



Comparative analysis of convective processes and the intense precipitation using numerical weather model and GNSS meteorology method

Martin Slavchev^{1,2*}, Anastasiya Stoycheva¹, Guergana Gerova²

¹*National Institute of Meteorology and Hydrology,
Tsarigradsko shose 66, 1784 Sofia, Bulgaria*

²*Faculty of Physics, Sofia University, 5 James Bourchier Blvd.,
1164 Sofia, Bulgaria*

Abstract: Forecasting convective processes and associated intense rainfall are paramount to ultra-short-term weather forecasts worldwide. A number of scientists have been studying the behavior of integrated water vapor, obtained by the GNSS (Global Navigation Satellite Systems) meteorology method, during intense rainfall. It has been established that the development of frontal systems is related to the places in which water vapor has a maximum and also that water vapor plays a leading role in the development of intravascular convection. The distribution of integrated water vapor, obtained by the GNSS meteorology method, was investigated for 20 preselected weather conditions in 2012 for the territory of Bulgaria. Ten of the selected cases are intramassic, another 10 are frontal. The high temporal and spatial resolution of water vapor obtained by the GNSS meteorology method and numerical simulations allows the field gradients to be investigated. The longer-term objective of the study is to apply the method to operational work, which is focused mainly on the short-term weather forecast.

Keywords: very short-range forecast, numerical weather experiments, convective precipitation, hail, integrated water vapour.

* Martin.Slavchev@meteo.bg

Сравнителен анализ на конвективни процеси и свързаните с тях интензивни валежи чрез числен модел за прогноза на времето и метода ГНСС метеорология

Мартин Славчев^{1,2}, Анастасия Стойчева¹, Гергана Герова²

*¹Национален институт по метеорология и хидрология,
бул. Цариградско шосе 66, 1784 София*

*²Софийски университет, Физически факултет,
бул. Дж. Баучер, 5, 1164 София*

Резюме. Прогнозата на конвективните процеси и свързаните с тях интензивни валежи са от първостепенно значение за свръхкраткосрочната прогноза на времето в целия свят. Редица учени изследват поведението на интегрираната водна пара, получена по метода ГНСС (Глобални Навигационни Спътникови Системи) метеорология, по време на интензивни валежи. Установено е, че развитието на фронталните системи е свързано с местата, в които водната пара има максимум и също така, че водната пара има водеща роля в развитието на конвекция от вътрешномасов характер. Изследвано е разпределението на интегрираната водна пара, получена по метода ГНСС метеорология, за 20 предварително избрани синоптични обстановки през 2012 г. за територията на България. От избраните обстановки десет са от вътрешномасов и десет от фронтален характер. Високата времева и пространствена резолюция на водната пара, получена по метода ГНСС метеорология и числени симулации, позволява да се изследват градиентите на полето. Корелацията между числените експерименти и получената по метода ГНСС метеорология водна пара е значително по-висока при фронталните нахлувания, но в някои случаи моделът занижава стойностите на (IWV). При вътрешномасовите процеси корелацията е малка и често моделната и получената по метода ГНСС метеорология водна пара са отместени по фаза. По-дългосрочната цел на изследването е приложение на метода в оперативната работа, насочена главно към свръхкраткосрочната прогноза на времето.

Ключови думи: Свръхкраткосрочна прогноза, числени експерименти, конвективни валежи, градушка, интегрирана водна пара.

ВЪВЕДЕНИЕ

Точното и навременно прогнозиране на развитието на конвективната облачност е от особено голямо значение в работата на дежурния синоптик в Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ). Количеството прогностични материали, използвани в съвременната оперативна практика е голямо и точното и навременното им анализиране става все по-непосилна задача. Този ефект е засилен при изготвянето на свръхкраткосрочна прогноза на явления с екстремнен характер и е пряко свързан с издаването на предупреждения в европейската

система МЕТЕОАЛАРМ, на която България е член от 2009 г. Поради тази причина е необходим модерен и съвременен подход в прогнозирането и анализа на екстремните явления на територията на България.

Конвективните процеси в България са обект на изследване в докторските работи на Маркова (2013) и Бочева (2014). Бочева (2014) разглежда разпределението и честотата на: гръмотевични бури, градушки, потенциално опасни валежи и смерч за периода 1961-2010 г. Установено е, че средногодишният брой дни с опасни валежи за периода 1991-2010 г. е 5.1 дни, което сравнено с 3.6 дни, получени за периода 1951-1990 г. (2 пъти по-дълъг) представлява увеличение с около 65 %. За станциите от Североизточна и Югоизточна България се регистрира двойно по-голямо нарастване на средния многогодишен брой дни с валежи $\geq 100 \text{ mm}/24 \text{ h}$ - статистически значимо нарастване с над 130% за станциите от Източна България и крайбрежието на Черно море. За последните 20 години интензивните валежи са по-чести през месеците от май до октомври и особено през юли, когато средния брой дни нараства с около 200 % (Бочева, 2014). Маркова (2013) изследва влиянието на условията на околната среда върху развитието на гръмотевичните облаци над Източна България. Разработена е класификационна функция разделяща термодинамичните условия при развитие на гръмотевични облаци над България и Черно море в съгласие с термичната хипотеза за контраста на гръмотевичната дейност море-суша. Установено е, че по-голяма честота на мълните се наблюдава при по-голяма дебелина на слоя между височината на изотерма -40°C и върха на облака (Маркова, 2013).

