



# НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ

Рилка Стефанова Вълчева

**Изследване на регионален климат с използване на числени  
модели с висока разделителна способност**

**АВТОРЕФЕРАТ  
на дисертация**

за присъждане на образователна и научна степен  
“ДОКТОР”

в област на висшето образование 4. Природни науки, математика и  
информатика, професионално направление 4.1. Физически науки  
(Метеорология)

Научен ръководител:  
проф. д-р Валери Спиридонов, НИМХ

София, 2019 г.

Дисертационният труд е с обем 134 страници. Състои се от увод, седем глави и заключение, списък на цитираната литература, включващ 115 заглавия. В дисертацията има 65 фигури, 12 таблици и 24 уравнения.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен научен семинар на департамент „Прогнози и информационно обслужване“, проведен на 12.03.2019 г., съгласно Заповед № НД-04-7/01.03.2019 г. на Генералния директор на НИМХ.

Докторанта работи като физик в департамент „Прогнози и информационно обслужване“ на Националния Институт по Метеорология и Хидрология.

**Състав на научното жури:**

проф. д-р Валери Спиридонов, НИМХ

доц. д-р Андрей Богачев, НИМХ

доц. д-р Николай Рачев, СУ

доц. д-р Елисавета Пенева, СУ

доц. д-р Георги Гаджев, НИГГТ

**Резервни членове:**

Чл.-кор. проф. дн Николай Милошев, НИГГТ

доц. д-р Боряна Ценова, НИМХ

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 28.06.2019 г. /петък/ от 14.00 часа в зала „Академик Л. Кръстанов“ на НИМХ, бул. „Цариградско шосе“ №66, гр. София.

(Номерата на таблиците, графиките и уравненията следват тези в дисертацията).

## СЪДЪРЖАНИЕ

<b>I. Обща характеристика на дисертацията.</b>	4
Актуалност на изследването.	4
Цел и задачи на изследването.	4
Методи на изследване.	5
Практическо значение на работата.	5
Апробация на дисертацията.	5
Съдържание и обем на дисертацията.	5
<b>II. Кратко изложение на дисертационния труд.</b>	7
<b>Глава 1.</b> Глобални и регионални модели, сценарии, климатични симулации.	7
<b>Глава 2.</b> Описание на използваните числени модели.	9
<b>Глава 3.</b> Чувствителност към размера на областта и конвективната схема. Регионален ефект на парниковите газове.	12
<b>Глава 4.</b> Верификация на регионален климатичен модел RegCM4 (Regional Climate Model Version 4) за територията на България и Балкански полуостров.	25
<b>Глава 5.</b> Нов индекс за оценка на климатичните промени. Пример с регионалните модели ALADIN и RegCM за Балканите и Апенински полуостров.	34
<b>Глава 6.</b> Симулации на температурата и валежите. Устойчивост на климатичните промени в зададен интервал от 30 годишен бъдещ период. Пример за територията на България (2021-2050 г.).	43
<b>Глава 7.</b> Влияние на климатичните промени (до 2050 г.) върху потенциала на възобновяемите енергийни източници (вятър и слънчева радиация) за територията на България.	48
<b>Заклучение</b>	54
<b>Приноси</b>	59
<b>Списък на публикациите на автора</b>	60
<b>Литература</b>	61
<b>Благодарности</b>	66

## **I. Обща характеристика на дисертацията.**

### **Актуалност на изследването.**

Изменението на климата може да се счита за едно от най-значимите предизвикателства, пред които е изправен светът в днешно време. Според Петият оценъчен доклад на Междуправителствената експертна група по изменението на климата (IPCC AR5, 2013), затоплянето на климатичната система е неоспоримо, а от 1950-та година насам, много от наблюдаваните климатични промени са безпрецедентни. Днес много аспекти на ежедневието ни са засегнати от изменението на климата. Атмосферата и океаните са се затоплили, количествата сняг и лед са намалели и нивото на морското равнище е нараснало (IPCC, Climate Change 2014). Човешкото влияние върху климатичната система е неоспоримо и сегашните нива на антропогенни емисии на парникови газове са най-високите в историята до сега. Последните изменения на климата имат широко въздействие върху човешката дейност и природните системи. Повърхността на Земята през всяко едно от последните три десетилетия е станала по-топла в сравнение с кое да е предходно десетилетие от 1850-та година насам. Средната глобална температура на земната и океанската повърхност, изчислени по линеен тренд, се е повишила с 0,85 (0,65 до 1,06) ° C за периода 1880 до 2012 г. Ето защо, когато се отчитат климатични, хидрологични, биологични и обществени въздействия породени от изменението на климата, проучванията които представят прогнозиране на климатичните промени и възможните им ефекти придобиват решаващо значение.

### **Целта на дисертацията е:**

- Целта на дисертацията е да се използват два различни по идеология регионални числени модела с висока разделителна способност ALADIN и RegCM4 за анализ на климатичните промени до 2050 година за различни метеорологични елементи, както и да се сравнят симулациите от моделите.

### **Задачите, които трябва да се изпълнят са:**

- Да се изследват различни параметризационни схеми за конвективния валеж на регионален климатичен модел RegCM версия 4 и да се избере най-подходящата от тях, за по-нататъшни изследвания с модела.

- Да се изследва чувствителност на модела RegCM4.4.5 към размера на областта и регионалното влияние на парниковите газове.

- Да се представят резултати от валидиране на модела RegCM4.4.5

за територията на България и Балкански полуостров за 30-годишния период 1983-2012 г.

-Да се представят резултатите от двата модела (ALADIN и RegCM4) за оценката на климатичните промени до 2050 година за територията на България и Балкански полуостров.

-Да се въведе нов индекс за оценка на климатичните промени при различни по идеология регионални числени модели.

-Да се представи метод за оценка на най-вероятните климатични промени (в зададен интервал, за конкретен метеорологичен елемент) за първите 10 години от симулацията.

-Да се представи оценка на промяната в енергийния потенциал на вятъра и на слънчевата радиация за периода 2021-2050 г. за територията на България.

### **Методи на изследване.**

Изследването е основано на резултати от числени симулации с регионални числени модели RegCM4 и ALADIN-Climate. За количествена оценка на отклонението на моделираните от измерените климатични данни е използвано отклонението BIAS, средно квадратичната грешка RMSE и коефициент на корелация. Сравненията са представени под формата на пространствени карти, както и в графичен и табличен вид.

### **Практическо значение на работата.**

Резултатите от т. 4, 6 и 7 от Приноси са приложени при оценката на метеорологичните параметри, използвани в разработената енергийна стратегия от БАН.

### **Апробация на дисертацията.**

Част от резултатите са изложени в 4 публикации и са представени на 4 конференции (три международни и една национална). Две от публикациите са в списания с импакт фактор (сп. „Idojaras“ и сп. „Доклади на БАН“). Една публикация е в списание „Годишник на Софийски университет“-Физически факултет и една публикация в сп. „Енергетика“.

### **Съдържание и обем на дисертацията.**

Дисертацията е с обем 134 страници. Състои се от увод, седем глави и заключение, списък на цитираната литература, включващ 115 заглавия. В дисертацията има 65 фигури, 12 таблици и 24 уравнения.

В първа глава са представени общата идеология на моделирането на климата, кратки сведения за глобални и регионални числени модели,

какво са климатичните симулации, както и описание на различни сценарии за изменение на климата.

Във втора глава са описани използваните числени модели, тяхната история на създаване, особености и параметризации на физичните процеси.

В трета глава са представени предварителни тестове с модела RegCM4 интегриран за територията на Балканския полуостров и България. Симулациите обхващат период от 10 години от 2000 до 2009 г. и за начални и гранични условия са използвани данни от метеорологични реанализи ECMWF ERA-Interim ( $1,5^{\circ} \times 1,5^{\circ}$ ). Проведени са предварителни тестове за избор на параметризация на конвективния валеж, тестове на чувствителност към размера на областта и концентрацията на парниковите газове.

В четвърта глава са представени и обсъдени резултати от валидация на модела RegCM4.4.5 с хоризонтална резолюция 20 км за периода от 30 години (1983–2012 г.). За валидиране способността на модела да симулира месечни температури и суми на валежа, са използвани базата данни от приземни наблюденията CRU TS3.23 с хоризонтална резолюция  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  и данни от приземни станции в регулярна мрежа E-OBS Version 15.0 с резолюция  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ .

В пета глава е предложен нов индекс за оценка на климатичните промени. Пространственото разпределение на новия индекс е демонстрирано, чрез използването на два регионални климатични модела ALADIN-Climate и RegCM4 за район включващ Балканите и Апенински полуостров за периода 2021–2050 г. Оценка е извършена за средните месечни температури и валежи. Използвани са резултати от симулации с регионалния модел ALADIN-Climate, форсиран с гранични условия от глобалния модел ARPEGE съгласно сценария A1B и регионалния климатичен модел RegCM4.4.5, форсиран с гранични условия от глобалния климатичен модел HadGEM2-ES, съгласно сценария RCP4.5. И двата модела имат разделителна способност от 20 км.

В шеста глава се предлага метод за оценка на климатичните промени през първите 10 години от симулацията по подобие на метода Монте Карло. Изводите са направени за територията на България и са основани на симулации за периода 2021–2050 година, проведени с модела ALADIN-Climate по проекта CECILIA от 6-та рамкова програма.

В седма глава е представена оценка на изменението на енергийния потенциал на вятъра и слънчевата радиация за територията на България за периода 2021–2050 г. Използвани са симулации с модела ALADIN-Climate с резолюция 10 км.

Дисертацията завършва със заключение, приноси, списък с

публикации и доклади свързани с темата на дисертацията, списък с цитираната литература и благодарности.

## **II. Кратко изложение на дисертационния труд.**

В Увода е представена актуалност на дисертацията, цели и поставени задачи за изпълнение, както и описание на структурата на дисертацията.

### **Глава 1. Глобални и регионални числени модели, климатични сценарии, климатични симулации.**

Числените модели се разделят на глобални (General Circulation Models – GCMs) и регионални (Regional Climate Models - RCMs) според областта, върху която се интегрират уравненията на термохидродинамиката. Идеята за използване на модели с ограничена територия (Limited Area Models-LAMs) за регионални проучвания и изследвания е предложена от Dickinson et al. (1989) и Giorgi (1990). Тя се основава на концепцията за еднопосочен нестинг (one-way nesting). Това означава, че диференциалните уравнения за поведението на атмосферата се решават върху ограничена площ от земното кълбо, т.е. създава се регионален климатичен модел (RCM) с висока резолюция. Полетата на променливите на този модел на границите на областта върху която е интегриран се осигуряват от метеорологичните полета на моделите за обща атмосферна циркулация (GCMs), или така наречените глобални модели, които се интерполират в по-фината мрежа на RCM. При еднопосочният нестинг няма обратна връзка между симулациите на регионалния и глобалния модел. При двупосочният нестинг симулациите на регионалния модел се използват като „поправка“ при интегрирането на глобалния модел.

Глобалните модели или моделите за общата атмосферна циркулация (GCMs) са за цялото земно кълбо и резолюцията им е ниска (~100-200 km). Проблемът при тях е, че не могат да отчетат ефекти от по-малкомащабни форми на релефа или човешката дейност. Например при тях от планините в Европа можем да различим само Алпите. За по-детайлно изследване на промените в даден регион се използват регионални модели с висока резолюция (10-50 km) за ограничена област от земното кълбо. При тях началните и гранични условия се осигуряват от моделите за обща атмосферна циркулация (GCMs) (нестинг). Предимство на регионалните модели е способността да симулират атмосферните черти на райони с по-малък мащаб (например орографски

валеж), а недостатък е систематичната грешка на форсиращите полета от глобалния модел.

### **Климатични сценарии на IPCC.**

В дисертацията са използвани два различни сценария A1B (IPCC SRES, 2000) и RCP4.5 (IPCC AR5, 2013). При SRES (IPCC Special Report on Emissions Scenarios, 2000) сценариите климатичните промени се изследват, като се предполага различно развитие на човешката дейност и различно отделяне на парникови газове. Обобщени са 40 „сценарии“, систематизирани в няколко големи групи. Тяхната цел е да се уеднаквят симулациите за климатични промени с глобалните и регионални климатични хидродинамични модели. Най-често използваните сценарии са три от тях – A2, A1B и B1, определяни съответно като „песимистичен“, „умерен“ и „оптимистичен“. На практика, до 2050 година различните сценарии са статистически неразличими.

При RCP сценариите (Representative Concentration Pathways) (IPCC AR5, 2013) моделирането на климатичните промени се извършва въз основа на очакваното радиационно въздействие (Radiative Forcing, RF) през настоящия век на парниковите газове и други природни и антропогенни фактори върху енергийния баланс на климатичната система, измерено във ват на квадратен метър. Сценарият RCP 8.5 (Riahi et al., 2011; Riahi et al., 2007; Rao and Riahi, 2006) може да бъде наречен „обичайна практика“ с нарастващи емисии на парникови газове във времето и съответно увеличаващи се концентрации на парникови газове. Радиационното въздействие нараства до 8.5 W/m<sup>2</sup> до 2100 г., което съответства на концентрации 1370 ppm в CO<sub>2</sub> еквивалентно. Това е най-песимистичният сценарий. Сценарият RCP 6.0 (Fujino et al., 2006; Hijikata et al., 2008; Masui et al., 2011) е стабилизиращ сценарий, при който емисиите ще нарастват бързо до 2080 г., след което ще намаляват. Радиационното въздействие към 2100 г. се оценява на 6 W/m<sup>2</sup> което съответства приблизително на концентрации от около 850 ppm в еквивалент. Сценарият RCP 4.5 (Smith and Wigley 2006; Clarke et al., 2007; Wise et al., 2009) предвижда по-бързо реализиране на адекватни мерки за ограничаване на емисиите. Очаква се пикът на емисиите да бъде около 2040 г., след което те да намалееят рязко до 2080г. Радиационното въздействие към 2100 г. се оценява на 4.5 W/m<sup>2</sup>, което съответства приблизително на концентрации около 650 ppm в CO<sub>2</sub> еквивалент. Сценарият RCP 2.6 (van Vuuren et al., 2006; 2007; 2011b) описва най-оптимистичния вариант, при който се допуска, че ще бъдат реализирани всички мерки за ограничаване на емисиите и че глобалното затопляне ще се ограничи до 2°C. Очаква се емисиите да намаляват рязко след 2020 г.



Радиационното въздействие към 2050 г. се очаква да достигне около 3.1 W/m<sup>2</sup>, след което към 2100 г. да се стабилизира на около 2.6 W/m<sup>2</sup>, което съответства на концентрации около 490 ppm в CO<sub>2</sub> еквивалент. Сценарият RCP 4.5 е близък до SRES B1, RCP 6.0 е подобен на SRES A1B (най-вече след 2100 г.), RCP 8.5 е по-песимистичен от A2 през 2100 г. и по-близък до SRES A1F1 сценария. RCP 2.6 е по-оптимистичен от всеки SRES сценарии.

### **Климатични симулации.**

Климатичният експеримент (симулация) е продължително интегриране на климатичния модел, до установяване на устойчив режим на промени в атмосферната циркулация, което се предполага да се случи за период от 30 години. Под промени в атмосферната циркулация тук се разбира промени във възникването и развитието на системите от циклони и антициклони водещи до характерните зимно-летни периоди. При това, неявно се предполага ергодност на моделите. Иначе казано, ако никакви външни параметри не се менят, включително парниковите газове, при определен продължителен период на интегриране, каквото време може да се случи, то се случва. Многократното увеличение на този период няма да доведе до промяна в получените климатични норми.

Климатичните модели са сходни с прогностичните. Разликата на климатичния експеримент от прогнозата е, че при прогнозата се използват съществено начални условия. Климатичният експеримент е задача без начални данни. Математическото естество на задачата налага да се тръгне от някакви начални условия, но те могат да са произволно взети и след интегриране от една-две години атмосферата влиза в режим, съответстващ на външните условия и състава на атмосферата. При достатъчно продължителен период на интегриране, за какъвто се приема 30-годишен период, се предполага, че атмосферната циркулация е преминала през различните възможни по-чести или по-редки състояния (ергодност) и е формирала климат, съответстващ на заложените външни и вътрешни фактори, т.е. получили са се „климатичните норми“. Ако интегрираме системата за 30 години при ниво на парниковите газове например през периода 1961-1990, „климатът“, който ще намерим би трябвало да прилича на реално осъществилия се. Ако моделът е прецизен и параметризиациите са релевантни, то статистическите разпределения на случаите с различните стойности на температура, валеж, вятър и други метеорологични елементи от климатичната симулация трябва да съответстват на случилите се в действителност.

## **Глава 2. Описание на използваните числени модели.**

### **Моделът RegCM - особености, използвани параметризации.**

RegCM е първият модел за ограничени територии разработен за дългосрочни симулации на климата, създаден е в края на 80-те години в Националния център за атмосферни изследвания (NCAR), САЩ. Понастоящем се поддържа от Международният център по теоретична физика (ICTP) в Триест, Италия <https://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/frs/>.

RegCM4 е последна четвърта версия модел на ICTP. Той е хидростатичен модел с примитивни уравнения, хоризонталната В-мрежа на Аракава и вертикална  $\sigma$ -координата „следваща терена“. Използва явна схема за интегриране по времето и алгоритъм за намаляване на хоризонталната дифузия при наличие на внезапни топографски градиенти. Динамичната схема на модела е същата като на модела MM5 Hydrostatic, Grell et al. (1994). Вертикалната координатна система на RegCM е в безразмерни  $\sigma$ -координати, тя е от т.нар. тип следваща терена, като по ниските мрежови нива следват терена, а по-горните са плоски. Навсякъде при експериментите в дисертацията броя на използваните вертикални нива е 18. Хоризонталната координатна система в модела е В-мрежа на Аракава: при нея скаларните моделни променливи ( $T$ ,  $q$ ,  $p$ , и т.н) са дефинирани в центъра на мрежовата клетка, докато компонентите на скоростта  $u$  (направление изток-запад) и  $v$  (направление север-юг) се пресмятат в ъглите на мрежовата клетка.

Нови елементи в последните обновления на модела са: крупномасщабната схема за облаци и валежи, която позволява променлив подмрежов мащаб на облаци (Pal et al., 2000); параметризацията на океанските повърхнинни потоци (Zeng et al., 1998) и повече опции за избор на конвективна схема (Anthes, 1977; Grell, 1993; Emanuel, 1991; Emanuel and Zivkovic-Rothman, 1999), както и новата смесена схема Grell и Emanuel: тя позволява избор на една от двете схеми в зависимост от повърхнинната маска (земя или океан). Друга съществена особеност на най-новата версия на модела, са усложнените ефекти от аерозолите в атмосферата: при пресмятане на радиационния баланс се включва отражение и поглъщане не само в късовълновия спектър, но е добавен и принос на инфрачервения спектър (Solmon et al., 2008). При схемата BATS1e е добавена т.нар. мозаечна параметризация, която се отнася до топографията и типа подложна повърхност, тя вече позволява по-фина резолюция на земната повърхност (RegCM Version 4.3 User Manual, 2011). Въведена е нова схема за микрофизика в облаци, изградена върху Интегрираната система за прогнозиране (IFS) на Европейския център за средносрочни прогнози (Tiedtke, 1993; Tompkins, 2007; Nogherotto and Tompkins, 2014). Като алтернатива на схемата за планетарен граничен слой на Holtslag PBL (Holtslag, 1990), е внедрен модел за турбулентност

(UW Turbulence Closure Model) на университета във Вашингтон (Grenier and Bretherton, 2001; Bretherton et al., 2004). Валидирането на тази параметризация за Европа е описано от Guttler et al., 2013, като първоначално е въведена, за да позволи на RegCM да симулира купесто слоести облаци и крайбрежна мъгла (O'Brien et al., 2012).

