



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛ. ОХРИДСКИ“  
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ  
КАТЕДРА „МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА“

---

**Диагноза и прогноза на конвективни процеси  
в България по метода ГНСС метеорология и  
числено моделиране**

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

За присъждане на образователна и научна степен „доктор“ по специалност  
4.1 Физически науки – Метеорология.

на

**МАРТИН ЦВЕТАНОВ СЛАВЧЕВ**

Научен ръководител:

/доц. д-р Г. Герова/

Дисертантът е задочен докторант към на Катедра "Метеорология и геофизика", Физически факултет, Софийски университет "Свети Климент Охридски" в периода 2015-2020 г. Отчислен е с право на защита със заповед #РД20-1093 от 23.07.2020 г.

Дисертационният труд се състои от:

- Брой страници - 132
- Брой фигури - 48
- Брой таблици - 11
- Брой цитирани литературни източници - 90

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на 21.10.2022 г. от 16 часа в аудитория А415 на Физическия факултет към Софийски университет „Свети Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучер“ 5. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Физическия факултет към Софийски университет „Свети Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучер“ 5.

Благодаря на научния ми ръководител доц. д-р Гергана Герова за търпението и възможността да участвам в развитието на науката в България. За съвместната работа, насоките и помощта за реализиране на дисертацията. Благодаря от все сърце. Благодаря на колегите синоптици от НИМХ за подкрепата, разбирането и търпението по време на творческия ми отпуск. Благодаря на гл. ас. д-р А. Стойчева за търпението и съдействието при описването на синоптичните обстановки и всеотдайната помощ. Благодаря на гл. ас. д-р Милен Цеков за ценните насоки в областта на статистическия анализ. Благодаря на Цветелина Димитрова за безценните съвети при обработката на информацията в Глава 6 и за предаденият опит. Благодаря на младши експерт, старши лейтенант Деница Баракова, че ме изтърпя по време на творческия ми отпуск. Благодаря на проф. Керанка Василева за всеотдайната помощ и насоки в мътните за мен води на геодезията. Благодаря на цялото ми семейство за търпението, подкрепата и насоките в трудните моменти.

# Съдържание

<b>1</b>	<b>Актуалност и цел на дисертационния труд</b>	<b>1</b>
1.1	Актуалност на проблема . . . . .	1
1.2	Цел и задачи на дисертацията . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Съвременно състояние на проблема</b>	<b>3</b>
2.1	Изследване на конвективните процеси в България . . . . .	3
2.2	GNSS метеорология: опасни явления . . . . .	5
2.3	GNSS метеорология: Югоизточна Европа . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Метод на работа и използвана информация</b>	<b>9</b>
3.1	GNSS метеорология и наклонени тропосферни закъснения . . . . .	9
3.1.1	Проследяване на GNSS сигнала между спътника и приемника . . . . .	9
3.1.2	STD по метода GNSS метеорология . . . . .	10
3.2	Наземни мрежи за прецизни GNSS наблюдения . . . . .	11
3.3	Числен модел за прогноза на времето . . . . .	13
3.4	Интегрирана вода пара от WRF и GNSS . . . . .	13
3.5	Атмосферен реанализ ERA5 . . . . .	15
3.6	Индекси на неустойчивост и класификационни функции . . . . .	15
3.6.1	Наземни наблюдения: Ловеч и Пазарджик . . . . .	15
3.6.2	Класификационни функции за гръмотевична буря . . . . .	16
3.7	Оперативен сервиз BeRTISS . . . . .	16

<b>4</b>	<b>Анализ на IWV при фронтални и вътрешномасови обстановки</b>	<b>17</b>
4.1	IWV от GNSS и WRF: януари-септември 2012 г. . . . .	18
4.1.1	Анализ на IWV от GNSS и WRF: 8-28 май 2012 г. . .	18
4.1.2	Влияние на параметризацията на микрофизиката на облака. . . . .	19
4.2	Карти на двумерното разпределение на IWV за 27 юни 2012	22
4.3	Анализ на IWV и радарна информация за две обстановки с градушка/интензивни валежи . . . . .	23
4.3.1	Синоптична обстановка 5 юни 2012 г. . . . .	24
<b>5</b>	<b>Анализ на градушки в България с наклонени тропосферни закъснения</b>	<b>26</b>
5.1	Наклонени тропосферни закъснения: 7-9 юли 2014 г. . . . .	26
5.2	Градушка в София 8 юли 2014 . . . . .	29
5.2.1	Прекъсване на вълните на Росби . . . . .	29
5.2.2	Наклонени тропосферни закъснения от GNSS, WRF и ERA5: 8 юли 2014 . . . . .	31
5.3	Синоптична обстановка: 15-16 май 2019 г. . . . .	33
5.3.1	Наклонени и зенитни тропосферни закъснения: 16 май 2019 г. . . . .	34
<b>6</b>	<b>GNSS сервиз за опасни метеорологични явления</b>	<b>35</b>
6.1	Оперативен GNSS сервиз - BeRTISS . . . . .	36
6.1.1	Анализ на ZTD продуктите от център SUGAC . . . . .	36
6.1.2	Класификационни функции за гръмотевична дейност: май 2019 г. . . . .	37
6.1.3	Синоптична обстановка 15-16 май 2019 г. . . . .	39
6.2	Анализ на IWV от GNSS и WRF: Северозападна България .	41
6.2.1	IWV за дни с/без гръмотевична дейност . . . . .	41
6.2.2	Оценка на WRF IWV за Северозападна България: май-септември 2020 г. . . . .	41
6.3	Анализ на IWV от GNSS и WRF: Южна България . . . . .	43
6.4	Класификационни функции за гръмотевична дейност: Южна България . . . . .	43

<b>7</b>	<b>Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията</b>	<b>46</b>
7.1	Научни приноси . . . . .	46
7.2	Публикации по дисертацията . . . . .	47
7.2.1	Публикации в списания . . . . .	47
7.2.2	Публикация в разширен текст на научни форуми . . .	48
7.2.3	Публикация в глава на книга . . . . .	48
7.3	Представяне на резултатите . . . . .	48
<b>8</b>	<b>Заключение</b>	<b>50</b>

## Глава 1

# Актуалност и цел на дисертационния труд

### 1.1 Актуалност на проблема

Според *Doswell III and Schultz* (2006) "Независимо дали го осъзнават или не, много синоптици и изследователи търсят „магическия куршум“, когато предлагат поредната комбинирана променлива или индекс за разглеждане. Ако прогнозирането беше толкова просто, че да може да се направи ефективно с помощта на някаква единична променлива или комбинация от променливи, то необходимостта от работата на дежурният синоптик на практика, изчезва."

Прогнозата на конвективните процеси и свързаните с тях интензивни валежи са от първостепенно значение за свръхкраткосрочната прогноза

на времето в целия свят. Точното и навременно прогнозиране на развитието на конвективната облачност е от особено голямо значение и за оперативната работа на дежурния синоптик в Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ). Количеството диагностични и прогностични материали в днешно време е голямо и навременното му анализиране от дежурния синоптик става все по-непосилна задача. Този ефект е засилен при изготвянето на свръхкраткосрочна прогноза на опасни метеорологични явления и е пряко свързан с издаването на предупреждения в европейската система за ранно предупреждение - METEOALARM, на която България е член от 2009 г. Поради тази причина е необходим модерен и съвременен подход в анализа и прогнозирането на опасните метеорологични явления на територията на България.

Редица държави в Европа вече успешно прилагат получената по метода GNSS (Global Navigation Satellite System) метеорология интегрирана водна пара в оперативната практика на националните си служби. Редица учени изследват поведението на интегрираната водна пара, получена по метода GNSS метеорология, по време на интензивни валежи. Високата времева и пространствена резолюция на водната пара, получена по метода GNSS метеорология и числени симулации, позволява да се изследва състоянието на атмосферата непосредствено преди развитието на конвективните процеси. Безспорна е нуждата от разработване на нови и развитието на вече съществуващи методи за свръхкраткосрочна прогноза на интензивни валежи и градушки за нуждите на оперативната работа на НИМХ.

## 1.2 Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертацията е да се приложи метода GNSS метеорология в разработване на продукти за свръхкраткосрочна прогноза и при диагноза на опасни метеорологични явления от конвективен характер в България.

Свързаните с тази цел задачи са:

- Използване на метода GNSS метеорология при синоптични обстановки от фронтален и вътрешномасов характер с интензивни валежи

и/или градушки. Разработване на карти на двумерното разпределение на интегрираната водна пара. Сравнение на интегрираната водна пара получена по метода GNSS метеорология и числени експерименти.

- Анализ на наклонени тропосферни закъснения от GNSS, мезомащабен числен модел и атмосферен реанализ за две избрани синоптични обстановки с градушки и гръмотевични бури в България.
- Разработване и прилагане на класификационни функции и прагови стойности на GNSS IWV (Integrated Water Vapour) и индекси на неустойчивост за свръхкраткосрочно прогнозиране на гръмотевична дейност.

## Глава 2

# Съвременно състояние на проблема

### 2.1 Изследване на конвективните процеси в България

Изследваните облачни структури, валежи и гръмотевична дейност са разделени на две основни групи: фронтални и вътрешномасови. Циклоналните вихри и свързаните с тях фронтални системи играят основна роля при фронталните обстановки. Принудителното издигане на въздуха по фронталната повърхност се получава поради различните свойства на въздушните маси (студени и топли, сухи и влажни и т.н.). На границата на

две въздушни маси се образува тясна преходна зона наречена атмосферен фронт. Свободната термична конвекция е вид вертикално движение на въздуха, което се осъществява под формата на дискретни елементи, наречени "термици". Това са прегрети въздушни обеми (мехури) от влажен въздух, които се издигат под действие на подемната сила или като непрекъсната струя, започваща от приземния слой. Има различни, вече утвърдени подходи за изследване на конвективните процеси, като наземни наблюдения, аерологични сондажи, индекси на неустойчивост, радарна информация и спътникови изображения.

Конвективните процеси в България са обект на изследване в дисертационния труд на *Маркова* (2013) и *Бочева* (2014). Географското разположение и разнообразният терен на България характеризират високата честота и интензивност на гръмотевичните бури и градушките. Както в много други страни, през последното десетилетие се наблюдава увеличение на интензивността на градушките и проливните дъждове в България, *Bocheva et al.* (2018). Западна България е регионът с най-висока честота на гръмотевични бури в страната *Бочева* (2014) и най-висока в Европа, *Taszarek et al.* (2019). Изследване на *Петрова* (2012) и *Petrova and Mitzeva* (2019) за разпределението на мълниите през летните месеци над България и Черно море и *Petrova et al.* (2009) над Централното и Източното Средиземноморие показва, че плътността на мълниите над море е по-малка отколкото над континенталната повърхност.

*Бочева* (2014) изследва опасни метеорологични явления за периода 1961-2010 г. и установява, че няма статистически значима тенденция на намаляване или нарастване в многогодишното разпределение на валежите от град за цялата територия на България. По отношение на гръмотевичните бури и потенциално опасни валежи в поне два от изследваните райони е на лице статистически значима положителна линейна тенденция. Установено, е че средния брой дни с гръмотевична дейност и потенциално опасни и интензивни валежи има статистически значимо нарастване през периода 1991-2010 г. главно за районите от Източна България.

*Doswell III and Schultz* (2006) предлагат концепция за подходящо и не подходящо използване на диагностични променливи при прогнозиране на интензивни гръмотевични бури. Разработена е рамка за класифика-



ция на диагностичните променливи, която показва ограниченията на тези променливи и тяхната пригодност за оперативна диагностика и прогнозиране. Разглежда се добавената стойност на диагностичните променливи, като допълнителни параметри при прогнози на времето, както и разработването на нови диагностични променливи.

## 2.2 GNSS метеорология: опасни явления

В Европа методът GNSS метеорология се разработва в рамките на няколко европейски проекта и научната мрежа European Cooperation in Science and Technology, COST 716 (*Elgered et al. (2005), 1999-2004*), но установяването ѝ в цяла Европа беше постигнато в рамките на COST акция ES1206 „Усъвършенствани глобални навигационни спътникови системи за тропосферни продукти за изследване на опасни метеорологични явления и климат“ (GNSS4SWEC, 2013-2017 г., *Jones et al. (2020a)*). От 2006 г. оперативният сервиз E-GVAP (*Egvar*), част от програмата EUMETSAT, предоставя GNSS тропосферни продукти в близко до реалното време (Near Real Time - NRT) за нуждите на националните метеорологични служби. За повече от 15 години GNSS метеорологията в Европа постигна изключително сътрудничество между метеорологичните и геодезическите общности.

Проучвания в Португалия от *Benevides et al. (2015)* показват, че промяната на Integrated Water Vapour (IWV) получена по метода GNSS метеорология корелира с валежите и може да се използва за прогнозиране на обилни валежи от дъжд. Скорошно проучване на *Benevides et al. (2019)* се фокусира върху краткосрочната прогноза на интензивни валежи, използвайки невронни мрежи и интегриране на IWV с метеорологична информация. Отчетено е подобрене в вероятността за регистрацията на събития с интензивни валежи с добър класификационен резултат между 63% и 72%. Регистрирано е и намаляване на броя на фалшиво положителните аларми до около 21%. *Huelsing et al. (2017)* изследват наводнения в Колорадо, САЩ, които са причинени от интензивни валежи и са в периода между 9 и 16 септември 2013 г. Анализът на IWV за 10-годишен период показва, че през 2013 г. сезонния максимум на IWV е удължен до началото на септември. Непосредствено преди наводненията е установено бързо

нарастване на IWV от  $22 \text{ kg/m}^2$  на  $32 \text{ kg/m}^2$  и остава около  $30 \text{ kg/m}^2$  за цялия период. *Baelen et al.* (2011) изучава връзката между изменението на водната пара и валежите по време на интензивна наблюдателна кампания в района на Шварцвалд през лятото на 2007 г. Те 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. *Mazany et al.* (2002) предлага модел с двуична логистична регресия, който да комбинира GPS IWV с начални предиктори, главно метеорологични параметри. Тази комбинация се използва за разработването на индекс за гръмотевичната дейност. Те постигат обещаващи резултати, но изследването е фокусирано само за един район в САЩ (Kennedy Space Center, Florida).

Няколко проучвания изследват пространствено-времените промени на IWV по време на интензивни валежи, гръмотевични бури и обстановки с преминаване на тропически циклони *Sapucci et al.* (2019); *Li and Deng* (2013); *Iwabuchi et al.* (2000); *Song and Grejner-Brzezinska* (2009); *Zhang et al.* (2015). Най-често се наблюдава повишаване на IWV с максимален пик преди началото на валежите и понижение на IWV след събитието *Sapucci et al.* (2019); *Li and Deng* (2013); *Barindelli et al.* (2018); *Song and Grejner-Brzezinska* (2009). Въпреки това, повишението и изместването във времето между IWV и пиковете на валежите се различават за отделните изследвани случаи. Наблюдаваният ръст на IWV свързан с интензивните валежи, е в основата на разработването на системи за ранно предупреждение въз основа на прагови стойности на IWV в комбинация с индекси на неустойчивост *Priego et al.* (2017); *Benevides et al.* (2015, 2019); *Guerova et al.* (2019).

## 2.3 GNSS метеорология: Югоизточна Европа

Докато в Западна и Централна Европа GNSS метеорологията е добре развита и е част от оперативната дейност, в Южна и особено Югоизточна Европа тя е в процес на разработване. Като първа стъпка в използването на GNSS метеорологията в България и Югоизточна Европа през 2012 г. беше разработена регионална база данни, "Архив за атмосферни данни

на Софийския университет” (Sofia University Atmospheric Data Archive - SUADA, *Guerova et al.* (2014)). GNSS данните от SUADA се използват за изследване на обстановки с гръмотевични бури за София *Guerova et al.* (2019), както и за анализ и прогноза на мъгла (*Stoycheva and Guerova* (2015), *Stoycheva et al.* (2017)). България участва активно в GNSS4SWEC и в сътрудничество с Люксембургския университет през 2014 г. се проведе първата кампания за обработка на SUGAC. В първата кампания за обработка на SUGAC *Jones et al.* (2020b), 7 български GNSS станции бяха обработени за една година, в резултат на което бяха получени тропосферни продукти с висока времева разделителна способност от 5 минути. Отчетено е много добро съгласуване между GNSS и IWV получена от числения модел за прогноза на времето (Weather Research and Forecast, WRF) с корелация 0.95 през студената част на годината (март, октомври и декември 2013 г.) и корелация под 0.9 през топлата част на годината (от април до август 2013). Дневният цикъл на WRF IWV показва сухо отклонение в диапазона от 0.5 - 1.5  $m^2$ . Първата кампания за обработка на SUGAC показва ползата от IWV, получена от GNSS за оценка на WRF в България.

GNSS4SWEC доведе до установяване на сътрудничество между България, Кипър и Гърция в рамките на програмата за транснационално сътрудничество Интеррег за района на Балканите и Източното Средиземноморие. През 2017 г. стартира регионалния проект ”BalkanMed real time severe weather service” (BeRTISS, *Guerova et al.* (2020)). Основната цел на проекта BeRTISS е да създаде пилотна транснационална услуга за прогноза на опасни метеорологични явления, чрез използване на GNSS тропосферни продукти за повишаване на безопасността, качеството на живот и опазването на околната среда в региона. Агенция за борба с градушката (ИАБГ) и Софийския Университет ”Св. Климент Охридски” са партньори по проекта BeRTISS.

