

Проявление конвективных процессов в рядах интегрального влагосодержания атмосферы по многолетним данным мониторинга тропосферы сигналами спутниковых навигационных систем в г. Казани

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

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru*

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) позволяют получать оценки интегрального атмосферного влагосодержания с высоким временным и пространственным разрешением. Это перспективная технология всепогодного мониторинга мезомасштабных конвективных процессов в связи с ростом числа опасных явлений, связанных с атмосферной конвекцией. В работе решается задача выявления связи измеряемого с помощью ГНСС-приёмников интегрального влагосодержания атмосферы с характеристиками конвективных процессов по данным мониторинга в г. Казани. За 2009–2021 гг. в Казанском университете получены длинные ряды данных ГНСС-мониторинга атмосферы в г. Казани с временным разрешением 5 мин. Результаты ГНСС-мониторинга сопоставлены с показателями интенсивности конвективных процессов за весь период наблюдений. Для оценки конвективных процессов использовались физико-статистические параметры неустойчивости, рассчитанные по метеопараметрам, представленным в виде данных реанализа ERA5, полученных по модели ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Использовались такие показатели конвективных процессов, как доступная потенциальная энергия неустойчивости, энергия противодействия конвекции, количество осадков, восходящая вертикальная скорость, параметр генерации вихря, индексы Vertical Totals, Total Totals, K-Index, WMAXSHEAR. Показано, что статистические характеристики интегрального влагосодержания атмосферы значительно изменяются в зависимости от индексов CAPE (*англ.* Convective Available Potential Energy), WMAXSHEAR, восходящей вертикальной скорости и параметра генерации вихря. Обнаружено, что максимум интегрального влагосодержания достигается на 30–60 мин раньше, чем максимум вариации конвективных индексов для характерных временных масштабов вариаций 2–4 ч.

Ключевые слова: ГНСС, атмосферная конвекция, интегральное влагосодержание атмосферы, реанализ ERA5

Одобрена к печати: 19.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-271-281

Введение

В связи с изменением климата растёт число сильных ливней, гроз, шквалов и других опасных погодных явлений мезомасштаба, связанных с конвективными процессами (Чернокульский и др., 2022; Ferguson et al. 1985). Мониторинг и точный прогноз мезомасштабных конвективных явлений всё ещё представляет собой чрезвычайно сложную проблему. Требуются экспериментальные данные с высоким временным и пространственным разрешением. Спутниковые данные не всегда удовлетворяют требованиям. Так, в работе (Шихов др., 2022) показано, что применимость данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) для диагностики условий возникновения сильных шквалов и смерчей ограничивается низкой частотой съёмки. В связи с этим необходимо исследовать применимость всепогодных методов подспутникового мониторинга, в частности зондирования тропосферы с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

ГНСС-зондирование тропосферы

Основной показатель влияния нейтральной атмосферы на распространение спутниковых сигналов — это зенитная тропосферная задержка ГНСС-сигналов (*англ.* Zenith Tropospheric Delay — ZTD). ZTD состоит из двух компонент: гидростатической (*англ.* zenith hydrostatic delay — ZHD) и влажной (*англ.* zenith wet delay — ZWD). ZHD с высокой точностью моделируется по известным значениям приземных метеопараметров (Santerre, 1989). По ZWD оценивают интегральное влагосодержание атмосферы (*англ.* integrated water vapour — IWV) — содержание водяного пара в вертикальном атмосферном столбе, обычно измеряется в килограммах на метр квадратный или в миллиметрах осажённой воды ZTD (Bevis, Businger, 1992):

$$IWV = \frac{ZWD}{0,10631 + \frac{1732,83}{a + bT_s}}$$

где a , b — коэффициенты Мендеса, $a = 50,4$, $b = 0,789$; T_s — приземная температура в точке наблюдения (Santerre, 1989).