За описание на физичните процеси и параметризициите им са използвани следните схеми в дисертацията: радиационна схема - NCAR CCM3 Kiehl et al. (1996). За експериментите с RegCM е използван сценария RCP4.5; физика на земната повърхност - Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme BATS (Dickinson et al., 1993); параметризация на планетарен граничен слой - Holtslag PBL (Holtslag, 1990); схема за конвективния валеж - схема на Grell (Grell, 1993) със „затваряне“ Arakawa & Shubert (1974); схема за крупномощабен валеж - явна схема за влага SUBEX (Pal et al., 2000); параметризация на океанските потоци - BATS1e Monin-Obukhov; схема за баричния градиент - използват се пълните 3D полета.

### **Моделът ALADIN - особености, използвани параметризации.**

Проектът ALADIN е получил името си, като акроним от Aire Limitée Adaptation Dynamique développement InterNational. Той представлява международен проект, включващ 14 метеорологични служби <http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>. През ноември 1996 година, в Париж, в присъствието на генералния секретар на Световната Метеорологична Организация, директорите на службите подписват меморандум, с което се установяват правилата и бъдещия прогрес на проекта и приемат развивания модел да е тяхно основно прогностично средство. ALADIN е изграден на основата на съвместимост със системата IFS/ARPEGE. Последната представлява съвместен проект на Метео-Франс и Европейския център за средносрочни прогнози (ECMWF) за издаване на средносрочни прогностични продукти. Следователно, ALADIN допълва тази система с детайлизирана прогноза, като поддържа възможно минимални софтуерни разлики. Историята на ALADIN-Climate е много по-кратка и започва през 2005 г., Spiridonov et al. (2005). Моделът използва последователно шест часовите резултати от ARPEGE-Climate, (Déqué and Piedelievre, 1995) както и неговата физична част.

За разлика от повечето регионални климатични модели (които са модели на "мрежата" grid-point models) ALADIN е проектиран като спектрален модел, с изключение на това, че приносът от физичните процеси се изчислява в конвенционалното пространство, т.е. в грид-точката. Този подход изисква допълнително използване на ефективни директни и обратни трансформации между спектралните и точковите

пространства. Докато при глобалните модели могат да се използват сферични хармоници (полиноми на Лежандър при ARPEGE) подходящи за сфера, каквато е земното кълбо, при регионалните модели трябва да се търсят други базови функции. В случая на модела ALADIN се използва проекция на площта на интегриране върху тор. Това е следствие от бипериодичното представяне на пространството на спектралните функции.

Друга характеристика на модела ALADIN-Climate е интегрирането на адвекционните части на уравненията чрез полу-неявна, полу-Лагранжева (SISL) схема, описана в Temperton et al. (2001) и използвана в глобалния модел ARPEGE-Climate.

Вертикалната координатната система е в т.нар.  $\eta$ -координата Ritchie et al. (2001 г.). Навсякъде при експериментите в дисертацията броят на вертикалните нива е 30.

За описание на физичните процеси и параметризиациите им са използвани следните схеми: радиационната схема съвпада с тази на Европейския център за средносрочни прогнози ECMWF (Morcrette, 1990) с 5 типа аерозоли (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC). За експериментите с ALADIN е използван сценария A1B; конвективната схема използва параметризиацията на Bougeault (1985); облачността, валежите и вертикалната дифузия е по схемата на Ricard and Royer, 1993; турбулентността се отчита по метода на Mellor and Yamada, 1982; обменът между почва, растителност и атмосфера е с така наречения модел „ISBA“ (Noilhan and Planton, 1989); албедото и параметризиацията на снега е съгласно Douville et al. (2001); влиянието на топографията е съгласно Lott (1999).

### **Глава 3. Чувствителност към размера на областта и конвективната схема. Регионален ефект на парниковите газове.**

#### **Чувствителност към конвективната схема.**

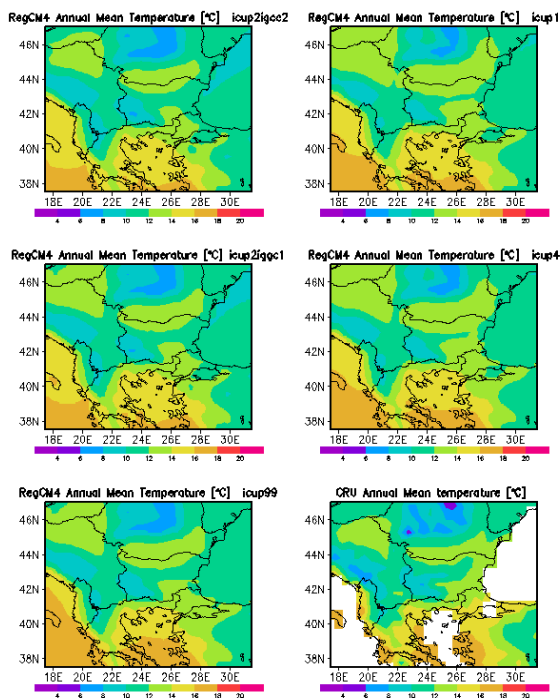
През последните няколко десетилетия проблемите на изменението на климата и влиянието му върху човешките дейности се обсъждат широко и се превръщат в основа за глобални политически решения и икономически стратегии. Повечето от заключенията относно измеренията на изменението на климата се получават от числени експерименти с климатичните модели по отношение на въздействието на парниковите газове в бъдеще. Основният проблем на тези числени симулации е да се оцени тяхната надеждност, например до каква степен климатичните модели са в състояние да представляват климат в момента и в бъдеще. В опит да се отговори на този въпрос, много изследвания

относно валидирането и калибрирането на числените модели са публикувани наскоро (Giorgi et al., 2012; Pieczka et al., 2016; Kotlarski et al., 2014; Torma et al., 2011; Torma et al., 2008; Skalak et al., 2014). Освен това, числените модели зависят от набор първоначални променливи и параметри, тъй като те използват поредица опростявания и параметризации на естествените процеси. Експериментите на чувствителност на въздействието на тези входни параметри върху поведението на модела е съществена част от калибрирането на модела.

Едно от най-важните решения в конфигурацията на модела е избора на параметризация на конвективните валежи т.е избор на конвективна схема. Ето защо в настоящия параграф е използван регионален климатичен модел ICTP RegCM4.3 с пространствена резолюция 30 km, интегриран за територията на Балканския полуостров с център в България. Симулациите обхващат период от 10 години от 2000 до 2009 г., като за начални и гранични условия са използвани данни от метеорологични реанализи ECMWF ERA-Interim (1,5°×1,5°). За установяване на най-подходящата схема, са извършени пет предварителни числени експеримента с пет различни конвективни схеми: модифицирана схема Anthes-Kuo – AK (icup 1); схема на Grell със “затваряна” на Arakawa & Schubert (1974) - GAS ( icup 2); схема на Grell със “затваряне “ на Fritsch & Chappell (1980) – GFC (icup2igcc2); схема на Emanuel – EM (icup 4); смесена конвективна схема на Grell-земя и Emanuel-океан - EM/G (icup 99). Мрежата на модела е от 64x64 точки т.е 1920x1920 км. Конфигурацията е една и съща при петте експеримента. Изходните данни за приземна температура и сума на валежите от модела са през 3 часа в сроковете 00 03 06 09 12 15 18 21 UTC. Получените данни от модела се сравняват с данни от приземни наблюдения CRU TS3.20 с 0.5°x0.5° хоризонтална резолюция (Mitchell and Jones, 2005), които за момента се считат като най-точните приближения на климата.

На Фигура 3.1 са показани карти на средната годишна температура (°C) за периода 2000-2009 г. от симулации с RegCM4.3 ERA-Interim с 5 различни конвективни схеми, сравнени със средната температура от наблюдения на CRU TS3.20 (долу в дясно). Средната годишна температура от CRU за района е между 4° и 18 °C. За България от 6° до 14 °C. И петте схеми дават подобни температури както при CRU, като показват ниските температури по високите части и по-високи температури в крайбрежните области. При всички симулации много добре се различава топлия въздух над морето. За съжаление при данните на CRU морето отсъства, така че не може да се направи сравнение над морска повърхност. Добре известен е факта, че регионалните климатични модели симулират добре температурата, така че не е изненада доброто

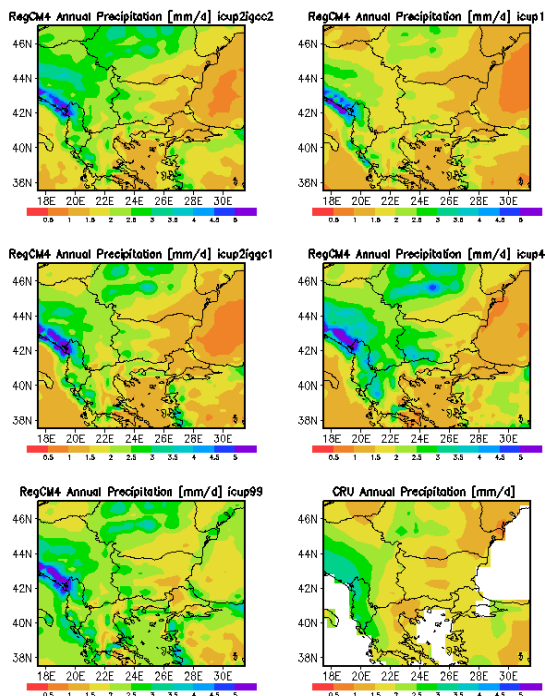
съвпадение на резултатите при петте различни експеримента.



**Фигура 3.1.** Средна годишна температура (°C) от симулации с RegCM4- ERA-Interim с 5 различни конвективни схеми (GAS-icup2 igcc1, GFC-icup2 igcc2, AK-icup1, EM-icup4, EM/G-icup99), сравнени със средната температура от наблюдения CRU TS3.20 (долу в дясно) за периода 2000-2009 г..

При валежите често месечната сума се превръща в среден валеж за 1 ден, което ще използваме тук. Фигура 3.2 са показани карти на сумата на валежа (мм/ден) за същия период 2000-2009 г. от симулации с RegCM4.3 ERA-Interim с 5 различни конвективни схеми, сравнени със сумата на валежа от наблюдения на CRU TS3.20 (долу в дясно). Средното количество на валежа по CRU за района е между 1-4 мм/ден. За територията на България в интервала 1-2 мм/ден. Максимален валеж от симулациите се наблюдава по източно крайбрежие на Адриатическо море в интервала 4-5 мм/ден. Най-малко валеж има в източните части на областта в границите от 0.5-1.5 мм/ден. Като цяло, симулациите с модела приличат на измерванията, но надценяват валежите и при петте схеми.

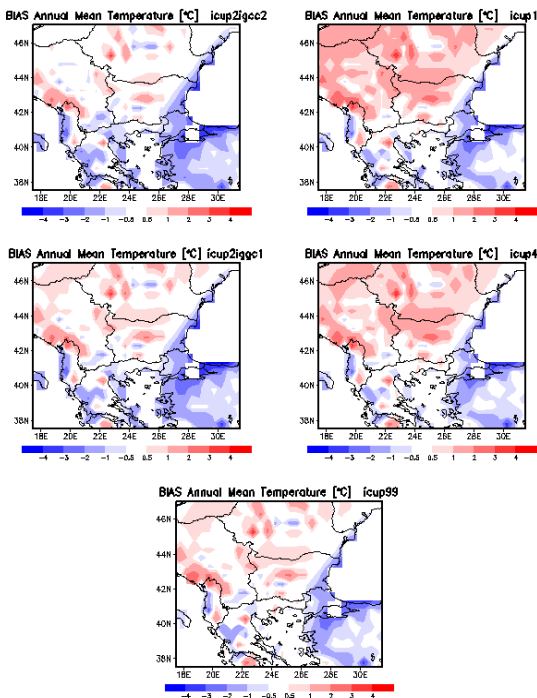
Докато при температурата няма особени разлики между петте експеримента, при валежите се наблюдават различия, особено в северните и западни части на областта.



**Фигура 3.2.** Годишни суми на валежа (мм/ден) от симулации с RegCM4- ERA-Interim с 5 различни конвективни схеми (GAS-icup2 igcc1, GFC-icup2 igcc2, AK-icup1, EM-icup4, EM/G-icup99), сравнени със сумата на валежа от наблюдения CRU TS3.20 (долу в дясно) за периода 2000-2009 г.

На следващите две фигури, за сравнение на петте експеримента са представени пространствени карти на отклонението BIAS при средната годишна температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) (Фигура 3.3) и отклонението при годишния валеж (мм/ден) (Фигура 3.4). И петте схеми показват отрицателно отклонение на температурата на югоизток. Най-големи положителни отклонения при температурата показват схемите АК и ЕМ в северните и северозападните части на областта. При валежа, най-големи положителни отклонения са представени от схемите ЕМ и GFC в

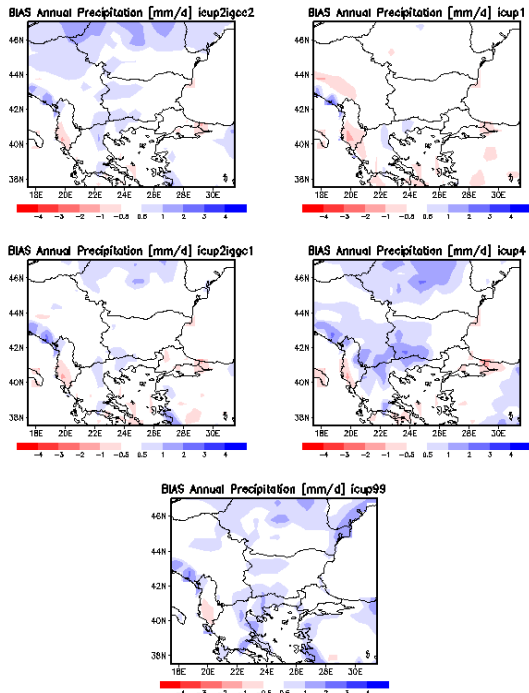
северните части на областта. Най-добри резултати при валежа показват схемите на GAS и АК. При температурата, най-малки са отклоненията при схемите GAS, GFC и EM/G.



**Фигура 3.3.** Отклонението BIAS при средната годишна температура (°C) от симулации с RegCM4 с пет различни конвективни схеми (GAS-icup2 igcc1, GFC-icup2 igcc2, АК-icup1, EM-icup4, EM/G-icup99), сравнени с данните от наблюдения CRU TS3.20 за периода 2000-2009 г.

От тези карти, обаче е трудно да се прецени, кой от експериментите дава най-добри резултати за територията на България. Затова са изчислени средните по площ отклонение BIAS и средно квадратичната грешка RMSE, за годишните температури и валеж, съответно (Таблица 3.1 и Таблица 3.2) за територия на България (41° - 44.5° N, 22.5° -28.5° E).





**Фигура 3.4.** Отклонението BIAS при годишните суми на валежа ( мм/ден) от симулации с RegCM4 с пет различни конвективни схеми (GAS-icup2 igcc1,GFC-icup2 igcc2, AK-icup1, EM-icup4, EM/G-icup99), сравнени с данните от наблюдения CRU TS3.20 за периода 2000-2009 г.

В Таблица 3.1 и Таблица 3.2 са представени средните стойности на годишните температури и валежи, съответно, отклонението BIAS и средно квадратичната грешка RMSE, изчислени за територията на България, от петте експеримента. Три от схемите (GFC, GAS и EM/G) показват отрицателна отклонение при температурата. При валежа всички схеми показват надценяване на валежа, без схемата на АК. Най-малки грешки при температурата показват схемите EM/G, GFC и GAS ( 1.7 °C), а при валежа, най-малка е грешката при схемата GAS (467 мм/год). Всички схемите надценяват валежа, с изключение на схемата АК, която показва отрицателно отклонение от -5 мм/год. При годишните стойности на температурата и валежа, схемата на GAS показва оптимално най-добри резултати.

**Таблица 3.1.** Средна годишна температура (°C) от симулации с RegCM4 с 5 различни конвективни схеми, сравнени със средната температура от наблюдения на CRU TS3.20, отклонението BIAS и средно квадратичната грешка RMSE за територията на България (41 ° - 44.5 ° N, 22.5 ° -28.5 ° E).

Схема	RegCM4	BIAS	RMSE
GFC icup22	11.6	-0.4	1.7
AK icup1	12.2	0.2	2.0
GAS icup21	11.8	-0.2	1.7
EM icup4	12.2	0.2	1.8
EM/G icup99	11.9	-0.1	1.7
CRU	12.1		

**Таблица 3.2.** Годишен валеж (мм/год) от симулации с RegCM4 с 5 различни конвективни схеми, сравнени с годишния валеж от наблюдения CRU TS3.20, отклонението BIAS и средно квадратичната грешка RMSE за територията на България (41 ° - 44.5 ° N, 22.5 ° -28.5 ° E).

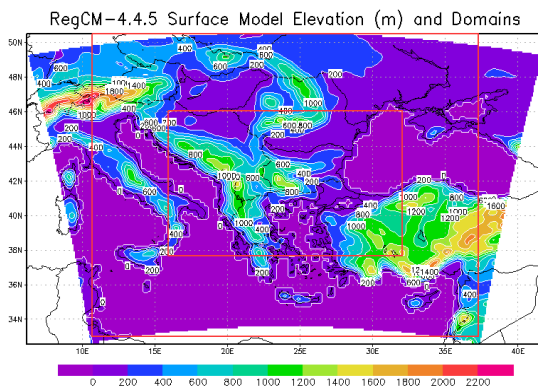
Схема	RegCM4	BIAS	RMSE
GFC icup22	648	67	506
AK icup1	582	-5	483
GAS icup21	606	24	467
EM icup4	708	130	503
EM/G icup99	715	127	600
CRU	593		

Сравнението между моделираните данни и данните от наблюдения показват, че моделът е чувствителен към избора на параметризация на конвективния валеж (конвективна схема) и най-добри резултати за територията на България, показва схемата на Grell със затваряне Arakawa-Schubert (GAS). Избора на тази схема, води до най-малки грешки при симулации на температурите (1,7°C) и валежа (467 мм/год)(Valcheva and Peneva, 2014).

