизонтального градиента ZTD не являются нормальными. В связи с этим для попарной проверки различий распределений, соответствующих сильной и слабой конвекции, использовались не только критерии Стьюдента и ANOVA, но и критерий Краскела–Уоллиса (проверка распределений на равенство медианных значений выборок). Обнаружено, что в условиях сильной и слабой конвекции по всем статистическим критериям распределения характеристик горизонтального градиента ZTD достоверно различаются.

В таблице представлены граничные значения конвективных индексов, используемые в исследовании для отбора выборок ГНС-мониторинга, и соответствующие им медианы интегрального влагосодержания атмосферы, величины градиента и флуктуаций градиента в условиях сильной и слабой конвекции.

Ранее [29] нами было показано, что в летний период в условиях глубокой конвекции интегральное влагосодержание, полученное с помощью ГНС-мониторинга в Поволжском регионе, значительно меняет распределение, его медиана увеличивается в среднем на 12 мм.

За исследуемый период коэффициент корреляции индексов UVV , VGP , WMAXSHEAR составляет 0,86–0,95. Ожидается, что атмосферные поля интегрального влагосодержания и тропосферной задержки ГНС-сигналов, разграниченные с помощью различных конвективных индексов, имеют сходные характеристики.

Видно, что в условиях сильной конвекции интегральное влагосодержание увеличивается более чем на 10 мм осажденной воды. Конвективные процессы формируют мезомасштабные неоднородности, что способствует росту $dZTD$ на 20%, а его среднеквадратического отклонения на 25%. Флуктуации направления градиента тропосферной задержки радиосигналов ГНС также увеличиваются.

Пример эмпирических распределений выборок амплитуды градиентного параметра, полученных на основе разграничения по конвективным индексам, представлен на рис. 1.

Примеры эмпирических распределений выборок среднеквадратического отклонения величины

Медианы IWV , $dZTD$ и его флуктуаций для выборок, соответствующих граничным значениям конвективных индексов (сильной и слабой конвекции согласно конвективному индексу)

Параметр	UVV		VGP		WMAXSHEAR	
	≥ 40 м/с	< 40 м/с	≥ 400 м ² /с ²	< 400 м ² /с ²	≥ 400 м ² /с ²	< 400 м ² /с ²
IWV , мм	35	23	35	23	33	23
$dZTD$, мм	0,87	0,73	0,89	0,73	0,87	0,72
Внутрисуточные флуктуации $dZTD$, мм	0,45	0,37	0,46	0,36	0,47	0,36
Внутрисуточные флуктуации A_{dZTD}	27	21	26	21	26	21

и направления градиентного параметра ZTD, полученных на основе разграничения по конвективным индексам, приведены на рис. 2 и 3.

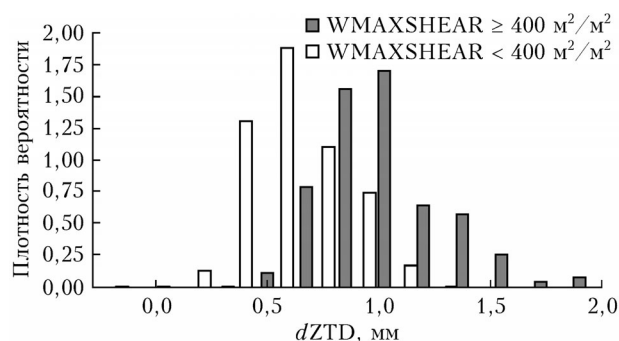


Рис. 1. Распределение выборок $dZTD$ для условий слабой и сильной конвекции в соответствии с индексом WMAXSHEAR

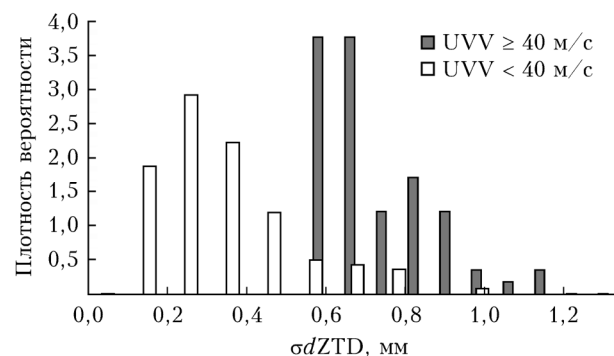


Рис. 2. Распределение выборок среднеквадратического отклонения $dZTD$ для условий слабой и сильной конвекции в соответствии с индексом UVV