В последното десетилетие метода (Глобални Навигационни Спътникови Системи) метеорология за изследване на интензивните валежи се разработва и използва оперативно в Европа (<http://egvar.dmi.dk/>). Baelen et al. (2011) изучават връзката между изменението на водната пара и валежите по време на интензивна наблюдателна кампания в района на Шварцвалд през лятото на 2007 г. и установяват, че: 1) развитието на фронталните системи е свързано с местата, в които водната пара има максимум и 2) водната пара има водеща роля в развитието на конвекция от вътрешномасов характер. В един от случаите се забелязва, че атмосферните условия благоприятстват натрупването на водна пара над билото на планината и това е предпоставка за развитието на конвекция. Друг случай показва, че водната пара, която минава над планината, води до конвекция на подветрената страна. Graham et al. (2012) изследват орографски валежи в Бернските Алпи в Швейцария с помощта на набор от независими наблюдения, включително и интегрирана водна пара (Integrated Water Vapour - IWV), получена от ГНСС наблюдения. Brenot et al. (2014) използват тропосферните продукти от ГНСС за изследване на характеристиките на водната пара в конвективните системи. Демонстрирано е, че важна роля за откриване на малки по мащаб структури, като конвективните клетки, имат градиентите на пълното зенитно закъснение (Zenith Total Delay - ZTD), получени от ГНСС. Те предлагат система за ранно предупреждение, която е

базирана на градиента сух/влажен въздух в първите 30 минути преди началото на развитие на конвективната система.

Редица държави от Европа вече успешно прилагат получената по метода ГНСС метеорология IWV в оперативната практика на националните си служби. Нуждата от разработване на нови и развитие на вече съществуващите методи за свръхкраткосрочна прогноза на екстремни валежи и градушка е на дневен ред в оперативната работа в НИМХ. В настоящата разработка се изследва разпределението на IWV, получена по метода ГНСС метеорология за 20 предварително избрани синоптични обстановки през 2012 г. за територията на България. От избраните обстановки десет са с вътрешномасов и десет с фронтален характер. Високата времева и пространствена резолюция на водната пара, получена по метода ГНСС метеорология и числени симулации, позволява да се изследват градиентите на полето. По-дългосрочната цел е приложение на метода в оперативната работа, насочена главно към свръхкраткосрочната прогноза на времето. За целта на изследването се анализират данни от атмосферния архив на СУ "Св. Климент Охридски" и се прави числена симулация на водната пара с числения модел за прогноза на времето Weather Research and Forecast (WRF). Изчисляването на IWV по метода ГНСС метеорология е съгласно методиката, описана от Guerova et al. (2014). Сравнението на получената водна пара чрез числени симулации и различни параметризации на модела позволява качествена и количествена оценка на всяка една от избраните параметризационни схеми за конвективни процеси. Част от предизвикателството е да се провери дали численият модел за прогноза на времето (WRF) може адекватно да представи поведението на IWV във времето и пространството. Използването на интегрираната водна пара, получена по метода ГНСС метеорология като помощен предиктор при анализиране на интензивни валежи и градушки, ще позволи по-точното им прогнозиране.

1. МЕТОД НА РАБОТА И ИЗПОЛЗВАНИ ДАННИ

В тази работа са използвани данни от ГНСС станции от България. ГНСС мрежата в България е собственост на фирмата „Зенит-гео“. Тя е създадена през 1992 г. със сфера на дейност геодезическо проучване и проектиране. Компанията има собствена мрежа от 30 перманентни референтни ГНСС станции. Тя осигурява пълно покритие на територията на страната като приема и обработва сигналите от американската спътникова система GPS (Global Positioning system). Използваните данни са от атмосферния архив на СУ (SUADA - Sofia University Atmospheric Data Archive, Guerova et al., 2014). SUADA е регионална база данни, която има две основни цели: а) да събира и съхранява информация за водната пара в атмосферата получена от различни измервателни методи и числени експерименти, и б) да използва данните за проучвания на територията на България и Югоизточна Европа.

Информацията за регистрираните количества на валежи за всички изследвани обстановки са от бюлетина на НИМХ.