Това е предпоставка за изследване на множество синоптични обстановки с опасни метеорологични явления, чрез GNSS тропосферни продукти и дава възможност за оценка на приложимостта им при прогнозиране на опасните метеорологични явления.

Алтернативен подход за изчисляването на тропосферните закъс-

нения в посока на спътника (Slant Total Delay, STD) и в посока зенит (Zenith Total Delay, ZTD) може да бъде методът за обратно проследяване на пътя на сигнала между спътника и приемника (Ray-Tracing, RT). При този подход траекторията на GNSS сигнала се реконструира въз основа на метеорологични параметри от различни източници на информация, като аерологични сондажи, радиометри или по-специално, модели за числена прогноза на времето (NWPm) (*Deng et al. (2011)*, *Hobiger et al. (2008)*, *Hofmeister (2016)*, *Feng et al. (2020)*). Тропосферните закъснения получени от GNSS и RT могат да послужат, като допълнително средство за изследване на обстановки с опасни метеорологични явления и за оценка на способността на числените модели за прогноза на времето за прогнозирането им (*Deng et al. (2011)*, *Li et al. (2015)*, *Ha et al. (2002)*). *Ha et al. (2002)* е сред първите, които сравнява наклонените тропосферни закъснения за водната пара (Slant Wet Delays, SWD) от GPS с прогноза на числения модел за прогноза на времето MM5 с пространствена област от 9 km за обстановка с преминаване на шквалова линия през Канзас и Оклахома в края на октомври 1999 г. Резултатите показват потенциала на GPS-SWD

да регистрират резките и малки промени във влагата.

## Глава 3

# Метод на работа и използвана информация

### 3.1 GNSS метеорология и наклонени тропосферни закъснения

#### 3.1.1 Проследяване на GNSS сигнала между спътника и приемника

Преминавайки през атмосферата, сигналът от GNSS се влияе от съставляващите я газове, аерозоли и хидрометеори. Пътят на GNSS сигнала, във всяка произволна посока, може да бъде възпроизведен от метеорологичната информация, като например тази, получена от числените модели. За целта се използва метод за проследяване на сигнала между спътника и приемника (Ray-tracing, RT). Проследяването на GNSS сигнала позволява да се изчислят наклонените тропосферни закъснения (STD). В тази дисертация се прилага методологията, приложена от *Lasota et al.* (2020) за двумерно проследяване на сигнала, чрез стъпкова линейна функция (2 Dimensional Piecewise Linear, 2D). При 2D методите хоризонталните градиенти на пречупване се пренебрегват, тъй като те са значително по-малки в сравнение с вертикалните градиенти. Това допускане предполага, че GNSS сигналът не напуска равнината на постоянния азимут ( $A$ ). Като се имат предвид азимутът и ъгълът спрямо хоризонта, на който се вижда спътника

$ea$ , пътят на лъча се моделира итеративно, следвайки линейните сегменти ( $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ ), свързващи станцията и спътника. За да се реконструира RT, тримерното поле на пречупване  $N$  трябва да бъде пресметнато въз основа на основните метеорологични елементи от числените модели за прогноза на времето, а именно: температура ( $T$ , в  $K$ ), налягане ( $P$ , в  $hPa$ ) и парциално налягане на водата пара ( $e$ , в  $hPa$ ). Пречупването  $N$  зависи от честотата на сигнала. Съответно стойностите на наклонените пътища се определят, чрез използване на средните стойности на коефициента на пречупване  $n$  в линейни сегменти  $s$  по пътя между приемника и атмосферата за нива  $k$ .

$$STD_{2D} = \sum_{i=1}^{k-1} [(n_i - 1)s_i] \quad (3.1)$$

Получените STD могат да се разделят на наклонени хидростатични закъснения (Slant Hydrostatic Delay, SHD), наклонени влажни закъснения (Slant Wet Delay, SWD) и наклонени закъснения от хидрометеори (Slant Hydrometeor Delay, HySHmD). Хидростатичната компонента на забавяне включва натрупания геометричен ефект на огъване по пътя на сигнала. Пълното зенитно закъснение (ZTD) може да бъде разглеждано, като частен случай на STD, при което  $ea$  на всяко ниво във височина е равен на  $90^\circ$ . В тази дисертация получените по метода RT, STD и ZTD могат да се използват за оценка на числените симулации при интензивни валежи и/или градушка. За целта са пресметнати относителните разлики между GNSS(STD/ZTD) и тропосферните продукти STD/ZTD (2D). Те се изчисляват по следните формули:

$$\begin{aligned} dSTD_{frac} &= \frac{STD_{GNSS} - STD_{2D}}{STD_{GNSS}} \cdot 100\% \\ dZTD_{frac} &= \frac{ZTD_{GNSS} - ZTD_{2D}}{ZTD_{GNSS}} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (3.2)$$

### 3.1.2 STD по метода GNSS метеорология

В дисертацията е използвана процедурата, описана в *Lasota et al.* (2020). Обработката на GNSS наблюденията е направена със специализирания

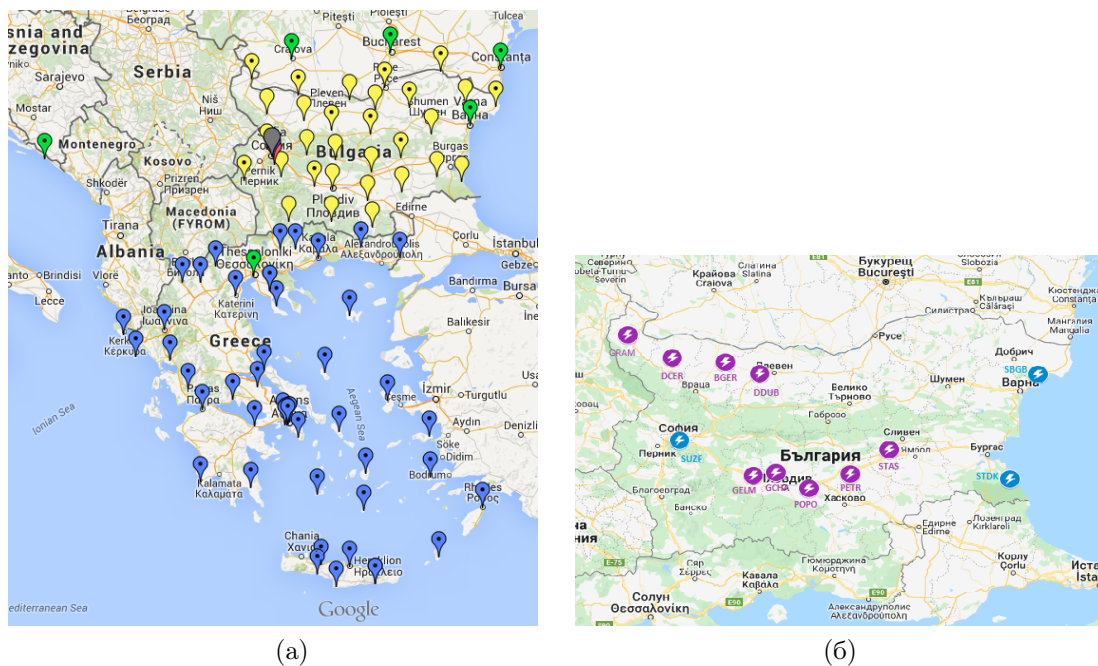
софтуер (Bernese 5.2) в режим на прецизно позициониране на точки (PPP) и с ъгъл на срязване от  $3^\circ$ , *Dach et al. (2015)*. От всички налични спътникови системи са използвани само GPS наблюдения. STD и градиентите са изчислени с времева разделителна способност съответно 15 минути и 1 час. STD са определени за всяко наблюдение между спътник и приемник, чрез коригиране на ZTD посредством линейни хоризонтални тропосферни градиенти, които отразяват асиметрията на тропосферата. Трансформацията от наклонени закъсненията към закъснения в посока зенит може да бъде направена с помощта на модели на проекция на сухата (хидростатичната) ( $mf_h$ ) и влажната ( $mf_w$ ) част на тропосферните закъснения и компонентите за хоризонталения градиент ( $mf_g$ ), предложени от (*Chen et al. (1996)*, *Chen and Herring (1997)*). Тъй като хоризонталните градиенти представляват само анизотропия на тропосферата от първи ред, остатъчните членове от анализа на фазата (Residual, RES) трябва да бъдат оценени заедно с други параметри. В заключение наклонените тропосферни закъснения в посока спътник могат да бъдат записани като:

$$STD_{GNSS}(ea, az) = ZHD \cdot mf_h(ea) + ZWD \cdot mf_w(ea) + G(ea, az) + mf_g(ea) \cdot (GN \cdot \cos(az) + GE \cdot \sin(az)) + RES(ea, az), \quad (3.3)$$

където  $GN$  и  $GE$  са компонентите на градиента север-юг и изток-запад,  $az$  е азимутът,  $ea$  е ъгълът на повдигане,  $mf_g(ea) = 1/(\sin(ea) \cdot \tan(ea)) + C$  а  $C = 0.0032$ .

## 3.2 Наземни мрежи за прецизни GNSS наблюдения

В дисертационния труд е използвана информация от наземната GNSS мрежа в България, собственост на фирмата "Зенит-Гео" ЕООД. Компанията има собствена мрежа от 30 перманентни високоточни GNSS станции, фигура 3.1 а). За територията на Гърция е използвана информация от 80 GNSS перманентни високоточни станции, фигура 3.1 а). Тропосферните закъснения и от двете мрежи са с времева разделителна способност от 1 час.



Фигура 3.1: Карта с GNSS мрежата на а) ЗенитГео (жълто); Гърция (синьо) и б) ИАБГ (лилаво); СУ (синьо).

Като част от проекта VeRTISS в България беше създадената наземната GNSS мрежа. Тя се състои от общо 12 наземни високоточни GNSS станции показани на фигура 3.1 б), като 9 са на Изпълнителна агенция „Борба с градушките“ (ИАБГ) и 3 са на Софийски университет „Свети Климент Охридски“. Наземните GNSS станции предоставят информация на всеки час в оперативния център за GNSS обработка на СУ (SUGAC), *Guerova et al.* (2020). За изследване на интензивната градушка в София на 8 юли 2014 г., в дисертационния труд е използвана информация от единствените две свободнодостъпни наземни GNSS станции. Първата е станция SOFI, тя е част от международната GNSS мрежа (International GNSS Service, IGS) и се намира в Плана планина, на югоизток от град София. Втората станция SOF1, която е от частната GNSS мрежа на фирмата *1Yocto* се намира в югоизточната част на град София.



### 3.3 Числен модел за прогноза на времето

За целта на изследването е използван числен модел за прогноза на времето “Weather Research and Forecasting” (WRF). Моделът е разработен съвместно от “Националния център за атмосферни изследвания”, “Лабораторията за прогнозни системи”, “Националния център за околната среда”, “Националната администрация за океаните и атмосферата” и “Центърът за анализ и прогнозите на бури”. WRF е конфигуриран и се изчислява на кльстъра на Физическия факултет - PhysOn. WRF е нехидростатичен модел и в дисертационния труд не е използвана асимилация на информация. Началните и гричните условия са от Global Forecast System (GFS), а хоризонталната разделителна способност е  $0.50^\circ$ . Вертикалните нива са 44, неравномерно разпределени и достигат до височина 20 km. Използвани са две версии на WRF. В таблица 3.1 са представени основните разлики между хоризонталната, вертикалната и времевата разделителна способност между версия v3.4.1 и v3.7.1.

Версия	Верг. (нива)	Области (брой)	Хор. (км)	Изход (мин.)
v3.4.1	44	2	9 - 4	60 - 30
v3.7.1	44	3	18 - 6 - 2	180 - 30 - 15

Таблица 3.1: Хоризонтална, вертикална и времева разделителна способност на WRF версия v3.4.1 и v3.7.1.

### 3.4 Интегрирана вода пара от WRF и GNSS

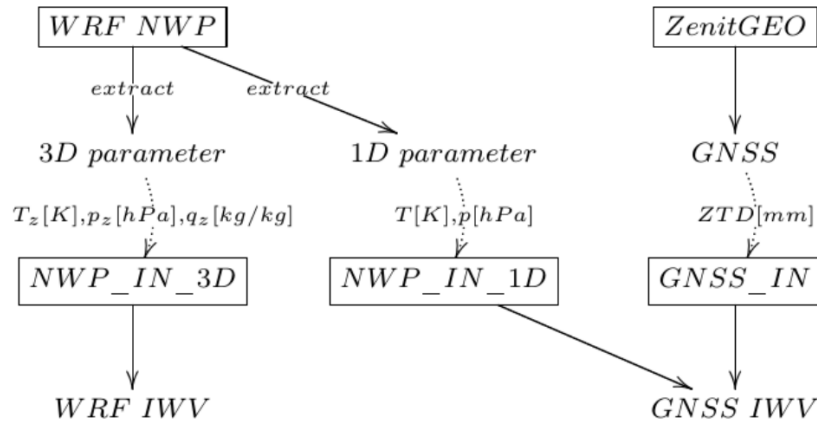
Методиката, по която се изчислява WRF IWV и GNSS IWV е представена на фигура 3.2. За GNSS IWV се използва приземното налягане  $p$  [hPa] и температурата  $T$  [K] от WRF. За получаване на WRF IWV се използва температурата  $T_z$  [K], налягането  $p_z$  [hPa] и специфична влажност  $q_z$  [kg/kg] на различни нива  $z$  [m]. WRF IWV се пресмята като се интегрира специфичната влажност на всички нива, за всяка от точките в мрежата на модела. Използва се следната формула:

$$I WV = \int_z^{z_n} \frac{p \times q}{R_v \times T} (z) dz \quad (3.4)$$

Съответно  $n$  е броя на нивата в модела;  $p$  [hPa] е приземното налягането;  $T$  [K] е приземната температура;  $R_v$  е специфичната газова константа за водната пара;  $q$  [kg/kg] е специфичната влажност;  $z$  е височината. IWV по метода GNSS метеорология се пресмята по формулата:

$$I WV = \frac{10^6}{\left(\frac{k_3}{T_m} + k_2\right) R_v} ZWD \quad (3.5)$$

Съответно  $k_2$  и  $k_3$  са константи,  $T_m$  [K] е средната температура в тропосферата и  $ZWD$  [m] е зенитното закъснение от водната пара.



Фигура 3.2: Поток от информация за изчисляване на WRF-IWV и GNSS-IWV.

## 3.5 Атмосферен реанализ ERA5

ERA5 е пето поколение глобален атмосферен реанализ направен от ECMWF, *Hersbach et al.* (2020). Основните промени по сравнение с предишните реанализи включват подобро качество и точност, както и подобрена хоризонтална и времева разделителна способност от  $0.25^\circ$  (около 31 km) и 1 час в сравнение с  $0.75^\circ$  (около 80 km) и 6 часа за четвъртото поколение реанализ (ERA-Interim). В дисертационния труд е пресметната величината интегриран транспорт на водна пара (Integrated Vapour Transport, IVT). За целта са използвани вертикалните профили на геопотенциала, температурата, специфичната влажност. Следователно IVT [ $kgm^{-1}s^{-1}$ ] се изчислява, както се интегрира специфичната влажност ( $q$ ) и компонентите на вятъра: зонална ( $u$ ) и меридионална ( $v$ ) за последователни барични нива ( $p$ ) между земната повърхност и горната граница на атмосферата, *Mahlstein et al.* (2019). IVT се изчислява по формула 3.6:

$$IVT = \frac{1}{g} \sqrt{\left[ \int_{p=1000}^{p=0} q(p)u(p) dp \right]^2 + \left[ \int_{p=1000}^{p=0} q(p)v(p) dp \right]^2}. \quad (3.6)$$

## 3.6 Индекси на неустойчивост и класификационни функции

### 3.6.1 Наземни наблюдения: Ловеч и Пазарджик

В дисертационния труд е оценен периодът с най-топлите пет месеца в годината, между май и септември и е разделен на дни с гръмотевична дейност (ТН) и дни без гръмотевична дейност (НО) в станция Ловеч (за 2012 - 2017 г.) и Пазарджик (за 2020 - 2021 г.). Наземните синоптични наблюдения са направени от наблюдатели към НИМХ, в 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 и 21:00 UTC в синоптичните станции Ловеч и Пазарджик.

### 3.6.2 Класификационни функции за гръмотевична буря

Разработени са класификационни функции на базата на индекси на неустойчивост (Instability Indices, InI) и IWV за Южна България. Аерологичните сондажи за пресмятане на индексите са от София, като са избрани само тези от 12:00 UTC. Избраните индекси на неустойчивост са както следва: Severe Weather Threat Index (SWEAT) и Totals Totals Index (TT) (*Miller (1972)*); K Index (K) (*George (2014)*); Lifted Index (LI) (*Galway (1956)*); Convective Available Potential Energy (CAPE) (*Glickman and Zenk (2000)*); Bulk Richardson Number (BRN) (*Weisman and Klemp (1982)*). Приложена е методиката представена в *Guerova et al. (2019)*. Направен е стандартен дискриминантен анализ, чрез специализирания софтуер за статистическа обработка на StatSoft, Statistica, v13.5.0.17, *StatSoft (2001)*. Изчислени са прагови стойности за IWV. Поетапният дискриминантен анализ е използван за разработване на класификационни функции  $F(\text{TH}, \text{NO})$ , които определят от какъв тип е всеки ден от разглеждания период, базиран на: (1) интегрирана водна пара  $F1(\text{IWV})$ ; индекси на неустойчивост  $F2(\text{InI})$  и (3) IWV и индекси на неустойчивост  $F3(\text{IWV}\&\text{InI})$ . Стойностите на  $F(\text{TH}, \text{NO}) \geq 0$  класифицират случая, като гръмотевична буря. Следните критерии за оценка са приложени за класификационните функции:

1. Probability of detection (POD):  $\text{POD} = \text{THC} / (\text{THC} + \text{THI})$
2. False alarm ratio (FAR):  $\text{FAR} = \text{NTHI} / (\text{THC} + \text{NTHI})$

Където THC е броя на правилно класифицираните случаи с гръмотевична дейност, THI е броя на неправилно класифицираните дни с гръмотевична дейност и NTHI е броят на неправилно класифицираните дни без гръмотевична дейност.

