



СУ „Св. Климент Охридски”
Физически факултет
Катедра “Метеорология и Геофизика”

Автореферат
На дисертация в изпълнение на изискванията за придобиване на
образователна научна степен „Доктор”

на
Мирна Матов

На тема:
**„Климатични промени и проекции за 21-ви век в района
на Черно море и Балканския полуостров”**

Научна специалност: Метеорология
Професионално направление: 4.2 Физически науки

Ръководител катедра:
(доц. д-р Гергана Герова)

Научен ръководител :
(доц. д-р Елисавета Пенева)

София, 2023

Дисертантът е редовен докторант към Катедра Метеорология и Геофизика на Физически Факултет при Софийски Университет "Св. Климент Охридски" в периода Февруари 2019 - Февруари 2023. Дисертацията е с обем 127 страници. Състои се от Въведение и 9 глави и списък с цитираната литература. Брой фигури - 69. Брой таблици - 14. Брой цитирани литературни източници - 150, от тях 13 интернет сайта. Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен катедрен съвет на Катедра Метеорология и Геофизика при Физически Факултет на 26ти януари 2023 г.

Благодарости

На първо място искам да благодаря на научния ми ръководител доц. д-р Елисавета Пенева за търпението и възможността да работя с нея по дисертационния ми труд. За съвместната работа, насоките, съветите и помощта за реализиране на дисертацията.

Искам да благодаря на гл. ас. д-р Милен Цеков за ценните насоки в областта на статистическия анализ.

Благодаря на всички колеги от катедра "Метеорология и геофизика,, за приемането, съдействието и насърчаването.

Благодаря на цялата общост от учени работещи на тема климат, чиято литература използвам в дисертацията.

Благодаря на семейството ми и на всички хора около мен за подкрепата и търпението.

1. Актуалност и цел на дисертацията	6
2. Съвременно състояние на проблема	7
2.1. Наблюдавани промени в глобалната температура	8
2.2. Наблюдавани промени в глобалното количество валежи	8
2.3. Наблюдавани промени в глобалното атмосферно налягане на морско ниво	9
2.4. Наблюдавани промени в циркулацията през XX век	9
2.5. Наблюдавани промени в глобалния приземен вятър	11
3. Методология и източници на данни	12
3.1. Климатични реанализи и проекции	12
3.2. Данни от наблюдения	15
3.3. Статистически оценки на моделните симулации за района на Черно море и Балканския полуостров за съвременния климат (1979-2005)	15
4. Промени на климата в региона Балкански полуостров – Черно море в настоящето (период 1979-2005)	17
4.1. Сравнение на температурата от моделните симулации и метеорологичния реанализ	17
4.1.1. Средни за периода характеристики на температурата	17
4.1.2. Междугодишен ход на температурата	19
4.2. Сравнение на валежите от моделните симулации и метеорологичния реанализ	20
4.2.1. Средни за периода характеристики на валежите	20
4.2.2. Междугодишен ход на валежите	22
4.3. Сравнение на налягането та морско ниво от моделните симулации и метеорологичния реанализ	22
4.3.1. Средни за периода характеристики на налягането на морско ниво	22
4.3.2. Междугодишен ход на налягането на морско ниво	24
4.4. Сравнение на скоростта на приземния вятър от моделните симулации и метеорологичния реанализ	25
4.4.1. Средни за периода характеристики на приземния вятър	25
4.4.2. Междугодишен ход на приземния вятър	27
5. Проекция на климата в региона Балкански полуостров – Черно море до края на 21-ви век	28
5.1. Очаквани промени в температурата	28
5.1.1 Очаквани промени в температурата на 2м височина за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.	28
5.1.2. Междугодишен ход на температурата по сценарии RCP4.5 и RCP8.5 за периода 2011-2100 г.	30
5.2. Очаквани промени на средното количество валежи	31
5.2.1. Очаквани промени на средното количество валежи за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.	31

5.2.2. Междугодишен ход на средното количество валежи по двата сценария за периода 2011-2100 г.	33
5.3. Очаквани промени в налягането на морско ниво	34
5.3.1. Очаквани промени в налягането на морско ниво за за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.	34
5.3.2. Междугодишен ход на налягането на морско ниво по двата сценария за периода 2011-2100 г.	36
5.4. Очаквани промени в скоростта на вятъра	37
5.4.1. Очаквани промени в скоростта на вятъра за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.	37
5.4.2. Междугодишен ход на приземния вятър по двата сценария за периода 2011-2100 г.	39
	39
6. Очаквани последици от климатичните промени през 21-ви век	41
6.1. Промени в зимните условия в Черноморския регион	41
6.2. Промени в интензивността на сезонните центрове на действие, които имат влияние в Черноморския регион	46
6.2.1. Сибирски център на високо налягане	46
6.2.2. Средиземноморска депресия	48
6.3. Промени в честотата на явленията с бурен вятър	49
7. Заключение	51
8. Приноси на дисертационния труд	52
9. Публикации и участия в събития	53
Използвана литература	56

1. Актуалност и цел на дисертацията

Темата за климатичните промени е една от най-обсъжданите в последните десетилетия, тъй като има отражение върху всички аспекти на човешкия живот. Дискутира се много за глобално затопляне, за парниковия ефект и за това какви са факторите, които ги определят.