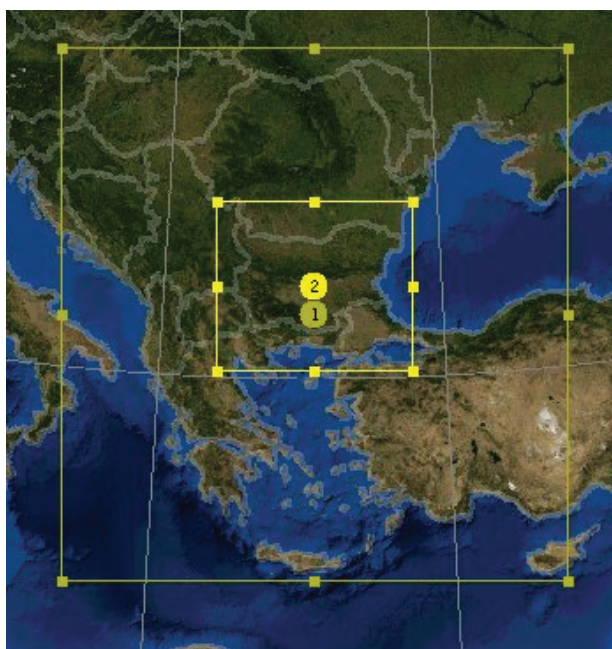
1.1. Числен модел за прогноза на времето

За целта на изследването е използван числен модел за прогноза на времето Weather Research and Forecasting версия 3.4.1. Моделът е разработен съвместно от Националния център за атмосферни изследвания (NCAR), Лабораторията за прогнозни системи, Националния център за околната среда, Националната администрация за океаните и атмосферата и Центърът за анализ и прогнози на бури на Съединените американски щати.

Версия 3.4.1 на числения модел за прогноза на времето WRF е конфигурирана и работи на клъстера на Физическия факултет PhysOn.

Използван е един основен и един внедрен домейн с пространствена резолюция съответно; основен домейн – 9 км; поддомейн – 4 км (Фигура 1.)

Вертикалните нива са 44 на брой, разположени са до 20 км във височина и са неравномерно разпределени. Времовата резолюция на записването в “SUADA” полета е 30 мин.



Фиг. 1. Използвани моделни области

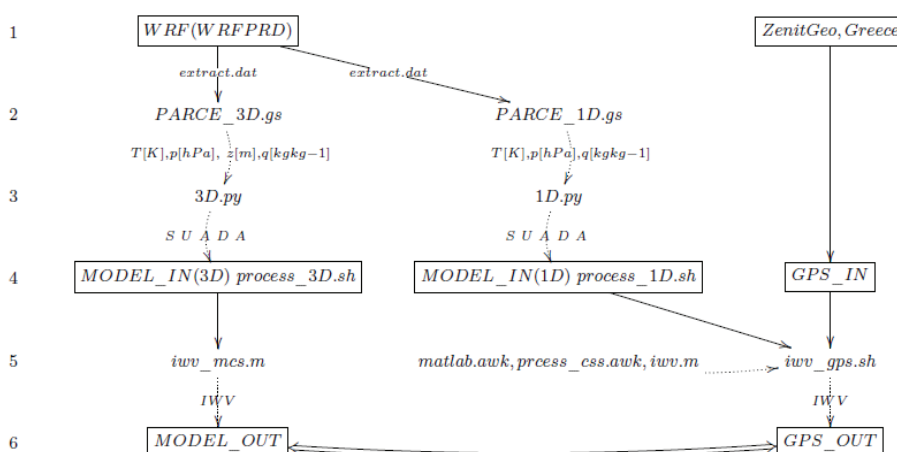
Fig 1. Domains used in the numerical weather model

Използваните параметризационни схеми са както следва:

1. Микрофизика: Double-Moment 6 class scheme (Lin and Hong, 2010);
2. Дълговълнова радиация: Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) - (Mlawer et al., 1997);
3. Късовълнова радиация: Dudhia scheme (Jiménez et al., 2012);
4. Параметризация на земната повърхност: Noah Land Surface Model (Chen et al., 1996);
5. Планетарен граничен слой: Yonsei University scheme (Hong et al., 2006);
6. Параметризация на конвективни процеси: Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004).

1.2. Интегрирана водна пара от модела WRF

На Фигура 2 е показан потокът от информация на използваните за целите на изследването данни:



Фиг. 2. Структура на SUADA и потока от данни.

Fig. 2. SUADA structure and data flow.

Стъпка 1 - Пресметнатите на PhysOn полета от числения модел се записват в WRFPRD (Weather research and forecast parent directory) под формата на един файл - „extract.dat“.

Стъпка 2 - Чрез програмата „parse_3D.gs“ от „extract.dat“ се извличат температурата T [K], атмосферното налягане p [hPa] и специфичната влажност q [kg.kg-1] на различни височини z [m].

Стъпка 3 - Чрез програмата „3D.py“ се записват моделните T [K], p [hPa], q [kg·kg⁻¹] и z [m] в таблица „MODEL_IN“ на базата данни SUADA.

За улеснение двете програми „parce_3D.gs“ и „3D.py“ са обединени в програмата „prcess_3D.sh“.

Стъпка 4 - Чрез програмата „iwv_mcs.m“ и данните в „MODEL_IN“ се изчислява интегралното количество на водната пара за моделните точки, съответстващи на наличните станции от двете мрежи (ZenithGeo и Greece). След пресмятането IWV се записва в таблицата „MODEL_OUT“ на базата данни SUADA.

Получената от модела IWV се пресмята като се интегрира специфичната влажност на всички нива, за всяка от точките в мрежата на модела.