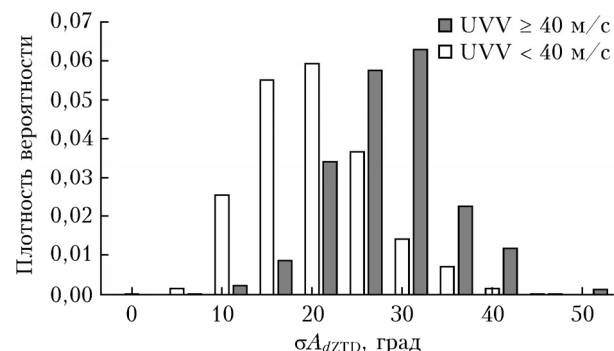


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для A_{dZTD}

Рис. 1–3, как и статистические критерии, показывают, что параметры атмосферы, получаемые с помощью ГНСС-зондирования, значимо изменяются в условиях глубокой конвекции. Корреляция максимальных суточных значений конвективных индексов в летний период и среднесуточных значений интегрального влагосодержания максимальна для индекса VGP и равна 0,6. Этот же индекс показал максимальный уровень корреляции (0,4) с флуктуациями A_{dZTD} . Такие коэффициенты корреляции характерны для существенной, но нелинейной связи величин.

Интересно, что отбор летних дней по величине интегрального влагосодержания показал, что добавление в качестве критериев выборки флуктуаций градиентных параметров увеличивает значение конвективных индексов в эти дни. Например, если установить порог интегрального влагосодержания равным 25 мм осадочной воды, то в пункте Казань медиана UVV будет 27 м/с. Если убрать из выборки дни с флуктуациями угла градиента ZTD менее 20° , то медиана UVV увеличивается до 30 м/с, тогда как в летний период она равна 10 м/с за исследуемые годы. Впрочем, задача установления критериев оценки интенсивности конвективных процессов по данным ГНСС требует дополнительного исследования. Работа [10], где сделана попытка разработки такого критерия, не получила дальнейшего развития по неизвестным причинам. Дополнительный учет градиентных параметров, получаемых в реальном времени, применялся для исследования возможности прогнозирования гроз в Болгарии [30].

Заключение

Наши исследования подтверждают, что использование глобальных навигационных спутниковых систем для дистанционного зондирования тропосферы является эффективным инструментом для подспутникового мониторинга конвективных процессов. Быстрое развитие атмосферных неоднородностей, которые могут сигнализировать о развитии опасных погодных явлений, таких как сильные осадки, грозы и смерчи, отражается на интегральном влагосодержании атмосферы и градиентных параметрах задержки ГНСС-радиосигналов в тропосфере. Это означает, что можно получать актуальные данные о состоянии атмосферы с высоким временным разрешением и реагировать на возможные опасности.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 23-27-00222) (<https://rscf.ru/project/23-27-00222>) (проект № 23-27-00222). Данные ГНСС-мониторинга собраны при поддержке программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ–2030»).

Список литературы

1. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорол. и гидрол. 2022. № 5. С. 27–41.
2. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 429–435; Shikhov A.N., Chernokul-

