

УДК 528.88: 551.515

О мониторинге конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем

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

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

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.;
после доработки 14.02.2022 г.;
принята к печати 11.04.2022 г.

Решается задача выявления связи измеряемых с помощью ГНСС-приемников параметров атмосферы с характеристиками конвективных процессов по данным мониторинга в г. Казани за 2010–2020 гг. Когерентность и синхронность вариаций интенсивности осадков и потенциальной доступной энергии неустойчивости с вариациями зенитной тропосферной задержки наиболее часто обнаруживаются на временных масштабах меньше 4 ч, при этом уровень вейвлет-корреляции в большинстве случаев больше 0,8.

Ключевые слова: ГНСС, атмосферная конвекция, осадки, зенитная тропосферная задержка; GNSS, atmospheric convection, precipitation, zenith tropospheric delay.

Введение

Путем комплексных наблюдений динамики пограничного слоя атмосферы в период фронтальной конвекции можно увидеть сильную изменчивость структуры аэрозольного и ветрового полей, возникновение внутренних волн плавучести, низкоуровневых струйных течений [1]. Мезомасштабные конвективные явления часто связаны с сильными ливнями, грозами и шквалами, приводящими к серьезным последствиям [2, 3]. Для прогноза обычно используются мезомасштабные численные модели атмосферы [3–5]. Мониторинг и точный прогноз мезомасштабных конвективных явлений представляют собой чрезвычайно сложную задачу, для решения которой необходимо учитывать максимально полную информацию о наблюдаемом состоянии атмосферы и его ожидаемых изменениях [6]. Предлагаются гибридные методы прогноза порывов ветра, учитывающие как результаты численного прогноза погоды, так и экспериментальные данные [7]. На основе анализа условий возникновения гроз, града и торнадо [8], шквалов и смерчей [9] предлагается учитывать комбинации различных предикторов. Используется ассимиляция данных радарных наблюдений в модели численного прогноза погоды [10].

Цель настоящей работы – выявление связей между измеряемыми с помощью ГНСС-приемников параметрами атмосферы и характеристиками конвективных процессов.

Методика исследования

Для мониторинга атмосферных процессов широко используется всепогодная технология с высоким временным и пространственным разрешением – зондирование тропосферы с применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [11–16]. В основе дистанционного зондирования лежит измерение наклонной тропосферной задержки STD (slant tropospheric delay) электромагнитных волн. Ее величина определяется разностью измеренного наземным приемником фазового пути сигнала, переданного спутником, и суммой ионосферной задержки и геометрической дальности между спутником и приемником. В свою очередь, задержка радиоволн в электрически нейтральной тропосфере параметризуется через зенитную тропосферную задержку ZTD (zenith tropospheric delay) с использованием картирующей функции $m(z)$, учитывающей нелинейную рефракцию атмосферы в зависимости от зенитного угла радиотрасы z [12]:

$$\text{STD} = \text{ZTD} \cdot m(z).$$

ZTD численно равен интегралу по высотному профилю коэффициента преломления радиоволн n , зависящего от атмосферных параметров [10]:

$$n = 1 + \left(77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \right) \cdot 10^{-6},$$

где первое слагаемое в скобках определяется влиянием неполярных газов, а второе – водяным паром; p и T – давление (мбар) и температура воздуха (К); e – парциальное давление паров воды (мбар). Это выражение позволяет разделить ZTD на две компоненты: гидростатическую ZHD (zenith hydrostatic delay), которая определяется плотностью атмосферы

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

(первое слагаемое в скобках), и влажную ZWD (zenith wet delay) (второе слагаемое в скобках). Далее ZHD обычно исключают, а ZWD трансформируют в интегральное содержание водяного пара IWV (integrated water vapor), учитывая приземные давление и температуру [11].

