



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

**Аномалии на компоненти от
хидрологичния цикъл в
България в периода 2003-2014 г.**

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

За присъждане на образователна и научна степен
„Доктор“

по специалност 4.1 Физически науки - Метеорология

на

Биляна Руменова Мирчева

Научен ръководител:

/доц. д-р Гергана Герова/

София 2021

Дисертантът е задочен докторант към Катедра "Метеорология и геофизика Физически факултет, Софийски университет "Св. Климент Охридски" в периода 2016-2021 г.

Брой страници – 143

Брой фигури – 40

Брой цитирани литературни източници – 131.

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на2021 г. от ... часа в аудитория ... на Физическия факултет на Софийския университет "Св. Климент Охридски", бул. "Джеймс Баучер" 5. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Физическия факултет на Софийския университет "Св. Климент Охридски", бул. "Джеймс Баучер" 5.

Благодаря на:

Доц. д-р Гергана Герова за предоставената възможност и помощта тази работа да се осъществи.

Гл. ас. д-р Милен Цеков от СУ „Св. Климент Охридски“, д-р Улрих Мейер от Университета в Берн, колегите от SUADA, DAMOCLES и Габриела Владимирова за ползотворната съвместна работа.

П. Сабо от унгарската метеорологична служба за предоставяне на данни от Аладин-климат.

Людмил Методиев за помощта с графичното оформление.

Цялото ми семейство и най-вече на Александър, Георги и Йордан Косташки за подкрепата.

Съдържание

1	Актуалност и цел на дисертационния труд	4
1.1	Актуалност на проблема	4
1.2	Цел и задачи на дисертацията	5
2	Съвременно състояние на проблема	6
2.1	Хидрологичен цикъл и неговите компоненти	6
2.2	Климатични промени и проекции: югоизточна Европа и България	6
2.3	Екстремни прояви на времето и климата	7
2.3.1	Гореща вълна 2007	7
2.3.2	Наводнения 2014	8
2.3.3	Сложни съставни събития	8
3	Метод на работа	8
3.1	Декомпозиция на времеви редове	9
3.2	Наблюдения от спътниковата система ГРЕЙС	10
3.3	Интегрирана водна пара от ГНСС	10
3.4	Атмосферен реанализ ERA5	11
3.5	Регионален климатичен модел Аладин-климат	11
3.6	Индекси на климатичната изменчивост	12
3.7	Индекси за валеж и дефицит на влажността	12
4	Опасни метеорологични явления - 2007 г.	13
4.1	Аномалии на времевите редове - 2007 г.	13
4.2	Тенденции и крос-корелации на температура, валеж, ИВП и TWSA	14
4.3	Регионален числен модел Аладин-климат	16
5	Опасни метеорологични явления - 2014 г.	17
5.1	Аномалии на времевите редове 2014 г.	17
5.2	Тенденции на времевите редове	19
5.3	Индекси на климатична изменчивост	22
5.4	Статистически анализ на температурата и валежа от ERA5	23

6	Индекси за сух/влажен режим 2003-2014 г.	25
6.1	Анлиз на DSI и SPI за периода 2003-2014 г.	25
6.2	Разлагане по компоненти на DSI и SPI	27
6.3	Оценка на SPI от наблюдения и ERA5	30
7	Съставни метеорологични и климатични събития: пожари и топлинен стрес	31
7.1	Декомпозиция на факторите водещи до грешки при анализа на опасностите от пожар и топлинен стрес	31
7.2	Едномерни разпределения: T, RH, CBI и WBGT	33
7.3	Оценка на грешката на CBI и WBGT	39
8	Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията	43
8.1	Научни приноси	43
8.2	Публикации по дисертацията	45
8.2.1	Публикации в списания	45
8.2.2	Цитирания на публикации	46
8.3	Представяне на резултатите по дисертацията	46
9	Заклучение	49

1 Актуалност и цел на дисертационния труд

1.1 Актуалност на проблема

Добре известен факт е, че повишаването на средногодишната глобална температура води до промени в хидрологичния цикъл и неговите компоненти. Например повишената температура от 1°C води до увеличаване на водната пара със 7 %, в съгласие с уравнението на Клаус и Клапейрон. Повишеното количество на водната пара в атмосферата води до облакообразуване и увеличение на валежите глобално със средно 1 %. Валежите допринасят за повишаване и на количеството влага в почвата и могат да доведат до наводнения при надвишаване на капацитета на почвения резервоар. Така представеният кръговрат на водата води до увеличение на честотата на продължителни периоди с наводнения в различни части от света, но е съпроводен и с продължителни суши в други райони. Понастоящем различните компоненти на хидрологичния цикъл като изпаряване, облакообразуване, валеж, воден отток и съдържание на водата в почвата се изучават в повечето случаи изолирано. Глобалната и регионалната картина на хидрологичния цикъл и неговите времеви и пространствени изменения все още е непълна. Регулярни измервания на компоненти от хидрологичния цикъл са често са непълни, а на трудно достъпни места липсват. През последните две десетилетия дистанционните методи за сондиране на хидрологичния цикъл се използват за оценка пространствените и времевите му изменения. Количествена оценка на атмосферната водна пара е възможно чрез използване на наземни наблюдения от Глобални Навигационни Спътникови Системи (ГНСС). Чрез ГНСС се получават наблюдения с висока пространствена разделителна способност, както локално така и глобално, независимо от метеорологичните условия. Наземното водно количество е основен компонент на хидрологичния цикъл и може да се получи от спътникова мисия Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE, ГРЕЙС). Наземното водно количество (TWS) е съвкупност от количествата на подземни води, почвена влага, повърхностни води, сняг и лед. Данните от ГРЕЙС имат потенциал за оперативно приложение при ранно прогнозиране и числена оценка на риск от събития, свързани с неб-

лагоприятни социални, икономически и екологични последици. Пример за такива са събития са характерните за югоизточна Европа сухи и влажни периоди.

1.2 Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертацията е използване на съвременни дистанционни методи за сондиране на атмосферата и наземното водно количество за оценка на факторите водещи до сух и влажен режим на хидрологичния цикъл в България за периода 2003-2014 г. Задачите свързани с тази цел са:

- 1) Изследване на зависимостите в компонентите на хидрологичния цикъл (температура, валеж, интегрирана водна пара и наземно водно количество) по време на горещата вълна през юли 2007 г.
- 2) Оценка на представянето на компонентите на хидрологичния цикъл от регионален климатичен модел Аладин-климат по време на горещата вълна.
- 3) Количествена оценка на взаимодействието между компонентите на хидрологичния цикъл довели до влажен режим и голям брой наводнения в България и района през 2014 г.
- 4) Оценка на крос-корелациите между индекси на климатична изменчивост и компонентите на хидрологичния цикъл в периода 2003-2014 г.
- 5) Количествена оценка на индекси за сух и влажен режим за периода 2003-2014 г.
- 6) Количествена оценка на факторите водещи до грешки в индекси за топлинен стрес и пожароопасност в глобални климатични модели.

2 Съвременно състояние на проблема

2.1 Хидрологичен цикъл и неговите компоненти

Основни компоненти на хидрологичния цикъл са водната пара, валеж и наземното водно количество, което се дефинира като общото количество повърхностни и подземни води, почвена влага и снежна покривка. През последните две десетилетия информация за два компонента от хидрологичния цикъл дават спътниковите наблюдения за интегрираната водна пара (ИВП) и аномалия на наземното водно количество (TWSA), от Глобалните Навигационни Спътникови Системи и спътникова система ГРЕЙС. През последното десетилетие бяха реализирани кампании за обработка на ГНСС наблюденията от Европейската Референтна Мрежа (EUREF, (*Pacione et al.*, 2017)) и наземните станции на Международният ГНСС Сервиз (IGS, (*Byun and Bar-Sever*, 2009)). Спътниковите мисии се доказват като ценен източник на данни за изследване на хидрологичните компоненти на Земята, включително TWS. Създаването на Европейската гравитационна служба за подпомагане на управлението при извънредни ситуации (EGSIEM, (*Jäggi et al.*, 2019)) е важна стъпка в подпомагане оперативното използване на спътникова мисия ГРЕЙС за ранно предупреждение за наводнения в Европа. През 2019 г. нов оперативен център COmbination Service for Time-variable Gravity (COST-G *Jäggi et al.* (2020)) е създаден към Международният гравиметричен сервиз на Международната асоциация по геодезия. В настоящата дисертация са използвани наземни водни количества предоставени от двата оперативни центъра EGSIEM и COST-G.

2.2 Климатични промени и проекции: югоизточна Европа и България

По данни от климатичния портал на Световната банка (*Evans and Webster*, 2008) като последица от климатичните промени е вероятно да настъпи съществено намаляване на валежите (-25 %) в региона на югоизточна Европа. Освен намаляване в общото количество валежи в югоизточна Европа, според четвъртия поред годишен климатичен доклад на Междуправителствения комитет по изменение на климата (IPCC, ?) голяма е вероятността

от увеличаване на екстремните валежи и риска от крайбрежни и речни наводнения в Европа и без адаптивни мерки това ще увеличи значително щетите от наводнения.

2.3 Екстремни прояви на времето и климата

В четвъртия поред годишен климатичен доклад на Междуправителствения комитет по изменение на климата (IPCC *Stocker et al.* (2013)), се отбелязва, че екстремните събития свързани с температурата са добре симулирани от глобалните климатични модели, но все още има ограничения при симулирането на валежа *Seneviratne et al.* (2012). Според доклада има средна увереност в прогнозираното увеличаване в продължителността и интензивността на периодите на суша в глобален и регионален мащаб, включително в централна, южна Европа и Средиземноморския регион. Проучванията показват, че има средна увереност в очакваното увеличение на продължителността и интензивността на сушите в някои региони по света, включително в южна Европа и Средиземноморския регион и Централна Европа (*Sheffield and Wood* (2008), *Sillmann and Roeckner* (2008)).

2.3.1 Гореща вълна 2007

Повишаването на средногодишната глобална температура води до промени в хидрологичния цикъл и неговите компоненти. Мониторингът на водната пара и TWS представлява интерес за югоизточна Европа, тъй като горещите вълни са често срещано явление в региона. Например горещата вълна през юли 2007 г. има голям географски обхват, достигащ и до България. Горещата вълна продължава шест дни от 19 до 25 юли *Simeonov et al.* (2013). Атмосферната циркулация, водеща до горещата вълна, се характеризира с изместване на север на субтропичното струйно течение, което позволява на субтропична африканска въздушна маса да достигне Балканския полуостров и до 50° N.

2.3.2 Наводнения 2014

През 2014 г. валежи над нормата са регистрирани в югоизточна Европа. Както показва *Stoycheva et al.* (2015) през 2014 г. наводненията в България започват още през януари и продължават през декември. През 2014 г. се наблюдават най-високите годишни валежи в България за 20-годишния период от 1999 г. до 2018 г. Регистрираните в София годишни суми на валежите са 168 % от средната стойност за тези 20 години.

2.3.3 Сложни съставни събития

Екстремните прояви на времето, свързани с промени в хидрологичния цикъл, следствие от промените в климата и взаимодействащи физически процеси в различни пространствени и времеви мащаби, са дефинирани от *Zscheischler et al.* (2018) като сложни съставни събития. Наводнения, горски пожари, горещи вълни и суши са примери за сложни съставни събития, водещи до неблагоприятни въздействия. В бъдеще комбинации от климатични променливи, водещи до подобни въздействия ще бъдат засегнати от глобалното затопляне и са необходими надеждни оценки на риска (*Fischer and Knutti* (2013), *Russo et al.* (2017), *Schär* (2016), *Raymond et al.* (2020), *Jézéquel et al.* (2020), *Zscheischler et al.* (2020)). Обикновено данните от климатичните модели съдържат отклонения, които водят до отклонения и в оценките на климатичните рискове (*Maraun et al.*, 2017). Оценката и разбирането на тези отклонения са от решаващо значение за моделирането на въздействието и за оценката на бъдещи климатични рискове.

3 Метод на работа

Основният метод на работа в тази дисертация е статистически анализ на времеви редове от: 1) наземни синоптични станции, 2) спътникови наблюдения, 3) климатични индекси на изменчивост, 4) индекси за сух-влажен режим, топлинен стрес и пожароопасност, 5) атмосферни реанализи и 6) глобални и регионални климатични модели. Представените в глава 4, 5 и 6 изследвания са за периода 2003-2014 г. и района на София. В глава 7 е изследван периода 1979-2005 г. като използваният метод, базиран на

теория на копулата, е описан в началото на главата.

3.1 Декомпозиция на времеви редове

В тази дисертация е направен статистически анализ, чрез разлагане по компоненти на разгледаните времеви редове, използвайки сезонна декомпозиция (STL, *Cleveland et al. (1990)*). Сезонната декомпозиция се основава на метода за локална регресия (LOESS). Това е стандартен статистически метод за разлагане на времеви редове (X_{ts}) в 3 компоненти - сезонна (X_{seas}), дългосрочна (X_{long}) и остатък (X_{sub}), както следва:

$$X_{ts} = X_{long} + X_{seas} + X_{sub}. \quad (1)$$

Този метод позволява връзката между трите компоненти на времевия ред да се опише чрез адитивен модел. Първата стъпка в метода е да се отдели сезонната компонента от времевия ред, което води до дългосрочна компонента плюс остатък. Дългосрочната компонента се отделя с изглаждане на времевите редове чрез нискочестотни филтри и премахване на високочестотните вариации. Допълнително разлагане на дългосрочната компонента от времевите редове на температурата, валежа и TWSA за период 2003-2014 г. е разгледано в глава 5.2. Дългосрочната (или нискочестотна) компонента се разлага (факторизира) чрез линейна (X_{lin}) и нелинейна компонента (X_{inter}) (*Humphrey et al., 2016*), както следва:

$$X_{long} = X_{lin} + X_{inter}. \quad (2)$$

Линейният компонент е изчислен от дългосрочния компонент, използвайки оценката на Theil-Sen (*Sen, 1968*). Изчислени, при 5 % ниво на значимост, са крос-корелационни коефициенти, между температурата, валежа и TWSA, между техните декомпозирани компоненти, както и между разгледаните параметри и четири индекси на климатичната изменчивост. В глава 5, за да се потвърди статистическата значимост на резултата са изчислени и представени р-стойностите, получени чрез тест за значимост по метод на Кендъл (*Hollander and Wolfe, 1973*), за разгледаните крос-корелационни коефициенти. В тази дисертация са използвани наблюдения

от синоптична станция София (595 m asl.).