Ранее было показано, что с помощью ГНСС-зондирования обнаруживаются самые разные мезомасштабные процессы: внутрисуточный ход влагосодержания атмосферы (Kalinnikov, Khutorova, 2017); неоднородности в период прохождения фронтов (Хуторова и др., 2019). В ходе исследований (Barindelli et al., 2018; Nykiel et al., 2019) было установлено, что максимальные значения атмосферных осадков совпадают с максимальными значениями IWV. С помощью ГНСС выявлено увеличение, а затем уменьшение влагосодержания до и после осадков, связанных с прохождением фронтальных систем (Camisaya et al., 2020). Есть успешные попытки ассимиляции ГНСС-измерений в модели численного прогноза погоды (Lindskog et al., 2017; Litta et al., 2012). В работе (Хуторова и др., 2022) показана когерентность и синхронность вариаций интенсивности осадков и потенциальной доступной энергии неустойчивости с вариациями зенитной тропосферной задержки сигналов ГНСС. В исследовании (Ziagani et al., 2021) построена экспоненциальная зависимость между IWV и интенсивностью экстремальных осадков, степенная зависимость между количеством осадков и потенциальной доступной энергии неустойчивости и показано влияние обеих переменных на образование осадков с помощью многомерного регрессионного анализа. В работе (Guegova et al., 2019) ГНСС-измерения IWV применялись для прогнозирования гроз на Софийской равнине.

В настоящей работе ставится задача выявить изменчивость интегрального влагосодержания в зависимости от различных индексов неустойчивости атмосферы, характеризующих высокую вероятность опасных мезомасштабных явлений.

В Казанском (Приволжском) федеральном 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 (Калинников, Хуторова, 2019).

За 2009–2021 гг. в Казанском университете получены длинные ряды данных ГНСС-мониторинга атмосферы в г. Казани с временным разрешением 5 мин. Далее мы сопоставим результаты ГНСС-мониторинга IWV с показателями интенсивности конвективных процессов за весь период наблюдений.

Характеристики конвективной неустойчивости атмосферы

На основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и температуре воздуха на определённых высотах или изобарических поверхностях рассчитывались характеристики, которые часто используются для оценки вероятности опасных конвективных явлений.

Для оценки конвективных процессов использовались физико-статистические параметры неустойчивости, рассчитанные по метеопараметрам, представленным в виде данных ре-анализа ERA5, полученных по модели ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Европейский центр среднесрочного прогноза погоды (ЕЦСПП)) (Hersbach et al., 2020).

Для сравнения были выбраны следующие индексы, характеризующие вероятность сильных ливней, гроз и смерчей.

Vertical Totals (VT) — разница температуры между уровнями 850 и 500 гПа. Этот параметр характеризует вертикальный градиент температуры и, соответственно, её устойчивость (Miller, 1972).

Total Totals (TT) — итоговый суммарный показатель. TT увеличивается с ростом влажности в нижних слоях атмосферы и вертикальных температурных градиентов (Miller, 1972):

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}.$$

Обычно применяются следующие три пороговых значения TT: при $TT \geq 44$ К возможны грозы; при $TT \geq 50$ К возможны сильные грозы; при $TT \geq 55$ К вероятны многочисленные сильные грозы.

Индекс Вайтинга, или K-Index, который рассчитывается по формуле:

$$K\text{-Index } (K) = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}),$$

где T_{850} , T_{700} и T_{500} — температура воздуха на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа соответственно, °С; T_{d850} и T_{d700} — температура точки росы на изобарической поверхности 850 и 700 гПа, °С. Считается, что при значениях индекса 35 и более вероятность развития гроз превышает 90 % (George, 1960).

В работе (Rasmussen, Blanchard, 1998) вводятся индексы, характеризующие сдвиг скорости ветра с высотой, рассчитанные как разность векторов скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли и на некотором высотном уровне.

Convective Available Potential Energy (CAPE) — доступная потенциальная энергия неустойчивости; представляет собой работу, которую может совершить частица воздуха при адиабатическом подъёме (Hersbash et al., 2020):

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

Здесь T_v и T_p — виртуальная температура среды и поднимающейся частицы; g — ускорение свободного падения. Интеграл рассчитывается от наиболее неустойчивого слоя ниже уровня 350 гПа z_{base} до того уровня модели, когда вертикальная скорость уменьшается до нуля z_{top} . Расчёт этого параметра предполагает, что частицы воздуха не смешиваются с окружающим воздухом; подъём псевдоадиабатический (IFS..., 2021).

Индекс CAPE описывает стабильность атмосферы, при его повышении увеличивается вероятность экстремальных осадков (Miller, 1972). В работе (Jelić et al., 2021) показано, что при CAPE выше 800 Дж/кг сильно возрастает индекс грозовой активности. В исследовании (Taszarek et al., 2017) отмечается, что вероятность торнадо увеличивается при значениях CAPE, превышающих порог 100–200 Дж/кг.