Для выявления закономерностей связи измеряемых с помощью ГНСС-приемников параметров атмосферы с характеристиками конвективных процессов в настоящей работе используются ежесекундные фазовые измерения спутниковых сигналов сети приемников ГНСС Казанского государственного университета. Измерения производились с помощью трехсистемного двухчастотного приемника Novatel OEM-V3 с антенной Novatel GPS-702, имеющего 72 канала слежения. Это оборудование с технологией подавления многолучевости и точностью измерений фазы несущей волны 0,5 мм. Рабочие частоты 1575,42 и 1227,60 МГц позволяют исключить влияние ионосферы [12]. В Казанском государственном университете было разработано собственное приложение TropoGNSS (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2014614454), которое позволяет оценивать тропосферные параметры ZTD и IWV. Верификация оценок IWV, получаемых с помощью TropoGNSS, по независимым данным солнечных фотометров показала, что стандартное отклонение во все сезоны составляет 5–6% от величины интегрального содержания водяного пара [11]. Точность оценки ZTD подробно обсуждается в [12] и оценивается в 1,5 мм при ее среднем значении 2400 мм.

В настоящей работе мы будем оперировать в основном ZTD радиосигналов ГНСС, чтобы учитывать как вариации влажности, так и вариации плотности воздуха. В работе были построены ряды ZTD и интегрального влагосодержания атмосферы, рассчитанные по наблюдениям ГНСС-приемника в Казани за 2010–2020 гг.

Для оценки интенсивности конвективных процессов использовались физико-статистические параметры неустойчивости, рассчитанные в модели ECMWF, доступные в данных реанализа ERA5 [17]. На основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и температуры воздуха на определенных высотах или изобарических поверхностях рассчитываются характеристики, которые применяются для оценки вероятности конвективных явлений. В ERA5 есть такие индексы, как энергия противодействия конвекции (Convective Inhibition, CIN). Значения $CIN > 200$ Дж/кг достаточно для прекращения конвекции в атмосфере [19].

Convective Available Potential Energy (CAPE), или доступная потенциальная энергия неустойчивости, представляет собой работу, которую может совершить частица воздуха при адиабатическом подъеме. Индекс описывает стабильность атмосферы, при его повышении возрастает вероятность экстремальных осадков [20]. При $CAPE \geq 2500$ Дж/кг стоит ожидать развития конвективных опасных метеорологических явлений [19]. В [21] показано, что при $CAPE = \sim 800$ Дж/кг сильно возрастает индекс грозовой активности. В [8] отмечается, что

вероятность торнадо повышается при $CAPE = 100–200$ Дж/кг. Для возникновения шквалов и смерчей необходимо сочетание высокого влагосодержания воздушной массы, $CAPE > 1000$ Дж/кг и сильного ветрового сдвига [9].

Результат внутримассовых и фронтальных конвективных процессов – значительное количество выпавших осадков, которые также могут быть показателем интенсивности конвекции. В настоящей работе использованы данные реанализа ERA5 об общем количестве осадков TP (Total precipitation), CAPE, CIN [17]. Так как исходное пространственное разрешение ERA5 0,25°, применялась двумерная нелинейная интерполяция для получения этих параметров в точке координат приемника ГНСС.

Для выявления связи вариаций параметров конвективной активности TP, CAPE, CIN и измеряемых ZTD оценивалась локальная вейвлет-корреляция рядов в масштабах от 1 до 12 ч. В качестве материнской функции взята функция Морле [18]:

$$\Psi(t) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(i\Omega t - \frac{t^2}{2}\right)$$

(t – временной масштаб).

Комплексный вейвлет нужен для того, чтобы находить фазовый сдвиг когерентных вариаций в рядах исследуемых параметров. Для выделения квазипериодических процессов и исследования их когерентности обычно выбирают параметр вейвлета $\Omega = 6$ [16]. В настоящей работе $\Omega = 1$. Вещественная и мнимая части материнской функции представлены на рис. 1. Функция масштабируется при преобразовании, поэтому масштаб по осям не приведен.