3.2 Наблюдения от спътниковата система ГРЕЙС

Спътниковата система за наблюдение на гравитационното поле и климата (ГРЕЙС) е разработена съвместно от NASA (National Aeronautics and Space Administration) и Германският център за Геонауки (GFZ, German Research Center for Geosciences). Спътниците са изстреляни през 2002 г. и са разположена на ниска околоземна орбита. ГРЕЙС се състои от два спътника-близнака, на полярна орбита с височина 500 km, и разстояние 220 km един от друг. Спътниците са свързани посредством високо прецизна К-честотна микровълнова система, която измерва промени в гравитационното поле чрез измерване на промяната на разстоянието между спътниците. Тези данни, заедно с информацията за местоположението от ГНСС се използват за изчисляване на динамичните сателитни траектории и месечната аномалия в гравитационно поле представена в единици милиметри воден стълб (web). В глава 4 са използвани данни от ГРЕЙС от център за обработка на Институт за астрономически изследвания към Университета в Берн (AIUB-RL02). В глава 5 са използвани данни за TWSA от три различни центъра за обработка, а именно: 1) център за космически изследвания към Тексаския университет в САЩ (CSR), 2) Германският център за Геонауки (GFZ) и 3) изследователски център към NASA (JPL). Данните са от мрежа с пространствена разделителна способност $1^\circ \times 1^\circ$. В случая използваните данни са с координати: България, София (42.75° N, 23.36° E). TWSA е достъпна от база данни на Международния център за обработка на промени в гравитационното поле (The International Combination Service for Time-variable Gravity Fields, COST-G *Jäggi et al.* (2020)), който е център към Международната гравитационна служба.

3.3 Интегрирана водна пара от ГНСС

В тази работа са използвани данни от ГНСС станция София-Плана (SOFI), която е част от Международния ГНСС Сервиз. ГНСС станция SOFI предоставя информация за тропосферното закъснение, което е резултат от атмосферната рефракция. Тропосферното закъснение се пресмята в посо-

ка зенит и се нарича Пълно зенитно закъснение (Zenit Total Delay, ZTD). Два са източниците на закъснението допринасящи към ZTD. Първото и по-голямо закъснение се дължи на сухия въздух (азот и кислород) и се нарича зенитно хидростатично закъснение (Zenith Hydrostatic Delay, ZHD). Второто закъснение е причинено от водната пара и се нарича зенитно водно закъснение (Zenith Wet Delay, ZWD). ZWD има значително изменение във времето. Така при измерено ZTD и пресметнатото ZHD разликата им дава ZWD. От ZWD се пресмята Интегрираната Водна Пара (ИВП), както следва:

$$IWV = \frac{10^6}{(k_3/T_m + k_2)R_v} ZWD \quad (3)$$

където: $k_2 = (17 \pm 10)[K hPa^{-1}]$, $k_3 = (3.776 \pm 0.004)10^5[K hPa^{-1}]$ са константи, $R_v = 461.51[Jkg^{-1}K^{-1}]$ е газовата константата за идеален газ, $T_m[K]$ е средна температура в тропосферата, $h [km]$ е височината и θ е географското изменение на земното ускорение. В глава 4.1 са изчислени и анализирани средномесечни стойности на ИВП за период от 2003 г. до 2013 г. В глава 4.2 е направено разлагане на дългосрочна и сезонна компонента на ИВП.

3.4 Атмосферен реанализ ERA5

Атмосферен реанализ ERA5 е разработен от Европейския център за средносрочна прогноза на времето (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) като част от Климатичния сервиз на програма Коперник (Copernicus Climate Change Service (ccu)). Данните от ERA5 са със свободен достъп и за целите на тази дисертация са изтеглени и анализирани времеви редици на средномесечните стойности на температурата и количеството валеж.

3.5 Регионален климатичен модел Аладин-климат

Аладин-климат е регионален климатичен модел, разработен в рамките на международно сътрудничество с водещ институт Mètèo France. Моделът

е създаден, обединявайки динамиката на числен модел за прогноза на времето Аладин и параметризационните схеми от глобален климатичен модел ARPEGE-Climate. В тази дисертация е използвана реализацията на модела осъществена от Унгарската метеорологична служба (*Csima and Horányi, 2008*) В тази дисертация са използвани температурата на 2 m, валежа, ИВП и TWSA от Аладин-климат за периода от 2003 до 2008 г.

3.6 Индекси на климатичната изменчивост

За целите на тази дисертация са избрани четири индекса на климатичната изменчивост, а именно: 1) индекс на Северно-атлантическата осцилация (North Atlantic Oscillation index-NAO), 2) индекс на Средиземноморската осцилация (Mediterranean Oscillation Index, MOI), 3) Атлантически осцилационен индекс (Atlantic Multidecadal Oscillation Index, AMO) и 4) Скандинавски осцилационен индекс (Scandinavia oscillation index, SCAND).

3.7 Индекси за валеж и дефицит на влажността

Zhao et al. (2017) предлагат индекс за оценка на дефицита на влажността - засушаването (Drought Severity Index, DSI) базиран на наблюдаваните от спътниковата система ГРЕЙС промени във времето на наземното водно количество. DSI е безразмерна величина, която индикира както суша, така и необичайно влажни периоди. DSI се пресмята по формула:

$$DSI_{i,j} = \frac{TWSA_{i,j} - TWSA_j}{\sigma_j}, \quad (4)$$

където i е годината, j е месецът, σ_j е отклонението на $TWSA_j$ спрямо $TWSA_{i,j}$. В глава 6 индекс DSI е пресметнат първо поотделно за трите оперативни центрове CSR, GFZ и JPL, след което е взета средната стойност. Стандартизираният индекс на валежите (Standardized Precipitation Index, SPI) е широко използван индекс, характеризиращ сух или влажен режим на на хидрологичния цикъл за даден регион и период от време (*McKee et al., 1993*). За пресмятането на този индекс се използват средно-

месечни данни за валеж, както следва:

$$SPI_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_j}{\sigma_j}, \quad (5)$$

където i е годината, j е месецът, σ_j е отклонението на P_j спрямо $P_{i,j}$.

4 Опасни метеорологични явления - 2007 г.

В тази глава са представени резултатите от анализа на горещата вълна в България през месец юли 2007 публикувани в *Mircheva et al. (2017)*. За целта са използвани времеви редове от средно месечни стойности на температурата, валежа, ИВП и TWS. Пресметнати и анализирани са: 1) средномесечните аномалии на температура, количество валеж, ИВП и TWS за периода 2003-2013 г., 2) дългосрочните и сезонните тенденции на разглежданите параметри за периода 2003-2010 г., 3) крос-корелациите между времевите редове, сезонните и дългосрочни тенденции на стойностите на TWSA за България, Унгария и Полша за периода 2003-2013 г. и 4) крос-корелациите между наблюденията и регионален числен модел Аладин-климат за периода 2003-2008 г.

4.1 Аномалии на времевите редове - 2007 г.

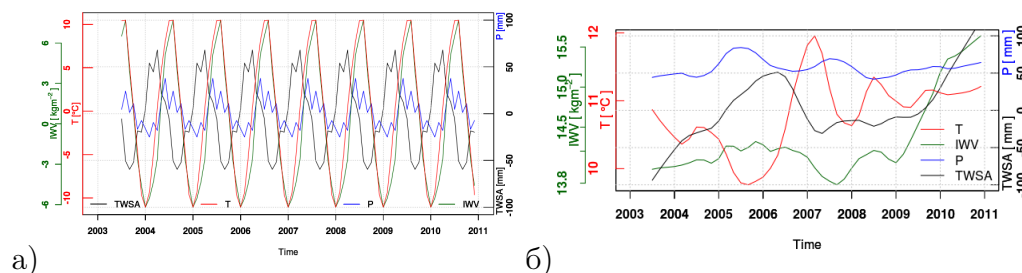
С високи положителни аномалии през 2007 г. са месеците януари (5°C), февруари (3.4°C) и юли (2.1°C). Аномалията на температурата през месец януари 2007 г. е и най-високата наблюдавана за този месец от 2003 г. до 2013 г. Аномалията на температурата за месец юли 2007 г., когато е и горещата вълна, е втората по стойност след тази от месец юли 2012 г., която я надвишава. През месец юли 2007 г. се наблюдава отрицателна аномалия на ИВП от -2.7 kgm^{-2} , която е и най-голямата отрицателна аномалия отчетена за този месец от 2003 г. до 2013 г. Други високи отрицателни аномалии през 2007 г. има през месец септември (-2.4 kgm^{-2}) и декември (-2.2 kgm^{-2}). През 2007 г. аномалиите на валежа са предимно положителни, но отрицателната аномалия от -56 mm за месец юли, когато е и горещата вълна в България, е най-високата за разглеждания период. Ми-

нимални и максимални стойности далеч от нормата на TWSA могат да са разглеждат като индикация за промени в един или няколко компонента от хидрологичния цикъл. Например най-високата отрицателна стойност на TWSA за периода 2003-2013 г. се отчита през 2003 г. и това съвпада с период на гореща вълна в централна Европа. Следващата подобна стойност е от периода на разглежданата гореща вълна в България - лятото на 2007 г. Други отрицателни аномалии при TWS за 2007 г., сравнени със осреднените за периода 2003-2013 г., се наблюдават през януари (-64 mm) и през втората половина от годината. През август месец 2007 г., който е след края на горещата вълна в България, са отчетени стойност на TWSA с 82 mm по-ниски от средното за 2003-2013 г. Следващият месец (септември 2007 г.) достига значително отклонение в стойността на TWSA като единствено през септември 2003 г. се наблюдава по-ниска стойност.

4.2 Тенденции и крос-корелации на температура, валеж, ИВП и TWSA

За пресмятане на дългосрочните и сезонните тенденции на: 1) температурата (червена линия на фигура 1), 2) валежа (синя линия на фигура 1), 3) ИВП (зелена линия на фигура 1) и 4) TWSA (черна линия на фигура 1) е използван метод за декомпозиция представен в секция 3.1. От фигура 1а се вижда, че сезонният ход на температурата и ИВП е сходен с максимум през лятото и минимум през зимата. Сезонният ход на валежа и TWSA е по-сложен с повече от един сезонен пик. При валежа най-високи стойности се наблюдават в края на пролетта (април и май), а най-ниски през зимните месеци. Визуалното сравнение показва, че минимумите при валежа са следвани от минимума в стойностите на TWSA със закъснение до 6 месеца. Например минимумът на TWSA от август 2007 г. е предхождан от минимум при валежа през февруари 2007 г., което е 6 месеца по-рано. Сезонният пик при TWSA се наблюдава от края на зимата (февруари) до началото на пролетта (март). На фигура 1б са показани дългосрочните тенденции на изследваните компоненти от хидрологичния цикъл за периода 2003-2010 г. Изводът от направения анализ на аномалиите и тенденции на разгледаните параметри е, че метеорологичната обстановка от лятото

на 2007 г. се характеризира с положителна аномалия при температурата в комбинация от негативни аномалии при валежа, ИВП и TWS.



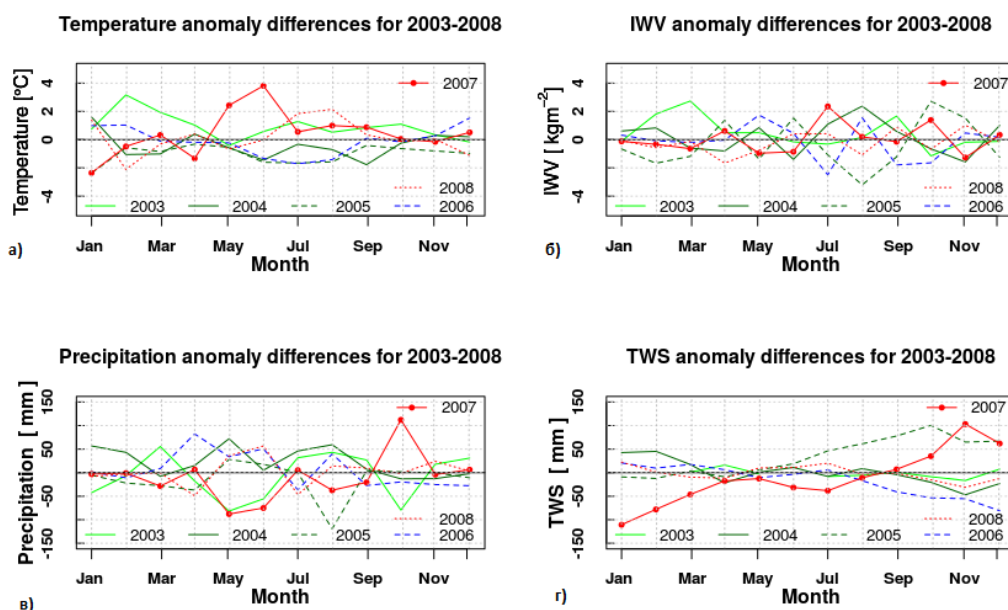
Фигура 1: Сезонни (а) и дългосрочни (б) тенденции на температурата (червена линия), количество валеж (синя линия) и ИВП (зелена линия) и TWSA (черна линия).

Направено е също сравнение на аномалиите на TWS за различни региони в Европа. Използвани са времевите редици на TWSA за Унгария и Полша от Европейският гравитационен сервис за реакция при бедствия егр. Целта е да се направи сравнение в наблюдаваните аномалии за различни региони в Европа като се има предвид географското им положение и известните траектории на баричните образувания. Направеното сравнение показва, че сезонната амплитуда в стойностите на TWSA в България и Унгария са сходни, докато в Полша е по-малка. Сравняването на дългосрочните тенденции показва, че: 1) през 2006 г. TWSA в България и Унгария достигат локален максимум, докато стойностите на TWSA през 2006 г. са почти константи; 2) през 2007 г. TWSA в България и Унгария достигат локален минимум, а в Полша-локален максимум и 3) през 2010 г. дългосрочната тенденция и за трите региона е положителна. Стойностите при дългосрочните тенденции на TWSA в България са по-близки до тези наблюдавани в Унгария, отколкото до тези в Полша, което се потвърждава и от крос-корелационните коефициенти между времевите редове от 0.9 и 0.7, съответно. Това е очакван резултат и е пряко свързан с водещите циркуляционни фактори а именно Средиземноморските и Атлантическите циклони.