## 3.7 Оперативен сервиз BeRTISS

Наземната мрежа на BeRTISS, която се обработва от центъра за анализ SUGAC е оперативна от 2018 г. От януари 2020 г. информацията

от SUGAC се обработва в близко до реалното време (NRT) със специализирания софтуер TropNET, *Douša* (2014). За обработка на GNSS информацията се използва и специализирания софтуер на Университета в Берн, версия 5.2 (Bernese5.2, *Dach et al.* (2015)). Беше създаден български интегриран продукт за свръхкраткосрочна прогноза (БИНКА), който се състои от девет високоточни GNSS станции на Изпълнителна агенция "Борба с градушките" (ИАБГ) и три на Софийски университет "Св. Климент Охридски" (СУ). За да се пресметне IWV се използва числения модел WRF v3.7.1. Всеки ден на изчислителния клъстер на СУ - PhysOn се стартира числена симулация с начално време 00:00 UTC и времеви интервал на прогнозата от 24 часа. Използва се само пространствената област с хоризонтална разделителна способност от 2 km, а началните и граничните условия са от численият модел GFS. В БИНКА е интегрирана и радарната информация от 7 доплерови радарни станции, като времето необходимо за едно пълно обемно сканиране е около 4 минути. Специализиран софтуер за обработка на радарната информация генерира продукти на база обемните сканирания на метеорологичните радарни станции. Интегрираната водна пара получена по метода GNSS метеорология, радарната информация, наземните наблюдения и числените симулации са обединени в интернет платформата на БИНКА.

## Глава 4

# Анализ на IWV при фронтални и вътрешномасови обстановки

В тази глава на дисертационния труд са избрани и анализирани 20 синоптични обстановки за периода януари - септември 2012 г. За числените

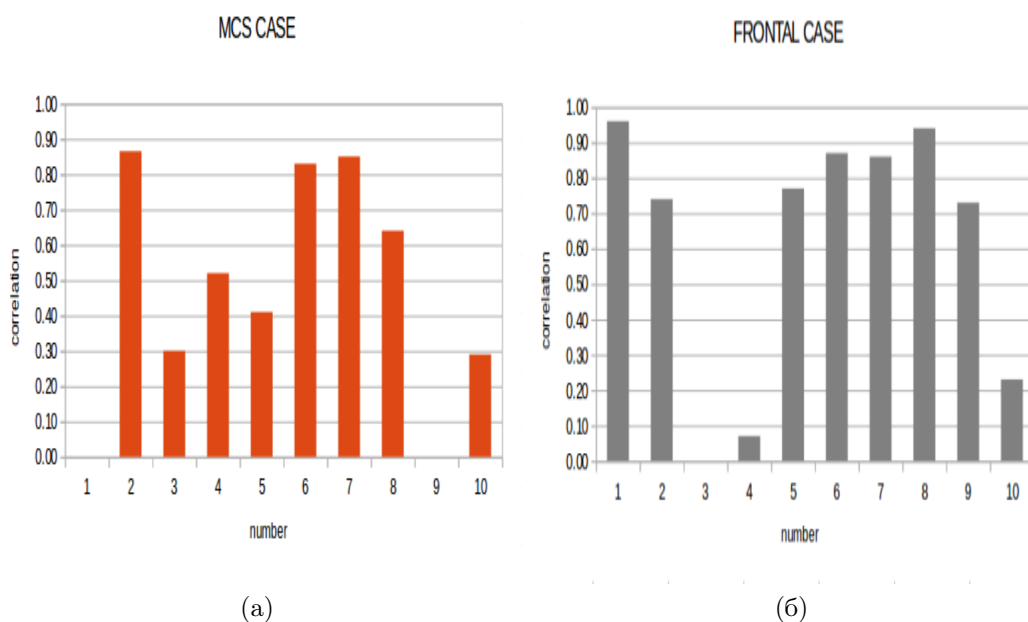
симулации е използван WRF v3.4.1 с хоризонталната разделителна способност от 4 km, а вертикалните нива са 44 и са неравномерно разпределени. Числената прогноза е за период от 24 часа.

## 4.1 IWV от GNSS и WRF: януари-септември 2012 г.

Като първа стъпка в изследването синоптичните обстановки са разделени по два основни критерия. Половината са свързани с преминаването на атмосферно смущение/фронт (*frontal cases*). Другата половина от изследваните обстановки са от вътрешномасов характер (*mesoscale convective cases*). Броят на обстановките от вътрешномасов характер по месеци е както следва: февруари - една; април - една; май - четири; юни - три и юли - една. Броят на обстановките от фронтален характер по месеци е както следва: януари - две; март - една; април - една; май - четири; август - една и септември - една. Прави впечатление, че 36% от изследваните синоптични обстановки са през месец май. На фигура 4.1 е показано разпределението на коефициентите на корелация между WRF и GNSS, за вътрешномасови и фронтални обстановки. Анализа на резултатите показва, че WRF корелира по-добре в обстановките от фронтален характер, като 7 от 10 случая са с коефициент над 0.70. При обстановките от вътрешномасов тип (MSC) само 3 са с коефициент над 0.70.

### 4.1.1 Анализ на IWV от GNSS и WRF: 8-28 май 2012 г.

Подробно е изследван месец май, периода 8 и 28 май 2012 г., защото той е с най-висока концентрация на опасни метеорологични явления - 6 от изследваните общо 20 обстановки. Описание на синоптичната обстановка и опасните метеорологични явления за месеца е представена в месечения хидрометеорологичен бюлетин на НИМХ (2012, май, <http://www.meteo.bg/>, ISSN 2815-2743). За първия числен експеримент с WRF за параметризация на конвективните процеси е използвана схемата на Kain-Fritsch. Направе-

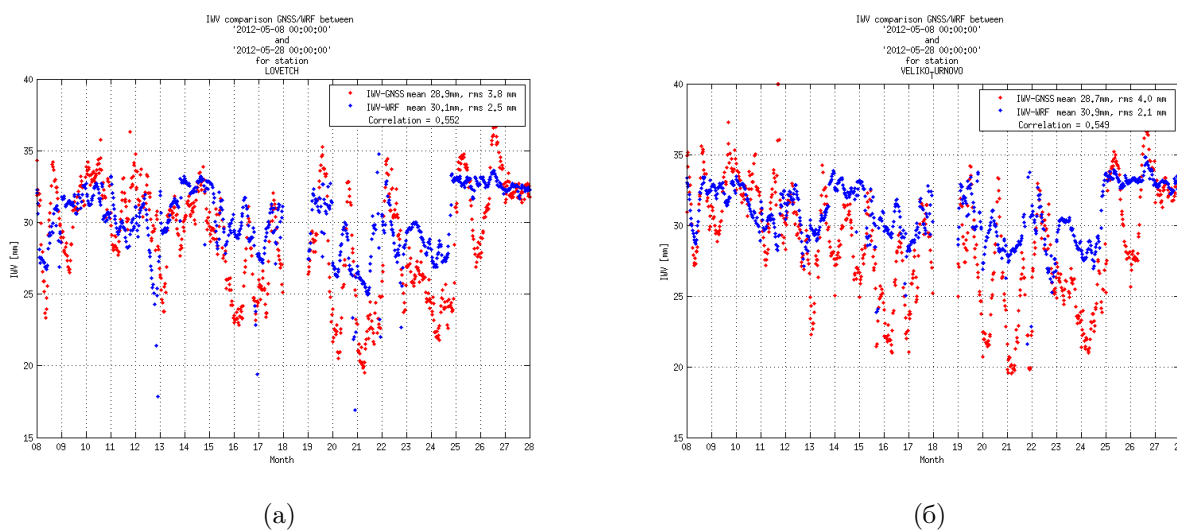


Фигура 4.1: Коефициент на корелация между WRF и GNSS за: а) вътрешномасови и б) фронтални обстановки.

но е сравнение на GNSS IWV и WRF IWV за станциите Ловеч и Велико Търново (фигура 4.2). Моделът систематично завишава стойностите на IWV и не успява да възпроизведе денонощния ход. Вижда се също така и отместване във времето, макар и разликата в средните стойности за месеца да е между 1,1 и 2,3  $kg/m^2$ . В някои от дните разликите достигат до 16  $kg/m^2$ . На 16 май във всички станции водната пара от GNSS е много по-ниска, като разликата в стойностите спрямо WRF е между 8 и 12  $kg/m^2$ . На 20 и 21 май също се наблюдават съществени отклонения, като наблюдаваната водна пара има минимум от около 20  $kg/m^2$  в различните станции, а на модела е между 25 и 30  $kg/m^2$ . Стойностите на IWV имат сходно поведение на 24, 25 и 26 май.

#### 4.1.2 Влияние на параметризацията на микрофизиката на облака.

За втория числен експеримент с WRF е направено сравнение на IWV от две числени симулации с различни параметризации на микрофизиката на

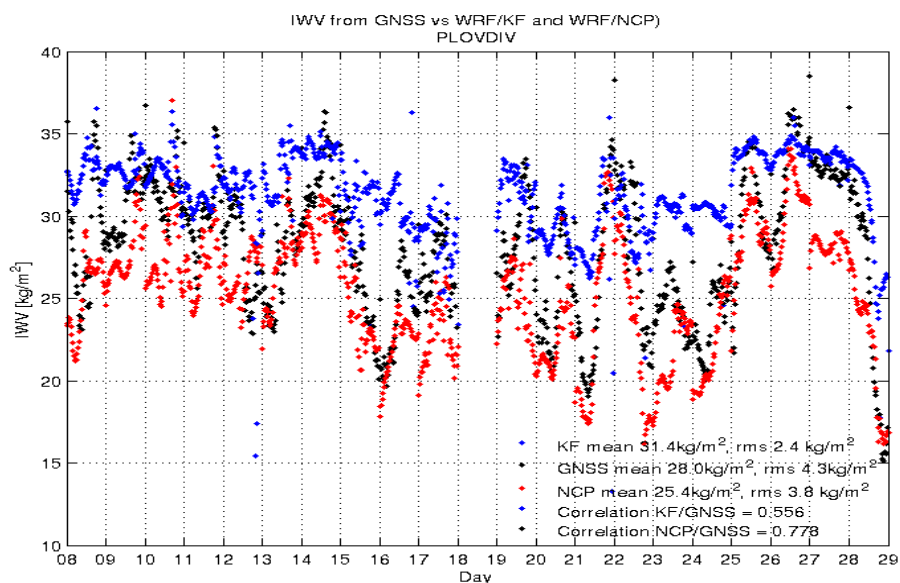


Фигура 4.2: Сравнение на WRF IWV (синьо) и GNSS IWV (червено) за периода 8 – 28 май 2012 г. за а) Ловеч б) Велико Търново в) Сливен и г) Гоце Делчев.

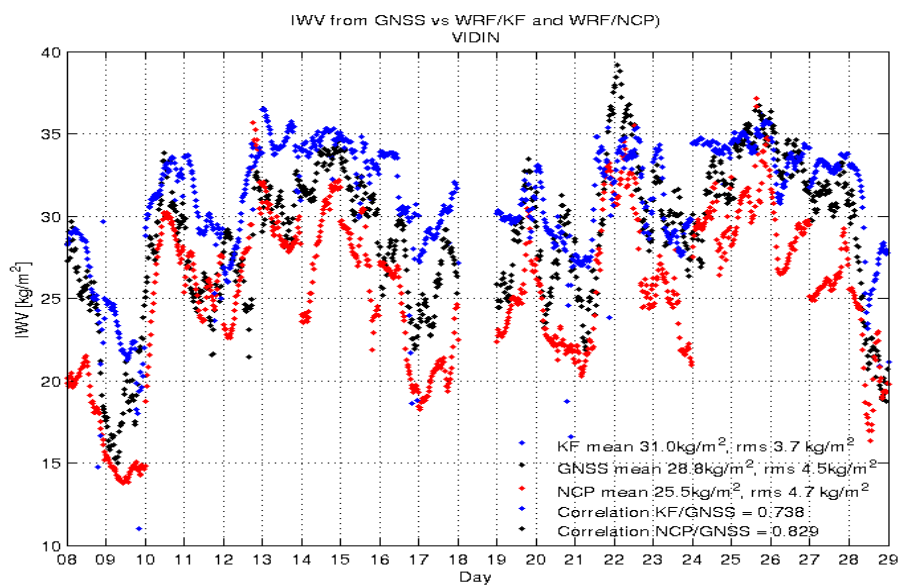
облака а именно: Kain-Fritsch (KF) и No Cloud Parametrization (NCP). За сравнението са използвани GNSS тропосферни продукти от станция Видин (Северозападна България) и Пловдив (Централна България).

Анализът на получените резултати показва, че WRF(KF) значително завишава IWV, като средните стойности са  $31 \text{ kg/m}^2$  за Видин (фигура 4.4) и  $31.4 \text{ kg/m}^2$  за Пловдив (фигура 4.3). За сравнение средните стойности на GNSS IWV са  $28 \text{ kg/m}^2$  за Пловдив и  $28.8 \text{ kg/m}^2$  за Видин. От друга страна при резултатите от WRF(NCP) се вижда, че подценява стойностите на IWV с  $3.3 \text{ kg/m}^2$  за Видин и  $2.6 \text{ kg/m}^2$  за Пловдив. Относителната разлика на WRF(NCP) и GNSS IWV е около  $3 \text{ kg/m}^2$ . Има висок коефициент на корелация, съответно 0.83 за Видин и 0.78 за Пловдив. За сравнение коефициентът на корелация за WRF(KF) е 0.73 за Видин и 0.56 за Пловдив. Прави впечатление, че разликата в стойностите на интегрираната водна пара между WRF(KF) и WRF(NCP) е  $5.5 \text{ kg/m}^2$  във Видин и  $6.0 \text{ kg/m}^2$  в Пловдив. Тази разлика показва високата чувствителност на WRF към параметризацията на конвективните процеси за избрания период. Важно е да се спомене, че резултатите и за другите GNSS станции са сходни, *Slavchev and Guerova (2019)*.





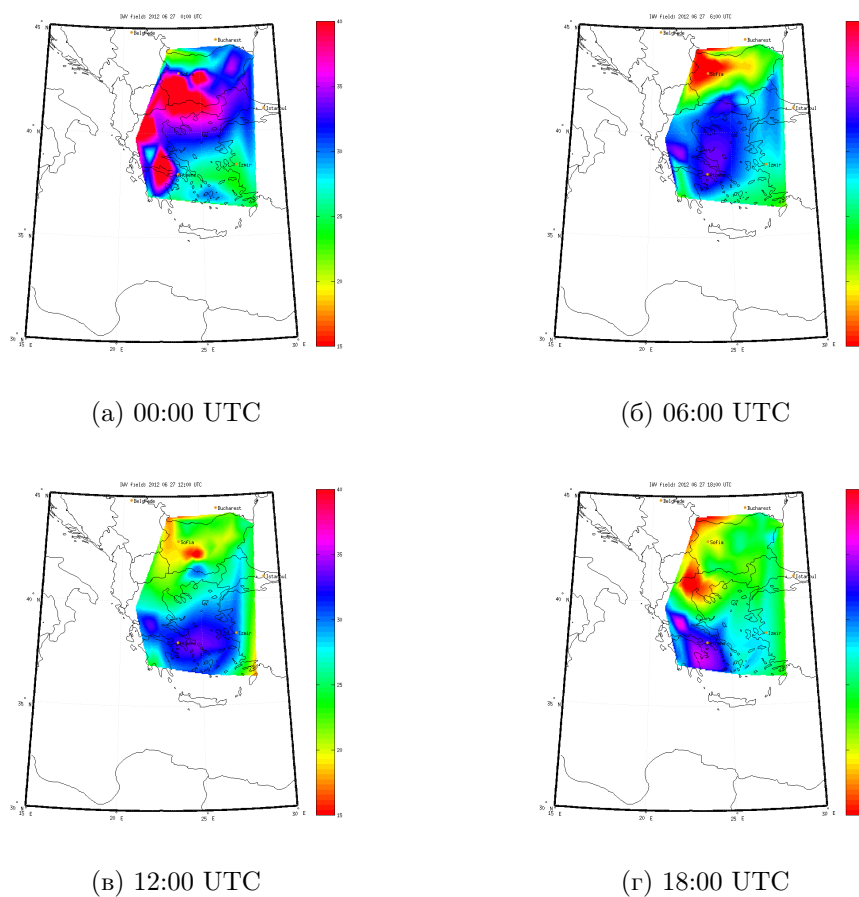
Фигура 4.3: Сравнение на IWV от WRF(KF) (сини точки), WRF(NCP) (червени точки) и GNSS (черни точки) за Пловдив, 8 - 28 май 2012 г.



Фигура 4.4: Сравнение на IWV от WRF(KF) (сини точки), WRF(NCP) (червени точки) и GNSS (черни точки) за Видин, 8 - 28 май 2012 г.