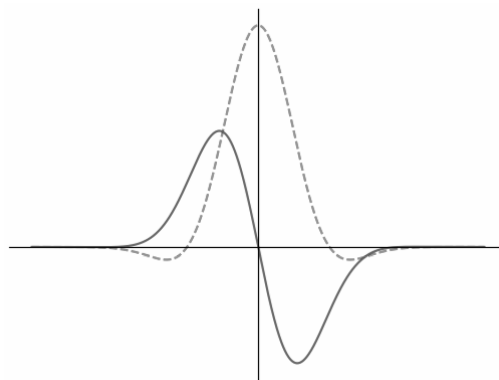


Рис. 1. Материнская функция Морле для вейвлет-анализа данных: вещественная (сплошная линия) и мнимая (пунктирная) части

Такая материнская функция была выбрана для того, чтобы выделять в рядах осадков и других показателях конвективных процессов отдельные импульсы и рассматривать их корреляцию с вариациями зенитной тропосферной задержки. На рис. 2 приведены примеры синхронных рядов ZTD, CAPE, TP, CIN для периода 16–21 июня 2020 г. Видно, что форма материнской функции в виде импульса хорошо отражает вариации исследуемых параметров. Заметно, что в периоды увеличения CIN

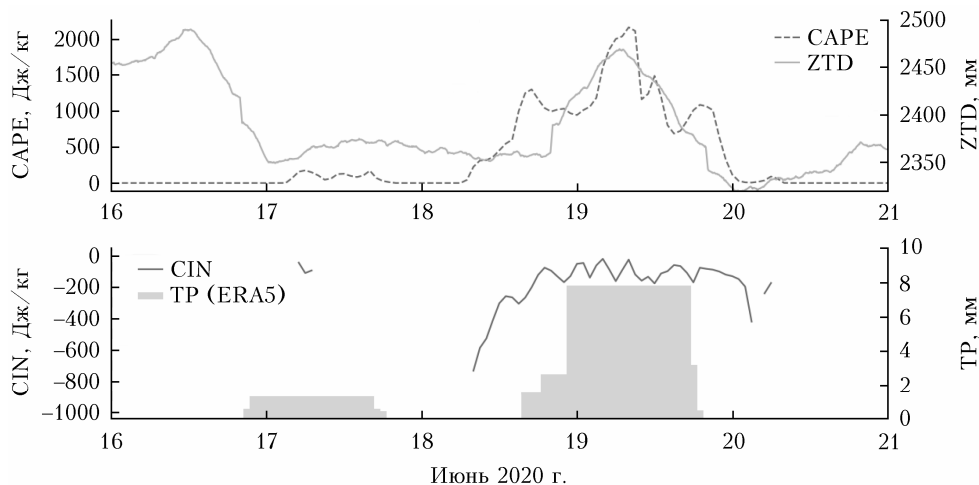


Рис. 2. Примеры синхронных рядов ZTD, CAPE, количества осадков TP по данным ERA5, CIN для периода 16–21 июня 2020 г. (Казань)

наблюдаются осадки, синхронно увеличивается интегральное влагосодержание атмосферы и за счет этого несколько растет ZTD относительно исходного уровня. В данном случае увеличение CAPE совпадает с усилением осадков, что также было заметно по данным метеорадара, взятых за тот же период.

В рядах индексов конвективной активности мы рассматриваем вариации рядов CAPE > 800 Дж/кг, диапазон изменчивости CIN от 0 до 100 Дж/кг, чтобы выявлять периоды с достаточно мощной энергией конвективных процессов. Критическое значение общего количества осадков мы выбрали равным 1 мм, так как сопоставление этого параметра с данными метеостанции показало, что события ливневых осадков отображаются в узлах сетки ERA5 начиная с этого порога.

Был проведен вейвлет-анализ временных рядов осадков, энергии противодействия конвекции, доступной потенциальной энергии неустойчивости за 2010–2020 гг. В каждом из рядов с помощью вейвлет-анализа выделялись значимые с вероятностью более 90% события превышения пороговых значений, оценивался масштаб события, время его максимума. Рассчитывалась вейвлет-корреляция выделенного импульса с вариациями ZTD соответствующего временного масштаба и сдвиг фаз между ними.