Энергия противодействия конвекции (*англ.* Convective Inhibition — CIN):

$$CIN = g \int_0^{z_{LFC}} \frac{T_p - T_v}{T_v} dz.$$

Интеграл рассчитывается до уровня свободной конвекции z_{LFC} . Значения $CIN > 200$ Дж/кг достаточно для прекращения конвекции в атмосфере (Быков и др., 2017).

Восходящая вертикальная скорость (*англ.* Upward Vertical Velocity — UVV) представляет собой максимальную вертикальную скорость ветра, она определяется как:

$$UVV = \sqrt{2CAPE}.$$

Восходящий поток при $UVV = 40$ м/с считается сильным, а при 60 м/с — очень сильным. Полагается, что с возрастанием UVV увеличивается вероятность крупного града (Burgess, Lemon, 1990).

Для возникновения шквалов и смерчей необходимо сочетание высокого влагосодержания воздушной массы, $CAPE > 1000$ Дж/кг, и сильного ветрового сдвига (Калинин и др., 2021). Для учёта таких ситуаций применяются комплексные конвективные индексы.

Параметр генерации вихря (*англ.* Vortex Generation Parameter — VGP) (Rasmussen, Blanchard, 1998) используется в качестве косвенного показателя наклона горизонтального вихря. Он определяется как произведение квадратного корня из $CAPE$ на трёхкилометровый сдвиг ветра:

$$VGP = \sqrt{2CAPE} \cdot MLS.$$

Здесь MLS (*англ.* Mid-level Shear) — это сдвиг ветра в слое 3 км. Чем больше сдвиг, тем продолжительнее конвекция. Сильный сдвиг также способствует высоким значениям спиральности.

Комплексный индекс $WMAXSHEAR$ учитывает и вертикальный поток, и сдвиг ветра (Taszarek et al., 2017):

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

Здесь DLS (*англ.* Deep Layer Shear) — сдвиг в глубоком слое, определяется как вертикальный сдвиг ветра между уровнем земли (высота 10 м) и высотой 6 км. Этот параметр используется и отдельно для прогноза суперячейковых штормов. Пороговым значением для возникновения шторма считается 40 узлов (21 м/с) (Brooks et al., 1994).

Результатом внутримассовых и фронтальных конвективных процессов выступает количество выпавших осадков (*англ.* total precipitation — TP), которые также служат показателем интенсивности конвекции.

Все вышеперечисленные индексы рассчитывались по данным реанализа ERA5 для координат антенн приёмников ГНСС в г. Казани. Так как исходное пространственное разрешение ERA5 — $0,25^\circ$, то применялась двумерная нелинейная интерполяция для получения этих параметров в точке координат приёмника ГНСС.

Статистические свойства интегрального влагосодержания

За период 2015–2020 гг. (с 15 апреля по 15 сентября) были рассчитаны длинные ряды всех индексов с временным шагом 1 ч. По каждому из параметров согласно их критическим значениям были сформированы выборки интегрального влагосодержания и его среднечасовой дисперсии, которые характеризовали условия слабой и сильной конвекции. 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. Мы сравнивали распределения выборок интегрального влагосодержания попарно в зависимости от каждого индекса. Получены следующие закономерности.

С помощью критерия Пирсона показано, что распределения IWV не соответствуют нормальному. Поэтому для попарной проверки разницы распределений при различных индексах, соответствующих сильной и слабой конвекции, использовались не только критерии Стьюдента и ANOVA (*англ.* ANalysis Of VAriance), но и критерий Краскела–Уоллиса проверки распределений на соответствие их медианных значений.

В *табл. 1* представлены граничные значения конвективных индексов, используемые в исследовании для отбора выборок ГНСС-мониторинга и соответствующие им значения разности средних и медианных величин интегрального влагосодержания атмосферы при возрастании конвективного индекса и при слабой конвекции.