## 4.2 Карти на двумерното разпределение на IWV за 27 юни 2012

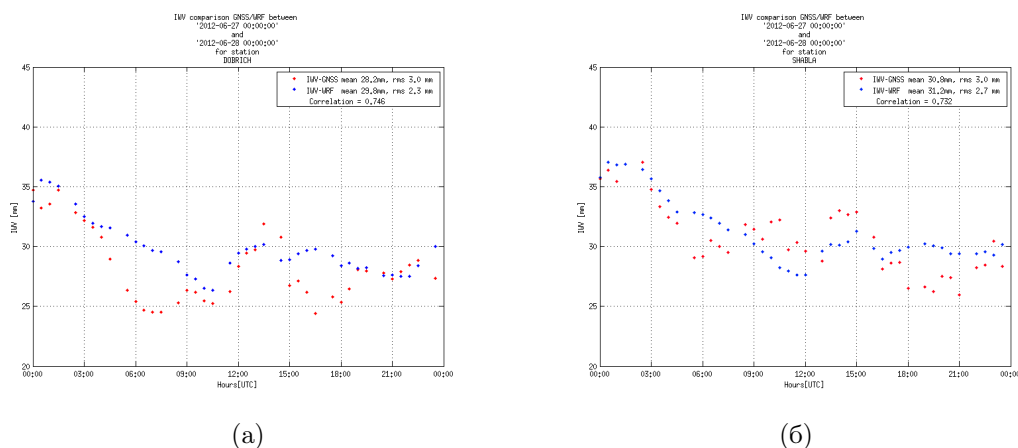
За детайлно изследване на пространственото разпределение на IWV са изготвени карти на двумерното разпределение, като е използвана информацията от GNSS мрежата на ЗетнитГео, фигура 3.1 а) и числения модел WRF v3.4.1. На 27 юни по северозападното крайбрежие на България е регистриран валеж от 74 mm между 9:00 и 15:00 UTC. На фигура 4.5 са представени четири срока с двумерното изменение на полето на IWV.



Фигура 4.5: 27 юни 2012 г. Карта на двумерното разпределение на IWV за: а) 00:00 UTC, б) 06:00 UTC, в) 12:00 UTC и г) 18:00 UTC.

Анализът на двумерното разпределение на IWV показва, че в 00:00 UTC над Северна България има по-суха въздушна маса, която до 06:00

UTC обхваща и южните райони от страната. За 6 часа стойностите на IWV в Южна България се понижават с около  $10 \text{ kg/m}^2$ , от  $35 \text{ kg/m}^2$  в 00:00 UTC до  $25 \text{ kg/m}^2$  в 06:00 UTC. Ясно изразен е и градиентът на IWV над Балканския полуостров между 12:00 и 18:00 UTC.



Фигура 4.6: Сравнение на IWV от WRF (синьо) и GNSS метеорология (червено) за 27 юни 2012 г. в станции Шабла и Добрич.

На фигура 4.6 е направено сравнение между WRF IWV и GNSS IWV. За станция Добрич средните стойности на IWV между модел и наблюдение с различават с около  $1.5 \text{ kg/m}^2$ , а коефициента на корелация е добър и е 0.746. За станция Шабла, където е регистриран и най-значителния валеж за обстановката, средните стойности между модел и наблюдение са с разлика от  $0.4 \text{ kg/m}^2$ . Коефициента на корелация отново е висок и е 0.732. И при двете станции се наблюдава пик на GNSS IWV около 13:00 UTC последван от понижение с около  $6 - 7 \text{ kg/m}^2$  за 4 часа до 17:00 UTC.

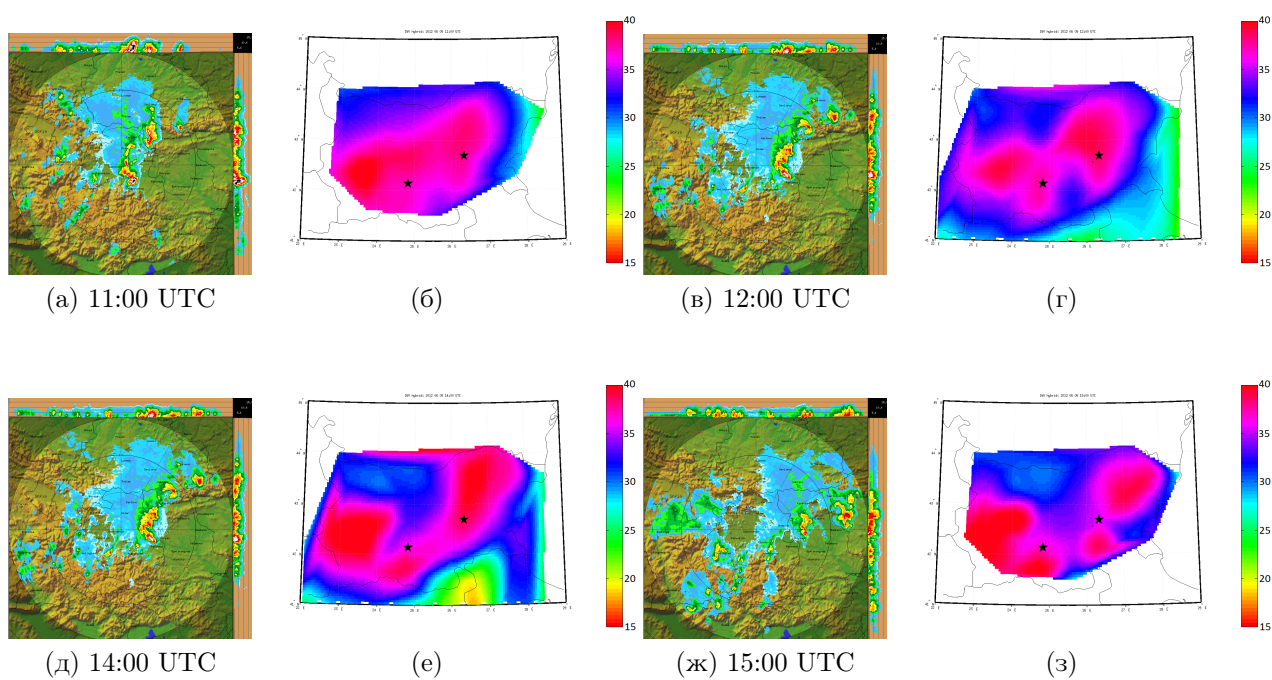
### 4.3 Анализ на IWV и радарна информация за две обстановки с градушка/интензивни валежи

В дисертационния труд е направено сравнение на картите на двумерното разпределение на IWV и радарни изображения за две избрани синоптични обстановки, подробно описани в месечния бюлетин на НИМХ (2012,

май, <http://www.meteo.bg/>, ISSN 2815-2743), за 5 юни и 22 май 2012 г. Резултатите от изследването са публикувани в *Guerova et al.* (2016).

#### 4.3.1 Синоптична обстановка 5 юни 2012 г.

На 5 юни 2012 г. между 10:50 и 12:00 UTC близо до Пловдив е регистрирана интензивна градушка, с диаметър на градовото зърно - между 5 и 6 *cm*. От изображенията на максималната радарна отражаемост от ИАБГ в 11:00 UTC на фигура 4.7, се вижда ясно изразена многоклетъчна конвективна система. До около 12:00 UTC многоклетъчната система се премества на изток. В района на Сливен, между 12:30 и 14:40 UTC, е регистрирана градушка с размер от около 2 *cm*. От картите на двумерно разпределение на IWV на фигура 4.7 се вижда, че в Пловдив и в Сливен стойностите на IWV са над 35  $kg/m^2$ . Преди 7:00 UTC повишението на IWV в Пловдив е с по-малко от 1  $kg/m^2$  за час, докато в интервала между 7:00 и 11:00 UTC повишението е с около 1.5  $kg/m^2$  за час т.е. 6  $kg/m^2$  за 4 часа. Максимумът на IWV е достигнат по същото време, когато е и максимума на интензитета на бурята. Трябва да се отбележи, че в изследването на *Benevides et al.* (2015) за Португалия е установено че при нарастване на IWV от 1,75  $kg/m^2/h$  вероятността за валеж е 52%. Получените в тази глава резултати са независими от тези в Португалия и съвпадат по време на публикация, а именно през 2015 г.



Фигура 4.7: Пловдив и Сливен (черни точки), 05 юни 2012 г. (а,в,д,ж) максимална радарна отражаемост [dBZ]; (б,г,е,з) двумерно разпределение на IWV.

## Глава 5

# Анализ на градушки в България с наклонени тропосферни закъснения

В тази глава са използвани наклонените тропосферни закъснения от GNSS, WRF и ERA5 за детайлно изследване на две синоптични обстановки с интензивни валежи и градушка. Приложението на наклонените тропосферни закъснения за изследване на опасни метеорологични явления е в процес на развитие в световен мащаб и представените в тази глава резултати са първото по рода си изследване за района на Югоизточна Европа.

### 5.1 Наклонени тропосферни закъснения: 7-9 юли 2014 г.

Подробно описание на синоптичната обстановка и механизмите довели до интензивната градушка в София на 8 юли 2014 г. е направено в *Bocheva et al.* (2018). Стойностите на  $STD_{GNSS}$  са изчислени по методиката описана в глава 3. Използвана е информация от GNSS станция SOFI и SOF1 и е изследван периода 07 - 09 юли 2014 г. За пресмятане на наклонените тропосферни закъснения е използван численият модел WRF v3.7.1 ( $STD_{WRF}$ ). Реализирани са числени експерименти, като са използвани две различни параметризационни схеми за конвективната облачност  $STD_{KF}$  и  $STD_{NCP}$  (таблица 5.1).

Експеримент име	Параметризационна схема	Станция
$STD_{KF}$	Kain-Fritsch Scheme	SOFI, SOF1
$STD_{NCP}$	No Cumulus Parameterization	SOFI, SOF1

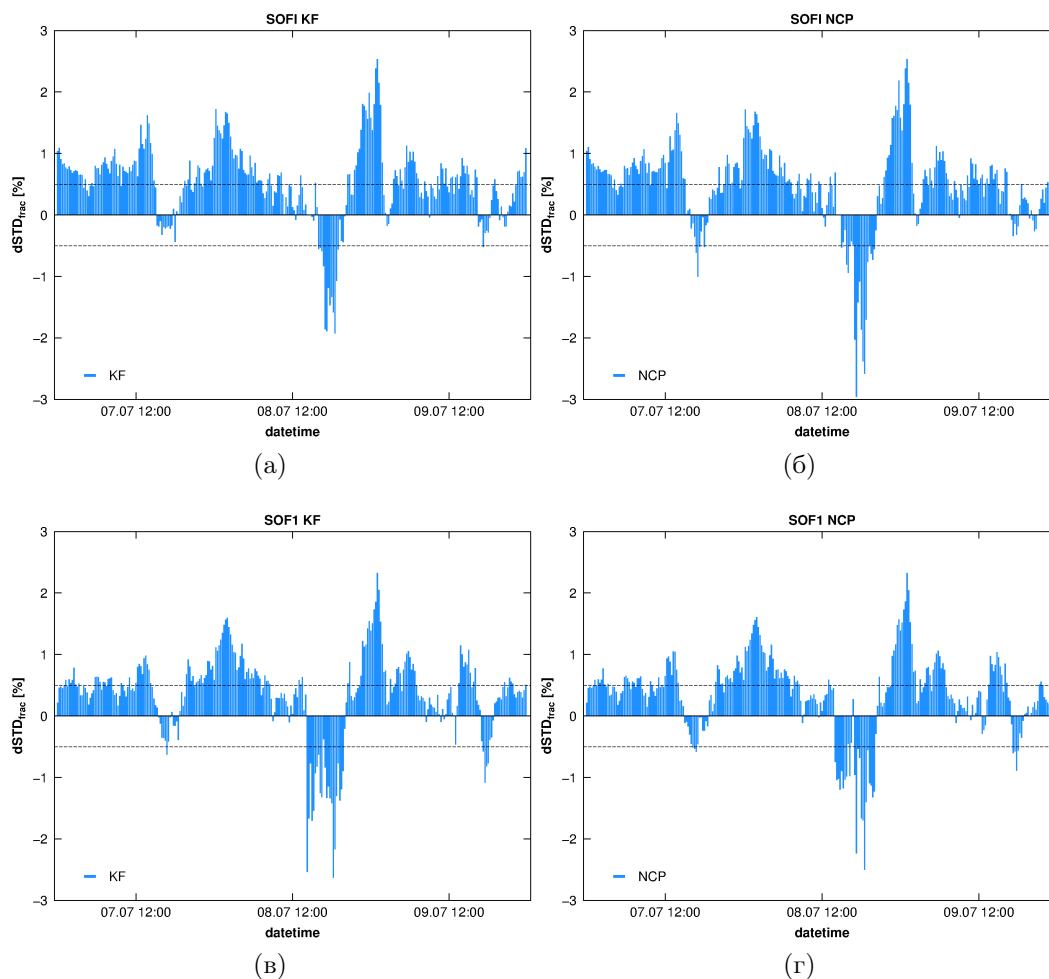
Таблица 5.1: Параметризационни схеми за конвекция в числените експерименти с WRF.

Получените наклонени тропосферни закъснения за всяка параметризационна схема  $STD_{KF}$  и  $STD_{NCP}$  са сравнени с получените от GNSS наблюденията  $STD_{GNSS}$ . Намерени са среднодневните относителни разлики:

$$\begin{aligned}
 dSTD_{frac(KF)} &= \frac{STD_{GNSS} - STD_{KF}}{STD_{GNSS}} \cdot 100\% \\
 dSTD_{frac(NCP)} &= \frac{STD_{GNSS} - STD_{NCP}}{STD_{GNSS}} \cdot 100\%.
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Стойностите на  $dSTD_{frac}$  за станция SOFI, представени на фигура 5.1 а) и б), са с времева резолюция 15 min. Относителната разлика  $dSTD_{frac}$  на наклонените тропосферни закъснения за двете параметризационни схеми ( $STD_{KF}$  и  $STD_{NCP}$ ) е положителна и варира от 0.25% до 2%. По време на интензивната градушка, около 12:30 UTC се вижда добра корелация между GNSS и  $STD_{KF}$  (фигура 5.1). Въпреки това след 13:00 UTC ясно се вижда отрицателен максимум със стойности достигащи -2%, последван от високи положителни стойности над +2%. Възможно обяснение за това отместване във времето и противофазата между WRF и GNSS е неспособността на модела да възпроизведе времето и продължителността на градушката. Добре видима тенденция и за двете параметризационни схеми ( $STD_{KF}$ ;  $STD_{NCP}$ ) е това, че те подценяват стойностите на STD т.е. има положителни относителни разлики. На фигура 5.1 в) и г) са представени относителните разлики  $STD_{GNSS}$  и  $STD_{KF/NCP}$  за станция SOF1, разположена в рамките на град София. Времева резолюция е 15 min. Вижда се че, положителните и отрицателните относителни разлики са почти равно разпределени. След интензивната градушка, около 12:30 UTC ясно се забелязва отрицателен максимум от около -2%, отново последван от висок положителен пик от около +2% за  $STD_{KF}$  и +1.6% за  $STD_{NCP}$ . Преди и по време на интензивната градушка и двете парамет-

ризацияционни схеми ( $STD_{KF}$ ;  $STD_{NCP}$ ) надценяват стойностите на STD.



Фигура 5.1: Относителни разлики в периода 7 - 9 юли 2014 г. за станция а) SOFI между  $STD_{GNSS}$  и  $STD_{KF}$ , б) за станция SOFI между  $STD_{GNSS}$  и  $STD_{NCP}$ , в) станция SOF1 между  $STD_{GNSS}$  и  $STD_{KF}$  и г) за станция SOF1 между  $STD_{GNSS}$  и  $STD_{NCP}$ .

Времевата разделителна способност на изчислените  $STD_{WRF}$  от 15 min дава важна информация за наличната водна пара в атмосферата. Има значително разминаване в стойностите на STD и за двете изследвани станции SOFI и SOF1, при сравнение на WRF и GNSS. Забелязва се, че WRF надценява стойностите на STD за целия период, не само в деня на интензивната градушка. Параметризацияционната схема на Kain-Fritsch е с малко отклонение спрямо NCP. Въпреки това по време на интензивната



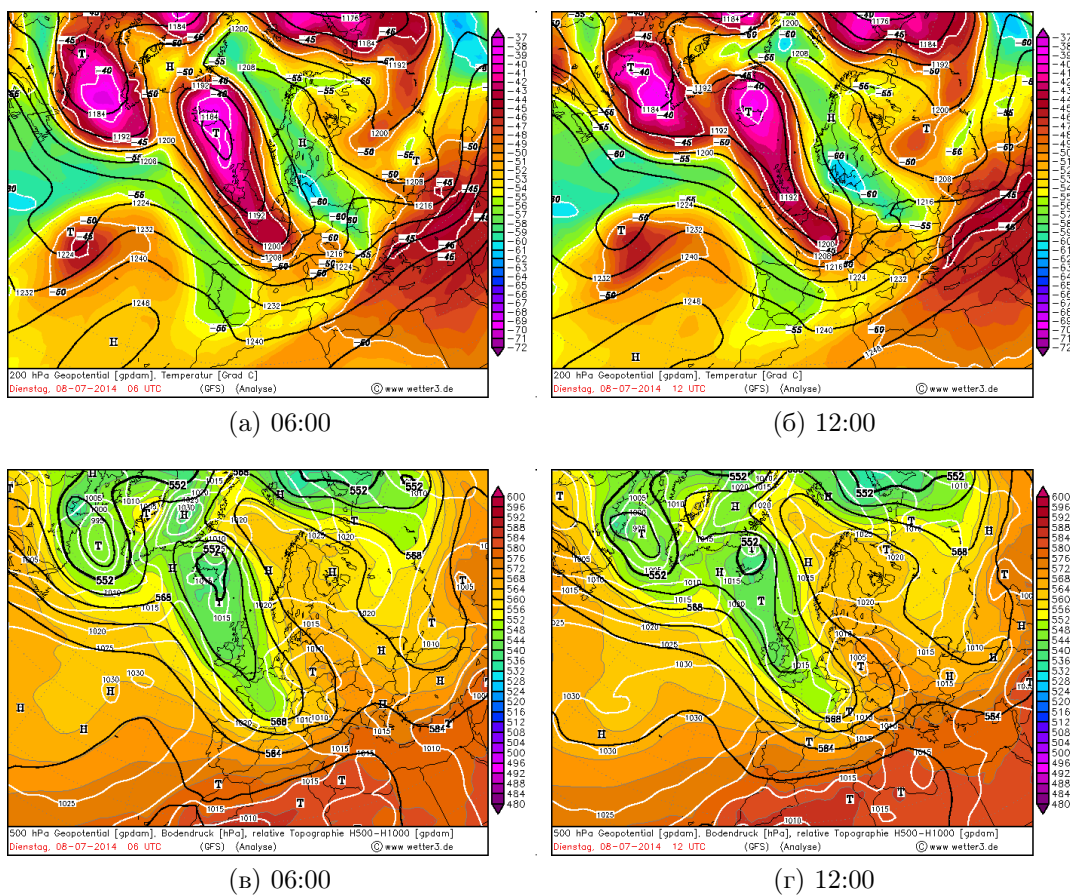
градушка в София  $STD_{WRF}$  и  $STD_{GNSS}$  са близки.