Използва се следната формула:

$$IWV = \int_z^{z_n} \frac{\frac{p \times q}{0.622 + 0.378q}}{R_v \times T} dz$$

Съответно n е броя на нивата в модела (в разглеждания случай - 44 нива);

p [hPa] е приземното налягането;

T [K] приземната температура;

R_v е специфичната газова константа за водната пара;

q [kgkg⁻¹] е специфичната влажност;

z е височината за дадена точка.

1.3. Интегрирана водна пара по метода ГНСС с използване на модел WRF

За да се увеличи времевата резолюция на ГНСС данните, при пресмятането на водната пара са използвани и полета от модела WRF (Фигура 2).

Стъпка 1 - Данните за пълното зенитно закъснение от ГНСС мрежите се записват в таблица „GPS_IN“ на базата SUADA.

Стъпка 2 - Чрез програмата „parce_1D.gs“ от „extract.dat“ се извлича приземната температура T [K], налягането p [hPa] и височината на приземното ниво на модела WRF Z_0 [m].

Стъпка 3 - Чрез програмата „1D.py“ T [K], налягането p [hPa] и Z_0 [m] се записват в таблица „MODEL_IN“ в базата данни SUADA.

За улеснение двете програми „parce_1D.gs“ и „1D.py“ са обединени в едно, чрез „prcess_1D.sh“.

Стъпка 4 - Чрез програмата „iwv_wrf.sh“ и данните в „MODEL_IN“ и „GPS_IN“ се изчислява интегралното количество на водната пара за всички налични станции от двете мрежи (ZenithGeo и Greece, Фигура 3). След пресмятането IWV се записва в таблицата „GPS_OUT“ в базата данни SUADA.



Фиг. 3. Карта на използваните ГНСС данни от България (ZenithGeo в жълто) и Гърция в синьо.

Fig. 3. Map of the data used in this manuscript from Bulgaria (ZenithGeo in yellow) and Greece in blue.

Интегрираната водна пара (IWV) по метода ГНСС се изчислява чрез формулата:

$$IWV = \frac{10^6}{\left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2\right)R_v} ZWD$$

Съответно k_2 и k_3 са константи;

T_m [K] е средната температура в тропосферата;

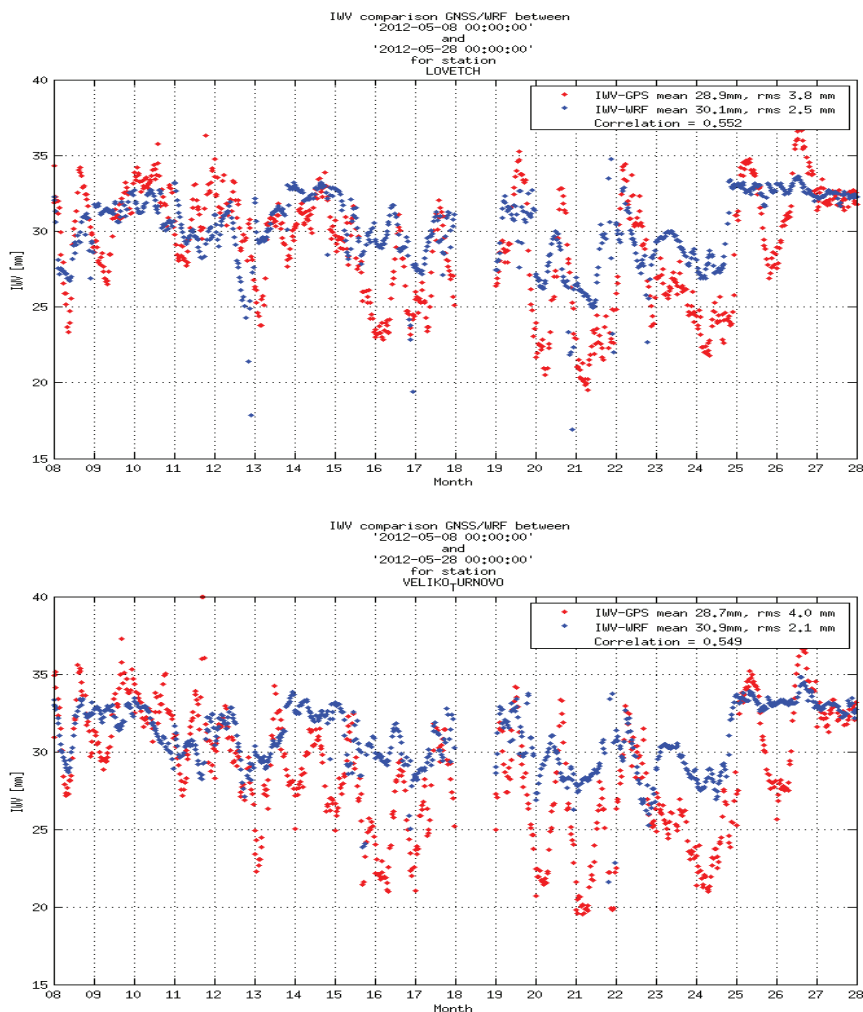
ZWD [m] е тоталното водно закъснение.