Таблица 1. Граничные значения конвективных индексов и разности средних и медианных величин интегрального влагосодержания атмосферы для выборок интегрального содержания атмосферы, соответствующих сильной и слабой конвекции согласно каждому конвективному индексу

Параметр конвекции	Граничные значения индекса	Разница средних значений I WV, мм	Разница медианных значений I WV, мм
VT	30 К	2,8	5,6
TT	55 К	7,6	10,1
К-индекс	40 К	2,8	5,8
CAPE	800 Дж/кг	11,4	11,6
UVV	40 м/с	10,6	
VGP	400 м ² ·с ⁻²	11,4	11,8
WMAXSHEAR		8,9	9,3
CIN	100 Дж/кг	Статистически незначимая	
TP	1 мм	6,9	7,9

Обнаружено, что отбор по величине энергии противодействия конвекции не даёт достоверных различий статистических параметров интегрального влагосодержания. Отбор по К, VT, TP, TT показал статистически достоверные различия распределений, но разность средних значений I WV, соответствующих сильной и слабой конвекции, составляет менее 7 мм осаждаемой воды. Большие различия в 10 мм дали такие индексы, как CAPE, UVV, VGP, WMAXSHEAR.

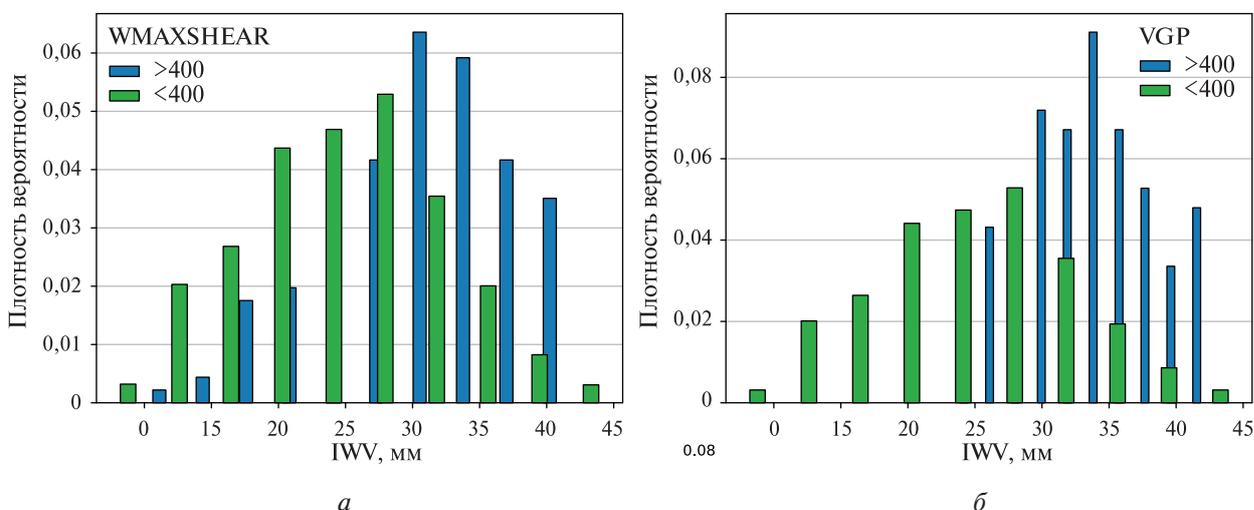


Рис. 1. Распределение I WV при сильной и слабой конвекции, разграниченное по величине WMAXSHEAR (а) и VGP (б)

Примеры эмпирического распределения выборок I WV, полученных на основе разграничения по конвективным индексам, представлены на рис. 1.

Когерентные вариации параметров конвекции и интегрального влагосодержания

Далее мы исследовали синхронность пиковых значений индексов конвекции и интегрального влагосодержания, измеренного с помощью ГНСС. Для выявления синхронности вариаций параметров конвективной активности и измеряемых I WV оценивалась локальная вейвлет-

корреляция рядов в масштабах от 1 до 12 ч. В качестве материнской функции взята функция Морле (Torrence, Compo, 1998). Комплексный вейвлет нужен для того, чтобы находить фазовый сдвиг когерентных вариаций в рядах исследуемых параметров. Для выделения квазипериодических процессов и исследования их когерентности параметр вейвлета Ω обычно выбирают равным шести. В данной работе мы выбрали этот параметр равным единице для выделения одиночных импульсов необходимого временного масштаба.