## 5.2 Градушка в София 8 юли 2014

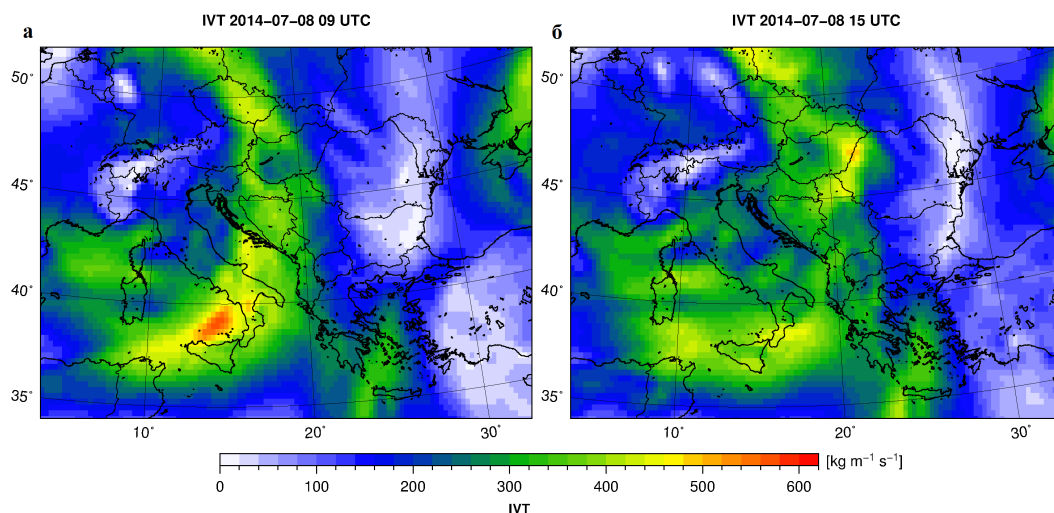
### 5.2.1 Прекъсване на вълните на Росби

На 8 юли 2014 г. над Софийското поле се развива мощна многоклетъчна купестодъждовна буря с проливни валежи и интензивна градушка с размер на градовото зърно до 10 cm. Според националния метеорологичен архив тази градушка е била най-силната за последните 75 години и е причинила щети на над 50 000 превозни средства и около 123 милиона евро *Bocheva et al.* (2018). За анализ на динамиката във височина са избрани карти на геопотенциалната височина на AT500 hPa и температурата на AT200 hPa, представени на фигура 5.2. Вижда се, че в 06:00 UTC топла въздушна маса се намира над Атлантическия океан, от Исландия до Франция. Докато студената въздушна маса се простира от Скандинавския полуостров, над Полша и достига до Сърбия. Относителната топография  $OT_{1000}^{500}$  в 06:00 и 12:00 UTC на 8 юли показва високи стойности над Скандинавския и Балканския полуостров (оранжев цвят на фигури 5.2 в) и 5.2 г) и ниски стойности над Атлантическия океан и Франция (зелен цвят). С дебела черна линия на ниво AT500 на фигури 5.2 в) и 5.2 г) се вижда прекъсването на вълната на Росби над Европа, между дълбоката и обширна барична долина и баричния гребен се образува зона на силна неустойчивост и циклогенез при земята.

От фигура 5.3 се вижда транспорта на водна пара от Централното Средиземноморие към Югоизточна Европа. В 09:00 UTC от Южна Италия, остров Сицилия и акваторията на Адриатическо море има пренос на водна пара по посока на Балканския полуостров. Стойностите са между 400 и 500  $kgm^{-1}s^{-1}$  (фигура 5.3 а). До 15:00 UTC стойностите на IVT (фигура 5.3 б) над Сърбия, Северна Македония и по западната граница на България се повишават от 100 на 300  $kgm^{-1}s^{-1}$ .



Фигура 5.2: 8 юли 2014 г., Геопотенциална височина и температура на АТ200 hPa в: а) 06:00 and б) 12:00 UTC. Изолинии на приведеното към морско ниво налягане (бял контур) и 500 hPa геопотенциална височина (дебели черни линии) за в) 06:00 UTC и г) 12:00 UTC.



Фигура 5.3: ERA5 IVT на 8 юли 2014 г. за а) 9:00 UTC и б) 15:00 UTC.

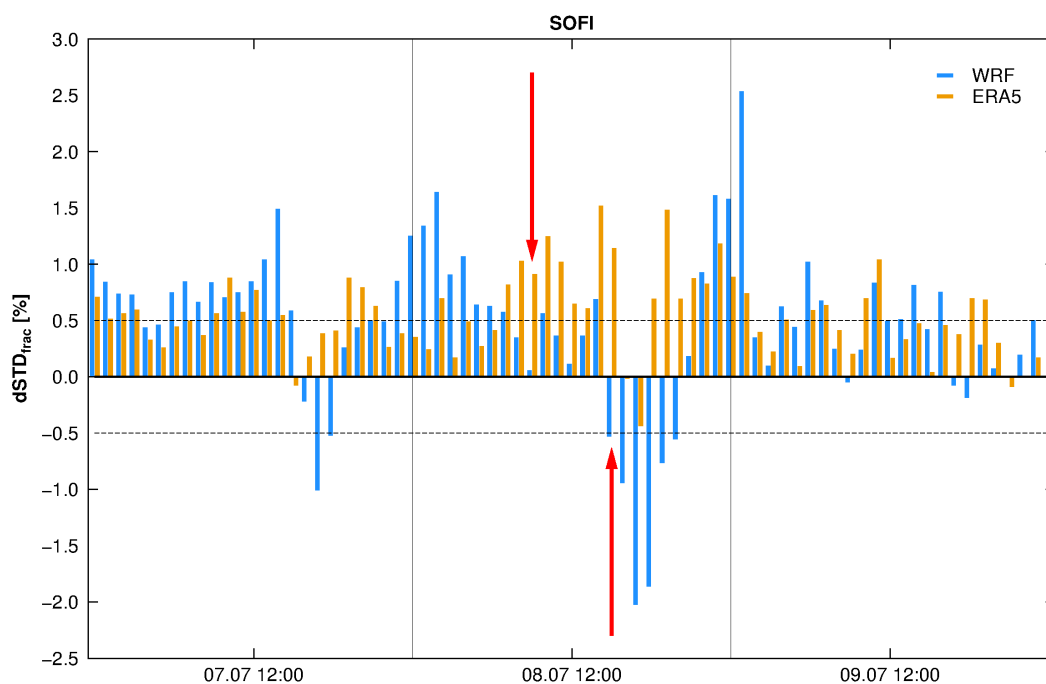
## 5.2.2 Наклонени тропосферни закъснения от GNSS, WRF и ERA5: 8 юли 2014

Получените наклонени тропосферни закъснения от GNSS за станция SOFI са сравнени с тези от ERA5 и WRF. Пресметнати са относителните разлики:

$$\begin{aligned}
 dSTD_{frac(WRF)} &= \frac{STD_{GNSS} - STD_{WRF}}{STD_{GNSS}} \cdot 100\% \\
 dSTD_{frac(ERA5)} &= \frac{STD_{GNSS} - STD_{ERA5}}{STD_{GNSS}} \cdot 100\%. \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

На фигура 5.4 със сини и оранжеви стълбчета са показани относителните разлики  $dSTD_{frac(WRF)}$  и  $dSTD_{frac(ERA5)}$ . Забелязва се отрицателно отклонение на WRF, което започва в 15:00 UTC и продължава до около 20:00 UTC на 8 юли 2014 г. Около 9:00 UTC WRF и ERA5 имат положително отклонение, което е индикация за занижаване на стойностите на наклонените закъснения в числения модел и в реанализа.

С цел количествено сравнение на разпределението на наклонените закъснения, между различните нива на численият модел и реанализа е пресметната и относителната разлика  $dSTD_{frac}$  между ERA5 и WRF по



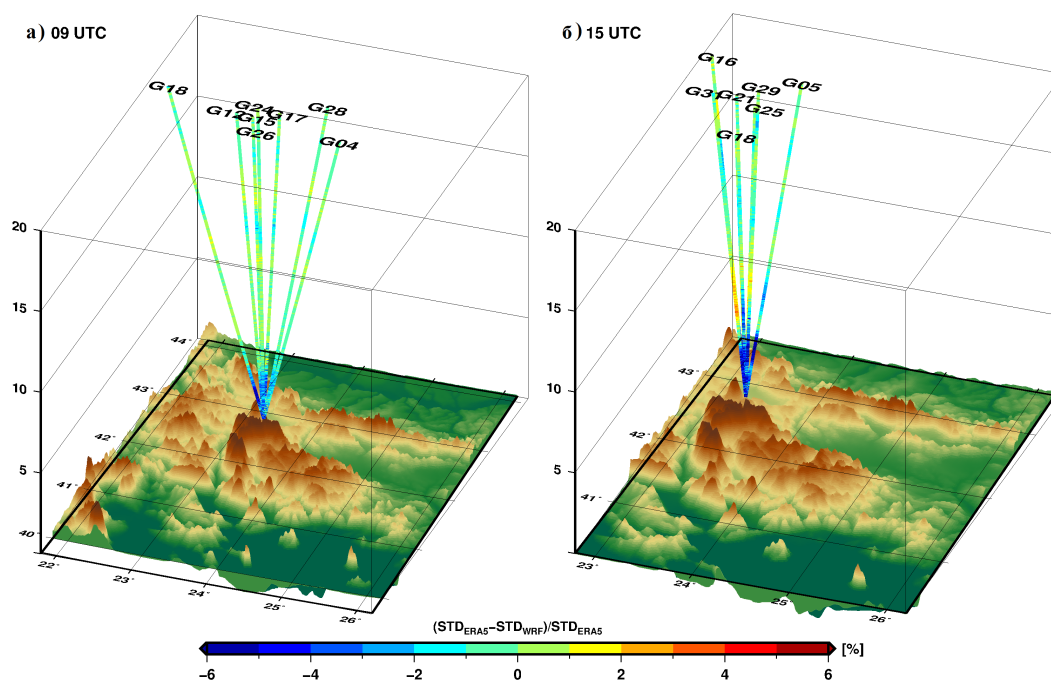
Фигура 5.4: Относителни разлики  $dSTD_{frac}$  за станция SOFI на WRF (синьо) и ERA5 (оранжево).

формулата:

$$dSTD_{frac} = \frac{STD_{ERA5} - STD_{WRF}}{STD_{ERA5}} \cdot 100\%. \quad (5.3)$$

Отношението  $dSTD_{frac}$  е получено от уравнение 5.3 по посока на всеки спътник и резултатите са представени на фигура 5.5. Фигурата представлява триизмерно възпроизвеждане на относителната разлика между стойностите на WRF и ERA5 за станция SOFI, съответно в 9:00 и 15:00 UTC. В 9:00 UTC относителните разлики  $dSTD_{frac}$  не са големи и са основно в първите 2 - 3 km. Интересен е факта, че най-значителните отрицателни отклонения  $dSTD_{frac}$  са насочени по посока на спътник G18 (тъмносин цвят на фигура 5.5). Слабо положително отклонение на  $dSTD_{frac}$  от около 1% се забелязва над 6 km. В 15:00 UTC отрицателните отклонения  $dSTD_{frac}$  са преобладаващо в ниската атмосфера, докато слабо положителни отклонения  $dSTD_{frac}$ , около 2% се виждат по посока на спътници G16 и G31. Триизмерната структура на относителните разлики между числения модел WRF и атмосферния реанализ ERA5 може да се използва за оценка

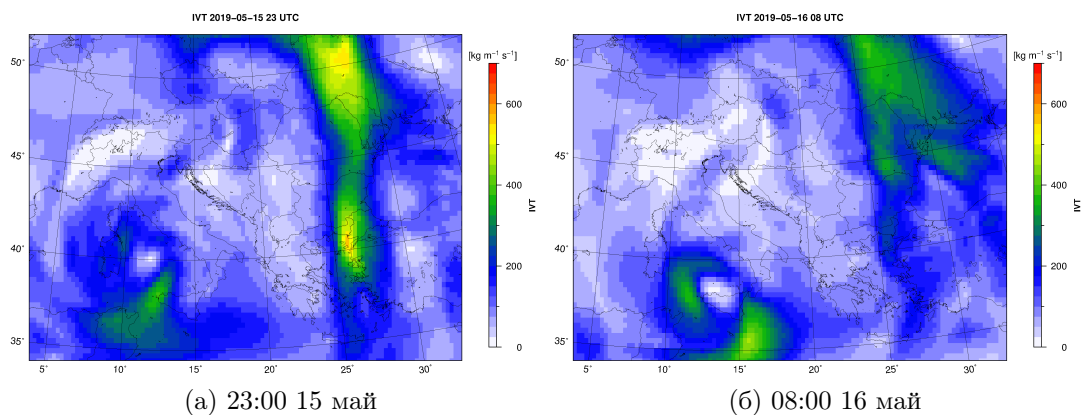
на вертикалната структура в двете числени реализации на атмосферата *Lasota et al.* (2022).



Фигура 5.5:  $dSTD_{frac}$  на 8 юли 2014 г. за станция SOFI в а) 9:00 UTC и б) 15:00 UTC.

### 5.3 Синоптичесна обстановка: 15-16 май 2019 г.

Подробно описание на синоптическата обстановка довела до интензивната градушка в периода 15-16 май 2019 г. е представено в *Guerova et al.* (2020). На 15 и 16 май 2019 г. на много места в Централна и Източна България се развиват мощни купесто-дъждовни клетки. За 16 май максималната радарна отражаемост е между 50 и 70 dBZ (не е показано). На фигура 5.6 а) около 23:00 UTC се вижда повишение на IVT, точно между зоната на двете основни барични образувания на ниво AT500.

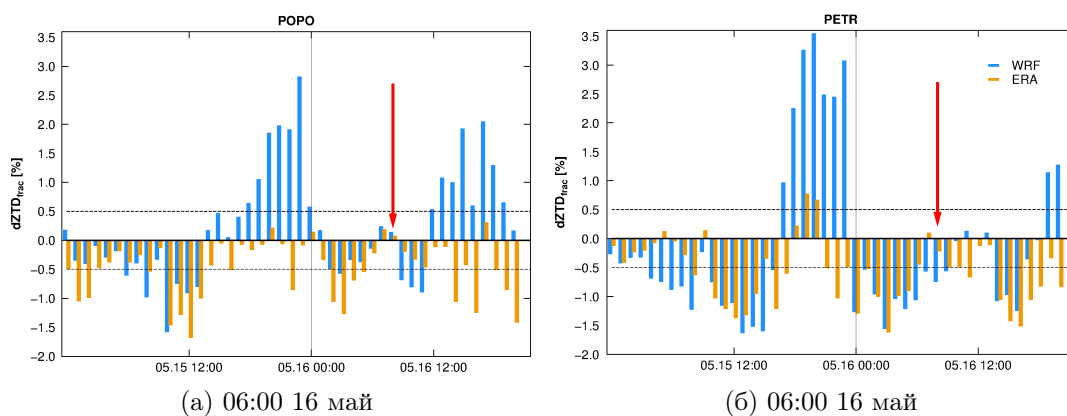


Фигура 5.6: ERA5 IVT за а) 23:00 UTC на 15 май 2019 г. и б) 08:00 UTC на 16 май 2019 г.