### **Чувствителност към размера на областта.**

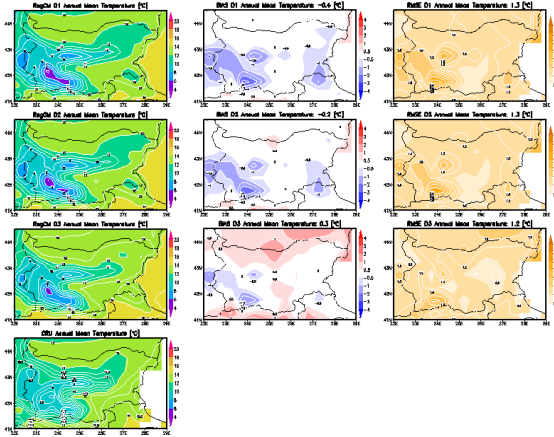
Освен чрез по-детайлната топография, регионалните модели, благодарение на по-голямата резолюция, се очаква да описват по-точно редица процеси. Траекторията и развитието на даден циклон ще получи уточнение в регионалния модел. От друга страна, прекалено голямата

област на интегриране може да позволи развиването на фиктивен циклогенез, извън тенденциите в глобалния модел. Различията в интеграционните области би изпъкнало най-вече при валежите. До 2000-та година броят на средиземноморските циклони бе намалял в сравнение с предни периоди. След 2000 година се забелязва значителен ръст в бройката им. Средиземноморските циклони са от най-значимите източници на валежи за страната. Затова периодът 2000-2009 г. ще е показателен за оценка на влиянието на областта на интегриране за RegCM4. Разгледано е поведението на RegCM4 в три области на интерес - голяма, средна и малка. Хоризонтална резолюция на модела е 20 км и стъпка по времето 60 сек. Използвана е проекция на Ламберт. Голямата област е с координати D1 (6.18°E – 41.82°E, 32.56°N – 50.47°N) и 128 x 96 точки в хоризонтална и вертикална посока, съответно или 2560 x 1920 км. Средната област D2 (10.68°E – 37.32°E, 32.99°N – 50.45°N) е от 96 x 96 точки или 1920 x 1920 км. Малката област D3 (15.96°E – 32.07°E, 37.68°N – 46.05°N) е 64 x 48 точки или 1280 x 960 км.

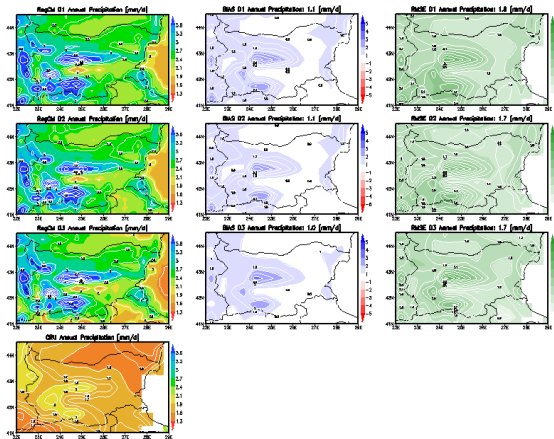


**Фигура 3.5.** Области на изследване: голяма област D1 (6.18°E – 41.82°E, 32.56°N – 50.47°N), средна област D2 (10.68°E – 37.32°E, 32.99°N – 50.45°N), малка област D3 (15.96°E – 32.07°E, 37.68°N – 46.05°N) с център България (42°N, 24°E). Права конична проекция на Ламберт, хоризонтална резолюция 20км .

На Фигура 3.5 са представени областите на изследване: голяма област D1 (6.18°E – 41.82°E, 32.56°N – 50.47°N), средна област D2 (10.68°E – 37.32°E, 32.99°N – 50.45°N), малка област D3 (15.96°E – 32.07°E, 37.68°N – 46.05°N) с център България (42°N, 24°E). С червена линия е обозначена границата на области D2 и D3.



**Фигура 3.6.** Средна годишна температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) от симулации с RegCM4.4.5 за трите области на изследване (от горе на долу D1, D2 и D3) (първа колона), сравнени с данните CRU TS3.23 (първа колона долу в ляво), отклонението BIAS (втора колона) и средно квадратичната грешка RMSE (трета колона), за трите области D1, D2 и D3, съответно.



**Фигура 3.7.** Годишен валеж (мм/ден) от симулации с RegCM4.4.5 за трите области на изследване (от горе на долу D1, D2 и D3) (първа колона), сравнени с данните CRU TS3.23 (първа колона долу в ляво), отклонението BIAS (втора колона) и средно квадратичната грешка RMSE (трета колона), за трите области D1, D2 и D3, съответно.

На Фигура 3.6 са представени пространствени карти на средната годишна температура (°C) от симулации с RegCM4.4.5 за трите области на изследване (от горе на долу D1, D2 и D3) (първа колона), сравнени с данните CRU TS3.23 (първа колона долу в ляво), отклонението BIAS (втора колона) и средно квадратичната грешка RMSE (трета колона), за трите области D1, D2 и D3, съответно.

Симулациите от областите D1 и D2 показват отрицателно отклонение при годишната температура в Югозападна и Югоизточна България, докато при област D3 показват положително отклонение при годишната температура в Северна България и южните части на областта. Грешките при D1, D2 и D3 са най-големи в Централна и Югозападна България.

На Фигура 3.7 са представени пространствени карти на годишния валеж (мм/ден) от симулации с RegCM4.4.5 за трите области на изследване (от горе на долу D1, D2 и D3) (първа колона), сравнени с данните CRU TS3.23 (първа колона долу в ляво), отклонението BIAS (втора колона) и средно квадратичната грешка RMSE (трета колона), за трите области D1, D2 и D3, съответно.

И при трите експеримента D1, D2 и D3, моделът показва положително отклонение при годишния валежа в Централна и Западна България и Черноморската област, там са и най-големите грешки при валежа.

**Таблица 3.5.** Средна годишна температура (°C) и годишен валеж (мм/ден) от симулации с RegCM4 за трите области, сравнени с CRU данните, RMSE и BIAS.

	Температура °C			Валеж мм/д		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
<b>RMSE</b>	1.301	1.251	1.218	1.781	1.705	1.659
<b>BIAS</b>	-0.380	-0.225	0.325	1.141	1.058	1.008
<b>REGCM</b>	11.56	11.703	12.246	2.747	2.671	2.607
<b>CRU</b>	11.79	11.795	11.795	1.704	1.705	1.704

В Таблица 3.5 са обобщени резултатите от Фигури 3.6 и 3.7, като са пресметнати средна годишна температура (°C) и годишен валеж (мм/ден) от симулации с RegCM4 за трите области, сравнени с CRU данните, средно квадратичната грешка RMSE и отклонението BIAS. Отклонението при валежа е положително и при трите експеримента, съответно 67%, 62% и 59% за областите D1, D2 и D3. Отклонението при

температурата е отрицателно при области D1 и D2 (-0.38°C и -0.23°C, съответно) и положително при най-малката област D3 (+0.33°C). Грешките при D1, D2 и D3 са съответно 1.3 °C, 1.3 °C и 1.2 °C при температурата и 1.8 мм/д, 1.7 мм/д и 1.7 мм/д при валежа.

В заключение, RegCM4 е чувствителен към размера на областта, но независимо от това, разликите между трите експеримента не са големи, както при температурите, така и при валежите. И при трите експеримента най-големи отклоненията се наблюдаван в Централна България и планинските райони на югозапад, където са и най-големите грешки.

### **Регионален ефект на парниковите газове.**

Интересен е въпросът, как парниковите газове влияят върху самия модел. За влиянието на топографията е ясно, че е значително. Какво би станало, ако при същите гранични условия променим количеството на газовете? Чувствителността на модела към това е интересно, когато изходът на модела се използва за запазване на външен химичен модел, при което няма "обратна връзка". Например, такъв е случаят с използване на комплекса модели CMAQ&SMOKE (CMAQ, Community Multi-scale Air Quality modeling system; SMOKE, The Sparse Matrix Operator Kernel Emissions).

Количеството на CO<sub>2</sub> е увеличено със 100 %. За целта са извършени следните промени в параметризираните на модела:

*&physicsparam*

*itweak = 1,*

*&tweakparam*

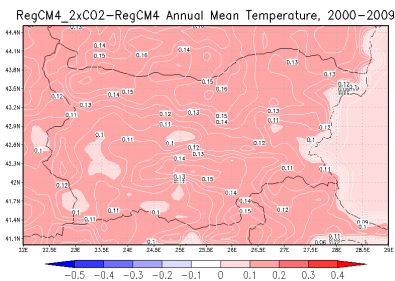
*itweak\_greenhouse\_gases = 1,*

*gas\_tweak\_factors = 2.0, 1.0 , 1.0 , 1.0 , 1.0,*

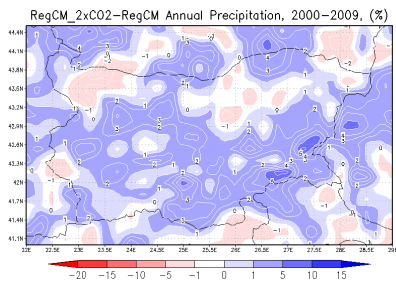
където петте числа на "gas\_tweak\_factors" са мултиплициращ коефициент за концентрациите на CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC11 и CFC12 в модела, съответно в този ред.

На Фигура 3.8 са представени разликите в средната годишна температура (°C) от двата експеримента с RegCM4\_2xCO<sub>2</sub> и RegCM4\_CO<sub>2</sub> с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim за 10 годишния период (2000 – 2009). Разликите в средната годишна температура между двата експеримент са от 0.1°C до 0.2 °C.

На Фигура 3.9 са представени разликите в годишния валеж (%) от двата експеримента с RegCM4\_2xCO<sub>2</sub> и RegCM4\_CO<sub>2</sub> с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim, за 10 годишния период (2000 – 2009). Разликите при годишния валеж (в %) между експериментите RegCM4\_2xCO<sub>2</sub> и RegCM4\_CO<sub>2</sub> са +-5%.



**Фигура 3.8.** Разлики в средната годишна температура (°C) от двата експеримента с RegCM4\_2xCO2 и RegCM4\_CO2 с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim, за 10 годишния период (2000 – 2009).



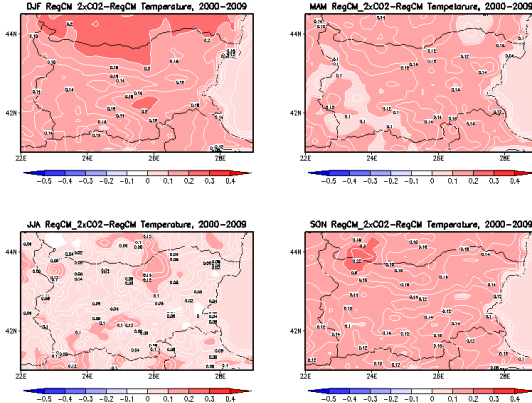
**Фигура 3.9.** Разлики в годишния валеж (%) от двата експеримента с RegCM4\_2xCO2 и RegCM4\_CO2 с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim, за 10 годишния период (2000 – 2009).

На Фигура 3.10 са представени разликите в средната температура (°C) по сезони от двата експеримента с RegCM4\_2xCO2 и RegCM4\_CO2 с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim, за 10 годишния период (2000 – 2009).

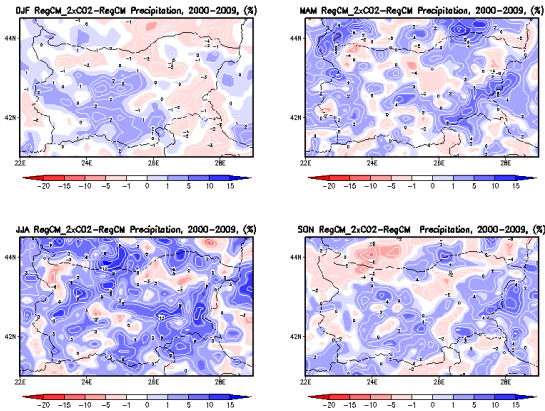
Най-големи разлики при температурата, между двата експеримента, се наблюдават през зимата (DJF) в северните части на областта до 0.3°C и през есента (SON) от 0.1°C до 0.3°C. Най-малки са разликите през летния сезон JJA (0.1°C) за цялата област. През пролетта (МAM) температурните разлики от двата експеримента са от 0.1°C до 0.2°C.

На Фигура 3.11 са представени разликите при валежа (в %) по сезони, от двата експеримента с RegCM4\_2xCO2 и RegCM4\_CO2 с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim за 10 годишния период (2000 – 2009)

Най-големи разлики при валежа, между двата експеримента, се наблюдават през летния сезон (JJA) - от намаление с 5% до увеличение с 15% и през пролетта (MAM) - от намаление с 5% до увеличение с 10%. През зимата (DJF) и есента (SON) изменението на валежа е с около +5%.



**Фигура 3.10.** Разлики в средната температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) по сезони от двата експеримента с RegCM4\_2xCO2 и RegCM4\_CO2 с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim, за 10 годишния период (2000 – 2009). DJF ( $0.1^{\circ}\text{C} - 0.3^{\circ}\text{C}$ ); MAM ( $0.1^{\circ}\text{C} - 0.2^{\circ}\text{C}$ ); JJA ( $0.1^{\circ}\text{C}$ ); SON ( $0.1^{\circ}\text{C} - 0.3^{\circ}\text{C}$ )



**Фигура 3.11.** Разлики при валежа ( $\%$ ) по сезони, от двата експеримента с RegCM4\_2xCO2 и RegCM4\_CO2 с хоризонтална резолюция от 20 км и гранични условия ERA-Interim за 10 годишния период (2000–2009). DJF (+5%); MAM (-5;+10%); JJA (-5;+15%); SON (+5%).



В заключение, при увеличение на CO<sub>2</sub> със 100% за територията на България, средната годишна температура се покачва с 0.1°-0.2°C, а годишните суми на валежа се изменят с до 5%. При сезонните, средните температури на модела се покачват с 0.1° до 0.3°C, а при валежите стойностите се изменят с -5% до +15%.

#### **Глава 4. Верификация на регионален климатичен модел RegCM4.4 (Regional Climate Model Version 4) за територията на България и Балкански полуостров.**

Климатичните модели са основен инструмент, за изследване на реакциите на климатичната система към различни фактори, за изготвяне на сезонни и многогодишни климатични прогнози, както и за изготвяне на различни сценарии за бъдещия климат. Поради това от решаващо значение е, да се оцени адекватността (релевантността) на тези модели (IPCC AR5, 2013 г.). Преди да приложим регионалния модел (RegCM4) за изследвания на бъдещи изменения на климата, е важно да се провери точността на модела в даден регион и способността му да възпроизведе успешно наблюдаваните регионални климатични характеристики.

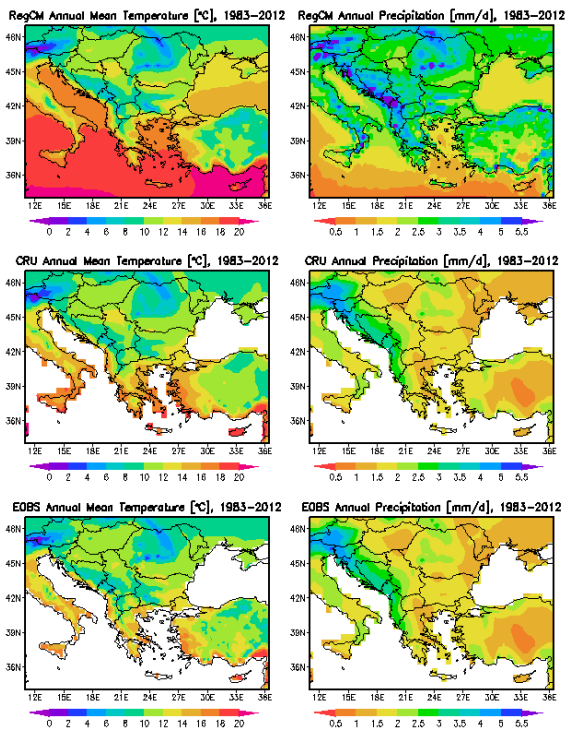
Голям брой предходни проучвания са свързани с оценка на регионалните климатични модели. Няколко международни проекта започват последователно, с крайната цел да се оцени ефективността на най-използваните понастоящем регионални климатични модели и да се разработят климатични сценарии за бъдещето. Тази дейност е иницизирана в региона на Европа през 90-те години на миналия век с проекта Regionalization of Anthropogenic Climate Change Simulations (Machenhauer et al., 1998). Той показва, че систематичните грешки в общата циркулация имат голямо влияние върху полетата на температурата и валежа. През следващото десетилетие стартират проектите PRUDENCE (Christensen et al., 2007) и ENSEMBLE (van der Linden and Mitchell, 2009) с цел да се създаде система от ансамбли от различни климатични модели и по този начин да се подобри представянето на моделите и да се определят техните несигурности (Van der Linden и Mitchell, 2009). Тази работа продължава в проекта CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) (Giorgi and Gutowski, 2015). Този проект е част от Световната програма за изследване на климата World Climate Research Program (WCRP), чиято цел е да оцени ефективността на регионалните климатични модели чрез набор от експерименти, насочени към изготвяне на регионални прогнози за климата. Друг международен проект е CECILIA “Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment” (<http://>

//www.cecilia-eu.org), който стартира през 2006 г. с цел оценка на климатичните модели с акцент върху Централна и Източна Европа.

В тази глава са представени и обсъдени резултати от симулация с продължителност 30 години (1983-2012) с модела RegCM4.4.5 (Giorgi et al., 2012) с хоризонтална резолюция 20 км. Първата година на симулацията (1982 г.) е използвана, като spin-up и не е отчетена в анализа на данните. За параметризация на физичните процеси са използвани схемите описана в Глава 2, за конвективна схема е избрана тази на Grell (1993) със „затваряне“ на Arakawa & Schubert (1974), която показва най-добри резултати при предварителните тестове на модела (Глава 3) (Valcheva and Peneva, 2014). Областта съпада с област D1 от предходната глава. Хоризонталната резолюция е 20 км, а стъпката по времето 60 секунди. Граничните условия се прилагат в „буферна“ зона от 12 точки на четирите странични граници. Пространствената мрежа на модела е Аракава-В, по вертикалата използва 18  $\sigma$ -нива, като най-горното е на 25 hPa, а най-долното на 995 hPa. Данните за релефа и типа постилаща повърхност са взети от уебсайта <http://climadods.ictp.it/data/regcm4/SURFACE/> (Loveland et al., 1991). Температурата на морската повърхност е взета от седмични осреднени данни NOAA OI SST V2 ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) (Reynolds, 2002). Като начални и гранични условия са използвани данни от реанализите на ECMWF ERA-Interim ( $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  резолюция) (Uppala et al., 2008; Dee et al., 2011). За валидиране способността на модела да симулира месечни температури и суми на валежа, са използвани базата данни от приземни наблюденията CRU TS3.23 (Harris and Jones, 2015) с хоризонтална резолюция  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , изтеглени от уеб-сайта ([http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru\\_ts\\_3.23/data](http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru_ts_3.23/data)) и данни от приземни станции в регулярна мрежа E-OBS Version 15.0 (Haylock et al., 2008) с резолюция  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  за температурата и валежа от проекта ENSEMBLES, изтеглени от уеб-сайта (<http://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>). Тъй като, симулациите покриват областта на България и Балкански полуостров, е използвана права конична проекция на Ламберт, подходяща за умерените ширини (Elguindi et al., 2014).