Был проведён вейвлет-анализ временных рядов осадков, энергии противодействия конвекции, доступной потенциальной энергии неустойчивости и других индексов за 2009–2021 гг. Ряды конвективных индексов с помощью линейной интерполяции приведены к временному разрешению 5 мин. В каждом из рядов с помощью вейвлет-анализа выделялись значимые с вероятностью более 90 % события превышения пороговых значений, оценивался масштаб события, время его максимума. Выделялись события с уровнем корреляции не ниже 0,8. При этом уровень каждого индекса конвекции должен быть не ниже значений, представленных в *табл. 1*, чтобы выявлять периоды с достаточно мощной энергией конвективных процессов (Gracier, 2012).

Рассчитывалась вейвлет-корреляция выделенного импульса с вариациями интегрального влагосодержания соответствующего временного масштаба и сдвиг фаз между ними.

Когерентность вариаций интегрального влагосодержания с вариациями всех исследуемых конвективных параметров наиболее часто обнаруживается на временных масштабах от 1 до 4 ч, как и следовало ожидать.

Гистограммы распределения фазового сдвига, представленные на *рис. 2*, показывают, что вариации IWV, как правило, опережают вариации WMAXSHEAR, UVV и интенсивности осадков менее чем на час.

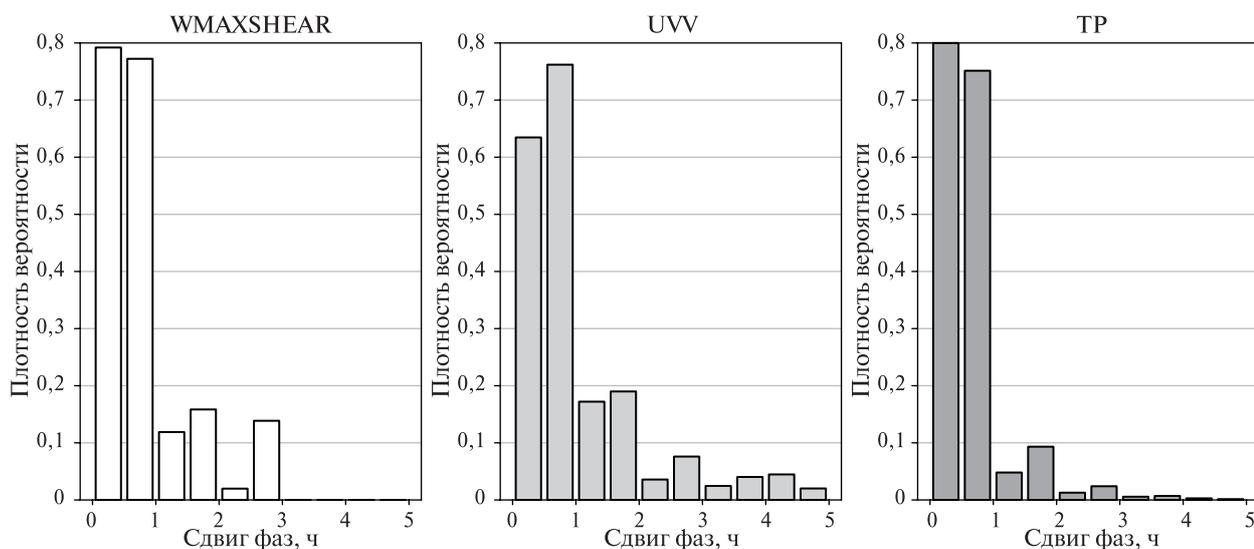


Рис. 2. Гистограммы распределения фазовых сдвигов мезомасштабных вариаций IWV относительно когерентных вариаций WMAXSHEAR, UVV, TP

Критерий Пирсона показал, что распределение фазовых сдвигов не является нормальным, поэтому были сделаны оценки медианных значений сдвигов фаз между когерентными вариациями различных показателей конвективных процессов и IWV (*табл. 2*).

Распределение фазового сдвига вариаций IWV и конвективных индексов получены математической оценкой. Учитывая, что исходное временное разрешение ERA5 составляет 1 ч, полученное распределение показывает, что вариации интегрального влагосодержания либо опережают вариации других конвективных индексов на час, либо происходят одновременно. Аналогичные результаты были получены и для вариаций ZTD (Хуторова и др., 2022). Уточнить фазовый сдвиг можно будет, используя эту же методику, в том случае, если данные

по количеству осадков и другим метеопараметрам будут получены с более высоким временным разрешением. Например, как в работе (Guerova et al., 2019), где собственный архив наблюдения метеопараметров, включая частоту молний, и ГНСС-измерения позволили установить сдвиг в 40 мин между повышением IWV и пиком гроз. По порядку величин такой сдвиг соответствует оценкам, приведённым в *табл. 2*.