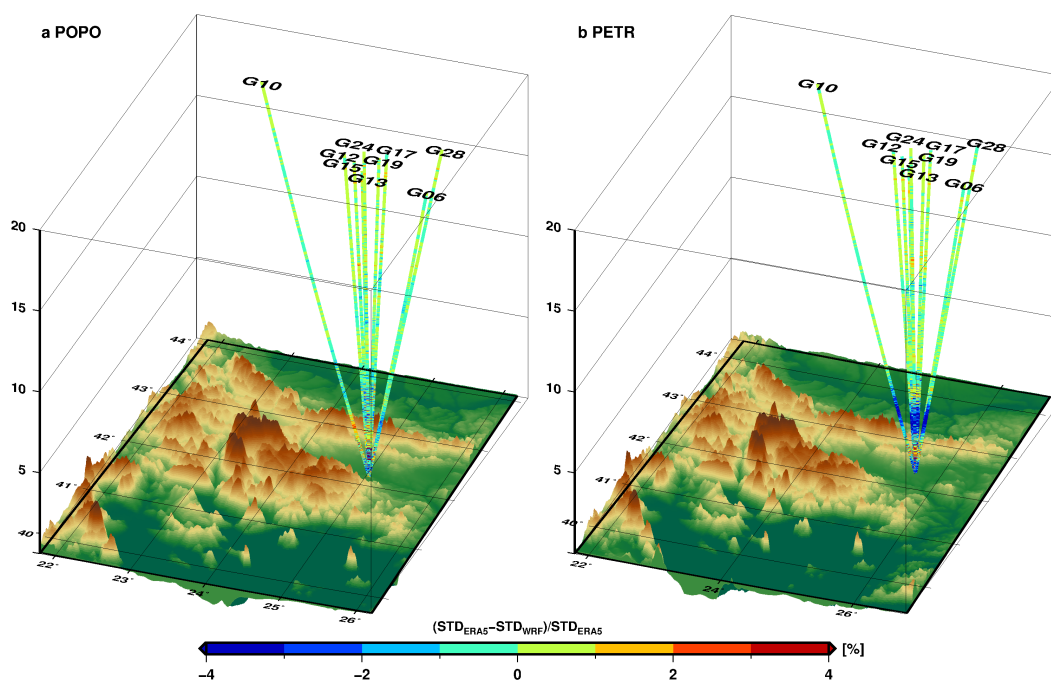
### 5.3.1 Наклонени и зенитни тропосферни закъснения: 16 май 2019 г.

За 2019 г. в района на конвективната буря са оперативни две наземни GNSS станции в Източна България: Попово (POPO) и Петрово (PETR). Те са използвани при анализа на ZTD (фигура 5.7). Относителната разлика  $dZTD_{frac}$  на WRF и ERA5 спрямо GNSS е представена на фигура 5.7. И при двете станции WRF има над 1% отрицателно отклонение между 19:00 и 23:00 на 15 май 2019 г. Възможна причина за подценяването на ZTD може да бъде преминаването на IVT във височина, както се вижда от фигура 5.6 а) и б).

Анализът на фигура 5.8 показва, че за станция POPO и двата модела са в синхрон, при земята и във височина. Относителните разлики  $dSTD_{frac}$  са с отклонение от около 1%. В първите 5 km за станция PETR се вижда отрицателна относителна разлика  $dSTD_{frac}$ , което означава ще WRF завишава стойностите на STD спрямо тези на ERA5. Във височина относителните разлики са около 1.5%.



Фигура 5.7: Относителни разлики  $dZTD_{frac}$  за станция а) РОРО и б) PETR на WRF (синьо) и ERA5 (оранжево).



Фигура 5.8: Триизмерно представяне на относителните разлики на STD между WRF и ERA5 на 16 май 2019 г. в 08:00 за GNSS станции: а) РОРО and б) PETR. GPS спътниците са отбелязани и за двете станции.

## Глава 6

# GNSS сервис за опасни метеорологични явления

### 6.1 Оперативен GNSS сервис - BeRTISS

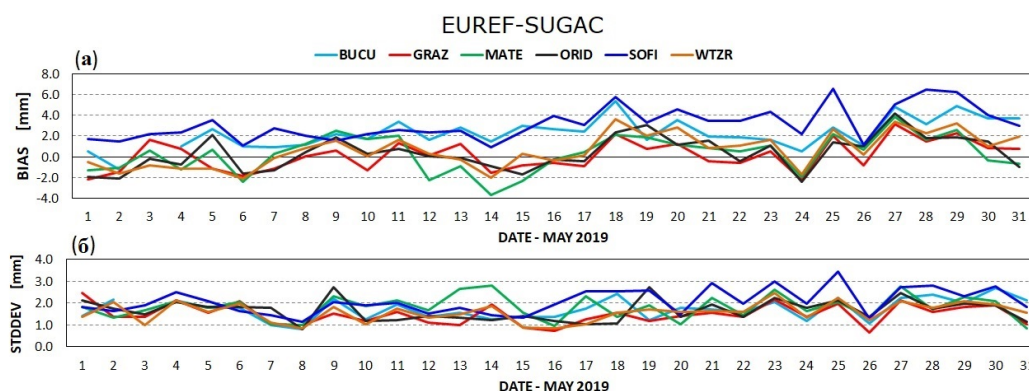
#### 6.1.1 Анализ на ZTD продуктите от център SUGAC

Като първа стъпка в използването на ZTD от изградената наземна GNSS мрежа по проекта BeRTISS е необходимо да се направи оценка на получените резултати от центъра за GNSS анализ SUGAC. За целта в тази глава на дисертационния труд е направено сравнение на ZTD от SUGAC и продуктите от утвърдили се центрове за анализ за тропосферни продукти, а именно: IGS, EUREF, BKG и CODE. Изследваните отклонения на ZTD не се различават съществено помежду си за всички центрове за анализ. Повечето от разликите EUREF-SUGAC, BKG-SUGAC и CODE-SUGAC за почти всички изследвани станции са между 0 mm и  $\pm 2$  mm. Средната грешка от IGS-SUGAC за станция MATE (не е показано) има по-голямо отклонение в сравнение с EUREF-SUGAC, BKG-SUGAC и CODE-SUGAC. Отклонението е почти постоянно за всички дни от месец май и е от 4-6 mm.

На фигура 6.1 са представени средната грешка и стандартното отклонение на ZTD между центрoвете SUGAC и EUREF за 6 IGS станции. И двата оперативни центъра осигуряват тропосферни оценки с времева резолюция от 1 час. Дневните средни грешки на EUREF-SUGAC са в интервала между -4 mm и 6 mm (фигура 6.1a) и съответните стандартни



отклонения са между 1 mm и 3.5 mm (фигура 6.1б). При направеното сравнение се вижда, че ZTD продуктите на SUGAC са със сходни стойности с тези получени от утвърдени центрове за анализ на GNSS тропосферни продукти.



Фигура 6.1: Стандартно отклонение и отклонение на средните стойности между тропосферните продукти от SUGAC и EUREF.

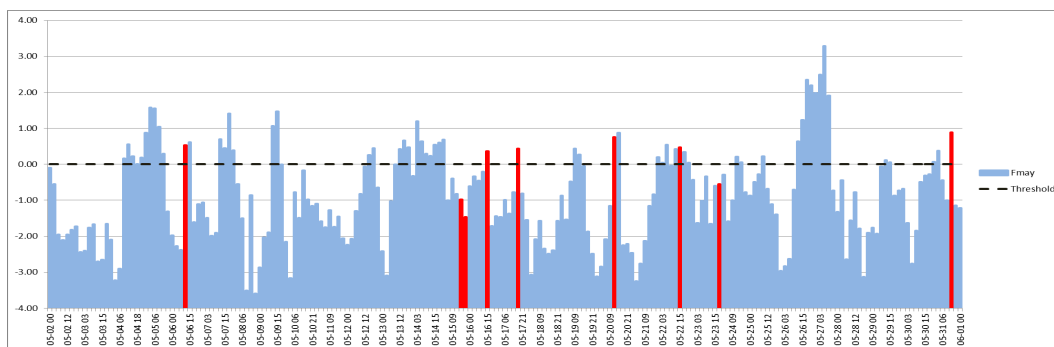
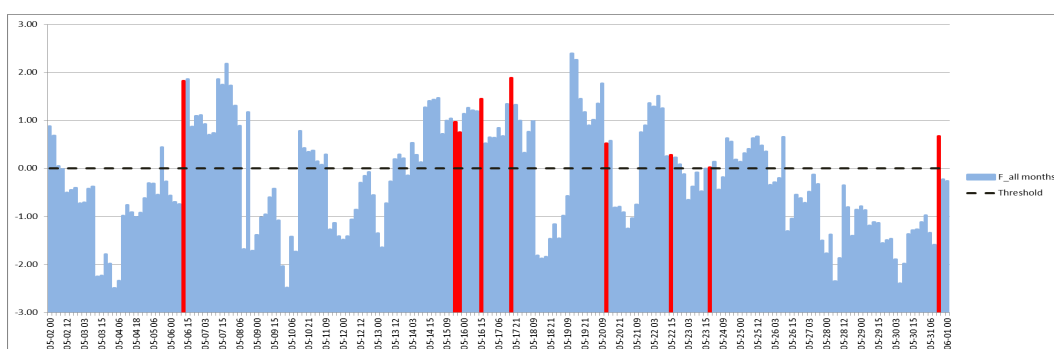
### 6.1.2 Класификационни функции за гръмотевична дейност: май 2019 г.

За месец май 2019 г. са намерени класификационни функции за гръмотевична дейност в София, като са използвани наблюдения от GNSS и аерологичен сондаж, подобно на представените в *Guerova et al.* (2019). Месечната и сезонната функция за класификация на гръмотевични бури (Function May,  $F_m$ ) и (Function Seasonal,  $F_s$ ) са получени, чрез дискриминантен анализ на GNSS IWV и индекси на неустойчивост (InI). Намерените класификационни функции са както следва:

$$F_m = 0.54xIWV + 1.36xSHI + 0.74xTT + 0.07xK - 51.16 \quad (6.1)$$

$$F_s = 0.24xIWV + 1.44xSHI + 0.85xTT + 0.02xK + 0.01xSWEAT + 0.11xT_{LCL} - 81.57. \quad (6.2)$$

Резултатите са представени на фигура 6.2. С червен стълб на фигурите са показани 9 случая на регистрирана гръмотевична дейност/буря в станция София. Три отрицателни регистрации на  $F_m$  са свързани с гръмотевична буря и могат да бъдат класифицирани, като неправилно предположение.

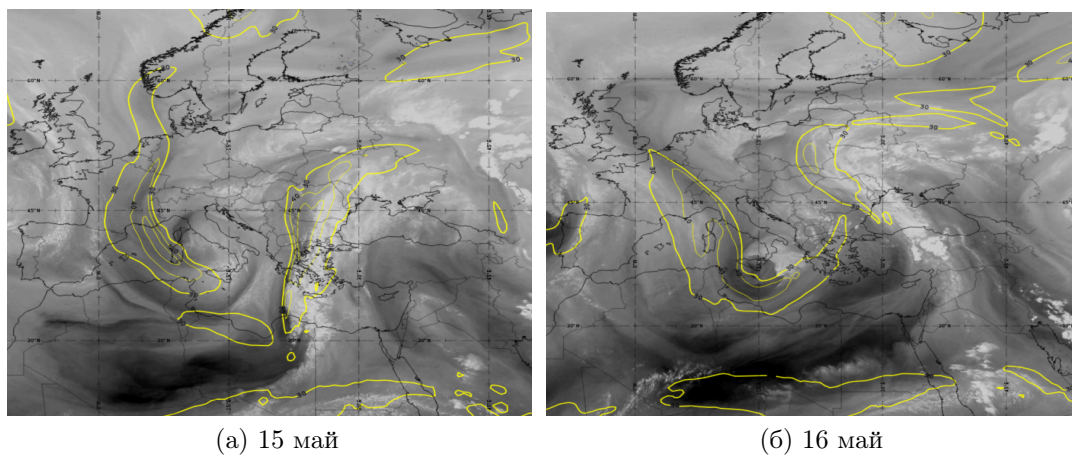
(a)  $F_m$ (б)  $F_s$ 

Фигура 6.2: Класификационни функции за гръмотевична дейност: а) месечни ( $F_m$ ) и б) сезонни ( $F_s$ ). С червен стълб са случаите с отчетена гръмотевична буря в синоптичната станция НИМХ-София за май 2019 г.

От фигура 6.2а се вижда, че 5 случая на  $F_m$  успешно регистрират гръмотевична буря, но в други 6 положителни регистрации на функцията  $F_m$ , не е отчетена гръмотевична буря и може да се счита за фалшива аларма (FAR). Класификационната функция  $F_s$  е сезонна и е за периода май - септември. Гръмотевичната буря може да бъде класифицирана, като неуспешно регистрирана с отрицателни стойности на  $F_s$ . Седем положителни регистрации на  $F_s$  са свързани с гръмотевична буря и 4 са с фалшива аларма (FAR). Както за месечните, така и за сезонните функции за класификация положителните стойности са между 18 и 3 часа преди гръмотевичната активност, което показва потенциал за ранно предупреждение при оперативно прогнозиране на гръмотевична буря.

### 6.1.3 Синоптическа обстановка 15-16 май 2019 г.

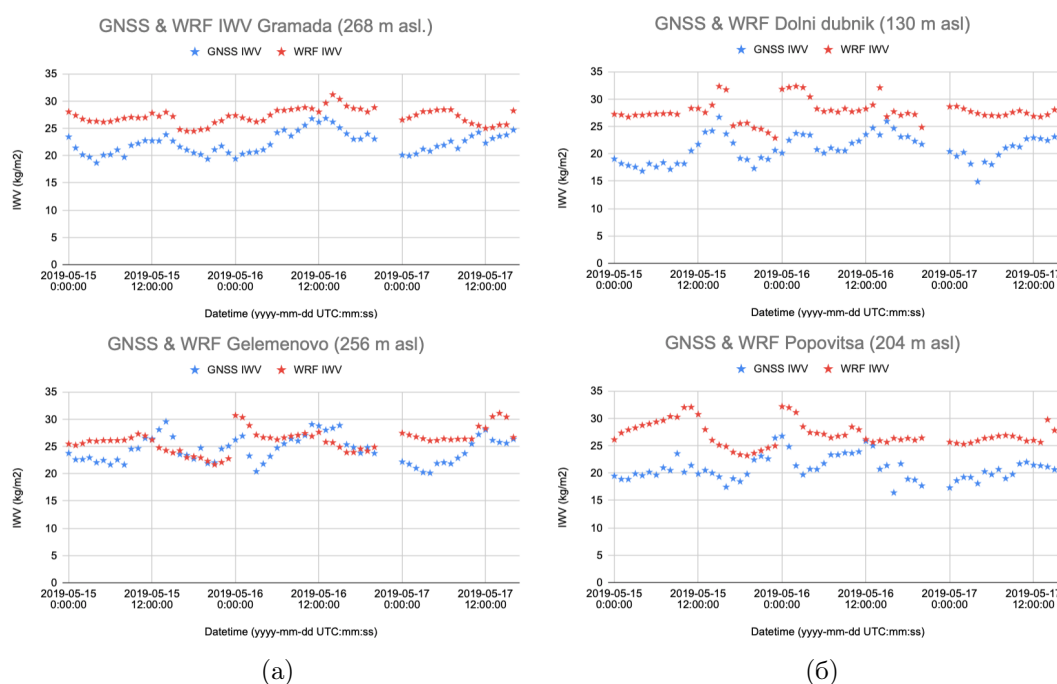
На 15 и 16 май 2019 г. във височина на АТ500, Балканския полуостров е под влияние на обширна многоцентрова област от ниско атмосферно налягане с основен център над акваторията на Черно море. При земята България е под влияние на средиземноморски циклон на юг от страната и се премества към Черно море на 15 и 16 май 2019 г. На 16 май, след преминаването на студен атмосферен фронт през Балканите, температурите и в източните райони от полуострова се понижават. На картите на АТ300 страната ни е под-влияние на струйното течение и има ясно изразена разходимост. От спътниковите изображения на канала на водната пара (Water Vapor, WV) ясно се виждат областите с максимум на аномалията на потенциалния вихър (Potential vorticity, PV, черни линии на фигура 6.3в и 6.3г) свързани с по-сух въздух от стратосферата. На 15 май западните райони от България се намират в левия изход на струйното течение, което допълнително допринася за развитието на конвективните бури. На 16 май 2019 г. в източната половина от страната се развиват мощни конвективни клетки и на много места там има интензивни валежи и градушка.



Фигура 6.3: Спътникови изображения на канала на водната пара WV за: а) 15 май и б) 16 май. Жълтите линии показват местоположението на струйното течение.

На фигура 6.4 е направено сравнение на WRF IWV (червени мар-

кери) и GNSS IWV (сини маркери) за 4 станции от мрежата на BeRTISS. Анализ на IWV за обстановката с интензивни градушки на 15 и 16 май 2019 г., показва, че и през двата дни IWV достига пик в 12:00 UTC за повечето от представените GNSS станции. Втори пик на IWV в 00:00 UTC на 15 срещу 16 май води до 20% скок на IWV между прогнозата на WRF в 24 часа и анализа в 00:00 UTC. Причина за това повишение е започването на нов изчислителен цикъл на WRF в 00:00 UTC. Изменението във времето на WRF IWV за Гелеменово и Голям Чардак е в противофаза с GNSS IWV. Валидирането на WRF с метода GNSS метеорология дава полезна оценка за отклоненията в полето на водната пара на модела при синоптични обстановки с опасни метеорологични явления. Като следваща стъпка в раздел 6.2.2 е представено сравнение на разработените в рамките на проект BeRTISS тропосферни продукти и численият модел, приложени в оперативни условия през сезона за борба с градушките, май - септември 2020 г.



Фигура 6.4: WRF IWV (червени символи) и GNSS IWV (сини символи) за периода 15 - 17 май 2019 г. в а) Грамада (горе), Гелеменово (долу) и б) Долно Церовене (горе), Голям Чардак (долу).