4.3 Регионален числен модел Аладин-климат

В тази секция наземните и спътниковите наблюдения са сравнени с регионален числен модел Аладин-климат за периода 2003–2008 г. и по-специално за 2007 г. Изчислени са средните месечни аномалии на температурата, валежа, ИВП и TWSA от наблюденията и модела. Пресметната е разликата между аномалиите от модела и наблюденията, за да се види дали конкретен месец се откроява в модела, в наблюденията или и в двата вида данни. На фигура 2 са показани разликите между аномалиите на температурата (фигура 2а), ИВП (фигура 2б), валежа (фигура 2в) и TWS (фигура 2г) от наблюдения и Аладин-климат (модел минус наблюдения) за всеки месец в периода 2003 до 2008 г. 2007 г. е представена с плътна червена линия с точки. Аномалиите на температурата и ИВП от регионален числен модел Аладин-климат са по-близки до стойностите на наблюденията в сравнение с аномалиите на валежа и TWSA. Вероятно това се дължи на добро представяне на годишния ход на температурата и интегрираната водна пара в регионалният климатичен модел. По-сложният годишен ход при валежите и аномалиите на наземното водно количество водят до необходимостта от по-задълбочено познаване на физическите фактори, които определят междугодишната изменчивост на тези два компонента от хидрологичния цикъл.

Тази работа е първата стъпка за оценка на потенциала на времевите редици от ИВП и TWSA при изучаване на регионалните характеристики и възможните бъдещи промени в климата. Дългосрочните наблюдения на ИВП и TWSA могат потенциално да се използват при регионален реанализ за подобряване на хидрологичния цикъл на моделите. В момента наблюденията на ИВП са включени в регионалните климатични реанализи на няколко водещи Европейски центъра. TWSA все още не се използва в регионални реанализи, но както беше показано може да бъде използвана за оценка на регионалните климатични модели.



Фигура 2: Разлика между аномалиите на температурата (а), ИВП (б), количество валеж (в) и TWSA (г) за всяка година в периода 2003-2008 г. Средната разлика за периода 2003-2008 г. е показана с червена линия.

5 Опасни метеорологични явления - 2014 г.

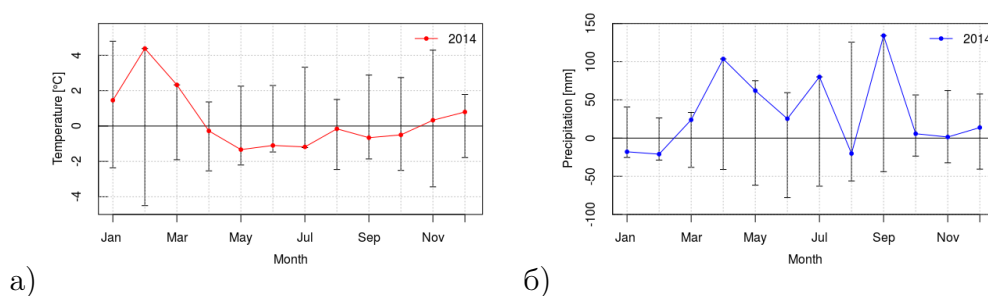
В тази глава са представени резултатите от анализа на: 1) средномесечни аномалии от наблюдения на температура, количество валеж и TWSA за периода 2003-2014 г., 2) дългосрочни и сезонни тенденции на разгледаните параметри за периода 2003-2014 г., 3) крос-корелации между времевите редици на разгледаните параметри и 4) индекса на климатичната изменчивост 4) крос-корелации между наблюдения и данни от атмосферен ре-анализ ERA5.

5.1 Аномалии на времевите редове 2014 г.

На фигура 3 е показана амплитудата на средномесечни аномалии на температура и количество валеж за София от периода 2003-2014 г. Характерни за началото на 2014 г. са високите положителни аномалии на температурата през месеците: януари (1.5° C), февруари (4.4° C) и март (2.3° C).

За периода май до юли 2014 г., температурните аномалиите са отрицателни. Най-високи отрицателни аномалии се наблюдават през месеците май (-1.3°C) и юли (-1.2°C), като стойността от месец юли 2014 г., заедно с тази от юли 2006 г. са най-високите отрицателни аномалии за разгледания период.

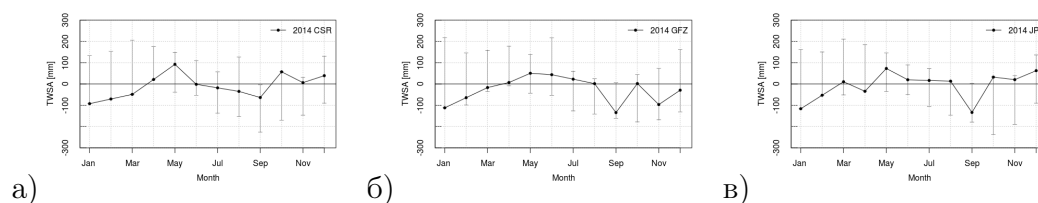
През 2014 г. се отчитат три от най-високите аномалии на валежите за съответните месеци от разгледания период а именно: 1) септември с 134 mm, което е 209 % над средномесечната стойност, 2) април с 104 mm, което е 200 % над средномесечната стойност и 3) юли с 104 mm, което е 114 % над средномесечната стойност. Отрицателни аномалии през 2014 г. се наблюдават през януари и февруари, което в комбинация с положителните температурни аномалии през тези месеци е показателно за едно топло и сухо начало на годината, което в последствие продължава със захлаждане и валежи над нормата от март до юли, а след това през септември.



Фигура 3: Амплитуда на средномесечните аномалии на температура (а) и количество валеж (б) за периода 2003-2014 г. Аномалиите от 2014 г. са показани с червена линия за температурата и синя за количеството валеж.

На фигура 4 са показани средномесечната амплитуда на аномалията при TWS за периода 2003-2014 г. (черни вертикални линии), както и съответните месечни стойности за 2014 г. (черни линии) от три центъра за обработка на данни: CSR (фигура 4а, GFZ (фигура 4б) и JPL (фигура 4в). През 2014 г. TWSA показва годишен ход различен от средния за периода, както следва: 1) положителни аномалии през първата половина на годината от януари до юни и 2) отрицателни аномалии през втората половина на годината от юли до декември. Месеците с големи наводнения в България от 2014 г., а именно месеците май, юни и юли, когато са половината

от общия брой наводнения за годината (*Stoycheva et al., 2015*), се характеризират с комбинация от отрицателни аномалии при температурата и положителни при валежа и TWS.

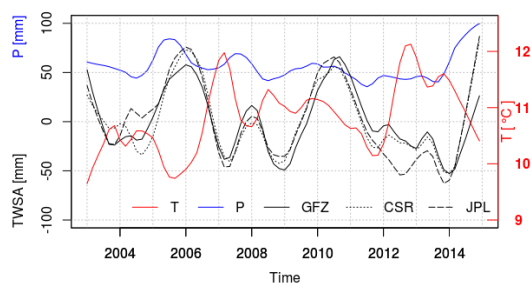


Фигура 4: Амплитуда на месечните аномалии на TWSA от център CSR (а), GFZ (б) и JPL (в) за периода 2003-2014 г. 2014 г. е показана с черна линия.

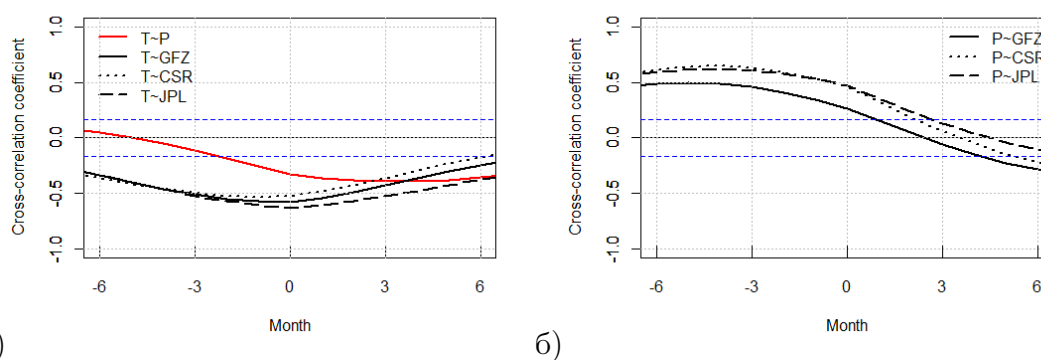
5.2 Тенденции на времевите редове

На фигура 5 са показани дългосрочните компоненти от времевите редове за периода 2003-2014 г. на температурата (червена линия), валежа (синя линия) и TWSA от център CSR (черна линия), GFZ (черна прекъсната линия) и JPL (черна пунктирана линия). Вижда се, че 2014 г. се характеризира с намаляващ тренд за температурата и нарастващ за валежа и TWSA. В контраст е ситуацията от 2007 г., през лятото, на която е горещата вълна в България и се характеризира с локален максимум при температурата, намаляващ тренд при валежа и локален минимум при TWSA (*Mircheva et al., 2017*). На фигура 6 са показани крос-корелационните коефициенти между дългосрочните компоненти на разгледаните параметри, изчислени при 5 % ниво на значимост. Между дългосрочните компоненти от времевите редове на температурата и валежа има слаба до умерена отрицателна корелация. Същото показва и крос-корелационният коефициент между температурата и TWSA. Корелацията между валежа и TWSA е умерена положителна. Най-висок крос-корелационен коефициент се наблюдава с 3 до 6 месеца закъснение на TWSA спрямо валежа и стойностите са съответно 0.65 за център CSR, 0.50 за GFZ и 0.62 за JPL. Извод от направения анализ на корелациите между валежа и TWSA е, че периоди със стойности над/под нормата за валежа ще бъдат последвани от стойности над/под нормата за TWSA, но отместени във времето между 3 и 6 месеца

ПО-КЪСНО.



Фигура 5: Дългосрочна компонента на температурата (червена линия), количество валеж (синя линия) и TWSA от CSR (черна пунктирана линия), GFZ (черна плътна линия) и JPL (черна прекъсната линия) за периода 2003-2014 г.



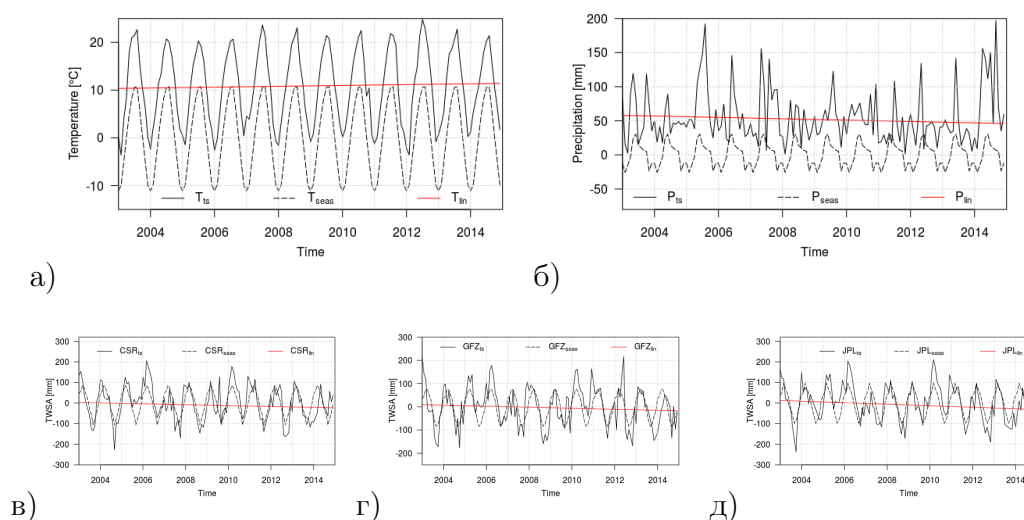
а)

б)

Фигура 6: Крос-корелационните коефициенти между дългосрочните компоненти на температура (Т), валеж (Р) и TWSA (а) и валеж (Р) и TWSA за периода 2003-2014 г. (б) Крос-корелационните коефициенти между а) дългосрочните компоненти на температура и валеж (червена линия) и температура и TWSA (черни линии) и б) между валеж и TWSA (черни линии) за периода 2003-2014 г.

Изследвания на *de Paiva et al.* (2013) и *Para et al.* (2008) установяват отместване във времето между сезонната компонента на времевите редици на валежа и TWSA. За България това отместване във времето е от порядъка на 6 месеца (*Mircheva et al.*, 2017). На фигура 7 сезонната компонента от времевите редове на разгледаните компоненти е показана с черна

прекъсната линия. Валежът (фигура 7б) достига максимални стойности в края на пролетта и началото на лятото (май и юни), а минимални се наблюдават в края на есента и зимните месеци (от ноември до февруари). TWSA (фигура 7в, 7г и 7д) има пикови стойности през пролетта (март и април) и минимални през есента (септември и октомври). Сезонната компонента от времевата редица на температурата е с максимум през лятото то 2 до 3 месеца преди есенния минимум в стойностите на TWSA. Същата зависимост се наблюдава и при минимума в стойностите на температурата, които са 2 до 3 месеца преди пролетния максимум в стойностите на TWSA. От тук следва изводът, че сезонният ход на температурата и този на TWSA са в противофаза.



Фигура 7: Времени редове (черна плътна линия), сезонна компонента (черна прекъсната линия) и линейна компонента от дългосрочния тренд (червена линия) за температурата (а), количество валеж (б) и TWSA от CSR (в), GFZ (г) и JPL (д) за периода 2003-2014 г.

От линейните трендове представени на фигура 7 следва, че: 1) температурата има положителен линеен тренд с покачване от 1.1°C ; 2) валежът има отрицателен линеен тренд и намалява с 12 mm и 3) TWSA също показва отрицателен тренд с намаляване от 26 mm за центровете CSR и GFZ и 44 mm за център JPL. Нелинейният компонент от дългосрочната тенденция се определя от вътрешногодишната изменчивост в стойностите

на разгледаните параметри. За разгледания период от 2003 г. до 2014 г. могат да се направят следните изводи: 1) между нелинейните компоненти на температурата и валежа има слаба до умерена негативна корелация, 2) умерена негативна корелация се наблюдава между нелинейните компоненти на температурата и TWSA и 3) има умерена положителна корелация между нелинейните компоненти на валежа и TWSA. Тези резултати показват, както би могло да се очаква, че температурата има негативен ефект върху TWSA, докато валежа има положителен ефект върху TWSA.