### **Пространствени карти на температурата и валежа.**

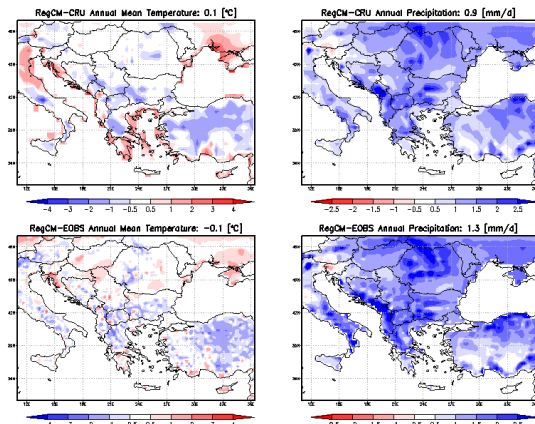
На Фигура 4.1 е представена средната годишна температура на въздуха ( $^\circ\text{C}$ ) на 2м и годишния валеж (представен чрез осреднени ежедневни стойности в мм/ден) от симулациите с RegCM4.4.5-ERA-Interim, сравнени с данните от CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г.



**Фигура 4.1.** Средна годишна температура на въздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на 2m (в ляво) и годишна сума на валежа (мм/ден) (в дясно) от симулации с RegCM4.4.5-ERA-Interim, сравнение с данни от наблюдения CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г.

Средногодишните приземни температури от CRU и E-OBS са между  $2^{\circ}\text{C}$  и  $20^{\circ}\text{C}$  за целия район. За територията на България те са в интервала  $6^{\circ}\text{C}$ – $14^{\circ}\text{C}$ . И при трите пространствени карти RegCM4, CRU TS3.23 ( $0.5 \times 0.5$ ) и E-OBS V.15( $0.25 \times 0.25$ ) се наблюдава добро съвпадение на средните годишни температури (лява колона) - ясно се вижда максимума на температурата в крайбрежната зона на юг (Средиземно, Егейско, Адриатическо море) и минимума по високите планински части. Годишните суми на валежа от CRU и E-OBS за цели район са между 0.5 и 5 мм/ден (дясна колона). За територията на България те са в интервала 1-2 мм/ден, което съвпада с климатологията на България. И при трите пространствени карти на валежа (RegCM, CRU

и E-OBS) максимум на валежа има по източното крайбрежие на Адриатическо море и по високите планински части (Алпи и Карпати). Наблюдава се положително отклонение на модела в планинските и крайбрежни райони.



**Фигура 4.4.** Средно годишно отклонение (BIAS) при температурата ( $^{\circ}\text{C}$ ) и валежа (мм/ден) от симулации с RegCM4.4.5-ERA-Interim, сравнени с данни от наблюдение CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г.

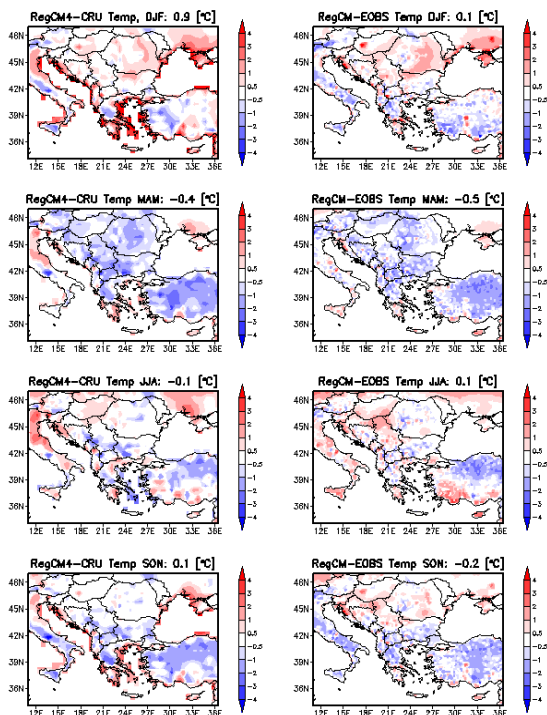
На Фигура 4.4 е представено средното годишно отклонение (BIAS) при температурата ( $^{\circ}\text{C}$ ) и валежа (мм/ден) от симулации с RegCM4.4.5-ERA-Interim, сравнени с данни от наблюдение CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г. В горния десен ъгъл е пресметнатото отклонението BIAS осреднено по площ за цялата територия на областта.

Годишните отклонения на модела са  $0.1^{\circ}\text{C}$  в сравнение с CRU данните и  $-0.1^{\circ}\text{C}$  в сравнение с E-OBS. При годишният валеж, отклоненията са 0.9 мм/ден (53%) и 1.3 мм/ден (81%) спрямо CRU и E-OBS, съответно.

На Фигура 4.5 е представено средното отклонение (BIAS) при температурата ( $^{\circ}\text{C}$ ) по сезони (от горе на долу: зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON), между симулации с RegCM4-ERA-Interim и данни от наблюдения CRUTS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г. В горния десен ъгъл е пресметнатото отклонението BIAS в градуси по Целзий осреднено по площ за цялата територия на областта.

Средното отклонението (BIAS) при температурата е  $<0.5^{\circ}\text{C}$  при всички сезони, с изключение на зимата. В сравнение с CRU данните,

отклоненията за цялата област са  $+0.9^{\circ}\text{C}$  през зимата,  $-0.4^{\circ}\text{C}$  през пролетта,  $-0.1^{\circ}\text{C}$  през лятото и  $+0.1^{\circ}\text{C}$  през есента. В сравнение с E-OBS данните температурните отклонения са  $+0.1^{\circ}\text{C}$  през зимата,  $-0.5^{\circ}\text{C}$  през пролетта,  $+0.1^{\circ}\text{C}$  през лятото и  $-0.2^{\circ}\text{C}$  за есента. Най-големи отрицателни отклонения са представени през пролетта. За територията на България отклонението на температурата е положително през зимата и отрицателно през другите сезони.

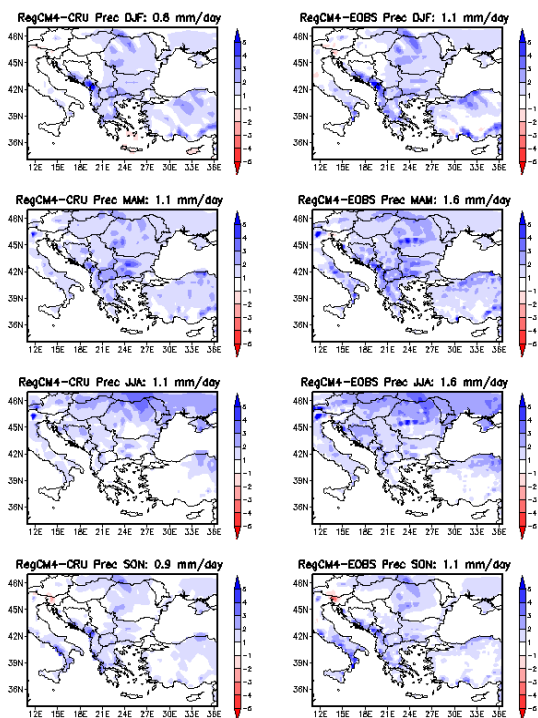


**Фигура 4.5.** Средно отклонение (BIAS) при температурата ( $^{\circ}\text{C}$ ) по сезони (от горе на долу: зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON), между симулации с RegCM4-ERA-Interim и данни от наблюдения CRUTS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г.

На Фигура 4.6 е представено средното отклонение (BIAS) при валежа (мм/ден) по сезони (от горе на долу: зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON), между симулации с RegCM4-ERA-Interim и данни от наблюдения CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г.

В горния десен ъгъл е пресметнато отклонението BIAS в мм/д осреднено по площ за цялата територия на областта.

Средното отклонението (BIAS) при валежа е положително през всички сезони. В сравнение с CRU данните, отклоненията за цялата област са: 0.6 мм/ден (38%) през зимата, 1.1 мм/ден (65%) през пролетта, 1.1 мм/ден (71%) през лятото и 0.9 мм/ден (53%) през есента. В сравнение с E-OBS данните отклоненията при валежа са 1.1 мм/ден (64%) през зимата, 1.6 мм/ден (96%) през пролетта, 1.6 мм/ден (108%) през лятото и 1.1 мм/ден (62%) за есента. Най-големи положителни отклонения са представени през лятото в северните части на областта. За територията на България отклоненията са най-съществени в Централна и Югозападна България.



**Фигура 4.6.** Средно отклонение (BIAS) при валежа (мм/ден) по сезони (от горе на долу: зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON), между симулации с RegCM4- ERA Interim и данни от наблюдения CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, за периода 1983-2012 г.

Резултатите от пространствените карти на отклонението BIAS и средноквадратичната грешката RMSE са обобщени за територията на България ( $41^{\circ}\text{N} - 44.5^{\circ}\text{N}$ ,  $22.5^{\circ}\text{E} - 28.5^{\circ}\text{E}$ ) в Таблицы 4.2 и 4.3.

**Таблица 4.2** Средно отклонение BIAS на годишните и сезонните температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) и валежи (мм/ден) от симулации с RegCM4- ERA-Interim сравнени с данни от наблюдения CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, осреднени за територията на България ( $41^{\circ}\text{N} - 44.5^{\circ}\text{N}$ ,  $22.5^{\circ}\text{E} - 28.5^{\circ}\text{E}$ ) за периода 1983-2012 г.

BIAS	CRU		E-OBS	
	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Precipitation (mm/day)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Precipitation (mm/day)
Winter (DJF)	+0.6	1.3	+0.1	1.6
Spring (MAM)	-0.7	1.5	-0.8	1.9
Summer (JJA)	-0.1	0.8	-0.1	1.2
Autumn (SON)	-0.2	0.9	-0.3	1.2
Year (1983-2012)	-0.1	1.1	-0.3	1.5

**Таблица 4.3** Средноквадратична грешка (RMSE) на годишните и сезонните температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) и валежи (мм/ден) от симулации с RegCM4- ERA-Interim сравнени с данни от наблюдения CRU TS3.23 и E-OBS V15.0, осреднени за територията на България ( $41^{\circ}\text{N} - 44.5^{\circ}\text{N}$ ,  $22.5^{\circ}\text{E} - 28.5^{\circ}\text{E}$ ) за периода 1983-2012г

RMSE	CRU		E-OBS	
	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Precipitation (mm/day)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Precipitation (mm/day)
Winter (DJF)	1.4	1.7	1.2	1.9
Spring (MAM)	1.2	1.9	1.2	2.1
Summer (JJA)	1.4	1.6	1.4	1.7
Autumn (SON)	1.3	1.5	1.2	1.6
Year (1983-2012)	1.4	1.7	1.3	1.9

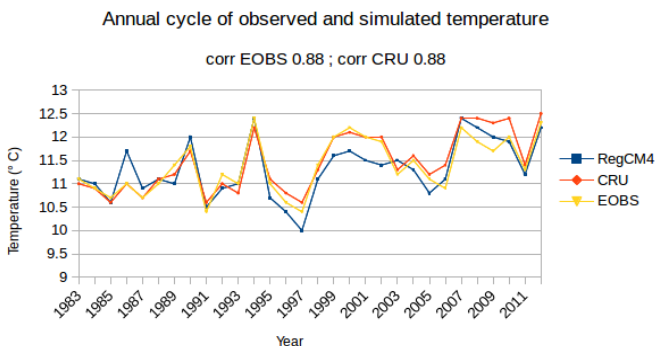
За територията на България, RegCM4 показва отрицателно отклонение при годишната температура в сравнение с данните CRU и E-OBS ( $-0.1^{\circ}\text{C}$  и  $-0.3^{\circ}\text{C}$ , съответно) и надценяване на годишните валежи ( $1.1\text{ мм/д}$  и  $1.5\text{ мм/д}$ , съответно) за целия 30-годишен период 1983-2012 г. т.е моделът е "по-влажнен" и "по-студен". Средните сезонни температурни отклонения са между  $-0.7^{\circ}$  и  $+0.6^{\circ}\text{C}$  при сравнение с CRU данните и между  $-0.8^{\circ}$  и  $+0.1^{\circ}\text{C}$  при сравнение с E-OBS данните. През всички сезони моделът показва отрицателно отклонение на температурата, с

изключение на зимния сезон, когато RegCM е по-топъл (+0.6°C в сравнение с CRU и +0.1 °C в сравнение с E-OBS данните). При валежа RegCM4 показва положително отклонение през всички сезони. Най-големи са отклоненията през пролетта (1.5 мм/ден в сравнение с CRU и 1.9 мм/ден в сравнение с E-OBS; Таблица 4.2), където са и най-големите грешки (Таблица 4.3). Отклоненията при валежа са най-малки през лятото (0.8 мм/д в сравнение с CRU и 1.2 мм/д в сравнение с E-OBS данните) (Таблица 4.2).

За целият периода на изследване (30 г.) за територията на България, моделът е по-студен и по-влажен. RegCM4 показва положително отклонение при температурата през зимата и отрицателно през другите сезони. Моделът симулира повече валеж през всички сезони, като най-големи са грешките през пролетта, а най-малки през есента.

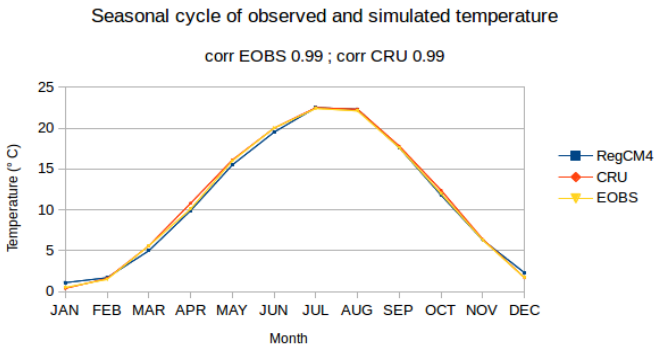
### Изследване на сезонен и междугодишен ход.

В този раздел, ще проверим възможността на модела да пресъздаде сезонните и междугодишните вариации на метеорологичните елементи. На Фигури 4.10 и 4.12 са представени междугодишния ход на температурата и валежа от симулации с RegCM4 сравнени с данните от наблюдения CRU и E-OBS за периода 1983-2012 г. На Фигури 4.11 и 4.13 са представени сезонния ход на температурата и валежа, съответно от симулации и наблюдения. Също така, са пресметнати и коефициентите на корелация (corr) между RegCM4.4.5 и данните от наблюдения (CRU TS3.23 и E-OBS) за периода 1983-2012 г. (горе на всяка графика).

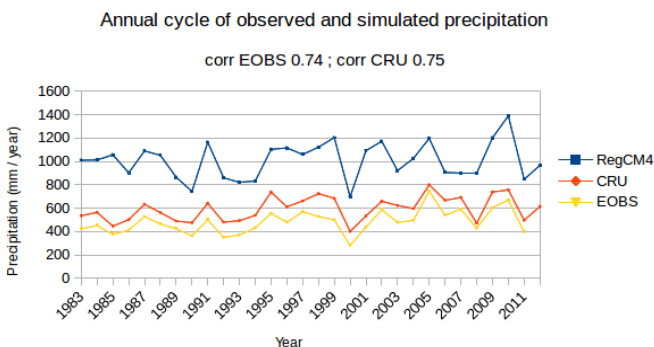


**Фигура 4.10.** Междугодишен ход на температурата (°C) от симулации (RegCM4.4.5) и наблюдения (CRU TS3.23 и E-OBS V15.0) за периода 1983-2012 г..



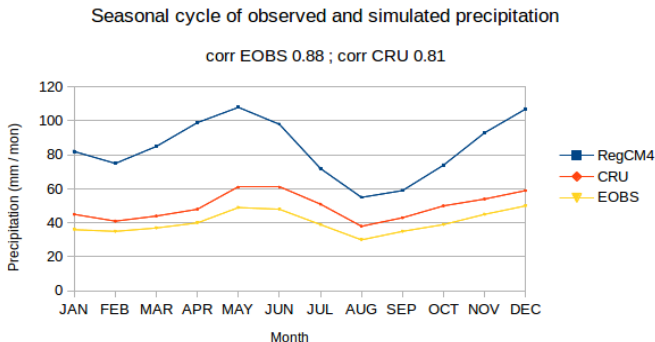


**Фигура 4.11.** Сезонен ход на температурата (°C) от симулации (RegCM4.4.5) и наблюдения (CRU TS3.23 и E-OBS V15.0) за периода 1983-2012 г.



**Фигура 4.12.** Междугодишен ход на валежа (мм/год) от симулации (RegCM4.4.5) и наблюдения (CRU TS3.23 и E-OBS V15.0) за периода 1983-2012 г.

RegCM4 показва много добро съвпадение (corr 0.99) при сезонния ход на температурите (Фигура 4.11), леко разминаване през пролетта и есента. При междугодишният ход на температурата (Фигура 4.10) най-големи различия се наблюдават през 1986, 1997, 2002, 2005, 2008 и 2009 година, но въпреки това коефициента на корелация е висок (corr 0.88). При валежа, корелацията при сезонния ход на модела с E-OBS и CRU данните (corr 0.88 и 0.81 съответно; Фигура 4.13) е по-висока от тази при междугодишния ход (corr 0.74 и 0.75 съответно; Фигура 4.14).



**Фигура 4.13.** Сезонен ход на валежа (мм/мес) от симулации (RegCM4.4.5) и наблюдения (CRU TS3.23 и E-OBS V15.0) за периода 1983-2012 г.

Това е първата мултидекадна симулация на модела RegCM версия 4.4 за територията на България. Моделът може да предостави полезна информация за метеорологичните величини, които са важни за оценката на въздействията от изменението на климата. Ето защо, в следващата глава се използва тази конфигурация на модела при симулации на бъдещи сценарии за климата при повишени концентрации на парниковите газове.

## Глава 5. Нов индекс за оценка на климатичните промени. Пример с регионалните модели ALADIN и RegCM за Балканите и Апенински полуостров.