Таблица 2. Оценки медианных значений сдвигов фаз между когерентными вариациями IWV и различными показателями интенсивности конвекции

Параметр конвекции	Разность времени максимума вариаций IWV и конвективного индекса, мин
VT	55
TT	41
K-индекс	42
CAPE	48
UVV	48
VGP	41
WMAXSHEAR	35
CIN	132
TP	27

Заключение

Результаты нашей работы, так же как и цитируемые источники, показали, что дистанционное зондирование тропосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем определённо стоит использовать как инструмент мониторинга конвективных процессов. Быстро развивающиеся атмосферные неоднородности, которые могут быть предвестниками опасных погодных явлений, таких как сильные осадки, грозы и смерчи, отражаются в когерентных им вариациях интегрального влагосодержания атмосферы, оценку которого существующими сетями ГНСС-приёмников можно получать с высоким временным разрешением.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-27-00222 (<https://rscf.ru/project/23-27-00222>). Данные ГНСС мониторинга собраны при поддержке программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета «ПРИОРИТЕТ-2030».

Литература

1. 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.
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 атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 1(384). С. 46–56. DOI: 10.15372/AOO20210106.
3. Калинин В. В., Хуторова О. Г. Валидация интегрального содержания водяного пара по данным наземных измерений сигналов ГНСС // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 58–63. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555458-63>.
4. Хуторова О. Г., Близоруков 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-254-262.

5. Хуторова О. Г., Маслова М. В., Хуторов В. Е. О мониторинге конвективных процессов с помощью приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6(401). С. 505–509. DOI: 10.15372/AOO20220612.
6. 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 конвективно-го характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидро-логия. 2022. № 5. С. 27–41. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.
7. Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Спрыгин А. А., Ярынич Ю. И. Оценка конвективной неустойчи-вости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6(401). С. 429–435. DOI: 10.15372/AOO20220601.
8. 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. No. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0795-7>.
9. Bevis M. S., Businger T. A. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophysical Research. 1992. V. 97. No. D14. P. 15787–15801. DOI: 10.1029/92JD01517.
10. Blanchard D. O. Assessing the Vertical Distribution of Convective Available Potential Energy // Weather and Forecasting. 1998. V. 13. No. 3. P. 870–877. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0870:ATVD OC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0870:ATVD OC>2.0.CO;2).
11. Brooks H. B., Doswell C. A., Wilhelmson R. B. The role of midtropospheric winds in the evolution and main-tenance of low-level mesocyclones // Monthly Weather Review. 1994. V. 122. P. 126–136. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0126:TROMWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0126:TROMWI>2.0.CO;2).
12. Burgess D. W., Lemon L. R. Severe thunderstorm detection by radar // Radar in Meteorology. American Meteorological Society. 1990. P. 619–647.
13. Camisaya M. F., Rivera J. A., Mateo M. L., Morichetti P. V., Mackern M. V. Estimation of integrated water va-por derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015–2018). Validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2020. V. 197. Art. No. 105143. 12 p. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105143.
14. Ferguson E. W., Ostby F. P., Leftwich Jr. P. W., Carle W. E., Corfidi S. F., Cundy R. G., Hirt W. D. The tornado season of 1983 // Monthly Weather Review. 1985. V. 113. P. 395–404.
15. George J. J. Weather Forecasting for Aeronautics. N. Y.; L.: Academic Press, 1960. 673 p.
16. Gracier J. Convection parameters. 2012. 22 p. <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf>.
17. Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S. Thunderstorm Classification Functions Based on Instability Indices and GNSS IWV for the Sofia Plain // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 24. P. 2988–3005. DOI: 10.3390/rs11242988.
18. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-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., Hólm 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 // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
19. IFS Documentation CY47R3 — Part IV: Physical Processes / ECMWF. 2021. 232 p. <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/81271-ifs-documentation-cy47r3-part-iv-physical-processes>.
20. 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. No. 7. P. 908–934. DOI: 10.3390/atmos12070908.
21. 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 // Annales Geophysicae. 2017. V. 35. P. 453–464. DOI: 10.5194/angeo-35-453-2017.
22. Lindskog M., Ridal M., Thorsteinsson S., Ning T. Data assimilation of GNSS zenith total delays from a Nordic processing centre // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. No. 17. P. 13983–13998. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13983-2017>.
23. Liita A. J., Mohanty U. C., Das S., Mary Indicula S. Numerical simulation of severe local storms over east India using WRF-NMM mesoscale model. // Atmospheric Research. 2012. V. 116. P. 161–184. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.04.015.
24. Miller R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center: Tech. Report No. 200. Illinois: Scott AFB, 1972. 190 p.