Результаты и обсуждение

На рис. 3, а приведены гистограммы распределений уровня вейвлет-корреляции TP, CIN, CAPE с вариациями ZTD. Видно, что в большинстве случаев уровень корреляции $> 0,8$.

Гистограммы распределений масштабов выявленных когерентных вариаций представлены на рис. 3, б. Индекс CIN показал высокую когерентность с ZTD в основном на масштабах, близких к 12 ч, что соответствует гармонике суточного цикла и, видимо, эти вариации связаны с суточными колебаниями устойчивости атмосферы. Из дальнейшего анализа эти вариации были исключены, в результате число случаев когерентности событий увеличения CIN

и изменчивости ZTD значительно меньше, чем когерентности ZTD и других параметров. Тем не менее из распределения периодов и сдвига фаз CIN и ZTD видно, что выявленные периоды и фазовые сдвиги, скорее всего, связаны с более высокими гармониками суточного цикла, поэтому использовать флуктуации ZTD как предиктор повышения CIN с целью прогноза опасных конвективных явлений неэффективно. Когерентность вариаций TP и CAPE с вариациями ZTD наиболее часто обнаруживается на временных масштабах, меньших 4 ч, как и следовало ожидать.

Гистограммы распределений фазового сдвига, представленные на рис. 3, в, показывают, что вариации ZTD опережают вариации TP менее, чем на час, в среднем на 40 мин. Однако этот результат получен в предположении, что максимум осадков приходится на середину интервала, которому соответствуют данные ERA5, кроме того, данные осадков относятся к большому пространственному интервалу. То есть с учетом пространственного и временного разрешения ERA5 можно считать, что значимые короткопериодные мезомасштабные вариации TP и ZTD происходят практически одновременно.

Анализ распределения фазового сдвига вариаций ZTD и CAPE показывает, что вариации ZTD опережают вариации CAPE в среднем на 1,5 ч. С учетом пространственного и временного разрешения ERA5 можно считать, что флуктуации ZTD происходят почти одновременно с ростом CAPE или несколько опережают его. Аналогичные результаты были получены и для вариаций интегрального влагосодержания атмосферы.

Наши результаты согласуются с работами других авторов. В [22] представлено использование тропосферных данных, полученных с помощью ГНСС, для мониторинга внезапных и интенсивных погодных явлений. В ходе исследования было установлено, что максимальные значения атмосферных осадков совпадают с максимальными значениями осаждаемого водяного пара. В [23] установлено, что сильные дожди влияют на значения осаждаемого