В Глава 5 е предложен нов индекс за оценка на климатичните промени. Той представлява отношението между броя на случаите от бъдещия период и случаите от контролния експеримент (референтния период), попадащи в предварително определен интервал от референтния период. Под "случай" се има предвид стойността на даден метеорологичния елемент, която отговаря на определени условия. В допълнение, запазването на този индекс е необходимо условие за намаляване на риска от загуба на надежден сигнал при моделиране изменението на бъдещия климат при прилагане на методите за корекция на отклоненията (bias correction methods - BCM's). Пространственото разпределение на новия индекс е демонстрирано, чрез използването на два регионални климатични модела ALADIN и RegCM4 за район включващ Балканите и Апенински полуостров. Оценката е извършена за средните месечни температури и валежи. Основните резултати от тази глава са приети за печат в списание „Idojaras“ (Spiridonov and Valcheva,

2018).

### **Определение и свойства на предложения С - индекс за оценка на изменението на климата.**

Стойностите на всеки метеорологичен елемент, получен чрез референтната (30-годишна) симулация, имат различни статистически разпределения за всяка точка от мрежата на модела. Симулацията на бъдещия период (отново 30 години), води до ново разпределение за всяка точка от мрежата. Нека  $X_R$  е броят на случаите от референтния период, които принадлежат на интервал от зададени стойности ( $\delta_1, \delta_2$ ). Нека  $X_F$  е броят на случаите от бъдещия период, които попадат в същия интервал от референтния период. Съотношението (5.1)

$$(5.1) \quad C = X_F / X_R,$$

е друга възможна мярка за изменението на климата във всяка точка от мрежата. По-късно това съотношение, ще се нарича "С - индекс". Когато  $C < 1$  броят на случаите от бъдещия период са по - малко от тези от референтния период за определения интервал, а когато  $C \geq 1$  броят на случаите от бъдещия период се запазва или се увеличава по отношение на случаите на референтния период за същия интервал. Например, броят на случаите над определена стойност през референтния период в сравнение с случаите на бъдещия период. Тази мярка има "релятивистично" значение, т.е. как ще изглежда бъдещото време за наблюдателя от референтния (контролен) период.

От това определение следва, че необходимото условие за всеки метод за корекция на отклоненията (bias), който не трябва да причинява изкривяване на функцията за плътност на вероятностите (probability density function, pdf) или функцията за кумулативна плътност (cumulative density function, cdf), е стойността С (каквото и да е тя), да не се променя. С други думи, ако В е "трансформиращата функция" посочена по-горе, тогава уравнение (5.2)

$$(5.2) \quad B(X_F) / B(X_R) = X_F / X_R = C$$

е необходимото условие, което е валидно само за определения интервал на С - индекса. Това е частичен отговор на въпроса, повдигнат по-горе.

Запазването на С-индекса зависи от метода на корекция (BSM). Ще покажем, че линейната трансформация ("линейната трансформираща функция") не променя това съотношение. Ако функцията за трансформация е нелинейна, тази характеристика не е гарантирана, но

може да има интервал, през който индексът  $C$  остава непроменен. Друга възможност е да се апроксимира нелинейната функция с частично линейна функция.

Нека стойностите на даден елемент (температура, валеж и т.н.) от бъдещия период попадат в определен интервал преди трансформацията:

$$(5.3) \quad X_{1R} < X_F < X_{2R},$$

където  $X_{1R}$  и  $X_{2R}$  определят интервала на интерес от референтния период, през който падат случаите  $X_F$  от бъдещия период. Ще докажем, че за всяка линейна трансформация:

$$(5.4) \quad Y = AX + B,$$

за която  $A \geq 0$ , се запазват бъдещите случаи, които попадат в този интервал, т.е. .:

$$(5.5) \quad AX_{1R} + B < AX_F + B < AX_{2R} + B$$

Да разгледаме лявото неравенство и да приемем обратното,

$$(5.6) \quad AX_{1R} + B \geq AX_F + B$$

или

$$(5.7) \quad A(X_{1R} - X_F) \geq 0$$

Когато  $A > 0$ , получаваме  $X_{1R} \geq X_F$ , което противоречи на (5.3). По същият начин се доказва правилността на дясната част на (5.5). След като това е вярно за всички случаи, това е вярно и за съотношението на тяхната сума  $C$ . Особеният случай  $A = 0$ , е когато функцията за плътност на вероятностите (pdf) се "мести" само по оста  $X$ .

Предложеният индекс е индикатор, дали сигналът от референтната към бъдещата симулация се променя при прилагания метод за "корекция на отклоненията".

Един важен въпрос е, колко стабилен е  $C$ -индексът, т.е. съотношението  $X_F / X_R$ . Това зависи от присъщите грешки на модела (например в резултат на приетите параметризации, апроксимация на уравненията и т.н.). Долното уравнение показва, че ако грешката е пропорционална на стойността на  $X$ , съотношението между референтния и бъдещите симулации не се променя. "Drizzle" ефектът, всъщност е

грешка на размера на валежните норми, симулирани от модела (Dai, 2006; Sun et al., 2006). Грешката, пропорционална на големината на валежа, не влияе върху C-индекса.

Нека  $k$  е коефициентът на грешка, следователно:

$$(5.8) \quad (X_F + k X_F) / (X_R + k X_R) = X_F(1 + k) / X_R(1 + k) = X_F / X_R$$

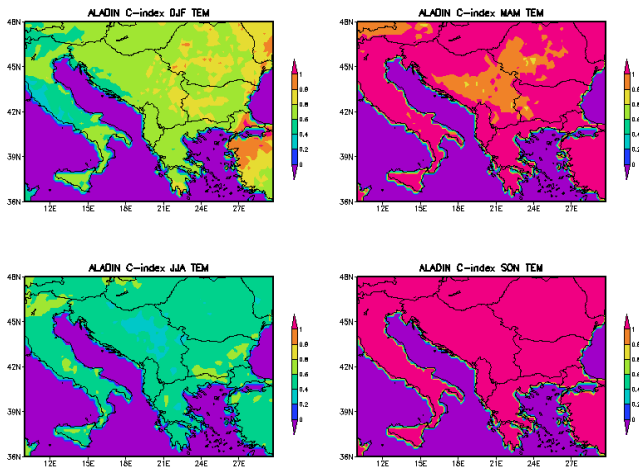
Ще отбележим, че този индекс се определя отделно за всяка точка от мрежата на модела. Така че, вместо фиксирани прагове, е възможно да има различни интервали във всяка точка на мрежата. Това ще бъде илюстрирано в следващия параграф.

### **Пример с интервал дефиниран от стандартно отклонение $\sigma$ и средното $\mu$ .**

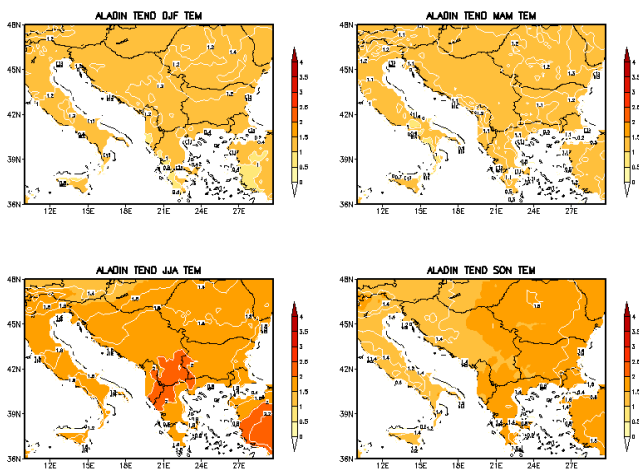
Ще илюстрираме C-индекса, като разгледаме промяната на броя на случаите, попадащи в точно определен интервал ( $\delta_1 = \mu - \sigma$ ;  $\delta_2 = \mu + \sigma$ ). C-индексът е определен от съотношението на броя на случаите на бъдещия период към броя случай от референтния период, попадащи в интервал, определен от средната стойност  $\mu$  и от стандартното отклонение  $\sigma$  на референтния период.

Около 68% от стойностите взети от Гаусово разпределение, са в рамките на едно стандартно отклонение  $\sigma$  от средното  $\mu$ . Нека случаите, попадащи в този интервал, се считат за "нормални", а случаите извън него за "екстремни". Когато  $C \geq 1$ , повече случаи от бъдещия период попадат в този интервал, т.е. в това определение бъдещият период става "по-нормален" от гледна точка на "наблюдателя на симулацията на референтния период" и тази промяна няма да окаже сериозно влияние върху околната среда, но е възможно да има повече случаи на "екстремни" метеорологични условия извън този интервал. Когато  $C < 1$  това означава, че по-малко случаи от бъдещия период попадат в интервала, определен от референтния период, т.е. това може да се счита за чувствителна промяна на климата. Колкото по-малък е  $C$ , толкова по-голяма е промяната.

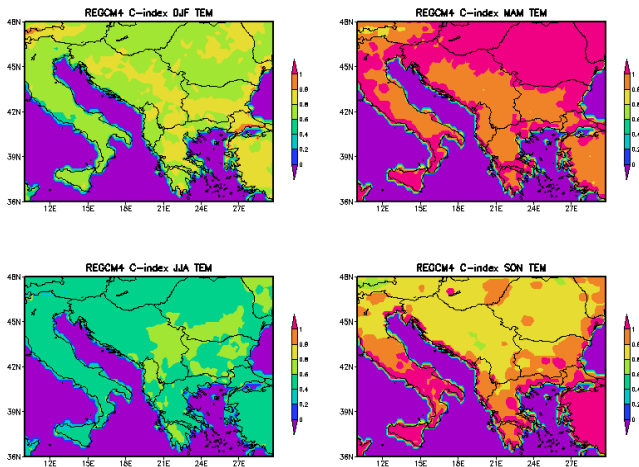
Използвани са резултати от симулации с регионалния модел ALADIN, форсиран с гранични условия от глобалния модел ARPEGE съгласно сценария A1B и регионалния климатичен модел RegCM4.4.5 (Giorgi et al., 2012), форсиран с гранични условия от глобалния климатичен модел HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environment Model - Earth-System version 2, Collins et al., 2011), съгласно сценария RCP 4.5 (Thomson et al., 2011). И двата модела имат разделителна способност от 20 км.



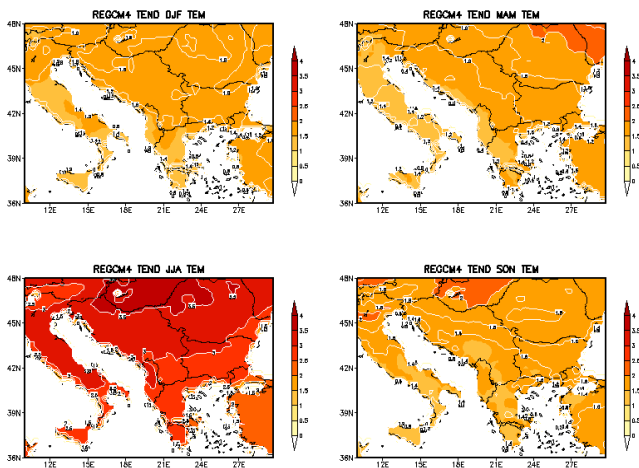
**Фигура 5.1.** Пространствено разпределение на C – индекса за температурата от симулации с модела ALADIN за референтния (1975-2004) и бъдещия (2021-2050) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON).



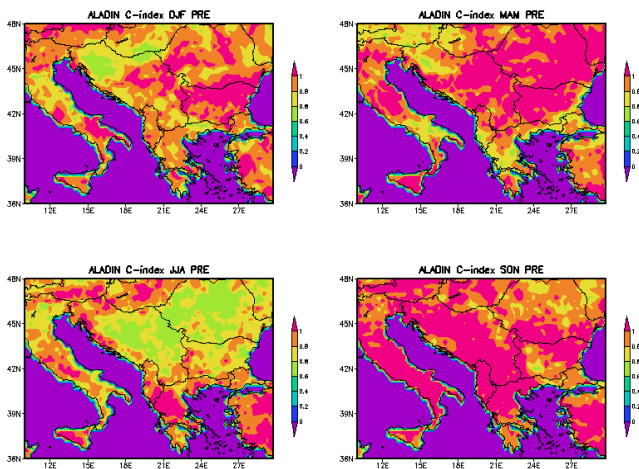
**Фигура 5.1а.** Температурни тенденции ( $^{\circ}\text{C}$ ) от симулации с модела ALADIN - разлика между бъдещия (2021-2050) и референтния (1975-2004) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON).



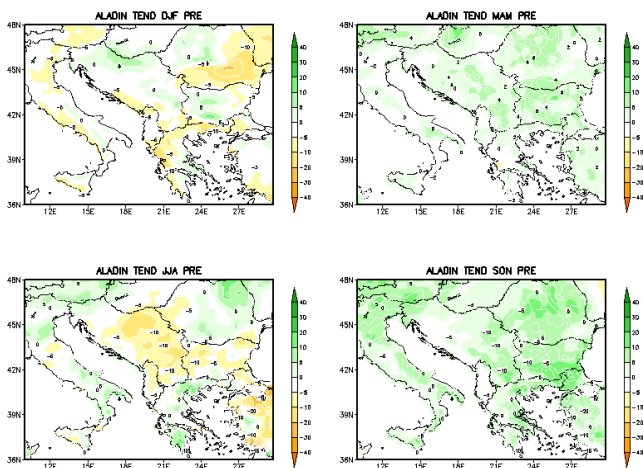
**Фигура 5.2.** Пространствено разпределение на *C* – индекса за температурата от симулации с модела RegCM4 за референтния (1975-2004) и бъдещия (2021-2050) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON).



**Фигура 5.2а.** Температурни тенденции ( $^{\circ}C$ ) от симулации с модела RegCM4 - разлика между бъдещия (2021-2050) и референтния (1975-2004) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен - SON) в  $^{\circ}C$ .

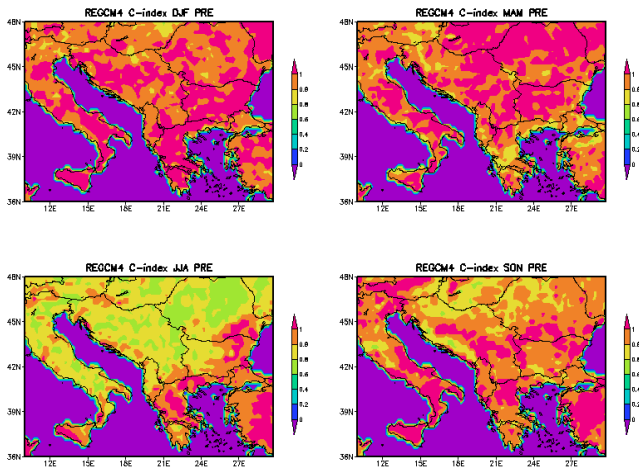


**Фигура 5.3.** Пространствено разпределение на  $C$  – индекса за валежа от симулации с модела ALADIN за референтния (1975-2004) и бъдещия (2021-2050) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен - SON).

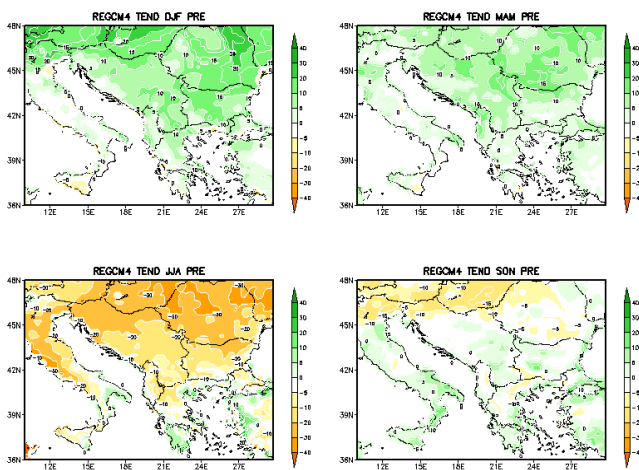


**Фигура 5.3а.** Тенденции при валежите в % от симулации с модела ALADIN - разлика между бъдещия (2021-2050) и референтния (1975-2004) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято JJA и есен SON)





**Фигура 5.4.** Пространствено разпределение на  $C$  – индекса за валежа от симулации с модела RegCM4 за референтния (1975-2004) и бъдещия (2021-2050) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен – SON).



**Фигура 5.4a.** Тенденции при валежите в % от симулации с модела RegCM4 - разлика между бъдещия (2021-2050) и референтния (1975-2004) период по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято JJA и есен SON).

На Фигура 5.1 и Фигура 5.2 е показан С-индексът при температурата от моделите ALADIN и RegCM4, съответно по сезони (зима - DJF, пролет - MAM, лято - JJA и есен - SON). Областите с  $C \geq 1$  са маркирани в червено ( $C > 1$ ) и оранжево ( $C = 1$ ) (всъщност там времето е "нормално"). За  $C < 1$  скалата на цветовете е с интервали през 0.2. На Фигури 5.1a и 5.2a са показани температурните тенденции с моделите ALADIN и RegCM4, т.е. разликата между бъдещия и референтния период по сезони в градуси ( $^{\circ}\text{C}$ ). За периода 2021-2050 г. тенденцията за повишение на температурата е забележима през цялата година и при двата модела, особено по време на летния сезона (JJA). Аналогично на Фигура 5.3 и Фигура. 5.4 е представен С-индексът при валежите и за двата модела, а на Фигури 5.3a и 5.4a тенденциите при валежа в проценти (%). И двата модела показват по-малко валежи през лятото (JJA) и повече валеж през пролетта (MAM).

Най-големите промени и за двата модела, т.е. големи площи с малък С-индекс, се наблюдават през летния (JJA) сезон. На картите за пространственото разпределение на С-индекса при температурата с RegCM4 (Фигура 5.2) е показан малък индекс ( $C < 1$ ) през зимата (DJF) и лятото (JJA) над цялата територията, както и малък индекс през есента (SON) над значителна територия в северните части на областта. Там моделът показва повишение на температурите (от  $2^{\circ}$  до  $3.5^{\circ}$  C през лятото и от  $1.5^{\circ}$  до  $2^{\circ}$  C през другите сезони, Фигура 5.2a). През пролетта (MAM),  $C \geq 1$  над цялата територия на домейна. На пространствените карти за разпределението на С-индекса при валежа, от симулации с RegCM (Фигура 5.4), се вижда малък индекс ( $C < 1$ ) през летния (JJA) сезон (особено в северната част на домейна). При RegCM4 намалението на валежа през лятото (JJA) е в интервала 20-40%, а увеличението на валежа през пролетта (MAM) е с 10%. (Фигура 5.4a). През зимата (DJF) и пролетта (MAM) С-индекса при валежа с RegCM (Фигура 5.4) е равен или по-голям от 1 над значителна част от домейна. При ALADIN, картите със С-индекса за валежа (Фигура 5.3) показват малък индекс през лятото (JJA) над централната и североизточната част на областта, където моделът показва най-големите промени при валежите. При ALADIN намалението на валежа през лятото (JJA) е в интервала 5-15%, а увеличението на валежа през пролетта (MAM) е с 5% (Фигура 5.3a). При температурата увеличението е от  $1.5^{\circ}$  до  $2^{\circ}$  C през лятото (JJA) и от  $1^{\circ}$  до  $1.5^{\circ}$  C през другите сезони (Фигура 5.1a).