2. РЕЗУЛТАТИ

2.1. Сравнение на IWV от модела WRF и метода ГНСС – май 2012г.

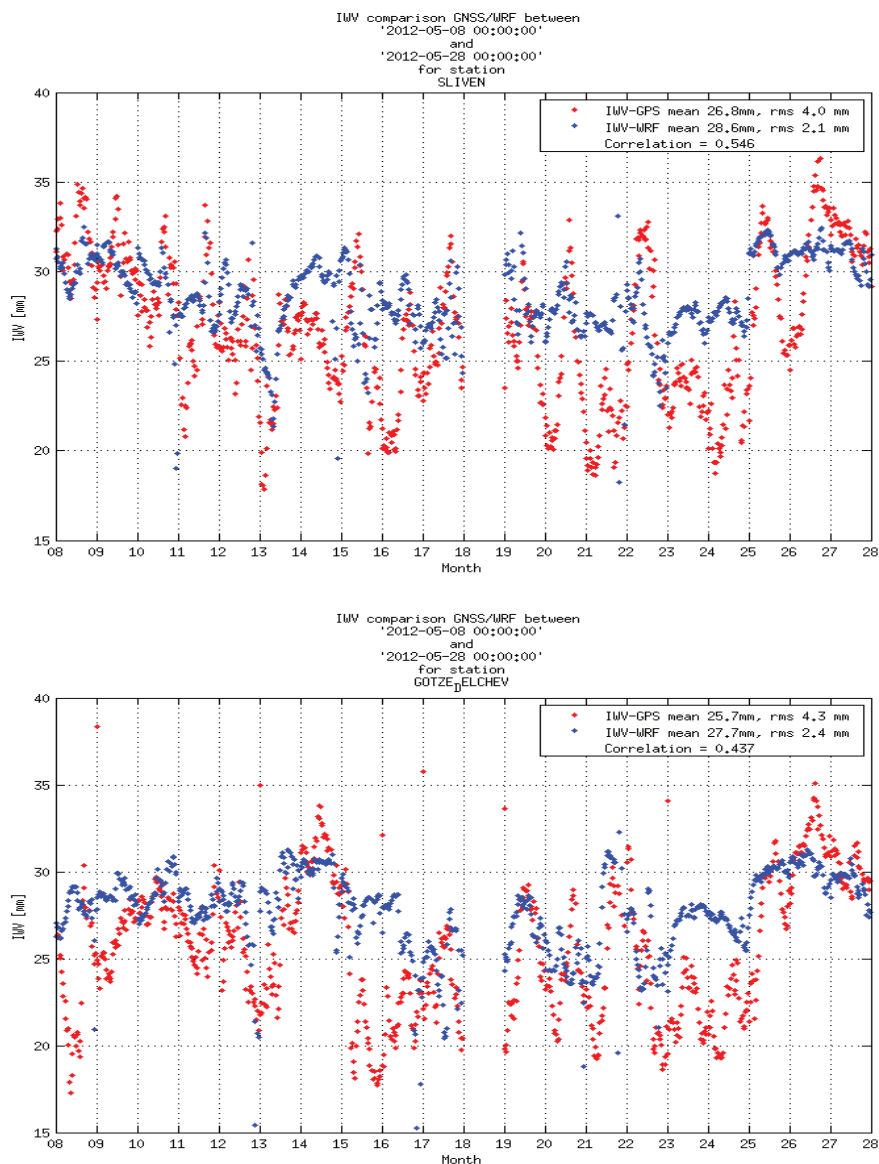
На фигура 4 е представено изменението на IWV за периода 8 - 28 май 2012 г. за четири станции в България: Ловеч и Велико Търново (първи ред на фигура 4); Сливен и Гоце Делчев (втори ред на фигура 4). Двете редици имат съществени разлики, като моделът систематично завишава стойностите на IWV . Той не успява да възпроизведе амплитудата на IWV . Вижда се също така и отместване във времето, макар и разликата в средните стойности за месеца да е между 1,1 и 2,3 mm. В някои от дните разликите достигат до 16 mm. На 16 май във всички станции водната пара от ГНСС е много по-ниска, като разликата в стойностите

спрямо WRF е между 8 и 12 mm. На 20 и 21 май също се наблюдават съществени отклонения, като наблюдаваната водна пара има минимум от около 20 mm в различните станции, а в модела е между 25 и 30 mm. Стойностите на IWV имат сходно поведение и на 24, 25 и 26 май.



Фиг. 4. Сравнение на IWV от WRF (синьо) и IWV по метода ГНСС (червено) за периода 8 – 28.05.2012 г. за четири станции в България: Ловеч, Велико Търново, Сливен и Гоце Делчев.

Fig. 4. Comparison of the IWV from WRF and GNSS (red) for the period 8 – 28.05.2012 in four stations in Bulgaria: Lovetch, Veliko Turnovo, Sliven, Gotze Delchev.