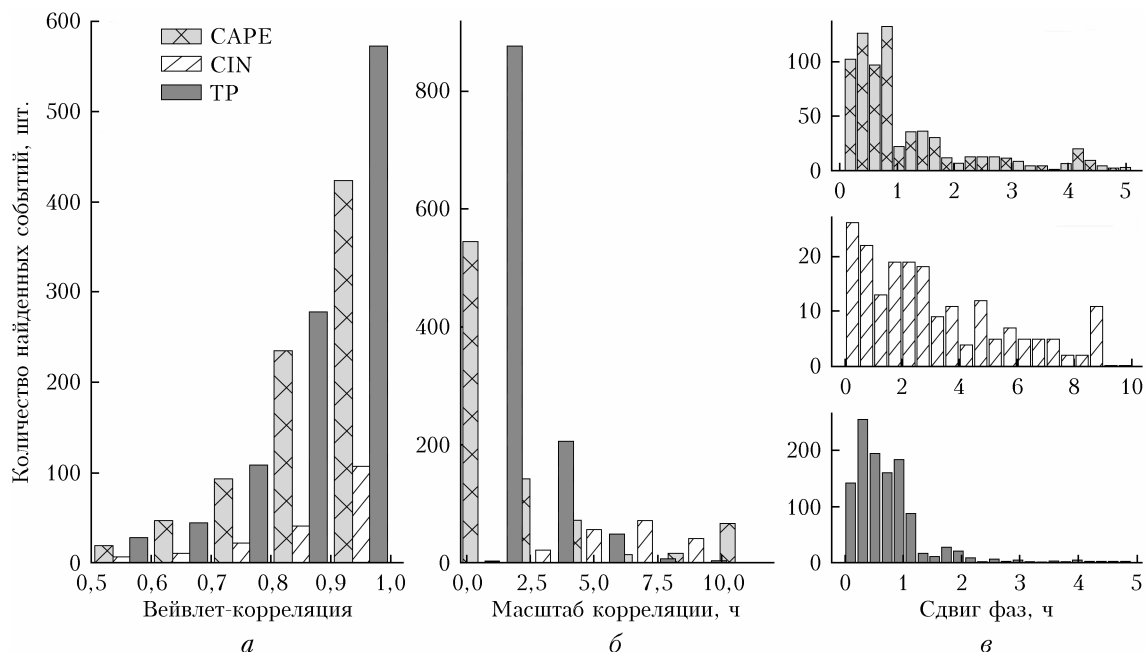


Рис. 3. Гистограммы распределений: *а* – уровень вейвлет-корреляции интенсивности осадков TP, энергии противодействия конвекции CIN, потенциальной доступной энергии неустойчивости CAPE с вариациями ZTD; *б* – временные масштабы когерентных процессов в рядах CIN, CAPE, TP с вариациями ZTD; *в* – фазовые сдвиги мезомасштабных вариаций ZTD относительно когерентных вариаций CAPE, CIN и TP

водяного пара. С помощью ГНСС выявлено увеличение, а затем уменьшение влагосодержания до и после выпадения осадков, связанных с прохождением фронтальных систем [24]. В [16] показано, что в периоды прохождения атмосферных фронтов появляются сильные возмущения поля интегрального влагосодержания атмосферы. Обнаружена связь интенсивности мезомасштабных процессов с полями давления и температуры. В [25] исследовались закономерности IWV ГНСС и CAPE при экстремальных дождях в восточной части Центральных Анд. Была построена экспоненциальная зависимость между IWV и интенсивностью экстремальных осадков, степенная зависимость между количеством осадков и CAPE и показано влияние обеих переменных (IWV ГНСС и CAPE) на образование осадков с помощью многомерного регрессионного анализа. В [26] ГНСС-измерения IWV и комбинация различных индексов конвективной неустойчивости и статистический регрессионный анализ применялись для прогнозирования гроз на Софийской равнине. Есть успешные попытки ассимиляции ГНСС-измерений в модели численного прогноза погоды [27].

Заключение

В работе обнаружена когерентность мезомасштабных вариаций зенитной тропосферной задержки ГНСС-сигналов с вариациями таких характеристик конвективных процессов в тропосфере, как интенсивность осадков и потенциальная доступная энергия неустойчивости. За исследуемый период 2010–2020 гг. по наблюдениям ГНСС-приемника в г. Казани обнаружено несколько сотен таких событий, совпадающих с сильными конвективными

явлениями. Когерентные и синхронные вариации зенитной тропосферной задержки, осадков и конвективного индекса CAPE наиболее часто обнаруживаются для процессов с характерными временными масштабами от 1 до 4 ч, при этом уровень вейвлет-корреляции как правило превышает 0,8.

Результаты нашей работы, как и цитируемые источники, показали, что дистанционное зондирование тропосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем определенно стоит использовать как инструмент мониторинга конвективных процессов. Быстро развивающиеся атмосферные неоднородности, которые могут быть предвестниками опасных погодных явлений (сильные осадки, грозы и смерчи), отражаются в когерентных им вариациях зенитной тропосферной задержки, измерения которой существующими сетями ГНСС-приемников можно ассимилировать в мезомасштабные погодные поля с целью улучшения качества прогнозов погоды.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («Приоритет-2030»).