25. 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. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 193. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105082.
26. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // *Weather and Forecasting*. 1998. No. 13. P. 1148–1164. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2.
27. Santerre R. GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning: Tech. Report No. 145. Brunswick: UNB, 1989. 203 p.
28. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-Derived Parameters Associated with Convective Hazards in Europe // *Monthly Weather Review*. 2017. V. 14. No. 4. P. 1511–1528. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0384.1>.
29. Torrence G., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // *Bull. American Meteorological Society*. 1998. V. 79. No. 1. P. 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
30. 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 Sensing*. 2021. V. 13. No. 18. P. 1–19. DOI: 10.3390/rs13183788.

Convective processes manifestation in integral water vapor series of the atmosphere based on long-term data of tropospheric monitoring by satellite navigation systems signals in Kazan

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

*Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia
E-mail: olga.khutorova@kpfu.ru*

Global navigation satellite systems (GNSS) make it possible to obtain estimates of atmospheric integral water vapor with high temporal and spatial resolution. This is a promising technology for all-weather monitoring of mesoscale convective processes due to the growing number of hazardous phenomena associated with atmospheric convection. The paper shows solution to the problem of identifying the relationship between integral water vapor of the atmosphere measured by GNSS receivers and convective processes characteristics, on the basis of monitoring data in Kazan. Kazan University has received long series of 2009–2021 GNSS monitoring data for the atmosphere in Kazan with a time resolution of 5 minutes. The results of GNSS monitoring were compared with convective processes intensity indicators for the entire observation period. To estimate these convective processes, we used physical and statistical parameters of instability calculated from meteorological parameters presented as ERA5 reanalysis data obtained by ECMWF model. We used such convective processes indicators as convective available potential energy, convective inhibition, amount of precipitation, upward vertical velocity, vortex generation parameter, and indices Vertical Totals, Total Totals, K-Index, WMAXSHEAR. It is shown that statistical characteristics of atmospheric integral water vapor vary significantly depending on CAPE, WMAXSHEAR, upward vertical velocity, and vortex generation parameter. It was found that the maximum integral water vapor is reached 30–60 minutes earlier than the maximum convective indices variation for the characteristic variation time scales of 2–4 hours.

Keywords: GNSS, atmospheric convection, atmospheric integral water vapor content, ERA5 reanalysis

Accepted: 19.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-271-281

References

1. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A., Forecast of hazardous convective phenomena in the Perm region using global forecasting models, *Proc. Hydrometeorological Center of Russia*, 2017, No. 363, pp. 101–119 (in Russian).