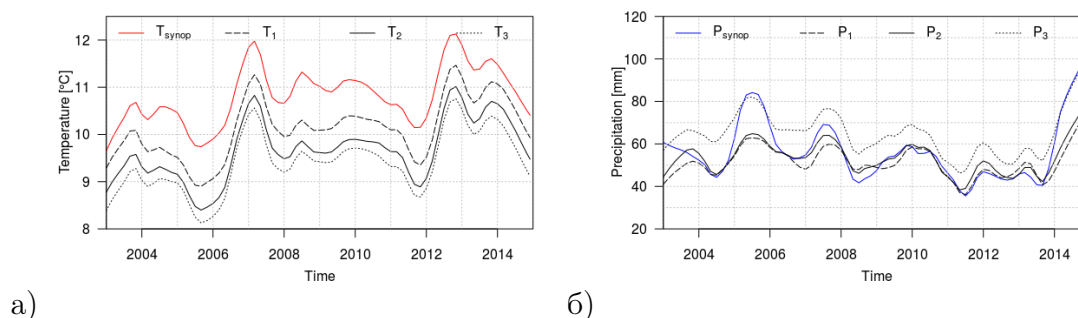
5.3 Индекси на климатична изменчивост

Следващата стъпка е анализ на крос-корелациите между климатични индекса на изменчивост MOI, NAO, AMO и SCAND и наблюденията на температурата, валежа и TWSA. При направения анализ са отчетени само крос-корелационни коефициенти при ниво на значимост от 5 %. За да се избегне корелация поради сезонния ход на променливите, предварително той е премахнат чрез използването на сезонна декомпозиция от променливите с добре изразен сезонен характер, а именно от температурата, TWSA и индекс AMO. Могат да бъдат направени следните изводи: 1) няма значима корелация между температурата и индекси MOI и NAO, 2) открива се слаба положителна корелация между MOI и валежа, докато между NAO и валежа има слаба отрицателна такава и 3) наблюдава се слаба към умерена корелация с един месец закъснение на TWSA спрямо индексите MOI и NAO. Подобно на валежа, между MOI и TWSA корелацията е положителна, а тази между NAO и TWSA е отрицателна. Най-значим положителен крос-корелационен коефициент от 0.25 се наблюдава между валежа и MOI, а най-значим отрицателен крос-корелационен коефициент от -0.21 се наблюдава между валежа и NAO. Тези резултати показват, че климатичната изменчивост в районите на Средиземно море и Северния Атлантически океан оказват влияние върху характеристиките на валежа над България, което може да се обясни със специфичния циклогенез за тези региони. Най-значимите крос-корелационни коефициенти между MOI и TWSA са с един месец закъснение от страна на TWSA и са съответно: 0.26, 0.24 и 0.31 за центрове CSR, GFZ и JPL. Този резултат показва, че

има вероятност стойности MOI над/под нормата да доведат до стойности над/под нормата на TWSA месец по-късно. При двойката MOI валеж не се наблюдава закъснение. Най-значимите крос-корелационни коефициенти между NAO и TWSA са също с един месец закъснение от страна на TWSA и са -0.27, -0.20, -0.25 за центрове CSR, GFZ и JPL, съответно. Този резултат показва, че има вероятност стойности над/под нормата в стойностите на NAO да доведат до стойности под/над нормата на TWSA месец по-късно.

5.4 Статистически анализ на температурата и валежа от ERA5

Изчислените крос-корелационни коефициенти между стойностите на температурата от наблюденията и реанализа е > 0.99 и за трите избрани точки. От направеното сравнение между стойностите на валежа от ERA5 и наблюденията, следва че осреднената разлика за трите точки е съответно -4.8 mm, -2.7 mm, 8.7 mm. Най-близки до наблюдаваните стойности са валежите от мрежовата точка на ERA5, разположена най-близо до станция София (P_3). Това се доказва и от крос-корелационния коефициент, между валежа от станция София и от тази точка, който е 0.83, докато между наблюденията и другите две точки (P_1, P_2) е съответно 0.71 и 0.77.



Фигура 8: Дългосрочната компонента на времевите редици на температурата (а) и валеж (б) от реанализ ERA5 и синоптични наблюдения за периода 2003-2014 г.

Следващата стъпка е разлагане по компоненти на времевите редо-

ве за температурата и валежа от реанализа. На фигура 8 са представени графично резултатите за дългосрочната компонента от времевите редове на температурата и на валежа. Вижда се, че трите точки от реанализа подценяват измерените стойности на температурата, поради тяхната по-голяма надморската височина. С по-голяма разлика във височината се наблюдава и по-голямо подценяване в стойностите на температурата. Въпреки това характера на дългосрочната тенденция между наблюдаваната температура и тази от реанализа е сходен, което показва, че данните от ERA5 добре описват дългосрочна тенденция на температурата в София. При сравнението на валежа от наблюдения и реанализ се установява, че всички дългосрочни компоненти отчитат рязко покачване и положителен тренд през 2014 г. Най-близки до стойностите от наблюдението са тези от най-близката избрана точка от реанализа (P_3). През 2014 г. и наблюденията и реанализа от тази точка отчитат най-високите си стойности за целия разглеждан период от 2003 г. до 2014 г. От направения анализ може да се направи извод, че разгледаните дългосрочни компоненти от времевите редове на валежа от реанализа и тези от наблюдението показват най-голямо покачване за разгледания период през 2014 г.

За 2014 г. е установено значително отклонение на годишния ход на TWSA от осреднения 12-годишен ход. Това е важна констатация, която може да се използва като критерий за ранно предупреждение в България. В допълнение крос-корелацията между TWSA и валежите показва добре изразено отместване във времето. Периодите с увеличаване/намаляване на валежите са последвани от 3 до 6 месеца, нарастващи/намаляващи TWSA тенденции, съответно. Този период на отместване във времето е в съответствие с глобално проучване на (*Humphrey et al.*, 2016), което намира времево отместване между 1 и 5 месеца в зависимост от региона. (*Reager et al.*, 2016) предлагат индекс на наводнение чрез определяне на повтарящи се максимуми в TWSA, над които допълнителните валежи биха довели до наводнения ако не е възможно увеличаване на оттока или изпарението. Създаването на Европейската гравитационна служба за подпомагане на управлението при извънредни ситуации (EGSIEM, (*Jäggi et al.*, 2019)) е важна стъпка в подпомагане оперативното използване на спътникова мисия ГРЕЙС за ранно предупреждение за наводнения в Европа. В та-

зи връзка представените в Глава 5 изследвания за 2014 г. представляват навременно и важен принос в подпомагане на оперативното използване на EGSIEM в България и югоизточна Европа.

6 Индекси за сух/влажен режим 2003-2014 г.

Широко практическо приложение в оперативната работа и при вземане на решения за дългосрочен анализ на риск от опасни явления като продължителни суши или наводнения са количествени индекси пресметнати на базата на метеорологични елементи или количествена оценка на явления. Два такива индекса са стандартизираният индекс за валеж (Standardized Precipitation Index, SPI, 5) и индекс за оценка на степента на засушаване (Drought Severity Index, DSI, 4). В тази глава е направен анализ на двата индекса за периода 2003-2014 г. За пресмятане на SPI са използвани наблюдения от синоптична станция София. Месечните аномалии на наземното водно количество от ГРЕЙС (TWSA) са използвани за пресмятане на DSI. Направена е и оценка на индекса SPI от реанализ ERA5.

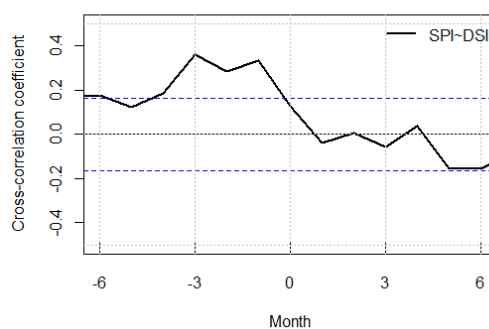
6.1 Анализ на DSI и SPI за периода 2003-2014 г.

Стойности на SPI и DSI между -1.6 и под -2.0 показват екстремна суша и от 1.6 и над 2.0 са за екстремно влажно. От 2003 до края на 2014 година и двата индекса приемат стойности в рамките на ± 2 и в различни периоди достигат до екстремно засушаване и екстремно влажно време за конкретния месец. С изключение на месеците септември, ноември и декември, през 2007 г. индекс DSI има отрицателни стойности. Първите три месеца от годината показват от необичайно сухо до умерена и силна суша и през месец март достига стойност -1.7 индикация за екстремна суша. За април 2007 г. стойността е около нормата, но е последван от месеците май и юни, през които отново се връща към умерена до силна суша. През месец юли, когато е горещата вълна, стойността на индекс DSI е -1.7, която е най-ниската стойност за годината и една от най-ниските за 12 годишния период и съответства на екстремна суша. През август 2007 г. индексът е отново в рамките на необичайно сухо и до края на годината се връща към

нормата, с изключение на месец октомври, когато е -0.9 , което индикира умерена до силна суша. При индекс SPI през 2007 г. се наблюдават сходни резултати. С изключение на месец януари, който е близо до нормата, първите четири месеца от годината са със стойности индикиращи умерена до силна суша. Стойностите на индекс SPI от месеците май и юни се отличават от същите месеци при индекс DSI с рязко покачване, достигайки стойности индикиращи умерено до много влажно време. През месец юли, през който е регистрирана горещата вълна в България, индексът SPI достига стойност от -1.9 , която е и една от най-ниските за 12 годишния период и индикира екстремна суша. До края на 2007 г., с изключение на декември SPI остава с положителни стойности показващи необичайно влажен период.

2014 се характеризира с множество наводнения в България и започва с отрицателни стойности и на двата индекса. Стойностите на индекс DSI през първите четири месеца от 2014 г. са в рамките на екстремна до умерена и силна суша. Следващите два месеци индикират връщане към нормата и през юли и август се наблюдават стойности показващи умерено до много влажно. Септември 2014 г. се връща отново към нормата, но е последван от рязко покачване през месец октомври като е близо до критичната стойност от 1.60 индикираща екстремно влажно. През последните два месеца от 2014 г. стойността на индекс DSI остава положителна и е близо до необичайно влажно за периода. SPI показва също умерена до силна, дори екстремна суша през първите два месеца от 2014 г. Следва рязко покачване в стойностите на индекса и с изключение на декември те се задържат положителни. Най-високи са стойностите през април, юли и септември от 1.91 , 1.59 и 2.2 , съответно, които индикират екстремно влажно за периода време. Тези три месеца се отличават и са сред най-високите индекси за целия разглеждан период. SPI стойностите за април и септември 2014 г. са двете най-високи стойности за периода от 2003 до 2014 г. Комбинираното влияние на валежа и TWSA се проследява ясно по стойностите на индексите. Както се вижда за 2014 г. високите положителни стойности на SPI в периода май-септември водят до смяна на знака на DSI през месец май, което показва запълване на капацитета на почвения резервоар. За числена оценка на връзката между двата индекса в пери-

ода 2003-2014 г. е използвана крос-корелационна функция с отместване ± 6 месеца. На фигура 9 са показани крос-корелационните коефициенти между двата индекса, изчислени при статистическо ниво на значимост 5%. Стойностите са положителни, а именно 0.33 за времево отместване -1 месец, 0.29 за времево отместване -2 месеца и 0.36 за времево отместване -3 месеца. Това показва, че има вероятност стойности над/под средното за индекс SPI да бъдат последвани от над/под средното за индекс DSI с един до три месеца закъснение във времето.

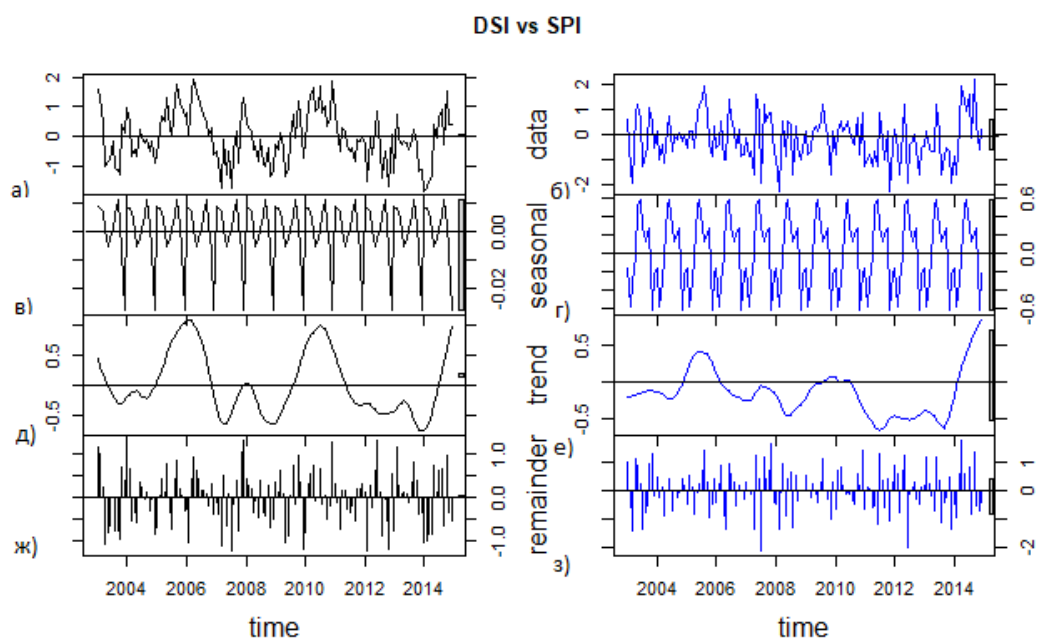


Фигура 9: Крос-корелационни коефициенти между индекс SPI и DSI за София в периода 2003-2014 г. Синята пунктирна линия съответства на ± 0.18 .