## 6.2 Анализ на IWV от GNSS и WRF: Северозападна България

В дисертационния труд е направено разпределение на дните с гръмотевична дейност и тези без регистрирана такава за период от пет месеца, от май до септември за годините от 2012 до 2017 г. Информацията за изследвания период е получена от архива на НИМХ и е описана в глава 3.6.1. Направено е сравнение между WRF IWV и GNSS IWV за четири станции в Северозападна България: Бардарски геран (BERG); Долно Церовене (DCER); Долни дъбник (DDUB) и Грамада (GRAM) за 2020 г.

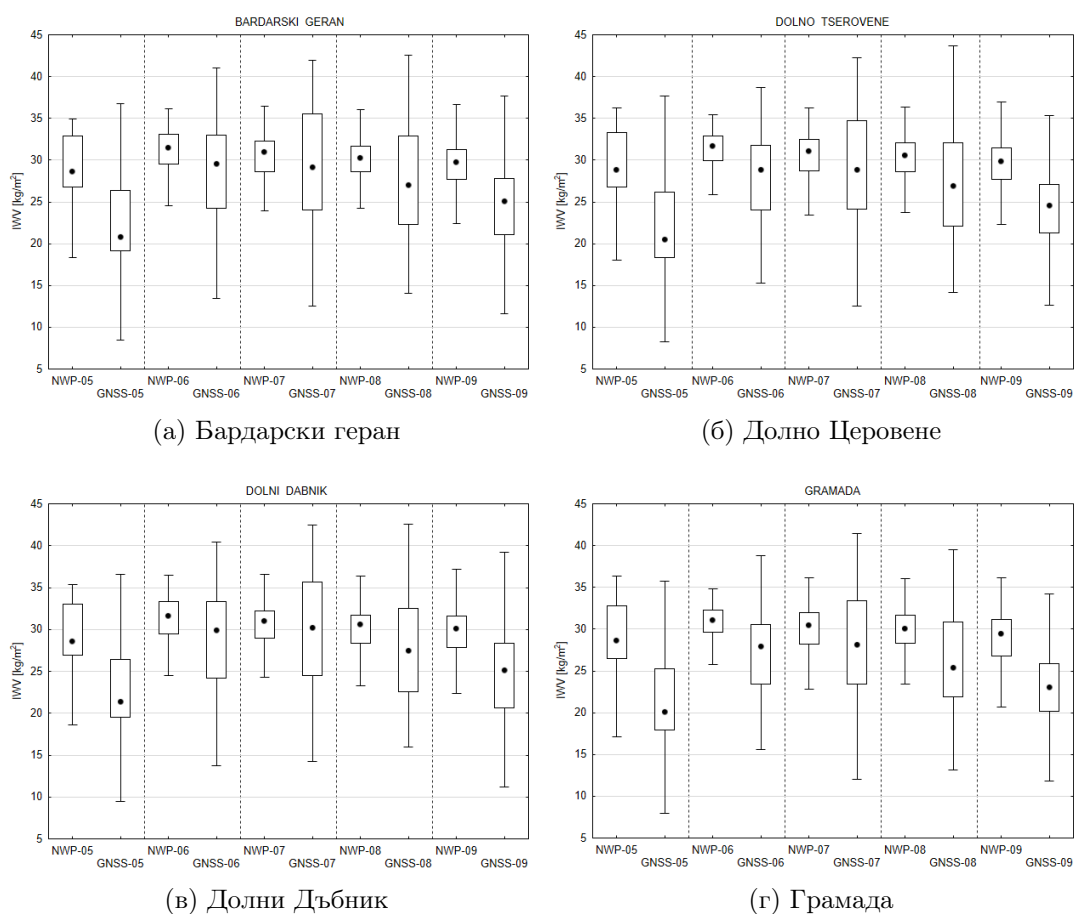
### 6.2.1 IWV за дни с/без гръмотевична дейност

Направено е разпределение на IWV в дните с гръмотевична дейност (TH) и дните без гръмотевична дейност (NO) за всеки месец в станция Ловеч. Медианата на IWV за дните с гръмотевична дейност е между  $23,4 \text{ kg/m}^2$  през май и  $36,6 \text{ kg/m}^2$  през юли. Съответно, медианата на IWV за дните без гръмотевична дейност е между  $20,63 \text{ kg/m}^2$  през май и  $27,30 \text{ kg/m}^2$  през юли. Медианите на IWV в дните с гръмотевична дейност са между 2 и  $9 \text{ kg/m}^2$  по-високи, спрямо дните без гръмотевична дейност. През юли и септември тази разлика е най-значителна. Очаквано разпределението на стойностите на IWV в дните с гръмотевична дейност е по-малко, поради завишените стойности на IWV преди гръмотевичната буря. Използвайки същия подход, но за GNSS станцията SOFI, подобни резултати са докладвани и в *Guerova et al.* (2019).

### 6.2.2 Оценка на WRF IWV за Северозападна България: май-септември 2020 г.

Оценката на полето на водната пара в числения модел WRF е направена за между май и септември 2020 г. и резултатите са представени във фигура 6.5. Черната точка е медианата, полето на кутийката е в диапазона от 25 до 75 перцентил, а мустаците са в диапазона  $\pm 1.5$  от полето на кутийката (IRQ). Коефициентът на корелация между WRF IWV и GNSS IWV за

всеки месец е както следва: май - 0,77; юни - 0,67; юли - 0,72; август - 0,61 и септември - 0,72. Възможна причина за по-ниския коефициент на корелация през август е наличната информация, която за всички станции е между 308 и 311 измервания. За сравнение наличната информация за септември е 717 измервания за всички станции. За май, юни и юли наличната информация е между 460 и 499 измервания.



Фигура 6.5: Сравнение на IWW от WRF и GNSS за периода май-септември 2020 г. в станции: а) Бардарски геран, б) Долно Церовене, в) Долни Дъбник и г) Грамада. (Box-Plot: Median; Box: 25%-75%; Whisker: Non-Outlier Range.)

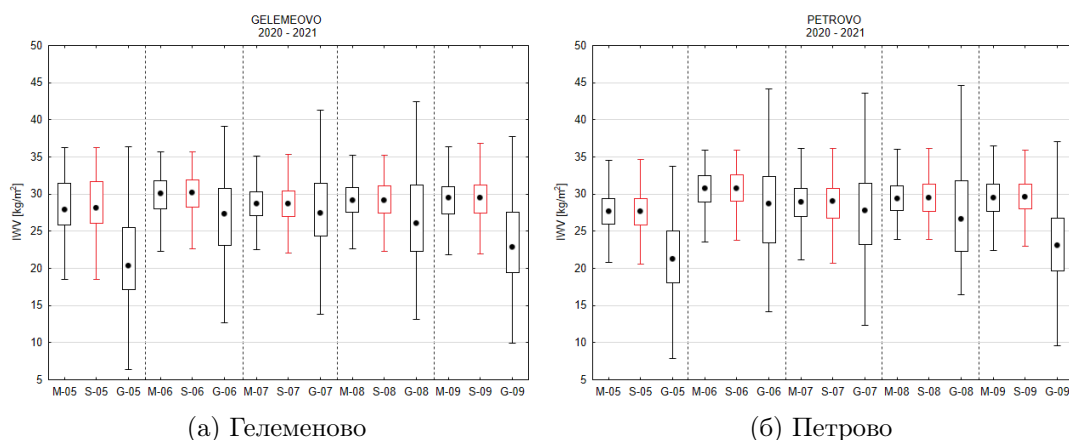
### 6.3 Анализ на IWV от GNSS и WRF: Южна България

За сравнение между WRF IWV и GNSS IWV е избран периода между май и септември 2020-2021 г. Сравнението е направено за станциите Гелеменово (GELM) и Петрово (PETR) от мрежата на BeRTISS в централните райони на Южна България. Използвани са две реализации на WRF IWV. Първата е от 0 до 24 h за всички дни в изследвания период (Model, M), а за втората са използвани само часовете между 6 и 24 h за всички дни в изследвания период (Spin-up, S). Разликите в стойностите на WRF IWV(M) и WRF IWV(S) са от около  $0.10 \text{ kg/m}^2$  за медианите и на трите изследвани станции за целия период май-септември. Направено и е сравнение на WRF IWV(M) и WRF IWV(S) с получените GNSS IWV (Gnss, G). Резултатите са представени във фигура 6.6. Черната точка е медиана и полето на кутийката е в диапазона от 25 до 75 перцентил, а мустаците са в диапазона  $\pm 1.5$  от полето на кутийката (IRQ). Коефициентът на корелация между IWV(M) и IWV(G) за Гелеменово е: май - 0,74; юни - 0,65; юли - 0,58; август - 0,65 и септември - 0,73. За сравнение броя на статистическата извадка за станцията е от 936 през август до 1369 през септември. За станция Петрово коефициентът на корелация е: май - 0,47; юни - 0,64; юли - 0,61; август - 0,62 и септември - 0,71. За сравнение броя на статистическата извадка за станцията е от 938 през август до 1368 през септември.

От получените резултати може да се заключи, че IWV(M) е значително завишена спрямо IWV(G) за месец май и септември. За месец юни и август разликите са малки, но WRF отново завишава стойностите на IWV(M). Само за месец юли разликата между IWV(M) и IWV(G) е под  $1 \text{ kg/m}^2$ .

### 6.4 Класификационни функции за гръмотевична дейност: Южна България

По методиката представена в *Guerova et al.* (2019), са разработени класификационни функции на базата на индекси на неустойчивост от аеро-

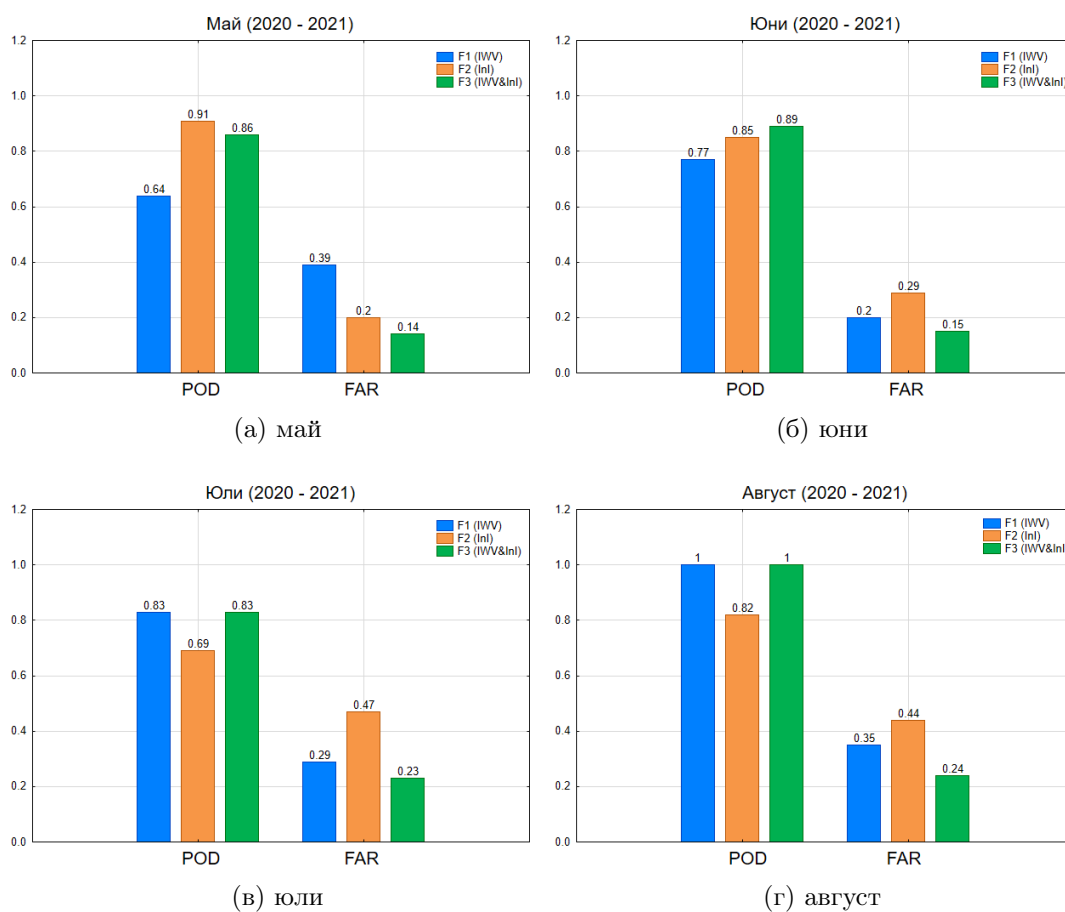


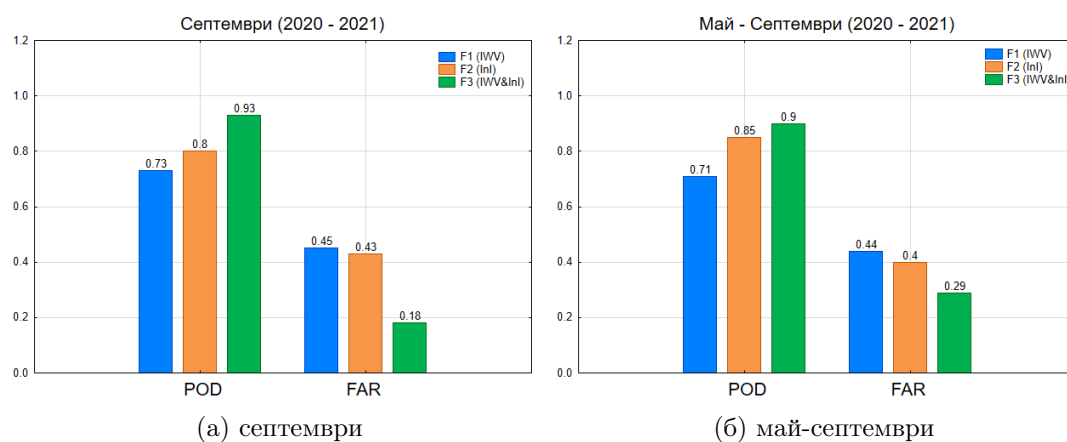
Фигура 6.6: Сравнение на WRF I WV(M), WRF I WV(S) и GNSS I WV (G) за периода май-септември, от 2020 до 2021 г. за станция: а) Гелеменово и б) Петрово. Box-Plot: Median; Box: 25%-75%; Whisker: Non-Outlier Range.

логичен сондаж и GNSS I WV. Намерени са и прагови стойности на I WV за Южна България. Чрез поетапен дискриминантен анализ са получени POD и FAR за периода май-септември 2020 - 2021. Сравнени са резултатите за три класификационните функции а именно: 1) класификационна функция от I WV - F1(I WV), 2) класификационна функция от индекси на неустойчивост - F2(InI) и 3) класификационна функция от I WV и индекси на неустойчивост F3(I WV&InI). В месечната класификационна функция F1 за целия период е избрана само I WV. Чрез експертен анализ за месечната класификационна функция F2 определените индекси са: (1) май: K, CAPE, TT и Li; (2) юни: K и TT; (3) юли: K, SWEAT и TT; (4) август: K, SWEAT и TT; (5) септември: K, CAPE, BRN и Li; (6) май-септември: Li, K и TT. Отново чрез експертен анализ за месечната класификационна функция F3(I WV&InI) определените индекси са: (1) май: TT, Li, I WV, BRN; (2) юни: K и I WV; (3) юли: I WV, Li, SWEAT, K и TT; (4) август: K, CAPE, TT, Li, I WV и SWEAT; (5) септември: I WV, CAPE, Li, TT, SWEAT и BRN; (6) май-септември: K, I WV, TT, SWEAT, Li, CAPE и BRN. На фигура 6.7 са представени POD и FAR за разглеждания период между май и септември 2020 - 2021 г. Стойностите на POD за функция F1(I WV) са от 0.64 през май до 1 през август. Стойностите на FAR за F1(I WV) са от 0.2 през юни до 0.45 през септември. При F2(InI) POD са от 0.69 през юли



до 0.91 през май. А F2(InI) FAR са от 0.2 през май и 0.50 през август. При комбинираните резултати F3(IWV&InI) през юни, септември и периода май-септември стойностите на POD се повишават между 5 и 10%, а стойностите на FAR се понижават. Само през месец май F2(InI) POD е с по-висока стойност спрямо тази на F3(IWV&InI). В заключение може да се отбележи, че добавянето на IWV към индексите на неустойчивост подобрява класификационната функция за прогнозиране на гръмотевична дейност с 5% и намалява значително фалшивите аларми с около 15%.





Фигура 6.7: Сравнение на POD и FAR за класификационни функции F1(IWV), F2(InI) и F3(IWV&InI) за 2020 - 2021 г.

## Глава 7

# Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията

### 7.1 Научни приноси

Приносите са от научно-приложен характер и могат да се обобщят в:

- Изследването на 20 синоптични обстановки от фронтален и вътрешномасов характер на територията на България, показва че наблюденията на водна пара по метода GNSS метеорология допринасят за подобряване на описанието на пространствено-времевите характе-

ристики на конвективните процеси. Установен е характерен дневен ход с добре изразени градиенти на водната пара.