Това е и причината многобройни научно-изследователски екипи от различни институти да се занимават с количествено и качествено описание и прогноза на климатичните промени.

Този проблем е сложен, тъй като касае климатичната система: съвкупност от атмосферата, хидросферата, криосферата, литосферата и биосферата на нашата планета. Тези компоненти са в постоянно взаимодействие помежду си и всеки процес възникнал в една от тях, води до промени в другите, това са така наречени - обратни връзки. Поради тази причина климатичните промени трябва да се разглеждат мултидисциплинарно и в различни времеви и пространствени мащаби. Не на последно място е и човешкото влияние върху климата, което напоследък се смята съизмеримо с това на останалите компоненти от климатичната система. Последните изследвания установяват, че приносът на антропогенните емисии от парниковите газове е отговорен за поне 50% от затоплянето на Земята. Всичко това прави научния проблем “климатична промяна” сложен за разглеждане.

Следователно информацията как и колко ще се промени климатът е от съществено значение. Такава информация може да се получи само чрез използване на сложни математически модели за взаимовръзките в климатичната система, чрез познаване на факторите, които влияят на климата и как те ще се променят. Такива математически числени инструменти се наричат климатични модели и те дават възможност да се направи бъдеща проекция на климата на базата на предположения за бъдещото развитие на обществото.

Глобалното затоплянето през 20-ти век безспорно е най-значителната промяна в климата. То е съпроводено с много други явления, с различна интензивност по различните части на земното кълбо: топене на арктичните и антарктични ледове, киселяване на океана, зачестяване на засушаванията и наводненията на сушата.

Едино от най-ясно и сигурно променящо се нещо в климата е температурата на Земята, която бесспорно навсякъде по света средната ѝ стойност се увеличава. Не толкова сигурни и по-трудни за определяне са промените в средното количество валежи, но съществува съгласие, че средното им количество на сушата в северното полукълбо се увеличава. Не на последно място и един от най-интересните аспекти на промяната на климата е, че глобалната и регионална циркулация се изменя. Това обаче не е еднозначно и е трудно да се определи, тъй като вятърът е сравнително труден за определяне от наблюдения. Учените използват данни от приземни наблюдения, аерологични сондажи и климатични моделни симулации, за да открият тенденции за промяна в циркулацията. Засега в глобален план има съгласие, че тропичните зони се разширяват към полюсите и съответно зоната на циклоните на умерените ширини се отмества към полюса. Допълнителна трудност е, че циркулацията участва в механизмите на климатичната променливост и фазите на основните климатични осцилации влияят на ветровете и вихрообразуването.

Целите на дисертацията могат да бъдат обобщени накратко като:

- Да използва потенциала на наличната база данни в резултат от изпълнението на проект Med-Cordex (регионални числени симулации за настоящето и климатични проекции за 21-ви век) за извличане и систематизиране на очакваните промени в региона Балкански полуостров-Черно море, като са избрани четири климатични променливи: приземна температура на въздуха, валежи, налягане на морско ниво и скорост на приземния вятър.
- Да изследва количествено явлението замръзване на Черно море, което представлява комплексен индикатор за регионалните климатични промени. При това да се изясни ролята на климатичните фактори и общата атмосферна циркулация, които традиционно се приемат за ключови в района.
- Да се анализират бъдещите промени на сезонните климатични центрове на действие Сибирски максимум и Средиземноморски минимум, които влияят на зимните условия в района.
- Да се анализират бъдещите промени на явленията с екстремен вятър, тъй като динамичните характеристики са по-малко изучени от температурата и валежите.

За оценките са използвани симулациите с висока разделителна способност на регионалния климатичен числен модел Aladin 5.2, разработен в Meteo-France, по два различни сценария, определени от AR5 IPCC (2013), като са избрани т.нар. „умерен“ и „песимистичен“ сценарий за еволюция на концентрацията на парникови газове в атмосферата през 21-ви век – RCP 4.5 и RCP 8.5.

За зимните условия в Черноморския район са използвани синоптични данни за температурата на въздуха на 2м височина от 9 брегови метеорологични станции по крайбрежието на Черно море – Бургас, Варна, Одеса, Херсон, Мариупол, Батуми, Трабзон, Синоп и Истанбул. Източникът на данни са редовните доклади SYNOP, разпространявани от архива с данни на Global Surface Summary of the Day (GSOD) на адрес pse1.noaa.gov. Данните обхващат периода от 1950 г. до днес, но има много пропуски, особено в началото на периода. Данните за размера на морския лед са взети от продукта на Националния център за данни за сняг и лед на САЩ Multisensor Analysed Sea Ice Extent—Northern Hemisphere (MASIE-NH).