Тези примери, илюстрират добавената стойност на прилагането на С-индекса, като мярка за изменението на климата. Ако тенденциите са малки (напр. нула) и  $\sigma$  на бъдещата симулация на климата е по-голяма от  $\sigma$  на референтния период, тогава индексът С, може да бъде много по-

малък от 1 (значителна промяна). Обратната ситуация е, когато стойността на индекса е около 1 (сравнително малка промяна в климата) и има значими тенденции. Във връзка с това, бихме искали да обърнем внимание на два конкретни случая. Първият е през пролетния сезон на картите за температурата с RegCM4 (Фигура 5.2a) и картите за разпределението на С-индекса при температурата (Фигура 5.2). Показано е, че в североизточната част на областта, където температурното затопляне е над 2 градуса по Целзий, стойността на С-индекса е повече от 1. Другият случай е през есенния сезон на температурните карти с ALADIN (Фигура 5.1a) и разпределението на С-индекса (Фигура 5.1), където също в североизточните части на областта, на повишението на температурата с около 2 градуса, съответства С-индекс над 1. Ако интервалът ( $\mu - \sigma$ ;  $\mu + \sigma$ ), ще се счита за интервал от случаи с "нормална" температура или валежи, увеличаването на броя им в бъдеще, не е опасно изменение на климата. Това означава, че в тези случаи ( $C \geq 1$ ), бъдещите температурни промени, няма да повлияят на потенциалното въздействие върху околната среда, независимо от температурата на затопляне, но е възможно да има повече случаи на екстремни климатични условия. Всъщност pdf се деформира до по-високи или по-малки стойности, оставащи в същия интервал. Избирането на друг интервал, може да доведе до други стойности на С-индекса и дори до промяна в посоката на неравенството.

В някои области, разликите между тенденциите на двата модела могат да изглеждат повече или по-малко значими, отколкото разликите между С-индексите, например температурата през летния период и в двата модела. Причината е в ефекта на комбинацията между  $\sigma$  и  $\mu$ . Въпреки тенденциите, поради преразпределение, по-голям или по-малък брой случаи спада в интервала, определен от средната стойност и сигмата на референтния период. Разликите между  $\mu$  на бъдещия период и  $\mu$  на контролния (референтен) период, могат да бъдат компенсирани от по-малките  $\sigma$  от бъдещия период и обратно. Причината за това е, че индексът С е чувствителен към промяна на разпределението на случаите от бъдещия период и референтния. Когато тази промяна е една и съща и за двата модела, тогава техните С-индекси съвпадат. Ако очакваните тенденции за двата модела са еднакви, но промените в разпределенията са значителни, тогава С-индексите се различават значително.

**Глава 6. Симулации за температурата и валежите. Устойчивост на климатичните промени в зададен интервал от 30 годишен бъдещ период. Пример за територията на България (2021-2050 г.)**

В Глава 6 се предлага метод, с идеологията на метода „Монте-Карло“, за оценка на най-вероятните климатични промени (в зададен интервал, за конкретен метеорологичен елемент) за първите 10 години от симулацията. Изводите са направени за територията на България и са основани на симулации за периода 2021-2050 г., проведени с модела ALADIN-Climate по проекта CECILIA от 6-та рамкова програма. Използваният референтен период е 1961-1990 г. Хоризонталната резолюция на модела е 10 км. Граничните условия са от глобалния модел ARPEGE-Climate (Déqué, 2007; Déqué et al., 1994). Областта на интегриране покрива значителна част от Балканския полуостров, но представените резултати са само за територията на България. Основните резултати от тази глава са публикувани в списание „Доклади на БАН“ (Spiridonov and Valcheva, 2017).

### **Устойчивост на тенденциите в зададен под-период.**

Както бе отбелязано в Глава 1, чрез климатичната симулация се получават нормите за целия климатичен период (30 години). Симулацията за референтния период, дори и да даде точно нормите за него, развитието на времето в този период не съвпада с действителното. Това важи с пълна сила и за симулациите на бъдещи периоди, които не могат да се разглеждат като „прогноза“ на времето. Затова, не може да се получи директен отговор на въпроса какво ще се случи например, през първите 10 години за даден бъдещ период, при всяка симулация. Този въпрос има практическо значение и тук ще предложим метод за анализ на вътрешната структура на симулациите. В известен смисъл, ще направим анализ доколко измененията в бъдещия период са устойчиви за конкретно използвания климатичен модел. Приложеният анализ е с идеологията на метода „Монте-Карло“.

Една климатична симулация на 30 годишен климатичен период позволява от всички 30 години да формираме различни 10 годишни комбинации, които ще считаме за равно вероятни. Броят на комбинациите от  $n$ -елемента от  $k$ -ти клас е:

$$(6.1) \quad C(n,k) = n!/(k!(n-k)!)$$

В случая  $n = 30$  години, от които избираме случайно  $k = 10$  години. Броят на възможните комбинации от 10 годишни периоди е:

$$(6.2) \quad C(30,10) = 30!/(10!20!) = 30045015$$

Методът „Монте Карло“ позволява да се определи достатъчно

точно вероятността за сбъждане на дадено събитие, без да се разгледат всички възможни случаи. За целта се правят серия случайни извадки  $M$ , които са много по-малко от всичките комбинации:

$$(6.3) \quad M \ll C(30,10)$$

Ако за тези  $M$  случайни извадки, направеното предположение се е сбъднало в  $X$  от тях, то вероятността въпросното предположение да се сбъдне определяме от съотношението  $X/M$ . Тази вероятност се изчислява поотделно за всяка точка от мрежата на модела. Така се получава разпределението и в областта на интерес.

Когато проверяваме предположение за някакво изменение спрямо референтния период, тогава множеството от 10 годишни норми получени от случайните извадки от бъдещия период се сравняват с нормата определена от целия 30 годишен референтен период.

По подобен начин е възможно дадено предположение да се проверява за конкретен сезон или месец. Възможно е да се формират „виртуални години”, чрез случаен подбор за всеки от дванадесетте месеца. Тук са използвани средните стойности от годините, както са получени от симулациите за референтния и бъдещ период. При направените експерименти се оказа, че серия от  $M = 100$  случайни извадки на 10 годишни периоди дава устойчива стойност на вероятността за сбъждане на направените предположения. Те са за годишните норми на температурата и валежите, но както бе отбелязано, този метод може да се приложи и за месечни или сезонни норми на тези и за други метеорологични елементи.

За температурата ще разгледаме две възможности: за увеличение на температурата до  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  и за увеличение над  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . За валежите ще разгледаме три възможности: запазване или увеличаване на количеството валеж, намаляване до 10% и намаляване над 10%. Определят се като „устойчиви“ измененията в тези възли, за които има над 95% попадения в определените интервали. По такъв начин, за произволен набор от 10 години, включително за първите 10 се намират възлите, в които съответното увеличение или намаление е с вероятност над 95%.

Следвайки този пример, могат да се проверяват различни хипотези за устойчиво изменение на различни елементи от изхода на модела. Например, с колко може да се увеличи или намали процентът на дните с температури над или под зададен праг за бъдещия период спрямо референтния. С колко се увеличават или намаляват случаите с интензивни валежи, след като определим праг за „интензивен валеж“. Възможни са оценки за промяна на енергийния потенциал на вятъра, спрямо зададен

праг и т.н. Съществено е определянето на съответния праг. Това зависи от конкретното разпределение при реално наблюдаваните стойности и разпределения сравнени с тези от референтния период. Например, ако през референтния период реално случилите с дни със максимална температура над 35 °C са 3% от всички дни на 30-годишния период, прагът се определя от климатичната симулацията за този период. Той се определя, като тази температура над която се случват точно 3% от всички дни през 30-те години на симулацията.

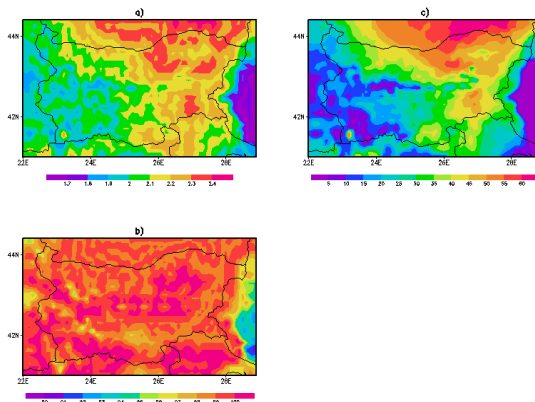
### **Резултати.**

Оказва се, че при брой на извадките  $M > 70$  няма съществена разлика в резултатите. Този брой може да зависи от модела и областта на интегриране и се определя експериментално. В конкретния случай  $M=100$ .

На Фигура 6.1 са показани измененията в градуси на температурата за периода 2021-2050 г., спрямо референтния период и на устойчивите повишения за интервалите до 1.5° и над 2°С .

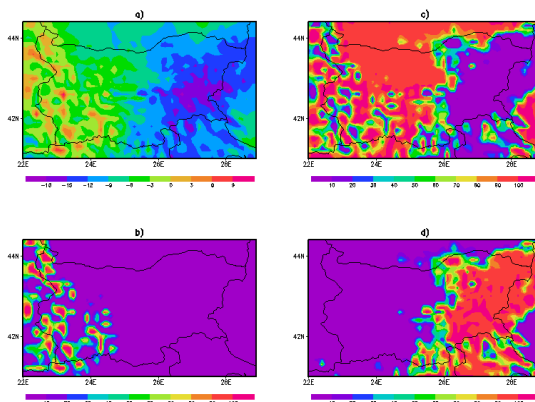
На Фигура 6.1 а) е показано увеличението на температурната норма с над 1.5°С за цялата територия на България за периода 2021 – 2050 г. Фигура 6.1 б) показва, че увеличение до 1.5°С може да се очаква с над 95% навсякъде за всеки 10 годишен период. На Фигура 6.1 с) са представени очакванията за увеличение на температурите с над 2°С. Те не надхвърлят 70% , като това най-напред ще се случи в северната част на страната.

На долната фигура (Фигура 6.2) са показани измененията в проценти на общото годишно количество на валежите за периода 2021-2050 г. спрямо референтния период и на устойчивите изменения за интервалите: положителен (запазване или увеличаване на количеството валеж); отрицателен (намаляване на валежа до 10 %); отрицателен (намаляване на валежа над 10 %).



**Фигура 6.1.**

- a) Изменение в градуси (°C) за периода 2021-2050 г. спрямо референтния период за средногодишната температура;
- b) Вероятност за изменение в градуси за всеки 10 - годишен период в 2021-2050 г. спрямо нормата на референтния период за средногодишната температура. Случаи на увеличение до 1.5 °C;
- c) Вероятност за изменение в градуси за всеки 10-годишен период в 2021-2050 г. спрямо нормата на референтния период за средногодишната температура. Случаи на увеличение над 2° C.



**Фигура 6.2.**

- a) Изменение в проценти (%) за периода 2021-2050 спрямо референтния период за средногодишното количество валеж (дъжд и сняг);
- b) Вероятност за изменение в проценти за всеки 10-годишен период от 2021-

2050 г. спрямо нормата на референтния период за средногодишното количество валеж. Случаи на запазване и/или нарастване на нормите на валежа в проценти;

c) Вероятност за изменение в проценти за всеки 10-годишен период от 2021-2050 г. спрямо нормата на референтния период за средногодишното количество валеж. Случаи на намаление на нормите на валежа до 10 %;

d) Вероятност за изменение в проценти за всеки 10-годишен период от 2021-2050 г. спрямо нормата на референтния период за средногодишното количество валеж. Случаи на намаление на нормите на валежа с над 10 %.

Изменението на нормите на валежа за периода 2021-2050 г. варира от увеличение и запазване (на запад) до намаляване на нормата с над 15 % (на изток), което е показано на Фигура 6.2 а). Фигура 6.2 б) представя средногодишната вероятност за промяната на валежите в % за всеки 10-годишен период през 2021-2050 г. сравнен с нормата на референтния период за случаите, в които валежите няма да се променят или ще се увеличат (планинските части на Западна България). Фигура 6.2 с) показва областите с намаление на валежите до 10 % (по-ниските части на Северозападна България с над 95% вероятност за намаление). Фигура 6.2 d) показва, къде ще е най-вероятното намаление на валежа с над 10 % и това ще се случи в източната и югоизточната част на страната.

### **Глава 7. Влияние на климатичните промени (до 2050 г.) върху потенциала на възобновяемите енергийни източници (вятър и слънчева радиация) за територията на България.**

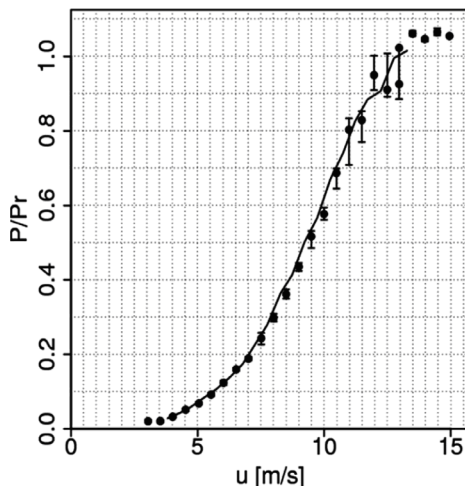
В Глава 7 са използвани числени симулации от регионален климатичен модел ALADIN-Climate с резолюция 10 км за оценка на изменението на енергийния потенциал на вятъра и слънчевата радиация за територията на България за периода 2021-2050 г. Основните резултати от тази глава са публикувани в списание „Енергетика“ (Spiridonov and Valcheva, 2016).

#### **Оценка за влиянието на климатичните промени за периода 2021-2050 г. върху ветровата енергия.**

Може да има различни подходи за оценка на промяната на ветровия енергиен потенциал. В Yao et al., (2012) се използва директно плътността на енергията. Тук ще приложим друг подход. За да има по-голямо практическо значение оценката за промяна на ветровия енергиен потенциал е необходимо да се съобразим с техническите и теоретични ограничения за добиване на електроенергия от енергията на вятъра. Такова ограничение е уравнението на Бец (Betz) в Ragheb M. and Ragheb A., (2011). То изразява теоретичната невъзможност да се извлече цялата енергия на вятъра, аналогично на това, че не може да се извлече напълно

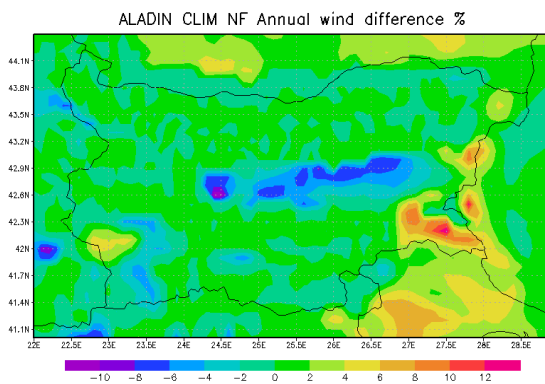


топлинната енергия от даден топлинен резервоар. Иначе казано това е аналог на цикъла на Карно. По такъв начин всяка турбина има някакъв коефициент на полезно действие (к.п.д.), което не позволява да се извлича енергия пропорционална на скоростта на вятъра в някакъв широк диапазон. Това се конкретизира с така наречената крива на мощността (power curve). Тя е въведена от Интернационалната електротехническа комисия (IEC), като международен стандарт IEC. Друга оценка е т.нар. уравнение на Ланжевин (Langevin) (Milan et al., 2010). На долната фигура (Фигура 7.1) са представени нормализираните криви по IEC и Langevin.

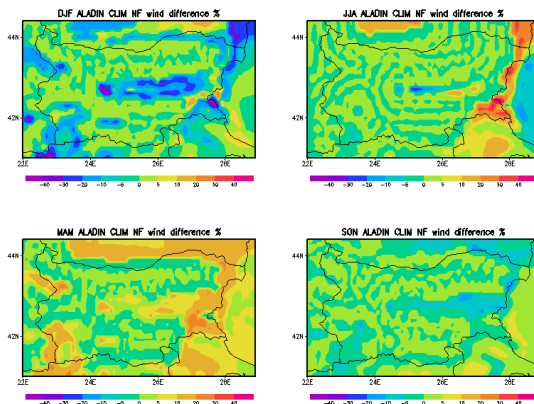


**Фигура 7.1.** Нормализирана крива на мощността съгласно Milan et al., (2010). Непрекъснатата линия представя кривата на мощността по IEC, а точките и интервалите представят областта на ефективност по Ланжевин.

Вижда се, че ефективните стойности за не турбулентизиран (без силни пориви) вятър са до 15 м/сек. и започват при скорости около 3-5 м/сек. В нашите условия при по-големи от 15 м/сек скорости обикновено се наблюдават силни пориви и от съображения за сигурност турбините би трябвало да се изключват. За оценка за промяната на ветровия енергиен потенциал, по тази крива се пресмята номиналната (rated) мощност  $P/P_r$  от натрупаните номинални мощности през референтния и през бъдещия (2021 - 2050 г.) периоди. След това се пресмята промяната в проценти по сезони и годишно. Оценката е направена за височина на мачтата 100 м.



**Фигура 7.2.** Изменение в проценти за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период в годишния енергиен потенциал на вятъра за територията на България.



**Фигура 7.3.** Изменение в проценти за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период в енергияния потенциал на вятъра по сезони: DJF - зима (горе в ляво), MAM – пролет (долу в ляво), JJA – лято (горе в дясно), SON – есен (долу в дясно) за територията на България.

На Фигура 7.2 е представена пространствена карта на очакваните промени (в проценти, %) в годишния енергиен потенциал на вятъра за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период за територията на България. Изменението варира в границите от -12 (намаление с 12 %) до

+14 (увеличение с 14 %) процента, като най - значимо е повишението в Югоизточна България с около 8 – 14%. Най - голямо понижение може да се очаква в Централна (8 - 12 %) и Югозападна България (4 - 6 %). В останалите части на страната изменението на годишния енергиен потенциал на вятъра варира в границите от – 2 до + 2 %.

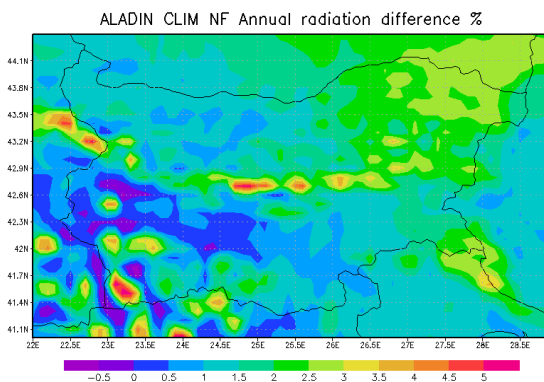
На Фигура 7.3 са представени пространствени карти на очакваните промени (в проценти, %) в енергийния потенциал на вятъра до 2050 г. по сезони: DJF - зима (горе в ляво), МАМ – пролет (долу в ляво), ЈЈА – лято (горе в дясно), SON – есен (долу в дясно) за територията на България. Изменението е в границите от -50 до + 50 %.