Список литературы

1. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Терпугова С.А., Банах В.А., Смалыхо И.Н., Фалищ А.В., Рассказчикова Т.М., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б. Структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным аэрозольного и доплеровского лидаров в период прохождения атмосферных фронтов // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 679–688; Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Pen-

- ner I.E., Samoilova S.V., Terpuгова S.A., Banakh V.A., Smalikhо I.N., Falits A.V., Rasskazchikova T.M., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B. Structure of aerosol fields of the atmospheric boundary layer according to aerosol and doppler lidar data during passage of atmospheric fronts // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 1. P. 18–32.
2. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Поморцева А.А., Абдуллин Р.К., Ажигов И.О. Условия формирования и краткосрочный прогноз конвективных опасных явлений погоды в Уральском регионе в теплый период 2020 года // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 1. С. 46–56; Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Pomortseva A.A., Abdullin R.K., Azhigov I.O. Formation conditions and short-term forecast of convective hazardous weather events in the Ural region in the warm period of 2020 // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 3. P. 250–262.
 3. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорол. и гидрол. 2017. № 1. С. 16–28.
 4. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Гудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса // Метеорол. и гидрол. 2020. № 7. С. 5–19.
 5. Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ермаков А.Н. Математическое моделирование конвективной облачности в полярных регионах // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 222–226.
 6. Шакина Н.П. Прогноз погоды для авиации на основе продукции численных моделей атмосферы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4. С. 241–256.
 7. Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г. Гибридный метод прогноза порывов ветра // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 523–529.
 8. 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.
 9. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала // Метеорол. и гидрол. 2021. № 2. С. 35–49.
 10. Gao Sh., Du N., Min J., Yu H. Impact of assimilating radar data using a hybrid 4DEnVar approach on prediction of convective events // Dyn. Meteorol. Ocean. 2021. V. 73, N 1. P. 1–19.
 11. Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken Ch., Anthes R.A., Ware R.H. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N D14. P. 15787–15801.
 12. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. Wien; New York: Springer, 1994. 356 p.
 13. Калининков В.В., Хуторова О.Г. Валидация интегрального содержания водяного пара по данным наземных измерений сигналов ГНСС // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2019. Т. 55, № 4. С. 58–63.
 14. Xu G. GPS. Theory, Algorithms and Applications. Berlin: Springer, 2007. 340 p.
 15. Lindskog M., Ridal M., Thorsteinsson S., Ning T. Data assimilation of GNSS zenith total delays from a Nordic processing centre // Atmos. Chem. Phys. 2017. N 17. P. 13983–13998.
 16. Хуторова О.Г., Близруков А.С., Дементьев В.В., Хуторов В.Е. Зондирование мезомасштабной структуры тропосферы в периоды прохождения атмосферных фронтов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2019. Т. 16, № 6. С. 254–262.
 17. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (last access: 20.12.2021).
 18. Torrence G., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 1. P. 61–78.
 19. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Тр. Гидрометцентра России. 2017. № 363. С. 101–119.
 20. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Center. Tech. Report No 200. Illinois, 1972. 190 p.
 21. 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 // Atmos. 2021. V. 12, N 7. P. 908–934.
 22. 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.
 23. 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.
 24. Camisaya M.F., Rivera J.A., Mateo M.L., Morichetti 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.
 25. 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.
 26. Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S. Thunderstorm classification functions based on instability indices and GNSS IWV for the Sofia Plain // Remote Sens. 2019. V. 11, N 24. P. 2988–3005.
 27. Litta A.J., Mohanty U.C., Das S., Mary Indicula S. Numerical simulation of severe local storms over east India using WRF-NMM mesoscale model. // Atmos. Res. 2012. V. 116. P. 161–184.

O.G. Khutorova, M.V. Maslova, V.E. Khutorov. **Monitoring of convective processes with satellite navigation system receivers.**

The problem of revealing relationships between atmospheric parameters measured with GNSS receivers and characteristics of convective processes based on monitoring data in Kazan for 2010–2020 is solved in the work. Coherence and synchrony of variations in the precipitation intensity and potentially available convective energy with variations in the zenith tropospheric delay are most often detected on time scales smaller than 4 hours, with the wavelet correlation level higher than 0.8 in most cases.