- sky A.V., Sprygin A.A., Yarinich Yu.I. Estimation of convective atmospheric instability during squalls, tornadoes, and large hail events from satellite observations and ERA5 reanalysis data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 793–801.
3. Семенов А.О., Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Сравнение наземных ИК-спектроскопических измерений общего содержания водяного пара с данными радиозондовых измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 11. С. 976–980; Semenov A.O., Virolainen Ya.A., Timofeyev Yu.M., Poberovskii A.V. Comparison of ground-based FTIR and radio sounding measurements of water vapor total content // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 121–125.
 4. Santerre R. GPS Satellite Sky Distribution: Impact on the Propagation of Some Important Errors in Precise Relative Positioning. Brunswick: UNB, 1989. 240 p.
 5. 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, N D14. P. 15787–15801.
 6. Bar-Sever Y.E., Kroger P.M., Borjesson J.A. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver // *JGR.* 1998. V. 103, N B3. P. 5019–5035. DOI: 10.1029/97JB03534.
 7. Elgered G, Ning T., Forkman P., Haas R. On the information content in linear horizontal delay gradients estimated from space geodesy observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. P. 3805–3823.
 8. 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 // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 4173–4181.
 9. 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 Space.* 2018. V. 70, N 1. P. 1–18.
 10. Brenot H., Nemighaire J., Delobbe L., Clerbaux N., De Meutter P., Deckmyn A., Delcloo A., Frappez L., Van Roozendaal M. Preliminary signs of the initiation of deep convection by GNSS // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 5425–5449.
 11. Nykiel G., Figurski M., Baldysz Z. Analysis of GNSS sensed precipitable water vapour and tropospheric gradients during the derecho event in Poland of 11th August 2017 // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 193. P. 105082.
 12. Graffigna V., Hernández Pajares M., Azpilicueta F., Gende M. Comprehensive study on the tropospheric wet delay and horizontal gradients during a severe weather event // *Remote Sens.* 2022. V. 14, N 4. P. 888.
 13. Kalinnikov V.V., Khutorova O.G. Diurnal variations in integrated water vapor derived from a GPS ground network in the Volga–Ural region of Russia // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. P. 453–464. DOI: 10.5194/angeo-35-453-2017.
 14. Хуторова О.Г., Хуторов В.Е., Деметьев 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.
 15. Camisaya M.F., Rivera J.A., Mateo M.L., Morihetti P.V., Mackern M.V. Estimation of integrated water vapor derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015–2018). Validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 197. P. 1–12.
 16. Хуторова О.Г., Маслова М.В., Хуторов В.Е. О мониторинге конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 6. С. 505–509.
 17. Ziarani M.R., Bookhagen B., Schmidt T., Wickert J., De la Torre A., Deng Z., Calori A.A. Model for the Relationship between rainfall, GNSS-derived integrated water vapour, and CAPE in the Eastern Central Andes // *Remote Sens.* 2021. V. 13, N 18. P. 1–19.
 18. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Mucoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hylm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049.
 19. Blanchard D.O. Assessing the vertical distribution of convective available potential energy // *Weather Forecast.* 1998. V. 13, N 3. P. 870–877.
 20. Brooks H.B., Doswell C.A., Wilhelmson R.B. The role of midtropospheric winds in the evolution and maintenance of low-level mesocyclones // *Mon. Weather Rev.* 1994. V. 122. P. 126–136.
 21. Burgess D.W., Lemon L.R. Severe thunderstorm detection by radar // *Radar Meteorol. Am. Meteorol. Soc.* 1990. P. 619–647.
 22. Miller R.C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center. Tech. Report N 200. Illinois: Scott AFB, 1972. 190 p.
 23. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // *Weather Forecast.* 1998. V. 13, N 13. P. 1148–1164.
 24. Gracier J. Convection parameters. 2012 [Electronic resource]. URL: <http://www.juergen-griser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (last access: 20.06.2023).
 25. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // *Mon. Weather Rev.* 2017. V. 145, N 4. P. 1511–1528.
 26. Jelić D., Prtenjak M.T., Malečić B., Vozila A.B., Megyeri O.A., Renko T. A new approach for the analysis of deep convective events: Thunderstorm intensity index // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 7. P. 908–934.
 27. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Тестирование комплексного метода прогноза молниевой активности // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 12. С. 949–957.
 28. ECMWF. IFS Documentation CY47R3 – Part IV: Physical Processes. URL: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/81271-ifs-documentation-cy47r3-part-iv-physical-processes> (last access: 20.06.2023).
 29. 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.

30. *Guerova G., Douša J., Dimitrova T., Stoycheva A., Václavovic P., Penov N.* GNSS storm nowcasting demonstrator for Bulgaria // *Remote Sens.* 2022. V. 14, N 15. P. 3746. DOI: 10.3390/rs14153746.

O.G. Khutorova, M.V. Maslova, V.E. Khutorov. **Effects of strong convection in summer on atmospheric characteristics derived from GNSS monitoring data.**

The paper solves the problem of deriving the relationship between the variability of statistical characteristics of atmospheric parameters measured by GNSS receivers and the characteristics of convective processes according to the monitoring data near the Kazan city for 2013–2021. The results of GNSS monitoring are compared with the convective indices for the observation period. To assess convective processes, we used physical and statistical parameters of instability calculated from ERA5 reanalysis: Upward Vertical Velocity, Vortex Generation Parameter, and WMAXSHEAR. Statistical characteristics of the zenith tropospheric delay's horizontal gradient significantly change under conditions of deep convection. The results of the work can be used to develop a methodology for sub-satellite monitoring of convective processes in the tasks of operational forecasting of severe weather phenomena.