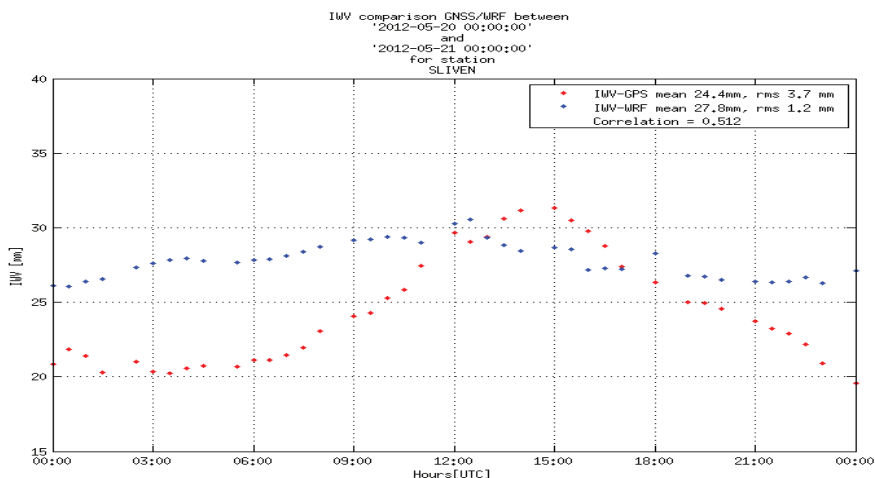


Фиг. 4. Продължение – Сравнение на *IWP* от WRF (синьо) и *IWP* по метода ГНСС (червено) за периода 8 – 28.05.2012 г. за четири станции в България: Ловеч, Велико Търново, Сливен и Гоце Делчев.

Fig. 4. Continued – Comparison of the *IWP* from WRF and GNSS (red) for the period 8 – 28.05.2012 in four stations in Bulgaria: Lovetch, Veliko Turnovo, Sliven, Gotze Delchev.

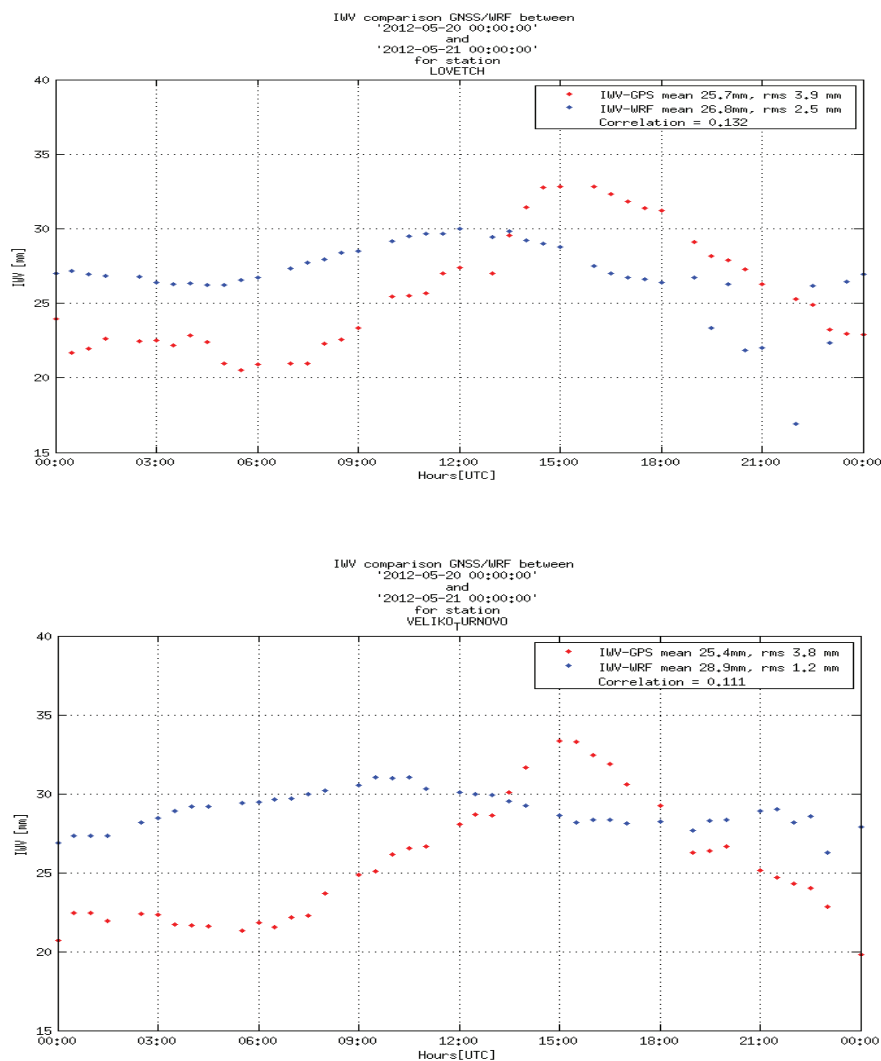
2.2. Синоптична обстановка от вътрешномасов характер – 20.05.2012г.