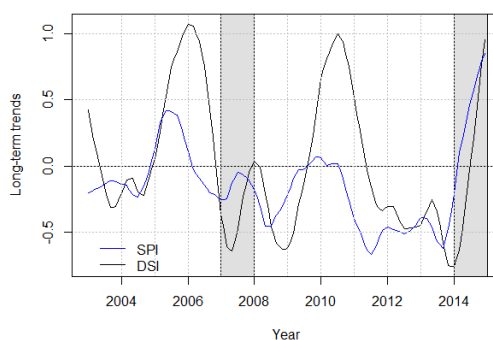
6.2 Разлагане по компоненти на DSI и SPI

На фигура 10а и 10б са представени месечните стойности на двата индекса. Представено е и разлагане по компоненти на DSI (черна линия, ляв панел) и SPI (синя линия, десен панел) на сезонна (фигура 10д и 10е) и вътрешногодишна изменчивост (фигура 10ж) за периода 2003-2014 г. Вижда се, че сезонната компонента на индекс DSI (фигура 10в) е с изключително малка изменчивост, която може да се приеме, че не допринася значително към стойността на индекса за конкретен месец. От друга страна сезонната компонента на индекс SPI (фигура 10г) приема стойности от ± 0.6 , т.е. има принос към стойността на индекса за конкретен месец, но като цяло не е съществен. На фигури 10д и 10е са показани дългосрочните компоненти на двата индекса. Тук се забелязва по-голямо сходство отколкото при се-

зонните компоненти на двата индекса. Изменчивостта на този компонент в разглеждания 12 годишен период е приблизително ± 1 .



Фигура 10: Времени редове на индекс DSI (ляв панел) и SPI (десен панел) и техните дългосрочна (в и г), сезонна (д и е) и вътрешногодишна компонента (ж и з) за София, България в периода 2003-2014 г.



Фигура 11: Дългосрочни компоненти на индекси DSI (черна линия) и SPI (синя линия) за периода 2003-2014 г. В сиво са повдигнати 2007 и 2014 г.

За по-добро сравнение на фигура 11 са показани съвместно дългосрочните компоненти на DSI (черна линия) и SPI (синя линия). И за двата индекса през 2007 г., с период на гореща вълна, се наблюдава локален минимум в началото на годината и слабо покачване в стойностите след това. Въпреки покачването, обаче, стойностите до края на годината не преминават нулата, тоест цялата 2007 година остава с отрицателни стойности описващи една по-суха от средното година за разглеждания 12 годишен период. Контрастно през цялата 2014 г., с множество наводнения в България, се наблюдава рязко покачване в стойностите и на двата индекса. Макар, че началото на 2014 г. и за двата индекса започва с отрицателни стойности като за DSI стойността от -0.77 е от най-ниските наблюдавани през целия разглеждан период. Последвалото рязко покачване в стойностите на индекса достига и преминава нулата още първите месеци от годината. И DSI и SPI достигат стойности над 0.6, което показва необичайно до умерено и много влажно според скалата на индекса. Крос-корелационният анализ показва, че най-голяма статистическа обвързаност между двата индекса може да се намери между 3 до 6 месеца с отместване и закъснение от страна на DSI спрямо SPI и крос-корелационни коефициенти над 0.7.

Последната компонента показана на фигура 10ж и 10з е вътрешногодишната променливост на двата индекса. Този компонент допринася най-много за стойността на конкретен месец като променливостта му е с най-голяма амплитуда и при двата индекса и е в рамките на ± 2 и е анализирана детайлно. През 2007 г. и при двата индекса се наблюдават преобладаващи отрицателни стойности. Стойността от месец юли и за двата индекса е най-ниска за годината, а тази на SPI се отличава като най-ниска за целия разглеждан период. Индикация за умерена до силна и екстремна суша индексите отчитат за юли месец 2007 година съответно -1.25 и -2.15 за DSI и SPI. През 2014 г. компонентът на вътрешногодишната променливост и при двата индекса отчита високи отрицателни стойности в началото на годината индикиращи умерена до силна суша. Последвани са от покачване на стойностите с максимални за индекс DSI през месеците май, юли, август и октомври от 0.73, 0.68, 0.62 и 0.96, съответно индикиращи умерени до много влажни условия. За SPI високи положителни стойности се наблюдават през месеците април, юли и септември (1.75,

0.82 и 1.34) индикиращи екстремна влажна пролет последвана от умерени до много влажни лято и есен. Крос-корелационният анализ между компонентите на вътрешногодишната променливост показва, че най-голяма статистическа обвързаност се открива с един месец закъснение на индекс DSI спрямо SPI и крос-корелационен коефициент от 0.3.

6.3 Оценка на SPI от наблюдения и ERA5

Като следваща важна стъпка е направена оценка на индекс за валеж SPI от наблюдения и реанализ ERA5 (SPI_{ERA5}). Установява се добро съвпадение между стойностите. Този резултат показва, че реанализа е подходящ при заместване на наблюдението на валежа при изчисление на този индекс, а това се потвърждава и числено от направения крос-корелационен анализ. Изчисленият крос-корелационен коефициент между индекси SPI и SPI_{ERA5} е 0.80. Крос-корелационни коефициенти между индекси SPI_{ERA5} и индекс DSI, са близки до на тези между SPI и DSI. Най-високи стойности отново се наблюдават със закъснение от един до три месеца от страна на индекс DSI спрямо SPI_{ERA5} . В тази глава са приложени два индекса за оценка на преминаване от сух към влажен режим на подложната повърхност за две години с опасни метеорологични явления 2007 г. и 2014 г. Индекс SPI е широко използва в научната литература и в България се използва в оперативната практика. Индексът базиран на наблюдения от спътникова система ГРЕЙС DSI е предложен през 2017 г. и се използва за пръв път в България. Съвместното използване на двата индекса показва взаимовръзка и отместване във времето на DSI след SPI за разглеждания период 2003-2014 г. Следва да се отбележи, че 2007 г. и 2014 г. започват с добре изразен сух режим и в двата индекса между януари и март, но след това се наблюдават разлики. През април 2014 г. SPI е със значителна положителна стойност, която съответства на екстремно влажен режим и през месец май се наблюдава и смяна на знака на индекс DSI от отрицателен към положителен, но той остава в рамките на влажната норма със стойност от 0.42. Високите положителни стойности на SPI през май и юни са следвани от стойности на DSI в режим необичайно влажно за юли и август 2014 г. Това е индикация за процес на значително овлажня-

ване на почвения слой през лятото на 2014 г. Интензивните валежи през септември 2014 г. водят до покачване на индекс DSI до режим умерено до много влажно през месец октомври 2014 г. Това ясно показва процесът на постепенно запълване на почвения резервоар като резултат от интензивните валежи през 2014 г. Стойността на индекс DSI за октомври 2014 г. е най-високата за този месец за 12-годишният период. Преминаването от сух към влажен режим на индекс DSI индекса не е характерен за първата половина 2007 г. въпреки положителните стойности на SPI за месец май и юни 2007 г. Индексите DSI и SPI през месец юли 2007 г. са със стойности отговарящи на екстремно сух режим и водят до горещата вълна.

7 Съставни метеорологични и климатични събития: пожари и топлинен стрес

В бъдеще много климатични променливи ще бъдат засегнати от глобалното затопляне и са необходими надеждни оценки на риска и по-добро разбиране на това как климатичните модели описват съвместното поведение на променливите, които са движещите фактори за сложните съставни събития. Пример за такива променливи са температурата и относителна влажност, чието адаптиране и правилно моделиране е от решаващо значение за правилното количествено определяне на свързаните с тях опасни явления днес и в бъдеще.

7.1 Декомпозиция на факторите водещи до грешки при анализа на опасностите от пожар и топлинен стрес

През 2019 г. Научна мрежа Дамоклес организира обучение на тема "Статистическо моделиране на сложни съставни събития". Като участник в обучението Биляна Мирчева участва в международен екип разработил практическа задача на тема "Декомпозиция на факторите водещи до грешки при анализа на опасностите от пожар и топлинен стрес". За реализирането на тази задача се предлага метод базиран на теория на копулата, за

оценка на представянето на моделите при изчисление на индекси за пожари и топлинен стрес получени чрез използване на няколко променливи във времето и пространството. Предложеният метод се състои в: 1) разлагане на грешката в индекси, изчислени от 12 климатични модела, 2) определяне на приноса на отделните променливи и 3) определяне на приноса от тяхната статистическа връзка. За целта е направено разлагане на индексите на съставните им компоненти, а именно: температура (Т) и относителна влажност (RH) на 2 m и са оценени грешките, които допринасят тези компоненти отделно и заедно. Използвани са два индекса, изчисляването, на които се основава на двете променливи, а именно глобална температура на мокрия термометър (wet-bulb globe temperature, WBGT) и индекс на Чандлер за пожар (Chandler Burning Index, CBI). Индексите са WBGT и CBI пресметнати както следва:

$$WBGT = 0.56 * T + 0.93 * e + 3.94, \quad (6)$$

$$CBI = \frac{(110 - 1.73 * RH) - 0.54 * (10.20 - T)) * 124 * 10^{-0.0142 * RH}}{60}, \quad (7)$$

където $e = (RH/100) * 6.105 * e^{\frac{17.27 * T}{237.7 + T}}$ е налягането на водните пари в hPa. Теорията на копулата е метод, с който двумерно разпределение на индексите може да бъде разложено на разпределенията на температурата и относителната влажност по отделно и на разпределението на тяхната статистическа зависимост (Sklar, 1959), както следва:

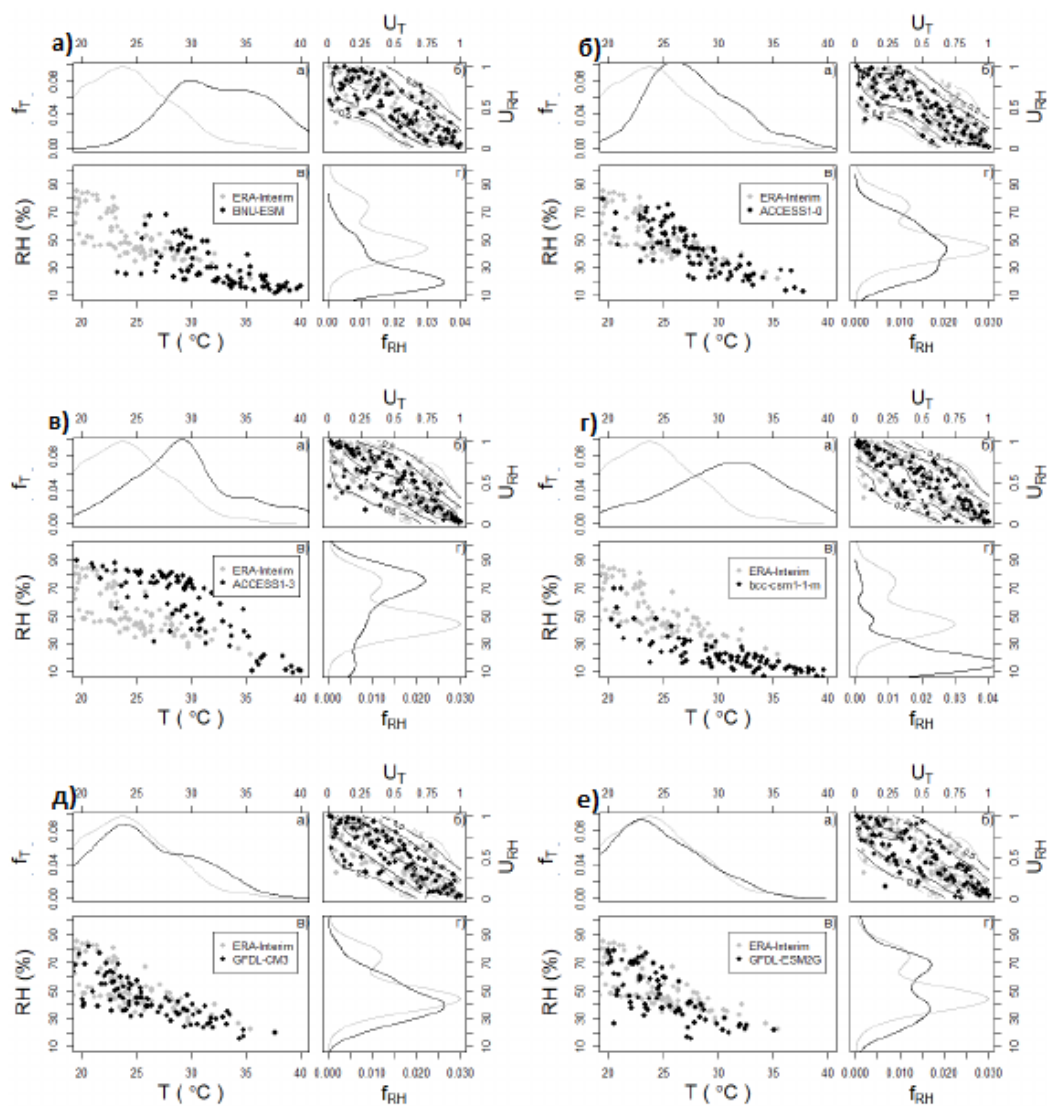
$f_{T,RH} = f_T(T) * f_{RH}(RH) * C(U_T, U_{RH})$, където f_T и f_{RH} са функции на вероятностната плътност на разпределението на Т и RH, съответно. U_T и U_{RH} се дават с $U_T = F_T(T)$ и $U_{RH} = F_{RH}(RH)$, където F_T и F_{RH} са кумулативните функции на разпределението. Това разлагане с теория на копулата позволява числена оценка на приноса на грешката в индекса от моделите, както на променливите поотделно, така и на тяхната статистическа зависимост. За целта са използвани регулярни 6-часови стойности на температура на въздуха (Т) и относителната влажност (RH) на 2 m за периода 1979-2005 г. от реанализ ERA-Интерим и 12 глобални климатични модела от Петия проект за сравнение на климатични модели (CMIP5, Taylor et al. (2012)). Следвайки Zscheischler et al. (2019), анализът е ограничен до

най-горещия календарен месец от годината, т.е. този с най-висока средна температура. Месецът е избран въз основа на осреднени данни от реанализ ERA-Интерим за всяка точка на мрежата. Следващата стъпка е чрез така получените двойки (Т, RH) да се оцени числено какъв е приносът на отделните компоненти: T_{mod} , RH_{mod} и C_{mod} към грешката на екстремните стойности на индексите CBI и WBGT. За целта е използвана методологията разработена от *Bevacqua et al.* (2019). Основна част в методологията е трансформирането на двойките променливи така, че да се получат допълнителни три двойки времеви редове, в които да остане по един компонент Т, RH или тяхната копула от ERA-Интерим. Чрез двойките от трите експеримента се оценява приносът на грешки от Т, RH и тяхната копула в общото отклонение в индексите от 12 климатични модела. За референтни се използват индексите от ERA-Интерим.