2. Kalinin N. A., Shikhov A. N., Bykov A. V., Pomortseva A. A., Abdullin R. K., Azhigov I. O., Conditions for the formation and short-term forecasting of hazardous weather events in the Ural region in the warm period of 2020, *Optika Atmosfery i Okeana*, 2021, Vol. 34, No. 1(384), pp. 46–56 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20210106.
3. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G., Validation of GNSS Data about the Integrated Water Vapor in Europe Using Sun Photometers, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Physics of the atmosphere and ocean*, 2019, Vol. 55, No. 4, pp. 58–63 (in Russian), <https://doi.org/10.31857/S0002-351555458-63>.
4. Khutorova O. G., Blizorukov A. S., Dementiev V. V., Mesoscale tropospheric structure sensing during weather front passage, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 254–262 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-254-262.
5. Khutorova O. G., Maslova M. V., Khutorov V. E., Monitoring of convective processes with satellite navigation system receivers, *Optika Atmosfery i Okeana*, 2022, Vol. 35, No. 6(401), pp. 505–509 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20220612.
6. Chernokulsky A. V., Eliseev A. V., Kozlov F. A., Korshunova N. N., Kurgansky M. V., Mokhov I. I., Semenov V. A., Shvets N. V., Shikhov A. N., Yarynich Yu. I., Atmospheric severe convective events in Russia: changes observed from different data, *Meteorology and Hydrology*, 2022, No. 5, pp. 27–41 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.
7. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Sprygin A. A., Evaluation of convective instability of the atmosphere in the cases with squalls, tornadoes and large hail events according to satellite observations and ERA5 reanalysis data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2022, Vol. 35, No. 6(401), pp. 429–435 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20220601.
8. 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, No. 1, pp. 1–18, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0795-7>.
9. Bevis M. S., Businger T. A., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophysical Research*, 1992. Vol. 97, No. D14, pp. 15787–15801, DOI: 10.1029/92JD01517 doi:10.1029/92JD01517.
10. Blanchard D. O., Assessing the Vertical Distribution of Convective Available Potential Energy, *Weather and Forecasting*, 1998, Vol. 13(3), pp. 870–877, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0870:ATVDOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0870:ATVDOC>2.0.CO;2).
11. Brooks H. B., Doswell C. A., Wilhelmson R. B., The role of midtropospheric winds in the evolution and maintenance of low-level mesocyclones, *Monthly Weather Review*, 1994, Vol. 122, pp. 126–136, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0126:TROMWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0126:TROMWI>2.0.CO;2).
12. Burgess D. W., Lemon L. R., Severe thunderstorm detection by radar, In: *Radar in Meteorology*, American Meteorological Society, 1990, pp. 619–647.
13. 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. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, Vol. 197, Art. No. 105143, 12 p., DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105143.
14. Ferguson E. W., Ostby F. P., Leftwich Jr. P. W., Carle W. E., Corfidi S. F., Cundy R. G., Hirt W. D., The tornado season of 1983, *Monthly Weather Review*, 1985, Vol. 113, pp. 395–404.
15. George J. J., *Weather Forecasting for Aeronautics*, New York; London: Academic Press, 1960, 673 p.
16. Gracier J., *Convection parameters*, 2012, 22 p., <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf>.
17. Guerova G., Dimitrova T., Georgiev S., Thunderstorm Classification Functions Based on Instability Indices and GNSS IWV for the Sofia Plain, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 24, pp. 2988–3005, DOI: 10.3390/rs11242988.
18. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-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., Hólm 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, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, Issue 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
19. *IFS Documentation CY47R3 — Part IV: Physical Processes*, 2021, 232 p., <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/81271-ifs-documentation-cy47r3-part-iv-physical-processes>.
20. 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, Vol. 12, No. 7, pp. 908–934, DOI: 10.3390/atmos12070908.

21. 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, *Annales Geophysicae*, 2017, Vol. 35, pp. 453–464, DOI: 10.5194/angeo-35-453-2017.
22. Lindskog M., Ridal M., Thorsteinsson S., Ning T., Data assimilation of GNSS zenith total delays from a Nordic processing centre, *Atmospheric and Chemistry Physics*, 2017, No. 17, pp. 13983–13998, <https://doi.org/10.5194/acp-17-13983-2017>.
23. 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, *Atmospheric Research*, 2012, Vol. 116, pp. 161–184, DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.04.015.
24. Miller R. C., *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center: Tech. Report No. 200*, Illinois: Scott AFB, 1972, 190 p.
25. 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. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, Vol. 193, pp. 1–26, DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105082.
26. Rasmussen E. N., Blanchard D. O., A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters, *Weather and Forecasting*, 1998, No. 13, pp. 1148–1164, DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2.
27. Santerre R., *GPS satellite sky distribution: impact on the propagation of some important errors in precise relative positioning: Tech. Report No. 145*, Brunswick: UNB, 1989, 203 p.
28. Taszarek M., Brooks H. E., Czernecki B., Sounding-Derived Parameters Associated with Convective Hazards in Europe, *Monthly Weather Review*, 2017, Vol. 145, No. 4, pp. 1511–1528, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0384.1>.
29. Torrence G., Compo G. P., A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. American Meteorological Society*, 1998, Vol. 79, No. 1, pp. 61–78, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).
30. 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 Vapor, and CAPE in the Eastern Central Andes, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 18, pp. 1–19, DOI: 10.3390/rs13183788.