На картата на абсолютната топография на ниво 500 hPa (AT 500) се вижда, че България попада под влияние на тилната част на плитък циклон, чийто център бавно се премества на изток. Приземното поле на налягането над България е разрито циклонално. На картата на абсолютната топография на ниво 850 hPa (AT 850) се забелязва адвекция на топъл въздух от югозапад. В 00 UTC температурите във височина са $6 - 8^{\circ}\text{C}$, след 12 UTC от югозапад се настанява по-топла въздушна маса и температурите в Западна България достигат $10 - 11^{\circ}\text{C}$. При полето на относителната влажност на ниво 700 hPa се вижда, че през по-голямата част от деня относителната влажност почти повсеместно е $80\% - 90\%$, но привечер от запад започва да намалява и до полунощ над почти цялата страна е $50\% - 60\%$. По данни от наблюдателната мрежа на НИМХ най-значително е количеството на валежа в Сливен – 34 mm. В останалите райони от България валежите са около 2 mm. Валежът в Сливен е между 12 и 18 UTC, а максимумът на IWV в района е около 16 UTC и след това съществено намалява. От фигура 5 се вижда, че в станциите Ловеч, Велико Търново, Сливен и Гоце Делчев моделната водна пара е значително завишена спрямо водната пара, получена чрез метода ГНСС метеорология. Максимумите на *IWV* от модела WRF са между 9 и 12 UTC, а получените по метода ГНСС са в 15 UTC.



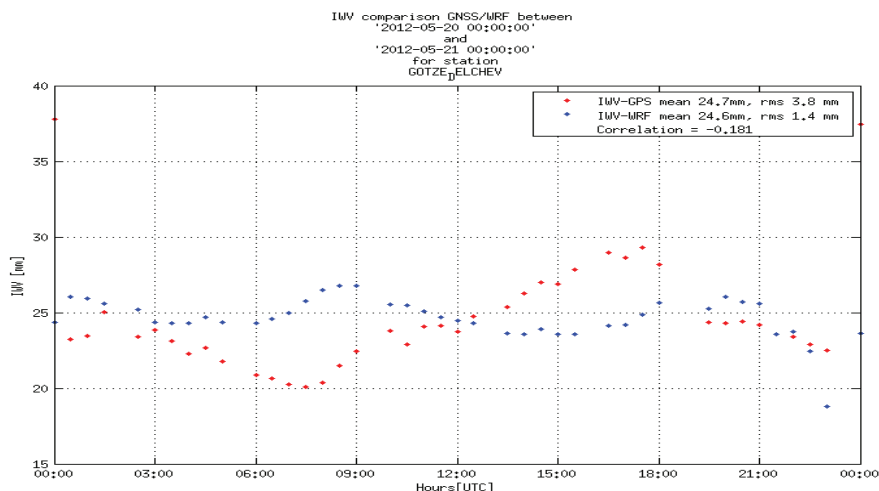
Фиг. 5. Сравнение на *IWV* от WRF (синьо) и *IWV* по метода ГНСС (червено) за 20 май за четири станции в България: Сливен, Ловеч, Велико Търново и Гоце Делчев.

Fig. 5. Comparison of the *IWV* from WRF (blue) and GNSS (red) for 20 May 2012 in four stations in Bulgaria: Sliven, Lovetch, Veliko Turnovo, Gotze Delchev.



Фиг. 5. Продължение – Сравнение на $I WV$ от WRF (синьо) и $I WV$ по метода ГНСС (червено) за 20 май за четири станции в България: Сливен, Ловеч, Велико Търново и Гоце Делчев.

Fig. 5. Continued – Comparison of the $I WV$ from WRF (blue) and GNSS (red) for 20 May 2012 in four stations in Bulgaria: Sliven, Lovetch, Veliko Turnovo, Gotze Delchev.



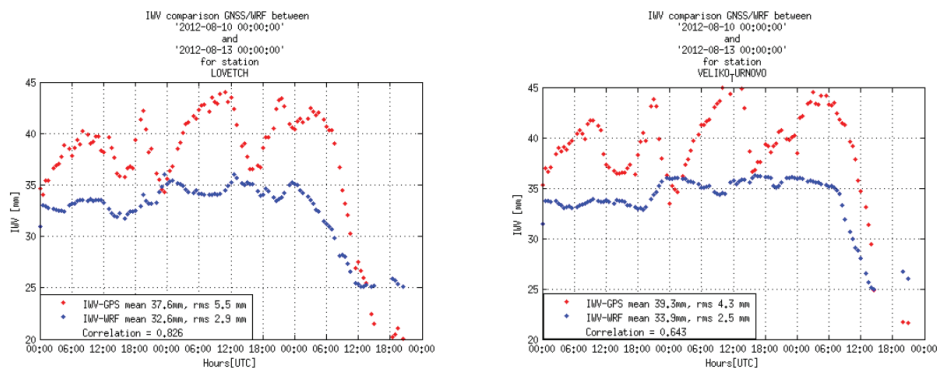
Фиг. 5. Продължение – Сравнение на *IIV* от WRF (синьо) и *IIV* по метода ГНСС (червено) за 20 май за четири станции в България: Сливен, Ловеч, Велико Търново и Гоце Делчев.