7.2 Едномерни разпределения: Т, RH, CBI и WBGT

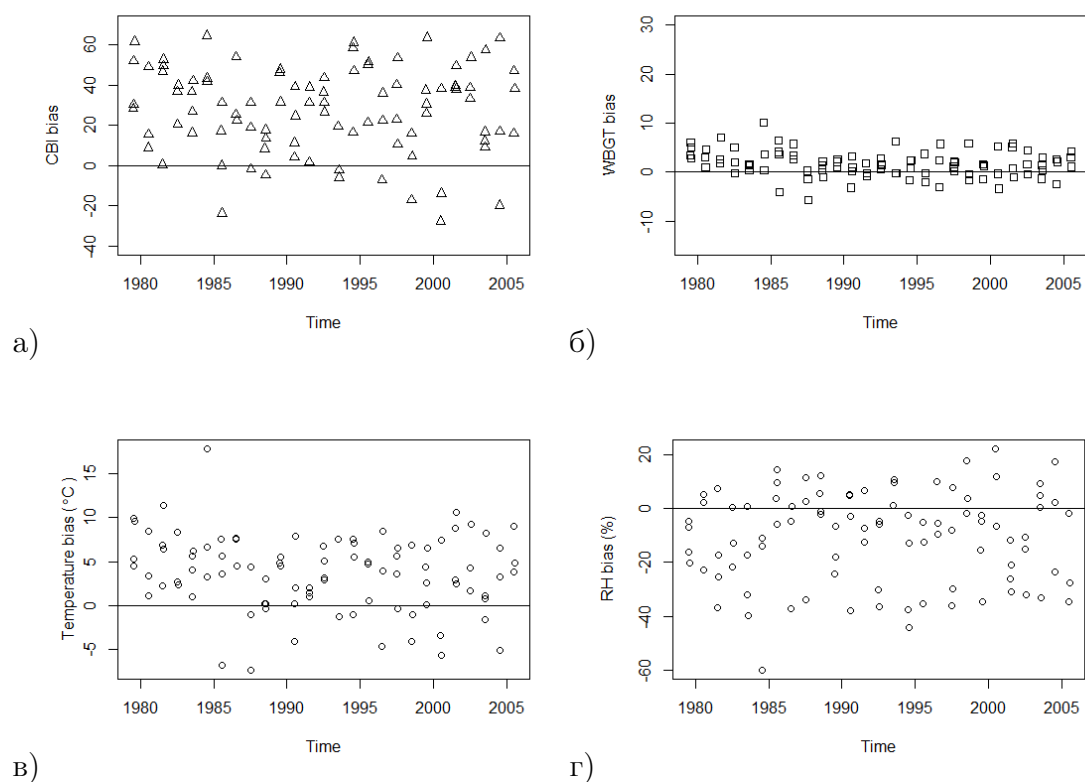
Методологията, базирана на теория на копулата, разработена за декомпозиция на отклоненията в индексите на CBI и WBGT, изчислени от климатичните модели, е илюстрирана за точка София е с координати 23.5° E и 42.5° N за периода 1979-2005 г. На всеки панел от фигура 12 са показани едномерните разпределение на Т и RH от ERA-Интерим (сива линия на горен ляв и долен десен панел) и климатичен модел от CMIP5 (черна линия на горен ляв и долен десен панел). Теорията на копулата позволява декомпозиране на двувариантна функция на плътността на разпределението на Т и RH по отношение на едномерните разпределения на Т (горен ляв панел на фигура 12) и RH (долен десен панел на фигура 12) и плътностното разпределение на копулата, която описва тяхната зависимост (горен десен панел на фигура 12). В долния ляв панел на фигура 12 са показани стойностите на двойката (Т, RH) от ERA-Интерим (сиви точки) и климатичен модел от CMIP5 (черни точки). Всеки панел е само за един климатичен модел и ясно се виждат разликите в едномерните разпределения на Т и RH между моделите.

Средното отклонение изчислено от 12 CMIP5 модела спрямо ERA-Интерим за CBI е представено на фигура 13а и за WBGT представено на



Фигура 12: Разпределение на T и RH от ERA-Интерим (сива линия на горен ляв и долен десен панел) и климатичен модел от CMIP5 (черна линия на горен ляв и долен десен панел) за София, България в периода 1979-2005 г. Едномерно разпределение на T (горен ляв панел) и RH (долен десен панел). Плътностно разпределение на копулата (горен десен панел) и стойности на двойката T , RH (долен ляв панел). Климатичните модели са както следва: а) BNU-ESM, б) ACCESS1-0, в) ACCESS1-3, г) BCC-CSM1-1-m, д) GFDL-ESM2G и е) GFDL-ESM2M

фигура 13б. Средното мултимоделно отклонение при индекс СВИ за София е 28°C .



Фигура 13: Стойности на средно мултимоделно отклонение (СМIP5 минус ERA-Интерим) за СВИ (а), WBGT (б), Т (в) и RH (г) за София в периода 1979-2005.

Анализът на средните глобални стойности на СВИ, през най-горещия месец представен в *Villalobos-Herrera et al. (2020)*, показва че стойностите на индекса са най-високи в региони със сухо и топло време, като например Сахара, по-голямата част от Австралия и западните САЩ и Мексико. Ниски стойности СВИ има в региони с влажен и топъл климат като басейните на Амазонка и Конго. Грешката на моделите СМIP5 в осреднената СВИ стойност е със средно отклонение от над 10°C от осреднените стойности на индекса, изчислен от данни от ERA-Интерим. В допълнение, резултатите от теста Андерсън-Дарлинг показват, че за 59 % от континентите има значителни разлики между ERA-Интерим и СМIP5 разпределенията на

СВІ в най-малко 75 % от моделите. Средното мултимоделно отклонение за индекс WBGT за София в периода 1979-2005 г. е 1.7°C . Анализът в глобален мащаб в *Villalobos-Herrera et al.* (2020) показва, че корелацията между моделните стойности WBGT и тези от ЕРА-Интерим са по-високи, от тези за СВІ, с минимална стойност 0.89. Осреднената грешка от всички климатични модели показва, че за големи части от континентите грешката е в диапазона $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Резултатите от теста Андерсън-Дарлинг показват, че разпределенията на WBGT в моделите са по-добре представени от тези на СВІ като само 35 % от мрежовите клетки не отговарят на критерия. Като цяло моделите СМІР5 се представят слабо в ключови региони, свързани с висок риск от пожар и топлинен стрес. Разпределението на СВІ не е добре представено от повечето климатични модели СМІР5 в региони, характеризирани се с високи нива на пожароопасност, като западната част на САЩ и Средиземноморския басейн. Резултатите от моделите за WBGT са с големи отклонения от реанализа за райони с висок топлинен стрес като Индия и екваториална Африка.

Направена е също и оценка как моделите СМІР5 представят променливите T и RH поотделно, както и тяхната статистическа зависимост. Средномултимоделно отклонение на 12 климатични модела от ЕРА-Интерим е изчислено за T и RH е представено на фигура 13в и 13г, съответно. Средното мултимоделно отклонение при температурата за София е 3.7°C , което е малко над 2 пъти по-високо от средното глобално. В глобален аспект резултатите представени в *Villalobos-Herrera et al.* (2020) потвърждават, че пространствено разпределение на температурата е коректно представено от моделите спрямо температурата от ЕРА-Интерим. Осреднените стойности на температурата са добре представени от моделите СМІР5 и показват корелация с ЕРА-Интерим от над 0.93. Въпреки това, се наблюдават някои значителни разлики в представянето на разпределението в стойностите на температурата като например в басейна на Амазонка със значително положително отклонение и над Северна Африка и Близкия изток със значително отрицателното отклонение (фигура 14b). Средната абсолютна стойност на отклонението за температурата е 1.6°C . Резултатите от теста на Андерсън-Дарлинг показват, че СМІР5 моделите не успяват да възпроизведат разпределение на температурата в над 40 % от конти-

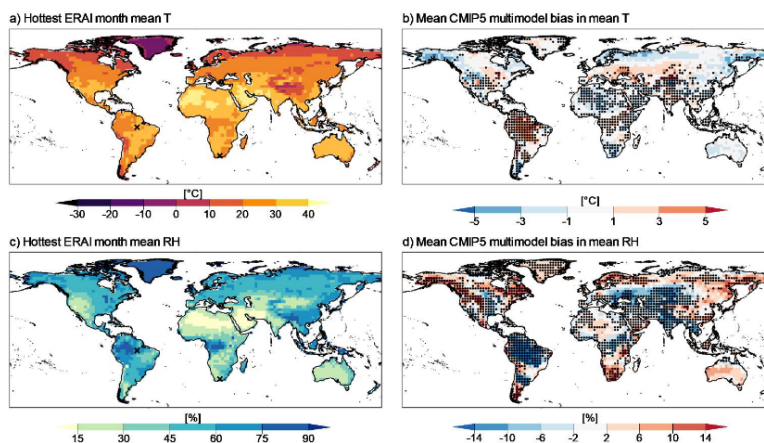
нентите. Средното мултимоделно отклонение за RH за София е -11 %. *Villalobos-Herrera et al.* (2020) показват, че в глобален мащаб климатичните модели не представят добре пространственото разпределение на относителната влажност като над 59 % от площта на континенталните региони не покриват теста Андерсън-Дарлинг. Пространственото разпределение не е представено толкова добре, колкото този на температурата, с минимален и максимален корелационен коефициент от моделите съответно от 0.75 и 0.90. Средното мултимоделно отклонение при относителната влажност е особено голямо в Амазонския басейн (фигура 14d). Въпреки това има области, в които отклоненията са сравнително малки, например в Австралия, Сахара и Източна Азия. Както се отбелязва в *Villalobos-Herrera et al.* (2020) се наблюдава ясна прилика между моделните отклонения при относителната влажност и индекс СВИ. На райони с високи положителни отклонения на относителната влажност, съответстват райони със силно отрицателно отклонение на индекс СВИ. Не се открива подобно поведение при индекс WBGT., т.е. отклонението в пространственото разпределение от моделните стойности на индекса за топлинен стрес не е подобно на отклоненията в пространственото разпределение нито на температурата, нито на относителната влажност.

Резултатите от тестовете за статистическа зависимост между температура и относителна влажност в ERA-Интерим и в моделите CMIP5 и изчислените крос-корелационни коефициенти τ за София са показани в таблица 1. Корелацията между двете променливи за всички двойки е умерена до висока отрицателна. В последната колона на таблица 1 е дадено средното мултимоделното отклонение в стойността на крос-корелационните коефициенти на 12 модела спрямо ERA-Интерим и то има стойност 0.04. Получените резултати за София се потвърждават и в глобален мащаб (*Villalobos-Herrera et al.*, 2020) и показват умерена до висока отрицателна корелация между моделите и реанализа, със средна стойност от -0.50. Отклонението на τ не е съществено за по-голямата част от моделите, т.е. корелациите са в рамките на 95 % доверителен интервал от стойностите на τ изчислени с променливите от ERA-Интерим. Резултатите от теста за еднаквост на копулите са подобни, с над 80 % съгласие в структурата на копулите между ERA-Интерим и модели за 52 % от конти-

data	EPA	BNU-	ACCESS1-0	ACCESS1-3	BCC-	GFDL-	GFDL-
	Интерим	ESM	ACCESS1-0	ACCESS1-3	CSM1-1-m	CM3	ESM2G
T~ RH	-0.56	-0.60	-0.63	-0.65	-0.65	-0.62	-0.62
data	CNRM-	GFDL-	INMCM4	IPSL-	IPSL-	NorESM1-M	bias
	CM5	ESM2M		CM5A-LR	CM5A-MR		
T~ RH	-0.68	-0.63	-0.52	-0.38	-0.46	-0.51	0.04

Таблица 1: Крос-корелационни коефициенти между температура (T) и относителна влажност (RH) за София.

ментите и 60-80 % съгласие в 33 % от континентите. Като цяло регионите, в които се откриват най-големи статистически значими разлики в структурата на копулата и τ включват части от Африка, Индия и басейна на Амазонка.



Фигура 14: Глобална средна температура (T) от ERA-Интерим (a) и средно мултимоделно отклонение на температура (b). Глобална средна относителна влажност (RH) от ERA-Интерим (c) и средно мултимоделно отклонение (CMIP5 минус ERA-Интерим) на относителна влажност (d). Фигурата е от *Villalobos-Herrera et al. (2020)*.