През зимата (горе в ляво) промяната на ветровата енергия е от -50 до +20 %. Тук се очаква и най - голямото намаление на ветровия потенциал в сравнение с другите сезони. Това е изразено най – добре в Централна и Югозападна България, както и в крайбрежната зона със стойности между 10 и 50 %. В останалите части на страната може да се очаква изменение в границите от – 5 до + 5 %. Подобни тенденции се очакват и през есента (долу в дясно), но стойностите тук са по - малки от -16 до +8 %. През лятото (горе в дясно) очакваното изменение на ветровата енергия е от -20 до +50 %. Най - голямо е повишението в Югоизточна България и крайбрежната зона с около 30 до 50 %. През пролетта (долу в ляво) очакваните промени са в границите от -5 до +30 %, като най – голямо е повишението на ветровия потенциал в Югоизточна и Югозападна България с около 10 до 30 %.

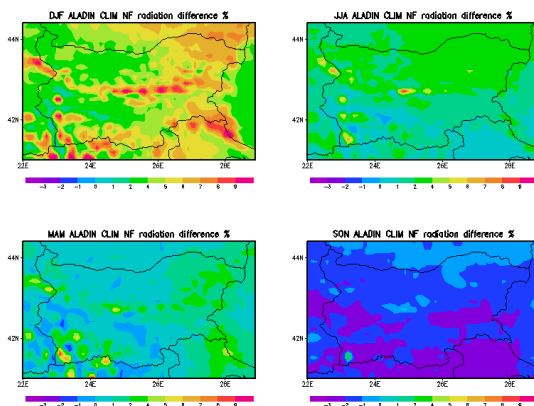
### **Оценка за влиянието на климатичните промени за периода 2021-2050 г. върху слънчевата енергия.**

От целият спектър на лъчението от Слънцето, от значение е за производство на електроенергия е само късовълновата радиация. Тя се пресмята в модела и аналогично на ветровата енергия може да се пресметне промяната в бъдещия спрямо референтния период.

На Фигура 7.4 е представена пространствена карта на годишното изменение (в проценти, %) на енергийния потенциал на радиацията за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период за територията на България. Промяната на слънчевата енергия варира от -1 до +6 %. Повишение на слънчевата енергия се очаква в Североизточна България (2 – 3.5 %), както и по билото на Стара планина и Пирин (2 - 6 %). В останалите части на страната изменението е между 0 и 2 %. Леко понижение на слънчевата енергия се очаква на места в Югозападна България (- 0.5 %), но там е и максимума на повишение на енергийния потенциал на радиацията (4 – 6 %).



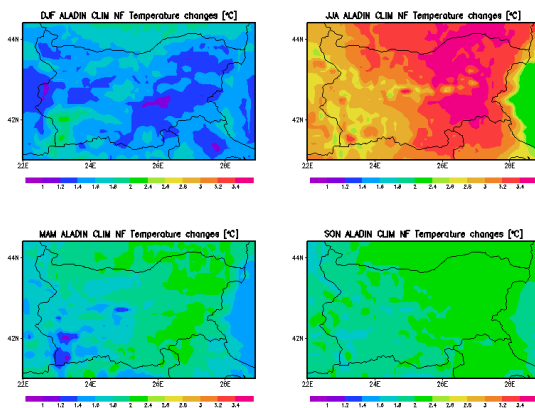
**Фигура 7.4.** Изменение в проценти за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период в годишния енергиен потенциал на слънчевата радиация за територията на България.



**Фигура 7.5.** Изменение в проценти за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период в енергийния потенциал на слънчевата радиация по сезони: DJF - зима (горе в ляво), MAM – пролет (долу в ляво), JJA – лято (горе в дясно), SON – есен (долу в дясно) за територията на България.

На Фигура 7.5 са представени пространствени карти на изменението (в проценти %) на енергийния потенциал на слънчевата енергия за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период по сезони: зима (DJF) – декември, януари, февруари; пролет (МAM) - март, април, май; лято (JJA) - юни, юли, август; есен (SON) – септември, октомври, ноември. Изменението варира в границите от -4 до +10 %.

През зимата (горе в ляво) промяната в потенциала на слънчевата енергия е положителна в цялата страна, като най – голямо увеличение на радиацията се наблюдава в Централна и Североизточна България (8 - 10 %), както и в планинските райони (Рила, Пирин и Стара планина). През лятото (горе в дясно) се очаква увеличение на радиацията както в Северна (от 2 до 4 %), така и в Южна България (0 - 2 %). През пролетта (долу в ляво) увеличението е най – голяма в Североизточна България и високите планини е с около 2 до 4 %. През есента (долу в дясно) слънчевата енергия намалява в цялата страна, като най – съществено е намалението в южните части на страната (от -2 до -4%).



**Фигура 7.6.** Изменение в градуси за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период в температурата по сезони: DJF - зима (горе в ляво), MAM – пролет (долу в ляво), JJA – лято (горе в дясно), SON – есен (долу в дясно) за територията на България.

На Фигура 7.6 е представена пространствена карта на изменението на температурата в градуси за периода 2021 – 2050 г. спрямо референтния период за четирите сезона по отделно: DJF - зима (горе в ляво), MAM – пролет (долу в ляво), JJA – лято (горе в дясно), SON – есен

(долу в дясно) за територията на България. Изменението на температурата е в границите 1 – 3.5°C.

През зимата (горе в ляво) повишението на температурата е най – малко в сравнение с останалите сезони (1 - 2 °C). През пролетта (долу в ляво) и есента (долу в дясно) увеличението на температурата е по – голямо в Източна България (2 -2.5 °C) и по – малко в Западна България (1.5 – 2 °C). Най – голямо повишение се очаква в Източна България през летния сезон (горе в дясно) с около 3 – 3.5 °C.

Известно е, че температурата на околната среда влияе на производителността на фотоволтаиците (<http://www.solar-facts-and-advice.com/solar-panel-temperature.html>). Намалението ѝ при температура на околната среда над 25 градуса по Целзий, се оценява на около 1% на всеки 2 градуса. Оценката зависи от типа на фотоволтаиците. В разглеждания бъдещ период се очаква повишения над 2 градуса. От Фигура 7.6 се вижда, че увеличението на температурата може да е от значение за лятото, когато увеличението на слънчевата радиация се балансира от увеличението на температурата на околната среда.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целта на настоящата работа е да се използват два различни по идеология регионални числени модела с висока разделителна способност ALADIN и RegCM4 за анализ на климатичните промени до 2050 година за различни метеорологични елементи, както и да се сравнят симулациите от моделите. Задачите, които са изпълнени: 1) изследвани са различни параметризационни схеми за конвективния валеж на регионален климатичен модел RegCM4, избрана е най - подходящата от тях - схемата на Grell със „затваряне“ на Arakawa and Schubert, за по-нататъшните изследвания с модела; 2) изследвана е чувствителността на модела RegCM4 към размера на областта и регионалното влияние на парниковите газове; 3) представени са резултати от валидиране на модела RegCM4 с хоризонтална резолюция 20 км за територията на България и Балкански полуостров за 30 годишния период от 1983 г. до 2012 г. включително; 4) представени са резултати от двата модела (ALADIN и RegCM4) за оценката на климатичните промени до 2050 г. за територията на България и Балкански полуостров; 5) въведен е нов индекс (С-индекс) за оценка на климатичните промени при различни по идеология регионални числени модели; 6) представен е метод с идеологията на метода „Монте Карло“ за оценка на най-вероятните климатични промени (в зададен интервал, за конкретен метеорологичен елемент) за първите 10 години от симулацията; 7) представена е оценка на промяната в

енергийния потенциал на вятъра и на слънчевата радиация за периода 2021-2050 г. за територията на България.

- **В Глава 1** са представени общата идеология на моделирането на климата, кратки сведения за глобални и регионални числени модели, какво представляват климатичните симулации и описание на различните сценарии за изменение на климата.

- **В Глава 2** са описани използваните числени модели, тяхната история на създаване, особености и параметризации на физичните процеси.

- **В Глава 3** са представени предварителни тестове с модела RegCM4 интегриран за територията на Балканския полуостров и България. Симулациите обхващат период от 10 години от 2000 до 2009 г. и за начални и гранични условия са използвани данни от метеорологични реанализи ECMWF ERA-Interim ( $1,5^{\circ} \times 1,5^{\circ}$ ). Проведени са предварителни тестове за избор на параметризация на конвективния валеж, тестове на чувствителност към размера на областта и концентрацията на CO<sub>2</sub>.

Сравнението между моделните данни и данните от наблюдения показват, че моделът е чувствителен към избора на параметризация на конвективния валеж (конвективна схема) и най-добри резултати за територията на България, показва схемата на Grell със затваряне Arakawa-Schubert (GAS). Избора на тази схема, води до най-малки грешки при симулации на температурите и валежа. Резултатите показват също, че модела е чувствителен към размера на областта и концентрацията на парниковите газове. При увеличение на CO<sub>2</sub> със 100% за територията на България, средната годишна температура се покачва с  $0.1^{\circ}$ - $0.2^{\circ}$ C, а годишните суми на валежа се изменят с до 5%. При сезонните, средните температури на модела се покачват с  $0.1^{\circ}$  до  $0.3^{\circ}$ C, а при валежите стойностите се изменят с -5% до +15%.

- **В Глава 4** са представени и обсъдени резултати от валидация на модела RegCM4.4.5 с хоризонтална резолюция 20 км за период от 30 години (1983-2012). За валидиране способността на модела да симулира месечни температури и суми на валежа, са използвани база данни от приземни наблюденията CRU TS3.23 с хоризонтална резолюция  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  и данни от приземни станции в регулярна мрежа E-OBS Version 15.0 с резолюция  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  за температурата и валежа.

Резултатите показват, че моделът може да възпроизведе пространственото разпределение на температурата над Балканския полуостров и България. В случай на валежа се наблюдава надценяване на количествата валеж в северната и западната част на областта, особено през лятото и в планинските райони през всички сезони. Годишните температурни отклонения на модела са  $0.1^{\circ}$ C в сравнение с CRU данните

и  $-0.1^{\circ}\text{C}$  в сравнение с E-OBS, а годишните отклонения при валежа са 0.9 мм/ден (53%) и 1.3 мм/ден (81%), в сравнение с CRU и E-OBS, съответно. Като цяло, температурните отклонения са  $<0.5^{\circ}\text{C}$  през всички сезони (с изключение на зимния сезон, при сравнение с CRU), положителни през зимата и отрицателни през пролетта, докато положителното отклонение при валежа е между 38% и 71% в сравнение с CRU и между 62% и 108% в сравнение с E-OBS данните, в зависимост от сезона.

За територията на България моделът показва отрицателно отклонение при температурата през всички сезони, с изключение на зимния сезон в сравнение с данните на CRU и E-OBS. В случай на валежа, пространствените карти показват надценяване на валежа, особено в планинските райони. Въпреки това, RegCM4.4.5 показва много добри резултати, както при изследване на междугодишния ход на температурата и валежа (коефициенти на корелация с CRU 0.88 и 0.75, съответно; с E-OBS 0.88 и 0.74, съответно), така и при сезонния ход на температурата и валежа (коефициенти на корелация с CRU 0.99 и 0.81, съответно; с E-OBS 0.99 и 0.88, съответно).

- **В Глава 5** е предложен нов индекс за оценка на климатичните промени. Запазването на този индекс е необходимо условие за намаляване на риска от загуба на надежден сигнал при моделиране изменението на бъдещия климат при прилагане на методите за корекция на отклоненията (bias correction methods). Пространственото разпределение на новия индекс е демонстрирано, чрез използването на два регионални климатични модела ALADIN и RegCM4 за район включващ Балканите и Апенински полуостров. Оценката е извършена за средните месечни температури и валежи.

Предложеният С-индекс предлага две възможности: първата е да се направи оценка на структурата на изменението на климата в бъдещия период от гледна точка на "наблюдател" на климата в контролния (референтния) период; другата опция е запазването на индекса, при прилагане на "трансформираща функция", като изискване да не се загуби оригиналният сигнал за промяна на климата. И при двата модела (ALADIN и RegCM) има големи участъци с еднакъв С-индекс, определен от интервала ( $\mu - \sigma$ ;  $\mu + \sigma$ ). При прилагане на методи за коригиране на отклоненията (bias correction methods), разпределението на С-индекса трябва да остане същото, т.е. пространствените карти на индекса, трябва да останат същите.

С-индексът, може да бъде определен за всеки интервал ( $\delta 1$ ,  $\delta 2$ ) за различните метеорологични елементи или индекси. Този индекс може да се разглежда като мярка за "изменение на климата" в този интервал. Колкото по-малък е индексът, толкова по-голяма е промяната. Друга



възможност е да се използва, като индикатор за промяна на сигнала на модела. Ако индексът се промени, логиката на симулациите на модела ще бъде изгубена. Тогава бъдещият климат след корекция на отклоненията, ще изглежда различно за "наблюдателя" от референтния период.

Определянето на интервала зависи от анализа, който трябва да се направи. В представените в Глава 5 примери, се следва предположението, че екстремното време е извън диапазона, определен от средното  $\mu$  и стандартното отклонение  $\sigma$ . Ако целта е да се направи оценка на промяната над или под някакъв праг, тогава трябва да се вземе предвид грешката в разпределението през референтния период. Например, много модели са по-студени по време на референтния период и предварително определения праг, може да не съществува.

Стабилността на предложения индекс зависи не само от грешката на модела (линейният компонент не оказва влияние върху индекса, както е показано в Глава 5), но и от броя на случаите, попадащи в избрания интервал. Малък брой случай, ще доведе до неговата нестабилност. Методите, осигуряващи автоматично присъствие на значителен брой случаи, като например използването на стандартно отклонение, са подходящи за определяне на стабилен индекс.

От пространствените карти с тенденциите на температурата за периода 2021-2050 г. можем да обобщим, че и двата модела показват затопляне през всички сезони и по-специално през лятото (JJA). При моделът RegCM4 увеличението на температурата е от  $2^\circ$  до  $3.5^\circ$  C през лятото (JJA) и от  $1.5^\circ$  до  $2^\circ$  C през другите сезони. При ALADIN – увеличението на температурата е от  $1.5^\circ$  до  $2^\circ$  C през лятото (JJA) и от  $1.5^\circ$  C през другите сезони.

При валежа, за периода 2021-2050 г. и двата модела показват намаление на количествата през лятото (JJA) и увеличение през пролетта (MAM). При RegCM4 намалението на валежа през лятото (JJA) е в интервала 20-40%, а увеличението на валежа през пролетта (MAM) е с 10%. При ALADIN намалението на валежа през лятото (JJA) е в интервала 5-15%, а увеличението на валежа през пролетта (MAM) е с 5%.

- **В Глава 6** се предлага метод за оценка на климатичните промени през първите 10 години от симулацията по подобие на метода Монте Карло. Изводите са направени за територията на България и са основани на симулации за периода 2021-2050 г., проведени с модела ALADIN-CLIMATE по проекта CECILIA от 6-та рамкова програма. За температурата са разгледани две възможности: увеличение на температурата до  $1.5^\circ\text{C}$  и увеличение на температурата над  $2^\circ\text{C}$ , а за валежа три възможности: запазване или увеличаване на количеството

валеж, намаляване на валежа до 10% и намаляване на валежа над 10 %.

Резултатите показват, че за периода 2021 - 2050 г. изменението на средногодишната температура е с над 1.5°C за цялата територия на България, като за всеки 10 годишен период, може да се очаква увеличение с 1.5°C градуса с над 95 % вероятност. Очакванията за увеличение на температурите с над 2°C градуса не надхвърлят 70%, като най-напред това ще се случи в северната част на страната. Изменението на нормата на валежите за периода 2021 – 2050 г. варира от увеличение и запазване до намаление с над 15 %. В планинските части на Западна България валежите няма да се променят или ще се увеличат. Областите с най-вероятно намаление на валежа до 10 % са ниските части на Северозападна България, а районите с най-голяма вероятност за намаление на валежите с над 10 % са източните и югоизточни части на страната.

- **В Глава 7** е представена оценка на изменението на енергийния потенциал на вятъра и слънчевата радиация за територията на България за периода 2021 – 2050 г. Използвани са симулации с модела ALADIN-CLIMATE с резолюция 10 км. Начертани са годишни и сезонни пространствени карти на енергийния потенциал на вятъра и слънчевата радиация до 2050 г., както и сезонни карти на температурните изменения.

Резултатите показват, че при годишните изменения на ветровата енергия най-голям ръст в енергийният потенциал може да се очаква в Югоизточна България (до 14%) и най -голям спад в централните части на страната (с около 12 %). При годишните изменения на слънчевата радиация може да се очаква повишение в Североизточна България с 2 до 3.5 % и на места по високите части на Стара планина и Пирин (до 6%). В някои части на Югозападна България енергията на слънчевата енергия ще намалее с до 1 %. При сезонните изменения на ветровият енергиен потенциал най-голямо намаление се наблюдава през зимата (10 - 30 %) в Централна и Югозападна България, а най-голямо повишение през пролетта (10 - 30 %) и лятото (до 50 %) в Югоизточна България и крайбрежната зона. При сезонното изменение на слънчевата радиация енергийният потенциал нараства през зимата в цялата страна (1- 10 %) и намалява през есента, като най – съществено е намалението в южните части на страната (от 2 до 4%). През лятото се очаква увеличение на слънчевата радиация, като най-голямо е в Североизточна България с 2 до 4 %.

Тези оценки за разпределението на очакваните промени в енергийния потенциала на вятъра и слънчевата радиация вследствие на климатичните промени мога да послужат за правилно планиране на стратегии за развитие и използване на ВЕИ за територията България.

## Приноси

1. Изследвани са различни параметризационни схеми на RegCM4 за конвективния валеж. Най-добри резултати показва схемата на Grell със „затваряне“ на Arakawa & Schubert.
2. Изследвана е чувствителността на RegCM към размера на областта и регионалното влияние на парниковите газове. Изводите са, че при 100% увеличение на CO<sub>2</sub>, годишната температура се повишава с 0.2°C, а валежите се изменят с ±5 %.
3. Получените статистическите резултати от верификацията на регионалния климатичен модел RegCM4 оправдават прилагането на модел за числени експерименти със сценарии за изменение на климата за територията на България (за симулации на климатичните промени).
4. Сравнени са резултатите от двата модела за оценката на климатичните промени до 2050 г. на Балканския полуостров. Областите на съвпадение при температурата при двата модела са значителни през зимата, пролетта и лятото, а при валежите - през пролетта и лятото.
5. Въведен е нов индекс за оценка на климатичните промени при различни модели. Илюстриран е чрез двата модела ALADIN и RegCM. Съхранението на този индекс е необходимо условие за запазване на значимия сигнал при прилагане на различните методи за корекция на симулациите, известни като „bias correction methods“. И при двата модела най-голяма промяна на климата е представена през лятото - обширни зони с малък C индекс ( $C < 1$ ).
6. Предложен е метод за оценка на най-вероятните климатични промени (в зададен интервал, за конкретен метеорологичен елемент) през първия 10 годишен период с използване на метода Монте-Карло.
7. Оценена е промяната в енергийния потенциал на вятъра и на слънчевата радиация за територията на България за периода 2021-2050 г.