Fig. 5. Continued – Comparison of the *IIV* from WRF (blue) and GNSS (red) for 20 May 2012 in four stations in Bulgaria: Sliven, Lovetch, Veliko Turnovo, Gotze Delchev.

2.3. Синоптична обстановка от фронтален характер 10-12.08.2012г.

В периода 10 – 12 август през страната преминава студен атмосферен фронт. На картата на абсолютната топография на ниво 500 hPa България попада в челото на добре изразена барична долина. Към края на синоптичната обстановка във височина се формира циклонален вихър с център над Полша и Западна Украйна. В приземното поле на налягането България е повлияна от периферията на обширна област от високо атмосферно налягане, която обхваща по-голямата част от континента. В утринните часове на 10 август относителната влажност не е много висока – около 60%, а над черноморското крайбрежие около и под 30%. Постепенно тя се увеличава и около обяд над цялата страна е 75%. Следва понижение на относителната влажност, последвано от покачване, като стойностите ѝ достигат максимум на 12 август над Централна България до 90%. Следва отново понижение на относителната влажност. На картата на абсолютната топография на ниво 850 hPa на 10.08 - 12 UTC температурите над България са 14 -16 °C, в крайните югозападни райони до 19 °C. На 11.08 - 00 UTC от северозапад започва да нахлува студен въздух и до края на синоптичната обстановка (12.08 - 12 UTC) температурите се понижават и са между 9 и 14 °C. На 10.08 - 00 UTC интегрираната водна пара за района на София е около 35 mm. Количеството се

увеличава и на 11.08 към 12 UTC вече е над 35 mm в Северна България. След това, от запад, постепенно започва да намалява. Стойностите на IWV над Западна България се понижават до 25 mm, но над североизточните райони остават високи (Фигура 6). От началото на синоптичната обстановка най-значително количество на валежа е отчетено в София - 35 mm и Силистра - 43 mm.



Фиг. 6. Сравнение на IWV от модела WRF (синьо) и IWV по метода ГНСС (червено) в България за 10-12.08.2012г. за Ловеч и Велико Търново.

Fig. 6. Comparison of the IWV from WRF (blue) and GNSS (red) for 10-12.08.2012 in stations Lovetch and Veliko Turnovo.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа най-много от анализираните синоптични обстановки от фронтален и от вътрешномасов характер са през май 2012 г. От получените резултати се вижда, че и при двата типа обстановки численият модел завишава интегрираното количество на водна пара, спрямо тази, получена по метода ГНСС метеорология. Корелацията между моделната и получената по метода ГНСС метеорология водна пара е значително по-висока при фронталните нахлувания, но в някои случаи моделът занижава стойностите на IWV . При вътрешномасовите процеси корелацията е малка и често моделната и получена по метода ГНСС метеорология водна пара са отместени по фаза. Това е индикация, че численият модел не може да пресъздаде адекватно динамиката на IWV . Нашето предположение е, че използването на друга параметризационна схема за пресъздаване на микрофизиката на облачните клетки е възможно да подобри корелацията при вътрешномасовите процеси. За правилната оценка на интегрираната водна пара, като предиктор за интензивни валежи и градушки, е целесъобразно да се разгледа

и двумерното ѝ разпределение при фронтални, вътрешномасови и комбинирани синоптични обстановки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването е осъществено в рамките на Национална програма „Млади учени и постдокторанти 2018“, модул „Млади учени“ на Министерството на образованието и науката.

REFERENCES

- Бочева Л., Климатични вариации и оценка на опасни метеорологични явления по конвективни бури над България (1961-2010), докторска дисертация НИМХ-БАН, 132, 2014.
- Маркова Б., Влияние на условията в околната среда върху развитието на гръмотевишни облаци над Източна България, докторска дисертация СУ, 144, 2013.
- Baelen, J. V., M. Reverdy, F. Tridon, L. Labbouze, G. Dick, M. Bender, and M. Hagen, On the relationship between water vapour field evolution and the life cycle of precipitation systems, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137(S1), 204-223, doi:10.1002/qj.785, 2011.
- Brenot, H., et al., A GPS network for tropospheric tomography in the framework of the Mediterranean hydrometeorological observatory cevennes-vivaraais (southeastern France), *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 553-578, doi:10.5194/amt-7-553-2014, 2014.
- Graham, E., E. N. Koffi, C. Matzler, An observational study of air and water vapour convergence over the western Alps during summer and the development of isolated thunderstorms, *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 1-13, 2012.
- Guerova, G., T. Simeonov, N. Yordanova, The Sofia university atmospheric data archive (SUADA), *Atmospheric Measurement Techniques*, 7 (8), 2683-2694, 2014.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., & García-Bustamante, E. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3), 898-918, 2012.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682, 1997.
- Hong, Z., Campbell, A. M., Coombs, T. A. Numerical solution of critical state in superconductivity by finite element software. *Superconductor Science and Technology*, 19(12), 1246, 2006.
- Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H. L., Koren, V., Betts, A. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D3), 7251-7268, 1996.
- Lim, K. S. S., Hong, S. Y. (2010). Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly weather review*, 138(5), 1587-1612, 2010.