7.3 Оценка на грешката на СВІ и WBGT

Предвид важността на сложните съставни събития, които често водят до екстремни прояви на времето (*Leonard et al. (2014)*, *Zscheischler et al. (2018)*), следващата стъпка е оценката на отклонението в представянето

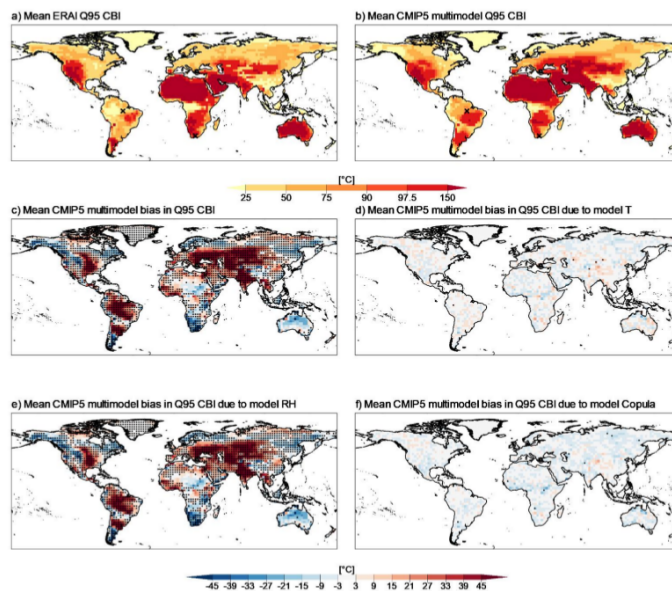
на екстремните стойности на индексите за пожароопасност и топлинен стрес (95-и перцентил, Q95) и свързаните с тях променливи. При индекса на пожароопасност се наблюдава голямо положително отклонение в разглежданата точка и подценяване на стойността на относителната влажност спрямо стойностите от ERA-Интерим, а както се вижда от фигурата това е променливата с най-голям принос към общото отклонение. От разлагането на общото отклонение за тази точка се вижда, че като цяло всички модели добре симулират температурата и статистическата зависимост между променливите изразено чрез тяхната копула и приноса им към общото отклонение не е значителен. Разлагането на общото отклонение по компоненти показва, че за разлика от СВИ, при WBGT, няма ясно изразен доминиращ източник на отклонение. И трите компонента допринасят, но се наблюдава компенсиращ ефект между температурата и относителната влажност, поради противоположните по знак отклонения. Статистическата зависимост между съставните променливи не внася значително отклонение в разглежданата точка. (*Villalobos-Herrera et al.*, 2020) установява, че пространственото разпределение на мултимоделната средна стойност на СВИ е много подобно на това от ERA-Интерим. Най-високи са екстремните стойности на СВИ в Централна Южна Америка, Северна Америка и части от Централна Азия. Този резултат е в съответствие с отклоненията в средната стойност СВИ. Осредненото мултимодално отклонение на индекс СВИ е 21°C , което съответства на 25 % от осреднената по площ стойност на СВИ в ERA-Интерим (84°C). За над 75 % от континентите мултимоделният СВИ се различават значително от ERA-Интерим. Резултатите от разлагането по компоненти показва, че отклонението, което се дължи на RH е основният фактор за общото средно отклонение при екстремни стойности на СВИ. За средна абсолютна стойност на отклонението от 21°C , съответстващите средни отклонения на T, RH и зависимостта между тях са съответно 3°C , 20°C и 3°C . Приносът на RH към отклонението в индекса СВИ е в съответствие с дефиницията на индекса, който се влияе главно от RH и в по-малка степен от T, следователно, моделното представяне на зависимостта между T и RH играе незначителна роля в общото отклонение. Може да се заключи, че приносът на RH води до значителни отклонения в стойностите на СВИ, освен в районите Сахара и Австралия,

а приносът на T и зависимостта между T и RH не водят до значителни отклонения в мултимоделните стойности на индекса за пожароопасност СВИ. *Villalobos-Herrera et al.* (2020) показват, че пространственото разпределение на мултимоделната средна стойност на индекса за топлинен стрес WBGT (фигура 16b) е подобен на този на ЕРА-Интерим (фигура 16a). Ниските стойности на индекса са концентрирани по планински вериги като Андите и Хималаите и във високи географски ширини. С високи стойности на индекса за топлинен стрес са Южна Америка и Индия (фигура 16). Въпреки това, по отношение на стойностите на отклонението, представянето на CMIP5 моделите при индекс WBGT изглежда по-добър от това за индекс СВИ. Средна стойност на абсолютното отклонение в индекса е $1.1^{\circ} C$, което е малко в сравнение със средно претеглената по площ стойност на WBGT в ЕРА-Интерим, която е $29^{\circ} C$. Разлагането на общото отклонение по компоненти показва, че за разлика от СВИ, при WBGT, няма един доминиращ източник на отклонение (фигура 16d 16e и 16f). И трите компоненти допринасят, но се наблюдава компенсиращ ефект между T и RH , виден за райони като Южна Америка, Централна Азия и др. Получават се значителни, но противоположни по знак отклонения компенсиращи общото отклонение на WBGT. Отклоненията, обусловени от T и RH , са значителни за над 69 % и 48 % от континентите. Глобално отклонение на копулата е значително само в 12 %, но за континентите отклонението е 39 %. Допълнително потвърждение за тези компенсиращи отклонения могат да бъдат намерени чрез средно претеглено по площ отклонение в Q95 на WBGT която е $1.1^{\circ} C$, и е по-малка от приноса на T и RH , които са съответно $1.9^{\circ} C$ и $1.4^{\circ} C$. В допълнение се отчита тенденция към по-ниско средно отклонение, задвижвано от компонента на копулата (средно претегленото по площ абсолютно отклонение е $0.85^{\circ} C$). Описаният по-горе компенсиращ ефект на T и RH е в съгласие с резултатите на *Fischer and Knutti* (2013). Те показват, че в регионален мащаб и за отделни модели, отклоненията в индекса за топлинен стрес WBGT, задвижвани от T и RH , се отменят взаимно, което води до малки отклонения в индекса. Компенсацията на отклоненията в отделните модели произтича от: 1) противоположни отклонения в T и RH т.е. моделиране на твърде високи температури и също така симулиране на твърде ниска относителна

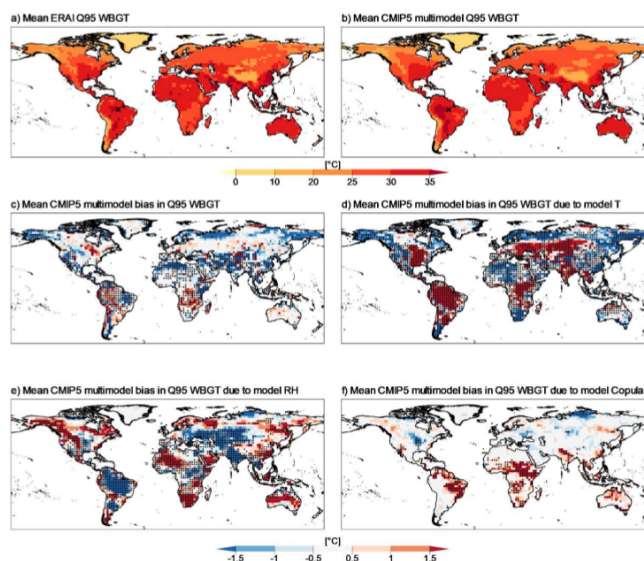
влажност и 2) тенденцията на индекс за топлинен стрес WBGT да бъде висока/ниска за влажни и топли/сухи и студени условия.

От направените изследвания за периода 1979-2005 г. за София е установено: 1) отклонение в едномерните разпределения на T и RH между климатичните модели CMIP5 и ERA-Интерим и 2) тенденция на моделите да завишават стойностите на пика на температурата и да занижават пика на относителната влажност. Средното мултимоделно отклонение за температурата за София е 3.7°C , което е малко над 2 пъти по-високо от средното глобално. В глобален мащаб пространствено разпределение на температурата е с висока корелация между моделите и ERA-Интерим (0.93), но за басейна на Амазонка е установено значително положително отклонение, а за Северна Африка и Близкия изток значително отрицателното отклонение. Средното глобално отклонение на температурата е 1.6°C . Средното мултимоделно отклонение за RH за София е -11 %. В глобален мащаб климатичните модели не представят добре пространственото разпределение на RH като над 59 % от континентите не покриват теста Андерсън-Дарлинг. Средното мултимоделно отклонение на RH е особено голямо в басейна на Амазонка. Въз основа на теорията на копулата е направена оценка на влиянието на T, RH и тяхната копула върху общото отклонение на индексите на опасност от пожар и топлинен стрес (CBI и WBGT). Моделите показват добро цялостно представяне на индивидуалните корелации за T, RH, CBI и WBGT. Водещ принос в отклонението на CBI има RH. Приносът в отклонението на индекс WBGT имат взаимодействието между отклонения, както на T, RH, така и на тяхната копула и това води до компенсиращ ефект. Компенсацията на отклоненията произтича от: 1) противоположни отклонения в T и RH т.е. завишена T и занижена RH и 2) тенденцията на WBGT да бъде висока за влажни и топли райони и ниска за сухи и студени райони. В съответствие с *Fischer and Knutti* (2013), модели които са склонни да завишават температурите, също така занижават относителната влажност. Тоест отрицателната корелация между приноса на температура и относителна влажност намаляват отклоненията в индекс WBGT в климатичните модели CMIP5. Направеното изследване на два индекса на сух режим на хидрологичния цикъл използва глобални климатични модели от CMIP5 и логично продължение е то да се приложи

и за СМIP6, както и за периода 2003-2014 г.



Фигура 15: 95-ти процентил на индекс за топлинен стрес СВІ от ERA-Интерим (а) и мултимоделно средно от СМIP5 (b). Разлагането по компоненти Т (d), RH (e) и копулата (f). Фигурата е от *Villalobos-Herrera et al.* (2020).



Фигура 16: 95-ти процентил на индекс за пожароопасност WGBT от ERA-Интерим (a) мултимоделно средно от CMIP5 (b) и разликата (c). Разлагането по компоненти T (d), RH (e) и копулата (f). Фигурата е от *Villalobos-Herrera et al.* (2020).

8 Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията

8.1 Научни приноси

В тази дисертация е поставено началото на комплексно изследване на връзките между компонентите на хидрологичния цикъл за България за две опасни метеорологични явления като горещата вълна през 2007 г. и наводненията през 2014 г. Наблюденията получени от спътниковата система за изследване на гравитационното поле на Земята (ГРЕЙС) и Глобалните Навигационни Спътникови Системи (ГНСС) са използвани за първи път съвместно и е показана тяхната зависимост с широко използваните наземни измервания на температурата и валежа. В допълнение глава 7 обобщава изследване на съставни сложни събития извършена от международен колектив, в който докторантът участва активно към работен пакет 4 “Нови статистически подходи за разработване и проверка на модели” на Евро-

пейска научна мрежа КОСТ 17109 "Изследване и моделиране на съставни сложни събития на времето и климата".

По-конкретно, приносите са от научно-приложен характер и могат да се обобщят в:

- 1.) В дисертационния труд за първи път е изследван потенциалът на спътникова система ГРЕЙС за наблюдение на аномалиите в интегрираните наземни и подземни водни количества (TWSA) по време на горещата вълна през 2007 г. в югоизточна Европа. Направената количествена оценка на връзката между валежа и TWSA показва времево отместване от 6 месеца за региона. Асимилация на времевите редове на TWSA и ИВП в регионалните реанализи имат потенциал да подобрят хидрологичния им цикъл и да допринесат за по-точно прогнозиране на опасни метеорологични явления като горещите вълни и свързаните с тях социално-икономически последици.
- 2.) Направеният количествен анализ на компонентите на хидрологичния цикъл за 2014 г. установи по-суха и по-топла от обичайното зима последвана от пет последователни по-влажно от средното месеци от март до юли. Установен и аномален годишен цикъл на наземното водно количество от ГРЕЙС с отрицателни аномалии от януари до април и положителни от май до август 2014 г. За период 2003-2014 г. линейните тенденции на: 1) температурата е положителна от $0.1^{\circ}\text{C}/\text{година}$, 2) валежите е отрицателна от $1\text{ mm}/\text{година}$ и 3) наземното водно количество е отрицателна от $2\text{--}4\text{ mm}/\text{година}$.
- 3.) За пръв път в България е използван индекс за дефицит на влажността (Drought Severity Index, DSI) от ГРЕЙС за оценка на две години със съответно сух и влажен режим през 2007 г. и 2014 г. Установена е количествена връзка на времевото отместване на индекс DSI със стандартизиран индекс за валеж (SPI). За 2007 г. е регистриран най-ниският индекс за екстремно сух режим през месец юли, който съвпада с горещата вълна в България. А през 2014 г. е установен прехода от сух към влажен режим на двата индекса и тяхното от-

местване във времето. Може да бъде предложено използването DSI съвместно с SPI в прогнозата на опасни метеорологични явления.

4.) Направена е количествената оценка на влиянието на грешките на температура, относителната влажност и тяхната зависимост върху индекс за топлинен стрес и пожароопасност от 12 климатични модели. Установено е че най-съществено влияние върху грешката на индекса за пожароопасност има относителната влажност. За индекса на топлинен стрес водещ е приносът на зависимостта между температурата и относителната влажност. Демонстрирана е необходимостта от оценка на зависимостите от два или повече параметъра в оценка на индексите получени от климатичните модели.

8.2 Публикации по дисертацията

8.2.1 Публикации в списания

- 1.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Meyer and G. Guerova, 2017. Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 165-166, 1-9, 10.1016/j.jastp.2017.10.005.
- 2.) Mircheva, B., Tsekov, M., Meyer, U., Guerova, G. Analysis of the 2014 Wet Extreme in Bulgaria: Anomalies of Temperature, Precipitation and Terrestrial Water Storage. *Hydrology* 2020, 7(3), 66, <https://doi.org/10.3390/hydrology7030066>.
- 3.) Villalobos-Herrera R., E. Bevacqua, A. F. S. Ribeiro, G. Auld, L. Crocetti, B. Mircheva, M. Ha, J. Zscheischler and C. De Michele, 2021. Towards a compound event-oriented climate model evaluation: A decomposition of the underlying biases in multivariate fire and heat stress hazards, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, <https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2020-383/> в процес на рецензия 29/01/2021.
- 4.) Мирчева Б. и Г. Герова, 2021, Индекси на сух и влажен режим в периода 2003-2014 в България, *Годишник на СУ*, 29/01/2021.

Публикация във финален отчет на научна мрежа КОСТ1206. Mircheva B. and G. Guerova, "Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave 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, 381-384, doi:10.1007/978-3-030-13901-8_5.

8.2.2 Цитирания на публикации

Забелязани са две цитирания на публикацията на *Mircheva et al.* (2017) както следва:

- 1.) Bonafoni, S., Biondi, R., Brenot, H. and Anthes, R., 2019. Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. *Atmospheric Research*, 230, p.104624.
- 2.) Jadala, N.B., Sridhar, M., Dashora, N. and Dutta, G., 2020. Annual, seasonal and diurnal variations of integrated water vapor using GPS observations over Hyderabad, a tropical station. *Advances in Space Research*, 65(1), pp.529-540.