**Резултатите от т. 4, 6 и 7 са приложени при оценката на метеорологичните параметри, използвани в разработената енергийна стратегия от БАН.**

## **Публикации и доклади на научни форуми свързани с темата на дисертацията**

### **Публикации:**

1. Valcheva R., Peneva E., "Sensitivity to the parametrization of cumulus convection in the RegCM4.3 simulations focused on Balkan Peninsula and Bulgaria", Annual of Sofia University "St. Kliment Ohridski", Faculty of Physics, 107 (2014) 113-131.
2. Spiridonov V., Valcheva R., "The Impact of Climate Change (until 2050) on the potential of renewable energy sources (wind and solar radiation) for the territory of Bulgaria (in Bulgarian)", Energy, 6 (2016) 38-46.
3. Spiridonov V., Valcheva R., "Stability of climate change at a given interval in a 30-year future period. Example for the territory of Bulgaria (2020-2050)", Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences, Tome 70, No 3 (2017) 405-410.
4. Spiridonov, V., Valcheva, R., "A new index for climate change evaluation. An example with the ALADIN and RegCM regional models for the Balkans and the Apennines", Idojaras, 2018 (in press).

### **Доклади на научни форуми:**

1. Valcheva R., Temperature and Precipitation Projections According to RCP45 Scenario For Bulgaria and Balkan Peninsula, Ninth ICTP Workshop on the Theory and Use of Regional Climate Models, Trieste, Italy, 28 May – 9 June 2018.
2. Valcheva R., Spiridonov, V. 27th ALADIN Workshop & HIRLAM All Staff Meeting 2017: The impact of climate change (until 2050) on the potential of renewable energy sources (wind and solar radiation) for the territory of Bulgaria, Helsinki, Finland, 03 – 07 April 2017.
3. Valcheva R., Validation of Regional Climate Model Version 4.4 (RegCM4.4) for the territory of Bulgaria, Third National Congress on Physical Sciences, Physics of Earth, Atmosphere and Space, Sofia, Bulgaria, 29 September – 2 October 2016.
4. Valcheva R., Peneva E. Numerical simulations with different convection schemes over Balkan Peninsula domain using RegCM4.3, Seventh ICTP Workshop on the Theory and Use of Regional Climate Models , Trieste, Italy, 12-23 May 2014.

## Литература (цитирана в автореферата)

1. Anthes R.A., Y.-H. Kuo, E.-Y. Hsie, S. Low-Nam, T.W. Bettge Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models Q. J. R. Meteorol. Soc., 115 (1989), pp. 768-806.
2. Arakawa, A. and Schubert, W.H., 1974: Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. J. Atmos. Sci., 31, 674-701.
3. Bougeault, P., (1985): A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. Monthly Weather Review, 113, 2108-2121.
4. Bretherton, C. S., J. McCaa, and H. Grenier, A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. part i: Description and 1d results, Monthly Weather Review, 132, 864-882, 2004.
5. Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G.: Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. Clim. Change 81(1), 16 (2007)
6. Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, R. Richels, 2007. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 pp.
7. Collins WJ, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, Gedney N, Halloran P, Hinton T, Hughes J, Jones CD, Joshi M, Liddicoat S, Martin G, O'Connor F, Rae J, Senior C, Sith S, Totterdell I, Wiltshire A, Woodward S, 2011: Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2, Geosci. Model Dev. Discuss., 4, 997-1062, doi:10.5194/gmdd-4-997-2011.
8. Dai, A, 2006: Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models, J Journal of Climate, volume 19, 4605-4630.
9. Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford AJ, Poli P, Kobayashi P, Andrae S, Balsamada U, Balsamo MA, Bauer G, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N, Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 137: 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
10. Déqué M, Piedelievre JP (1995) High-Resolution climate simulation over Europe. Clim Dyn 11:321-339
11. Déqué M., Dreveton C., Braun A., Cariolle D. (1994) : The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. Climate Dynamics 10:249-266.
12. Déqué M, “Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values,” Global and Planetary Change, vol. 57, no. 1-2, pp. 16–26, 2007, ELSEVIER.
13. Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi, and G. T. Bates, A regional climate model for the western United States, Climatic Change, 15, 383–422, 1989.
14. Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., and Kennedy, P., 1993: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1 as coupled to the NCAR community climate model. NCAR Technical Note NCAR/TN-387 + STR, 72p.
15. Douville, H., Royer, J.-F., Mahfouf, J.-F., (1995): A new snow parametrization for the Météo-France climate model. Part I: Validation in stand-alone experiments, Climate Dynamics, 12, 21-35.
16. Elguindi, N.; Bi, X.; Giorgi, F.; Nagarajan, B.; Pal, J.; Solmon, F.; Rauscher, S.; Zakey, A.; O'Brien, T.; Nogherotto, R.; et al. Regional Climate Model RegCM User Manual Version 4.4; International Centre for Theoretical Physics (ICTP): Trieste, Italy, 2014.
17. Emanuel, K. A., A scheme for representing cumulus convection in large-scale models, J. Atmos. Sci., 48(21), 2313-2335, 1991.
18. Emanuel, K. A., and M. Zivkovic-Rothman, Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models, J. Atmos. Sci., 56, 1766-1782, 1999.

19. Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka, 2006. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *Multigas Mitigation and Climate Policy. TheEnergy Journal*, 3 (Special Issue).
20. Giorgi, F., Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941–963, 1990.
21. Giorgi, F, Coppola, E, Solmon, F, Mariotti, L, Sylla, MB, Bi, X, Elguindi, N, Diro, GT, Nair, V, Giuliani, G, Turuncoglu, UU, Cozzini, S, Guttler, I, O'Brien, TA, Tawfik, AB, Shalaby, A, Zakey, AS, Steiner, AL, Stordal, F, Sloan, LC & Brankovic, C, 2012 RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, vol 52, no. 1, pp. 7-29. DOI: "<http://dx.doi.org/10.3354/cr01018>"10.3354/cr01018.
22. Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 467–490. doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.
23. Grell G, Dudhia J, Stauffer DR (1994) A description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech Note NCAR/TN-398 + STR, NCAR, Boulder, CO.
24. Grell, G. A. (1993), Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, *Mon. Weather Rev.*, 121, 764–787, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2.
25. Grenier, H., and C. S. Bretherton, A moist pbl parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers, *Monthly Weather Review*, 129, 357–377, 2001.
26. Guttler, I., C. Brankovic, T. A. O'Brien, E. Coppola, B. Grisogono, and F. Giorgi, Sensitivity of regional climate model RegCM4 to planetary boundary layer scheme, 2013.
27. Harris, I.C.; Jones, P.D. (2015): CRU TS3.23: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.23 of High Resolution Gridded Data of Month-by-month Variation in Climate (Jan. 1901- Dec. 2014). Centre for Environmental Data Analysis, 09 November 2015. doi:10.5285/4c7fdfa6-f176-4c58-acee-683d5e9d2ed5. <http://dx.doi.org/10.5285/4c7fdfa6-f176-4c58-acee-683d5e9d2ed5>.
28. Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New. 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201
29. Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma, 2008. Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering* 13, 97-108.
30. Holtslag, A. A. M., E. I. F. deBrujin, and H. L. Pan (1990), A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, *Mon. Weather Rev.*, 118, 1561–1575, doi:10.1175/1520-0493(1990)118<1561:AHRAMT>2.0.CO;2.
31. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
32. IPCC AR5, 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. doi:10.1017/CBO9781107415324.
33. IPCC SRES, 2000: *Special report: Emissions Scenarios*, Nebojsa Nakicenovic, Joseph Alcamo, Gerald Davis, Bert de Vries, Joergen Fenhann, Stuart Gaffin, Kenneth Gregory, Arnulf Grüber, Tae Yong Jung, Tom Kram, Emilio Lebre La Rovere, Laurie Michaelis, Shunsuke Mori, Tsuneyuki Morita, William Pepper, Hugh Pitcher, Lynn Price, Keywan Riahi, Alexander Roehrl, Hans-Holger Rogner, Alexei Sankovski, Michael Schlesinger, Priyadarshi Shukla, Steven Smith, Robert Swart, Sascha van Rooijen, Nadejda Victor, Zhou Dadi Cambridge University Press, UK. Pp 570.
34. Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Breigleb, D. Williamson, and P.

- Rasch, Description of the NCAR community climate model (ccm3), Tech. Rep. NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, 1996.
35. Lott, F., 1999, Alleviation of Stationary Biases in a GCM through a Mountain Drag Parameterization Scheme and a Simple Representation of Mountain Lift Forces, *Monthly Weather Review*, Vol. 127, 5, pp. 788–801.
  36. Loveland, T. R., Merchant, J. W., Ohlen, D. O., and Brown, J. F. 1991. Development of a Land-Cover Characteristics Database for the Conterminous U.S. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57:1453-1463.
  37. Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, Colette A, Déqué M, Gobiet A, Goergen K, Jacob D, Lüthi D, van Meijgaard E, Nikulin G, Schär C, Teichmann C, Vautard R, Warrach-Sagi K, Wulfmeyer V (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci Model Dev* 7:1297–1333.
  38. Macheinbauer, B., M. Windelband, M. Botzet, J. H. Christensen, M. D. Qud, R. G. Jones, P.M. Ruti, and G. Visconti, Validation and analysis of regional present-day climate and climate simulations over Europe, MPI Rep. 275, Max Planck Inst., Hamburg, Germany, 1998.
  39. Masui T, K Matsumoto, Y Hijioka, T Kinoshita, T Nozawa, S Ishiwatari, E Kato, PR Shukla, Y Yamagata, M Kainuma. 2011. An emission pathway for stabilization at 6 Wm<sup>-2</sup> radiative forcing. *Climatic Change*, 109:59-76. DOI; 10.1007/s10584-011-0150-5. Available at: <http://www.springerlink.com/content/2558w01458131545/>.
  40. Mellor, G. L., and Yamada T., (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851 – 875.
  41. Milan P., Matthias Wächter, Stephan Barth & Joachim Peinke For Wind Center for Wind Energy Research of the Universities of Oldenburg, Bremen and Hannover, Oldenburg, Germany. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, Vol 44, 2010 WIT Press.
  42. Mitchell and Jones, An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatology*, 25, 693-712, Doi: 10.1002/joc.1181, 2005.
  43. Morcrette, J.-J., (1989): Description of the Radiation Scheme in the ECMWF Model. Technical Memorandum, 165, ECMWF, 26 pp.
  44. Nogherotto, R., and A. M. Tompkins, The new cloud microphysics implemented in the Regional Climate Model RegCM4, in preparation, p., 2014.
  45. Noilhan, J., and Planton, S., (1989): A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.
  46. O'Brien, T. A., P. Y. Chuang, L. C. Sloan, I. C. Faloona, and D. L. Rossiter, Coupling a new turbulence parameterization to regcm adds realistic stratocumulus clouds, *Geoscientific Model Development*, 5(4), 989– 1008, doi:10.5194/gmd-5-989-2012, 2012.
  47. Pal, J. S., E. E. Small, and E. A. B. Eltahir, Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM, *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 105(D24), 29,579–29,594, 2000.
  48. Pieczka, I., Pongrácz, R., André, K., Kelemen, F.D., Bartholy, J., 2016: Sensitivity analysis of different parameterization schemes using RegCM4.3 for the Carpathian Region. *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-016-1941-4.
  49. Ragheb M. and Ragheb Adam M. (2011). *Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Dr. Rupp Cariveau (Ed.), ISBN: 978- 953-307-508-2, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>.
  50. RegCM Version 4.3 User Manual, 2011
  51. Rao, S. & Riahi, K. 2006. The role of non-CO2 greenhouse gases in climate change mitigation: Long-term scenarios for the 21st century. *Multigas mitigation and climate policy. The Energy Journal*. 3 (Special Issue), 177–200.
  52. Reynolds, R.W., N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang, 2002: An Improved In

- Situ and Satellite SST Analysis for Climate. *J. Climate*, 15, 1609-1625.
53. Riahi K, S Rao, V Krey, C Cho, V Chirkov, G Fischer, G Kindermann, N Nakicenovic, P Rafaj. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*. 109:33-57. DOI 10.1007/s10584-011-0149-y. Available at: <http://www.springerlink.com/content/q5024170k1t504t7/>
54. Riahi, K. Gruebler, A. and Nakicenovic N. 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 7, 887-935. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>.
55. Ricard, J.-L., and Royer, J.-F., (1993): A statistical cloud scheme for use in a AGCM, *Ann. Geophysicae*, 11, 1095-1115.
56. Ritchie, H., Temperton, C., Simmons, A., Hortal, M., Davies, T., Dent, D. and Hamrud, M. (1995) Implementation of the semi-Lagrangian method in a high resolution version the ECMWF forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 489-514
57. Skalák Petr , Michel Déqué, Michal Belda, Aleš Farda, Tomáš Halenka, Gabriella Csima, Judit Bartholy, Mihaela Caian, Valery Spiridonov, CECILIA regional climate simulations for the present climate: validation and inter-comparison, *Clim Res*, Vol. 60: 1–12, 2014.
58. Smith, S.J. and T.M.L. Wigley, 2006. Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *The Energy Journal* (Special Issue #3) pp 373-391.
59. Solomon, F., M. Mallet, N. Elguindi, F. Giorgi, A. Zakey, , and A. Konare, Dust aerosol impact on regional precipitation over western africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties, *Geophysical Research Letters*, 35, 124705, 2008.
60. Spiridonov V., Valcheva R., "Stability of climate change at a given interval in a 30-year future period. Example for the territory of Bulgaria (2020-2050)", *Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences*, Tome 70, No 3 (2017) 405-410.
61. Spiridonov V., Valcheva R., "The Impact of Climate Change (until 2050) on the potential of renewable energy sources (wind and solar radiation) for the territory of Bulgaria (in bulgarian)", *Energy*, 6 (2016) 38-46.
62. Spiridonov, V., Deque, M., and Somot, S. (2005): ALADIN-CLIMATE: from the origins to present date, *ALADIN Newsletter* 29.
63. Spiridonov, V., Valcheva, R. A new index for climate change evaluation. An example with the ALADIN and RegCM regional models for the Balkans and the Apennines, Idojaras, 2018 (in press).
64. Sun, Y., S. Solomon, A. Dai, and R. W. Portmann, 2006: How often does it rain? *J. Climate*, 19, 916–934.
65. Temperton C., Hortal M., Simmons A. J., (2001): A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Q.J.R.Meteorol. Soc.*, 127, 111-128.
66. Thomson A, K Calvin, S Smith, P Kyle, A Volke, P Patel, S Delgado-Arias, B Bond-Lamberty, M Wise, L Clarke, and J Edmonds. 2011. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109:77-94. DOI: 10.1007/s10584-011-0151-4. Available at: <http://www.springerlink.com/content/70114wmj1j12j4h2/>
67. Tiedtke, M., Representation of clouds in large-scale models, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 3040–3061, 1993.
68. Tompkins, A. M., Ice supersaturation in the ECMWF integrated forecast system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 133, 53–63, 2007.
69. Torma C, Bartholy J, Pongrácz R, Barcza Z, Coppola E, Giorgi F (2008) Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás* 112(3–4):233–247.
70. Torma C, Coppola E, Giorgi F, Bartoly J, Pongracz R (2011) Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian basin. *J Hydrometeorol* 12:84–100.
71. Uppala S, Dee D, Kobayashi S, Berrisford P, Simmons A. 2008. Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-Interim *ECMWF Newsl.* 115: 12–18.
72. Valcheva R. and E. Peneva, 2014: Sensitivity to the parametrization of cumulus convection in



the RegCM4.3 simulations focused on Balkan Peninsula and Bulgaria, Annual of Sofia University Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculty of Physics, Vol. 107, 113-131.

73. Van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160Pp (2009).

74. van Vuuren, D, E Stehfest, MGJ den Elzen, T Kram, J van Vliet, S Deetman, M Isaac, K Klein Goldewijk, A Hof, A Mendoza Beltran, R Oostenrijk, B van Ruijven. 2011b. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below  $2\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ , 109:95-116. DOI: 10.1007/s10584-011-0152-3. Available at:

<http://www.springerlink.com/content/701751t54248643j/>

75. van Vuuren, D. P., Eickhout, B., Lucas, P. L. & den Elzen, M. G. J. 2006. Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing — Exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. Multigas mitigation and climate policy. The Energy Journal. 3 (Special Issue), 201–234.

76. van Vuuren, D., M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, R. van Houdt, 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change. Available at <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>.

77. Wise, MA, KV Calvin, AM Thomson, LE Clarke, B Bond-Lamberty, RD Sands, SJ Smith, AC Janetos, JA Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO2 Concentrations for Land Use and Energy. Science. 324:1183-1186.

78. Yao et al.: Climate change impacts on Ontario wind power resource. Environmental Systems Research 2012 1:2.

79. Zeng, X., M. Zhao, and R. E. Dickinson, Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using toga coare and tao data, J. Climate, 11, 2628–2644, 1998.

<http://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>

[http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru\\_ts\\_3.23/data](http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru_ts_3.23/data)

<http://clima-dods.ictp.it/data/regcm4/SURFACE>

<http://www.cecilia-eu.org>

<http://www.cnr-meteo.fr/aladin>

<https://gforge.ictp.it/gf/project/regcm/frs>.

## Благодарности

На първо място искам да изкажа своята специална благодарност на научния ми ръководител проф. д-р Валери Спиридонов за неоценимата помощ и ценните съвети по време на изготвяне на дисертацията.

Искам да благодаря на колегите от Центъра по Теоретична Физика в Триест, Италия, за предоставения софтуер използван в дисертацията (RegCM4) и помощта при инсталиране и калибриране на модела.

Благодаря на колегите доц. д-р Андрей Богачев и доц. д-р Боряна Ценов за професионализма и подкрепата през целия период на подготовка на дисертацията.

Издавам и своята голяма благодарност на семейството си!

Работата по настоящата дисертация е реализирана с подкрепата на проект BG051PO001-3.3.06-0063 - Програма за мултидисциплинарно обучение на докторанти, постдокторанти и млади учени, финансиран от Европейски социален фонд 2007 – 2013, оперативна програма "Развитие на човешките ресурси". Изследванията са подпомогнати и от проект ДФНП-28/20.04.2016 „Програма за подпомагане на младите учени в БАН, 2016-2017 г.“, както и от проект № ДН-14/3/13.12.2017 „Оценка и анализ на климатичните промени в регионални/локални мащаби и някои последствия от тях“, 2017-2020 г. към ФНИ.

В работата са използвани данни предоставени от група „Метеорологична база данни“, департамент „Метеорология“ на НИМХ, за което им благодаря!