- Количественият анализ на корелацията между водна пара получената по метода GNSS метеорология и числени експерименти показва значително по-високи стойности при фронтални нахлувания като в 7 от 10 случая тя е над 0.7, спрямо корелацията при вътрешномасовите процеси.
- За пръв път в България и Югоизточна Европа са използвани наклонени тропосферни закъснения за детайлно изследване на две синоптични обстановки с особено опасни метеорологични явления - градушка на 8 юли 2014 г. и 15-16 май 2019 г. Комплексният анализ на наклонените тропосферни закъснения от GNSS, числен модел и атмосферен реанализ позволяват да се утновят времеви отмествания и разлики във вертикалната структура преди, по-време и след конвективните бури.
- На базата на разработените в дисертацията класификационни функции може да се заключи, че добавянето на интегрираната водна пара от GNSS към индексите на неустойчивост, води до повишаване на вероятността за регистрация и намаляване на фалшивите аларми на дните с гръмотевичната дейност в Южна България. Класификационните функции ще бъдат внедрени в оперативния сервиз "Български интегриран продукт за свръхкраткосрочна прогноза" (БИНКА).

## 7.2 Публикации по дисертацията

### 7.2.1 Публикации в списания

1) M. Slavchev, A. Stoycheva and G. Guerova, 2019. Comparative analysis of convective processes and the intense precipitation using numerical weather model and GNSS meteorology method, Bul. J. Meteo. Hydro, 23/1, 31-45.

2) Guerova G., T. Dimitrova, K. Vassileva, M. Slavchev, K. Stoev, S.

Georgiev, 2020. BalkanMed real time severe weather service: progress and prospects in Bulgaria. *Advances Space Research*, 66/12, 2844-2853. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.005>. e3

3) M. Slavchev, E. Lasota, J. Kaplon, 2020. Raytracing the 8 July 2014 hail storm in Sofia, Bulgaria, *Bul. J. Meteo. Hydro*, 24/2, 24/2, 37-50.

4) Lasota, E., M. Slavchev, G. Guerova, W. Rohm, and J. Kaplon, Combined space- and ground-based GNSS monitoring of two severe hailstorm cases in Bulgaria, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, doi:10.1175/JTECH-D-21-0100.1, 39, 5, 649–665, 2022.

### **7.2.2 Публикация в разширен текст на научни форуми**

1) Guerova G., M. Slavchev, R. Mitzeva, Tsv. Dimitrova and Tzv. Simeonov: Use of GNSS water vapour for severe weather studies in Bulgaria: hail and heavy rain in 2012, *Proceedings of the 8th European Conference on Severe Storms – ECSS 2015*, Wiener Neustadt, Austria, 14-18/09/2015.

### **7.2.3 Публикация в глава на книга**

1) Slavchev M. and G. Guerova, "WRF model evaluation with GNSS-IWV for intense precipitation cases in Bulgaria in COST Action ES1206: Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate, Jones J., G. Guerova, J. Dousa, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, R. van Malderen [editors], Springer [publisher], 2020, 210-217, doi:10.1007/978-3-030-13901-8\_4.

## **7.3 Представяне на резултатите**

1) M. Slavchev, E. Lasota, J. Kaplon "Raytracing of the Hail storm on 8 July 2014 in Sofia, Bulgaria" 1st colloquium GNSS applications in the BalkanMed region, 30-31 January 2020, Sofia, Bulgaria. (oral)

- 2) Guerova, G., Tz. Dimitrova, M. Slavchev, K. Stoev, S. Georgiev, and K. Vassileva "BalkanMed real time severe weather service: progress and prospects in Bulgaria 2019 EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology, 9-13 September 2019, Copenhagen, Denmark. (poster)
- 3) Dimitrova Tsv., K. Stoev, G. Guerova, M. Slavchev and S. Georgiev, "Bulgarian Integrated NowCASTing tool (BINCA) 2018 EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology, 3-7 September 2018, Budapest, Hungary. (poster)
- 4) M. Slavchev, "Evaluation of NWP WRF model with GNSS-IWV during intense precipitation cases in Bulgaria"2nd European Hail Workshop, 19-21/04/2017, Bern, Switzerland. (poster)
- 5) M. Slavchev and B. Mircheva, "Evaluation of hail storm and flash floods in Bulgaria during 2014 using GNSS meteorology GNSS4SWEC Final Workshop, 21-23/02/2017, ESTEC, Netherlands. (oral)
- 6) Guerova G., Tzv. Simeonov, M. Slavchev, A. Stoycheva, B. Mircheva, "Bulgarian contribution to COST Action Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate (GNSS4SWEC) 3rd National Physics Congress, 29/09-2/10/2016, Sofia, Bulgaria. (oral)
- 7) M. Slavchev, "Development of severe weather tool with GNSS tropospheric products in Bulgaria 3rd National Physics Congress, 29/09-2/10/2016, Sofia, Bulgaria. (oral)
- 8) Guerova G. and M. Slavchev, "Comparison of WRF model with GNSS tropospheric products during intense precipitation events in Bulgaria 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology, 12-16/09/2016, Trieste, Italy. (poster)
- 9) M. Slavchev, "Development of severe weather tool with GNSS tropospheric products in Bulgaria 2nd GNSS4SWEC summer school, 29-31/08/2016, Potsdam, Germany. (poster)

10) Slavchev M., G. Guerova and A. Stoycheva: Evaluation of NWP WRF model with GNSS-IWV during intense precipitation cases in Bulgaria, 3rd GNSS4SWEC workshop, Reykjavik, Iceland, 8-10/03/2016. (oral)

11) Guerova G., M. Slavchev, R. Mitzeva, Tsv. Dimitrova and Tzv. Simeonov: "Use of GNSS water vapour for severe weather studies in Bulgaria: hail and heavy rain in 2012 8th European Conference on Severe Storms – ECSS 2015, Wiener Neustadt, Austria, 14-18/09/2015. (poster)

## Глава 8

### Заклучение

Продължавайки казаното от *Doswell III and Schultz (2006)* ”може да има и други причини за смъртта на човешките прогнози на времето, но раздробяването на сложната атмосфера с нейните нелинейни, вероятно хаотични взаимодействия в една всеобхватна променлива изглежда невероятно... Ако научният прогрес някога достигне до такъв прогностичен параметър за опасните конвективни бури или числените модели станат почти перфектни, по отношение на прогнозирането на опасната конвекция, тогава необходимостта от човешки прогнози наистина ще изчезне, независимо от желанията ни. Но ние вярваме, че е малко вероятно това да се случи скоро. Дори и ако този момент настъпи, остава задължението на оперативните синоптици да използват информацията, с която разполагат, възможно най-ефективно.”

В този дисертационен труд е изследван потенциала на тропосферни GNSS продукти с висока времева разрешаваща способност за диагноза и прогноза на конвективни процеси в България. Този нов за България метод за прогнозиране на опасни метеорологични явления е комбиниран с утвърдените методи и източници на информация, като радарни изображения

ния, спътникови и наземни наблюдения, както и числен модел за прогноза на времето и атмосферен реанализ. Продуктите от GNSS мрежата се генерират на всеки час и осигуряват непрекъснато наблюдение на ключовия за развитието на конвекцията параметър – водна пара. Разработени са карти на двумерното разпределение на интегрираната водна пара във времето. След успешна година на тестов период и оперативни настройки, обновяването на информацията в българския интегриран продукт за свръхкраткосрочна прогноза е сведено до 15 min и е с цел използването на продукта за прогноза на конвективни процеси. За напред се планира намаляване на стъпката по време на 5 min. Визуализираните продукти от интерактивната уеб платформа на БИНКА са достъпни до всеки оперативен синоптик, метеорологична служба, регионални звена за защита на населението и околната среда, както и широката общественост.

Добавената стойност на GNSS тропосферните продукти при прогнозиране на конвективни бури е голяма, но при наличие на висока времева и пространствена разделителна способност. В началото на изследването на 20-те синоптични обстановки, представени в глава 4 от дисертационния труд, информацията от високоточните GNSS мрежи от Гърция и фирмата Зенит-Гео беше от мрежа с висока пространствена разделителна способност от над 120 високоточни GNSS станции. За съжаление тропосферните продукти бяха само за 2012 г. За изследването на интензивната градушка в София единствената налична информация беше от станция SOF1, което осигурява добра времева, но ниска пространствена разделителна способност. Впоследствие добавихме тропосферни продукти и от станция SOF1, но информацията беше представена само за три дневен период. С изградената през 2018-2019 г. оперативна високоточна GNSS мрежа по проекта BeRTISS, беше поставено началото на нов етап в използването на тропосферните продукти за изследване и прогнозиране на опасни метеорологични явления в България. Получените в този дисертационен труд класификационни функции и прагови стойности на GNSS IWV, са първа стъпка в оперативното им прилагане в НИМХ и ИАБГ. Следва да се отбележи, че към момента разстоянието между повечето GNSS станции е около 50 km, а съгласно изискванията на СМО за свръхкраткосрочна прогноза на времето е необходимо тя да бъде 5 km. За реализацията на

тази цел е необходимо подобряване на пространствената разделителна способност на съществуващата високоточна GNSS мрежа, което е свързано с много финансов, изчислителен и чевешки ресурс, за да може да се реализира възможно най-скоро.

Като бъдеща работа може да се внедри и асимилация на информация от високоточните GNSS мрежи в числените модели за прогноза на времето в НИМХ. Това вече е възможно, защото от 2019 г. мрежата по проекта BeRTISS е оперативна и предоставя тропосферни продукти в близко до реалното време, с висока времера разделителна способност от 1 час. Предвижда се и интегрирането на Европейската GNSS система "ГА-ЛИЛЕО" в центъра за обработка на GNSS информация към СУ (SUGAC).

## Библиография

- Baelen, J. V., M. Reverdy, F. Tridon, L. Labbouz, 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.
- Barindelli, S., E. Realini, G. Venuti, A. Fermi, and A. Gatti, Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers, *Earth, Planets and Space*, 70(1), 1–18, 2018.
- Benevides, P., J. Catalao, and P. M. A. Miranda, On the inclusion of gps precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(12), 2605–2616, doi:10.5194/nhess-15-2605-2015, 2015.
- Benevides, P., J. Catalao, and G. Nico, Neural network approach to forecast hourly intense rainfall using gnss precipitable water vapor and meteorological sensors, *Remote Sensing*, 11(8), doi:10.3390/rs11080966, 2019.
- Bocheva, L., T. Dimitrova, R. Penchev, I. Gospodinov, and P. Simeonov, Severe convective supercell outbreak over western bulgaria on july 8, 2014, *Időjárás*, 122, 177–202, doi: 10.28974/idojaras.2018.2.5, 2018.
- Chen, F., K. Mitchell, J. Schaake, Y. Xue, H.-L. Pan, V. Koren, Q. Y. Duan, M. Ek, and



- A. Betts, Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with five observations, *Journal of Geophysical Research*, 101, 7251–7268, 1996.
- Chen, G., and T. A. Herring, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20,489–20,502, 1997.
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, and P. Fridez, Bernese GNSS software version 5.2, 2015.
- Deng, Z., M. Bender, F. Zus, M. Ge, G. Dick, M. Ramatschi, J. Wickert, U. Löhnert, and S. Schön, Validation of tropospheric slant path delays derived from single and dual frequency GPS receivers, *Radio Science*, 46(06), 1–11, 2011.
- Doswell III, C., and D. Schultz, On the use of indices and parameters in forecasting, *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 1, 1–22, 2006.
- Douša, J., Gop’s trop-net system documentation <https://www.pecny.cz/tropnet/documents/tropnet-documentation.pdf>, 2014.
- Egvap, *e<sub>GVAP</sub>*, <http://eumetnet.eu/activities/observations-programme/current-activities/e-gvap/>, Accessed: 2022-24-05.
- Elgered, G., H. Plag, P. van der Marel, S. Barlag, and J. Nash (Eds.), *COST 716: Exploitation of ground-based GPS for operational numerical weather prediction and climate applications*, European Commission, Brussels, [https://e-services.cost.eu/files/domain\\_files/ESSEM/Action\\_716/final\\_report/final\\_report-716.pdf](https://e-services.cost.eu/files/domain_files/ESSEM/Action_716/final_report/final_report-716.pdf), Accessed: 2022-24-05, 2005.
- Feng, P., F. Li, J. Yan, F. Zhang, and J.-P. Barriot, Assessment of the Accuracy of the Saastamoinen Model and VMF1/VMF3 Mapping Functions with Respect to Ray-Tracing from Radiosonde Data in the Framework of GNSS Meteorology, *Remote Sensing*, 12(20), 3337, 2020.
- Galway, J. G., The lifted index as a predictor of latent instability, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37(10), 528 – 529, doi:10.1175/1520-0477-37.10.528, 1956.
- George, J. J., *Weather forecasting for aeronautics*, Academic press, 2014.
- Glickman, T. S., and W. Zenk, *Glossary of Meteorology*, ARRAY(0x55c1ba53b2d0), Boston, 2000.
- Guerova, G., T. Simeonov, and N. Yordanova, The Sofia University Atmospheric Data Archive (SUADA), *Atmos. Meas. Tech.*, 7(8), 2683–2694, doi:10.5194/amt-7-2683-2014, 2014.

- Guerova, G., T. Dimitrova, and S. Georgiev, Thunderstorm classification functions based on instability indices and gnss iwv for the sofia plain, *Remote Sensing*, 11(24), doi:10.3390/rs11242988, 2019.
- Guerova, G., T. Dimitrova, K. Vassileva, M. Slavchev, K. Stoev, and S. Georgiev, BalkanMed real time severe weather service: progress and prospects in Bulgaria, *Advances in Space Research*, 66(12), 2844–2853, 2020.
- Guerova, G., et al., Review of the state of the art and future prospects of the ground-based gnss meteorology in europe, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(11), 5385–5406, doi:10.5194/amt-9-5385-2016, 2016.
- Ha, S.-Y., Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo, C. Rocken, and T. Van Hove, Comparison of GPS slant wet delay measurements with model simulations during the passage of a squall line, *Geophysical research letters*, 29(23), 2002.
- Hersbach, H., et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049, 2020.
- Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo, Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(D20302), 2008.
- Hofmeister, A., Determination of path delays in the atmosphere for geodetic VLBI by means of raytracing, Ph.D. thesis, PhD thesis. Department of Geodesy and Geoinformation, TU Wien, 2016.
- Huelsing, H. K., J. Wang, C. Mears, and J. J. Braun, Precipitable water characteristics during the 2013 colorado flood using ground-based gps measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(11), 4055–4066, doi:10.5194/amt-10-4055-2017, 2017.
- Iwabuchi, T., I. Naito, and N. Mannoji, A comparison of Global Positioning System retrieved precipitable water vapor with the numerical weather prediction analysis data over the Japanese Islands, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D4), 4573–4585, 2000.
- Jones, J., G. Guerova, J. Dousa, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, and R. van Malderen (Eds.), *COST Action ES1206: Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate*, 563 pp., Springer Nature Switzerland AG, iISBN: 978-3-030-13900-1, 2020a.
- Jones, J., G. Guerova, J. Dousa, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, and R. van Malderen (Eds.), *Sofia University GNSS analysis center (SUGAC): First processing campaign*, 178-181 pp., Springer Nature Switzerland AG, doi:10.1007/978-3-030-13901-8\_3, 2020b.

- Lasota, E., W. Rohm, G. Guerova, and C.-Y. Liu, A comparison between ray-traced GFS/WRF/ERA and GNSS slant path delays in tropical cyclone Meranti, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(1), 421–435, 2020.
- Lasota, E., M. Slavchev, G. Guerova, W. Rohm, and J. Kapłon, Combined space- and ground-based gns monitoring of two severe hailstorm cases in bulgaria, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, doi:10.1175/JTECH-D-21-0100.1, 2022.
- Li, G., and J. Deng, Atmospheric water monitoring by using ground-based GPS during heavy rains produced by TPV and SWV, *Advances in Meteorology*, 2013, 2013.
- Li, X., F. Zus, C. Lu, G. Dick, T. Ning, M. Ge, J. Wickert, and H. Schuh, Retrieving of atmospheric parameters from multi-GNSS in real time: Validation with water vapor radiometer and numerical weather model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(14), 7189–7204, 2015.
- Mahlstein, I., J. Bhend, C. Spirig, and O. Martius, Developing an automated medium-range flood awareness system for switzerland based on probabilistic forecasts of integrated water vapor fluxes, *Weather and Forecasting*, 34(6), 1759–1776, 2019.
- Mazany, R., S. Businger, and S. Gutman, A lightning prediction index that utilizes gps integrated precipitable water vapor, *Weather and forecasting*, 17(5), 1034–1047, 2002.
- Miller, R. C., Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the air force global weather central, *Tech. rep.*, 1972.
- Petrova, S., and R. Mitzeva, Difference in diurnal variation of lightning over bulgaria and black sea, p. 120010, doi:10.1063/1.5091268, 2019.
- Petrova, S., R. Mitzeva, V. Kotroni, J. Latham, and E. Peneva, Analyses of summer lightning activity and precipitation in the central and eastern mediterranean, *Atmospheric Research*, 91, 453–458, doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.013, 2009.
- Priego, E., J. Jones, M. Porres, and A. Seco, Monitoring water vapour with GNSS during a heavy rainfall event in the Spanish Mediterranean area, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 282–294, 2017.
- Sapucci, L. F., L. A. T. Machado, E. M. de Souza, and T. B. Campos, Global positioning system precipitable water vapour (gps-pwv) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting, *Meteorological Applications*, 26(1), 49–63, doi:https://doi.org/10.1002/met.1735, 2019.
- Slavchev, A., M. Stoycheva, and G. Guerova, Сравнителен анализ на конвективни процеси и свързаните с тях интензивни валежи чрез числен модел за прогноза на времето и метода ГНСС метеорология, *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 23(1), 2019.