8.3 Представяне на резултатите по дисертацията

- 1.) B. Mircheva, "Terrestrial water storage anomaly during the 2007 heat wave in Bulgaria 2nd GNSS4SWEC summer school, 29-31/08/2016, Potsdam, Germany. (постер)
- 2.) 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. (доклад)

- 3.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Meyer and G. Guerova, "Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria Annual meeting of the Avio-meteorologic club, Borevents, Bulgaria 3-4/06/2017. (доклад)
- 4.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Meyer and G. Guerova, "Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria 2017 EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology, 4-8/09/2017, Dublin, Ireland. (постер)
- 5.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Meyer and G. Guerova, "Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria 6th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 25-27/10/2017, Valencia, Spain. (доклад)
- 6.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Mayer, and G. Guerova "Extreme weather events in Southeast Europe: the 2014 floods in Bulgaria 4th International Training School, "Convective and volcanic clouds detection, monitoring and modeling", Nicolosi - Etna, Italy, 28/09– 6/10/2018. (доклад)
- 7.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Mayer, and G. Guerova "Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria EGU 7-12/04/2019 Vienna Austria. (постер)
- 8.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Mayer, and G. Guerova "Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria CA17109 DAMOCLES Working Group 4 Meeting, 18-19/06/2019, Graz, Austria. (доклад)
- 9.) Mircheva B. Anomalies of the components of the hydrological cycle in Bulgaria during 2014 floods, 6th annual meeting of the Avio-meteorologic club, 19/10/2019, Panitchiste, Bulgaria. (доклад)
- 10.) Mircheva B., "GNSS & GRACE First colloquium "GNSS applications in the BalkanMed region 30-31/01/2020, Sofia University "St. Kliment Ohridski", Sofia, Bulgaria. (доклад)

11.) Мирчева Б., "Аномалии на компоненти от хидрологичния цикъл в България в периода 2003-2014 г. 13-15/11/2020 2ри научен семинар "Физика и химия на Земята, атмосферата и океана", Пчелин. (доклад)

12.) Mircheva B., M. Tsekov, U. Mayer, and G. Guerova "Analysis of the 2014 wet extreme in Bulgaria: anomalies of temperature, precipitation and terrestrial water storage Workshop on Compound Weather and Climate Events, 12-15/01/2021, hosted online by the University of Bern, Switzerland. (постер)

13.) Villalobos-Herrera R., E. Bevacqua, A. F. S. Ribeiro, G. Auld, L. Crocetti, B. Mircheva, M. Ha, J. Zscheischler and C. De Michele, "A copula-based decomposition of multivariate biases in climate models, with an application to compound fire and heat stress hazards Workshop on Compound Weather and Climate Events, 12-15/01/2021, hosted online by the University of Bern, Switzerland. (постер)

9 Заключение

Тази дисертация е първата стъпка за оценка на потенциала на Интегрираната Водна Пара (ИВП) и наземното водно количество (TWS) при изучаване на регионалните характеристики на хидрологичния цикъл за България. За целта са използвани наблюденията от Глобалните Навигационни Спътникови Системи (ГНСС) и спътникова система за наблюдение на гравитационното поле и климата (ГРЕЙС) в периода 2003–2014 г. В този период са регистрирани две екстремни прояви на времето като горещата вълна през 2007 г и наводнения през 2014 г. Изследвани са аномалиите на температурата и три компонента на хидрологичния цикъл (валеж, ИВП и TWS) за горещата вълна в югоизточна Европа през юли 2007 г. През 2007 г. са установени положителни температурни аномалии през януари (5°C), февруари (3.4°C) и юли (2.1°C). Положителната аномалия от януари 2007 г. е най-високата за изследвания период 2003–2013 г. Най-висока отрицателна аномалия на ИВП за месец юли е регистрирана през 2007 г. Най-висока отрицателна аномалия на валежите от -56 mm е регистрирана през юли. TWSA през 2007 г. са отрицателни през януари, май и от юли до октомври, като са най-високи са стойностите през август (-130 mm). В началото на 2007 г. е отчетен локален максимум за температурата и тенденциите към намаляване на ИВП и TWSA. В допълнение комбинацията от над средните температури и отрицателни аномалии на ИВП, валежите и TWSA характеризира горещата вълна през юли 2007 г. Резултатите показват, че най-силно изразената отрицателна TWSA се наблюдава по време на горещата вълна за югоизточна Европа през 2007 г. и за централна Европа през 2003 г. Висока корелация между TWSA през юли и средните месечни стойности на TWSA и валежите се наблюдава съответно за февруари (0.81) и март (0.74). Сравнението на аномалиите от 2007 г. от наблюденията и регионален числен модел Аладин-климат показват: 1) висока корелация за температурата и ИВП и 2) ниска корелация за валежите и TWSA.

Количественият анализ на аномалиите на температурата, валежите и TWS в България, за периода 2003–2014 г., показва че 2014 г. започва с отрицателни аномалии на валежите през януари и февруари, което в комби-

нация с положителни температурни аномалии обуславя по-суха и по-топла от средната за периода зима. Годината продължава с пет последователни по-влажно от средното месеци от март до юли и още по-влажнен септември. Аномалиите на TWS, показват годишен ход с предимно положителни аномалии през първата половина на годината от февруари до юни и отрицателни през втората половина от юли до декември. В контраст месечните стойности на TWSA за 2014 г., са отрицателни от януари до април и положителни от май до август 2014 г. Изчислените крос-корелации между дългосрочните тенденции за 2003–2014 г. показват: 1) слаби до умерени, отрицателни корелации между дългосрочните компоненти на температурата с валежите и TWSA и 2) умерени, положителни корелации между дългосрочните компоненти на валежите и TWSA. За 12-годишния период температурата има положителна линейна тенденция от 0.1°C /година, тенденцията за валежи е отрицателна (1 mm /година), както и стойностите на TWSA намаляват в диапазона $2\text{--}4\text{ mm}$ /година. Сезонната компонента от времевия ред на валежа достига локални максимуми повече от веднъж в годината, а именно в края на пролетта и в началото на лятото (май и юни). Сравняването на дългосрочните компоненти от времевите редове на температура и валеж от синоптични наблюдения и ERA5 показва много добро съгласие. 2014 г. се откроява като годината с най-голямо покачване в стойностите на дългосрочния компонент на валежите за целия изследван 12-годишен период. За април и септември 2014 г. са наблюдавани високи стойности на вътрешногодишната променливост при валежа, които съвпадат със значителен брой регистрирани събития от наводнения, с втори по големина е локален максимум наблюдаван през юли 2014 г. Индексите на климатичната изменчивост MOI и NAO показват слаба корелация с наблюдаваните валежи и слаба до умерена корелация с TWSA. От направения анализ може да се очаква, че стойности на MOI над/под средното е вероятно да бъдат последвани TWSA над/под средното, но един месец по-късно.

За периода 2003-2014 г. е направен анализ и на двата индекса за сух-влажнен режим, а именно стандартизираният индекс за валеж (SPI) и индексът за засушаване от спътникова система ГРЕЙС (DSI). Установено е че 2007 г. и 2014 г. започват с добре изразен сух режим и в двата

индекса между януари и март, но след това се наблюдават разлики. През април 2014 г. SPI е със значителна положителна стойност и през месец май се наблюдава смяна на знака на индекс DSI от отрицателен към положителен. Високите положителни стойности на SPI през май и юни са следвани от стойности на DSI в режим необичайно влажно за юли и август. Интензивните валежи през септември водят до покачване на индекс DSI до режим умерено до много влажно през октомври 2014 г., което е най-високата регистрирана стойност за този месец за 12-годишния период. Преминаването от сух към влажен режим на индекс DSI не е установено за първата половина 2007 г. въпреки положителните стойности на SPI за месец май и юни 2007 г. Индексите DSI и SPI през юли 2007 г. отговарят на екстремно сух режим и водят до горещата вълна.

Въз основа на теорията на копулата е разработена непараметрична процедура за многомерна оценка на приноса на отделните фактори като температура, относителна влажност и тяхната копула към общото отклонение в индексите на пожароопасност и топлинен стрес (CBI и WBGT) от 12 климатични модела. Резултатите от изследването показват, че отклоненията в индекса за пожароопасност се дължат главно на приноса на относителната влажност. За индекса за топлинен стрес е установен принос на отклонения в температурата, в относителната влажност и в тяхната статистическа зависимост (копула). Противоположни отклонения в температурата и относителната влажност се компенсират взаимно, което води до относително малки крайни отклонения в индекса за топлинен стрес. Предложеният метод за оценка на отделните задвижващи фактори оказващи влияние на сложни съставни събития, може да бъде използван в настоящи и бъдещи проучвания в помощ на оценки на тяхното въздействие и риск.

Литература

Copernicus Climate Change Service (C3S),
<https://climate.copernicus.eu>, (accessed 10 2020).

- European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM) plotter, <http://plot.egsiem.eu/>, (accessed 10 May 2020).
- Gravity Recovery And Experiment, <http://nasa.gov/Grace>, (accessed 10 May 2020).
- Bevacqua, E., D. Maraun, M. I. Vousdoukas, E. Voukouvalas, M. Vrac, L. Mentaschi, and M. Widmann, Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in europe under anthropogenic climate change, *Science advances*, 5(9), eaaw5531, 2019.
- Byun, S., and Y. Bar-Sever, A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service, *J. Geod.*, 83, 367–373, doi: 10.1007/s00190-008-0288-8, 2009.
- Cleveland, R. B., W. S. Cleveland, J. E. McRae, and I. Terpenning, Stl: A seasonal-trend decomposition, *Journal of official statistics*, 6(1), 3–73, 1990.
- Csima, G., and A. Horányi, Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian meteorological service, *Időjárás*, 112(3-4), 155–177, 2008.
- de Paiva, R. C. D., D. C. Buarque, W. Collischonn, M.-P. Bonnet, F. Frappart, S. Calmant, and C. A. B. Mendes, Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, *Water Resources Research*, 49(3), 1226–1243, 2013.
- Evans, B., and M. Webster, Adapting to climate change in europe and central asia, 2008.
- Fischer, E. M., and R. Knutti, Robust projections of combined humidity and temperature extremes, *Nature Climate Change*, 3(2), 126–130, 2013.
- Hollander, M., and D. A. Wolfe, Nonparametric statistical methods, 1973.
- Humphrey, V., L. Gudmundsson, and S. I. Seneviratne, Assessing global water storage variability from GRACE: Trends, seasonal cycle, subseasonal anomalies and extremes, *Surveys in geophysics*, 37(2), 357–395, doi: 10.1007/s10712-016-9367-1, 2016.

- Jäggi, A., et al., European gravity service for improved emergency management (egsiem)—from concept to implementation, *Geophysical journal international*, 218(3), 1572–1590, 2019.
- Jäggi, A., et al., International combination service for time-variable gravity fields (cost-g), 2020.
- Jézéquel, A., E. Bevacqua, F. d’Andrea, S. Thao, R. Vautard, M. Vrac, and P. Yiou, Conditional and residual trends of singular hot days in europe, *Environmental Research Letters*, 15(6), 064,018, 2020.
- Leonard, M., et al., A compound event framework for understanding extreme impacts, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 113–128, 2014.
- Maraun, D., et al., Towards process-informed bias correction of climate change simulations, *Nature Climate Change*, 7(11), 764–773, 2017.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, J. Kleist, et al., The relationship of drought frequency and duration to time scales, in *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, vol. 17, pp. 179–183, Boston, 1993.
- Mircheva, B., M. Tsekov, U. Meyer, and G. Guerova, Anomalies of hydrological cycle components during the 2007 heat wave in Bulgaria, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 165, 1–9, 2017.
- Pacione, R., A. Araszkievicz, E. Brockmann, and J. Dousa, EPN-Repro2: A reference GNSS tropospheric data set over Europe, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(5), 1689, doi: 10.5194/amt-2016-369, 2017.
- Papa, F., A. Güntner, F. Frappart, C. Prigent, and W. B. Rossow, Variations of surface water extent and water storage in large river basins: A comparison of different global data sources, *Geophysical Research Letters*, 35(11), 2008.
- Raymond, C., T. Matthews, and R. M. Horton, The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance, *Science Advances*, 6(19), eaaw1838, 2020.

- Reager, J., A. Gardner, J. Famiglietti, D. Wiese, A. Eicker, and M.-H. Lo, A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology, *Science*, *351*(6274), 699–703, 2016.
- Russo, S., J. Sillmann, and A. Sterl, Humid heat waves at different warming levels, *Scientific reports*, *7*(1), 1–7, 2017.
- Schär, C., Climate extremes: The worst heat waves to come, *Nature Climate Change*, *6*(2), 128–129, 2016.
- Sen, P. K., Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau, *Journal of the American statistical association*, *63*(324), 1379–1389, 1968.
- Seneviratne, S., et al., Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, 2012.
- Sheffield, J., and E. F. Wood, Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, ipcc ar4 simulations, *Climate dynamics*, *31*(1), 79–105, 2008.
- Sillmann, J., and E. Roeckner, Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change, *Climatic Change*, *86*(1-2), 83–104, 2008.
- Simeonov, T., K. Vassileva, and G. Guerova, Application of ground-based GNSS meteorology in Bulgaria/Southeast Europe: case study 2007 heat wave, *Annual of University of Sofia*, *106*, 88–100, 2013.
- Sklar, M., Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges, *Publ. inst. statist. univ. Paris*, *8*, 229–231, 1959.
- Stocker, et al., *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- Stoycheva, A., et al., The 2014 floods and their condisions, *Bul. J. Meteo and Hydros*, *20*(5), 73–105, 2015.

- Taylor, K., R. Stouffer, and G. Meehl, An overview of cmip5 and the experiment design, *b. am. meteorol. soc.*, **93**, 485–498, doi: 10.1175, *Tech. rep.*, BAMS-D-11-00094.1, 2012.
- Villalobos-Herrera, R., E. Bevacqua, A. F. Ribeiro, G. Auld, L. Crocetti, B. Mircheva, M. Ha, J. Zscheischler, and C. De Michele, Towards a compound event-oriented climate model evaluation: A decomposition of the underlying biases in multivariate fire and heat stress hazards, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–31, 2020.
- Zhao, M., I. Velicogna, and J. S. Kimball, A global gridded dataset of grace drought severity index for 2002–14: Comparison with pdsi and spei and a case study of the australia millennium drought, *Journal of Hydrometeorology*, **18**(8), 2117–2129, 2017.
- Zscheischler, J., E. M. Fischer, and S. Lange, The effect of univariate bias adjustment on multivariate hazard estimates, *Earth System Dynamics*, **10**(1), 31–43, 2019.
- Zscheischler, J., et al., Future climate risk from compound events, *Nature Climate Change*, **8**(6), 469–477, 2018.
- Zscheischler, J., et al., A typology of compound weather and climate events, *Nature reviews earth & environment*, **1**(7), 333–347, 2020.