За оценка на интензивността на Сибирския максимум са използвани данни от реанализа ERA-5, а за Средиземноморския минимум са използвани данните от регионалния модел ALADIN 5.2. използвани в CORDEX.

2. Съвременно състояние на проблема

Най-мощните оценки за промените в климата днес се правят от Междуправителствения панел за климатичните промени (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), който има за цел да осигури научна информация на правителствата по света, която да се използва за изготвяне на политики свързани с промените в климата. Чрез оценките си IPCC описва каква е степента на научното съгласие в различни области, като например степента в промените на климатичната система в миналото и настоящето, както и оценката на човешкото влияние върху промените в климата. IPCC досега е публикувал шест Оценъчни доклада, които са най-изчерпателните научни доклади в света относно промените в климата.

На 9. Август 2021 г. IPCC публикува последният, шести оценъчен доклад (AR6) на работна група I, която се занимава с физическата основа на науката за климата.

Тъй като в настоящата дисертация правим оценка на 4 метеорологични елемента за Балканския полуостров и района на Черно море – температура, валежи, налягане и вятър, в следващите няколко параграфа разглеждаме каква е реалната картина и какви са промените на тези 4 метеорологични елемента в глобален мащаб, както и за района на Балканския полуостров и Черно море, от вече публикувани проучвания.

2.1. Наблюдавани промени в глобалната температура

Температурата е един от най-сигурно променящите се метеорологични параметри с хода на глобалното затопляне.

В Петия оценъчен доклад на IPCC AR5 е отбелязано, че от 1850 г., всяко едно от последните три десетилетия на повърхността на Земята е било по-топло от всяко предходно.

Глобално, приземната температура на въздуха през първите две десетилетия на 21-ви век (2001-2020 г.) е с 0,99 [0,84-1,10] °C по-висока от тази през 1850-1900.9 Глобалната приземна температура на повърхността за периода 2011-2020 г. е с 1,09 [0,95 до 1,20] °C по-висока от тази за периода 1850-1900 г., като средните стойности са по-високи над сушата (1,59 [1,34 до 1,83] °C), отколкото над океана (0,88 [0,68 до 1,01] °C). Очакваното увеличение на глобалната температура на повърхността след AR5 се дължи основно на по-нататъшното затопляне, от 2003-2012 г. насам (+0,19 [0,16 до 0,22] °C). Освен това, методологическият напредък и новите набори от данни допринасят с приблизително 0,1 °C за актуализираната оценка на затоплянето в AR6 (IPCC, 2021).

Голяма е вероятността парниковите газове да са основният фактор за затоплянето на тропосферата от 1979 г. насам и е изключително вероятно причиненото от човека изчерпване на стратосферния озон да е основният фактор за охлаждането на долната стратосфера между 1979 г. и средата на 90-те години на XX век.

Всички оценки на промяната към затопляне на глобалната средна температура за 1998-2012 г. са в рамките на 10-ти-90-ти перцентил на симулациите по CMIP6.

2.2. Наблюдавани промени в глобалното количество валежи

Сигурността в промяната на средното количество валежи в световен мащаб, е ниско за годините преди 1950 г. и средна - след това, поради недостиг на данни. Наличните непълни бази данни в световен мащаб показват разнопосочни и незначителни

дългосрочни тенденции в отчетените средни глобални промени на валежите. (IPCC.2013)

Вероятността е голяма човешкото влияние да е допринесло за наблюдаваните промени в количеството валежи от средата на 20-ти век насам. Новите проучвания за влиянието на човека върху климата засилват резултатите направени преди това, за нарастване на количеството валежи на сушата в Северното полукълбо в средните и високите географски ширини.

Средностатистически, със средна степен на достоверност, валежите на сушата в световен мащаб са се увеличили от средата на 20-ти век, като степента на достоверност на тенденциите преди 1950 г. е ниска. От 80-те години на миналия век се наблюдава по-бързо нарастване на валежите на сушата в световен мащаб (средна степен на достоверност), с голяма междугодишна променливост и регионална хетерогенност. Над световния океан има ниска степен на доверие в оценките на тенденциите на валежите, което е свързано с несигурността на алгоритмите за извличане на информация от спътниковите наблюдения и ограничените наблюдения *in situ*. (AR6 IPCC, 2021)

2.3. Наблюдавани промени в глобалното атмосферното налягане на морско ниво

Промените в налягането, макар и малки, могат да доведат до промени и в температурата, и във валежите, и в циркулацията. Van Haren et al. (2012) установяват силно намаляване на налягането на морско ниво над Средиземноморския район в зимния сезон (януари до март) за периода 1961-2000 година.

Новите ERA реанализи показват увеличение на налягането на морско ниво над субтропиците с по-силно увеличение през австралийската зима за периода 1979-2018 г. Над северното полукълбо приземното налягане се увеличава над Тихия океан в средните ширини през зимата в Северното полукълбо и намалява над източния субтропичен и северния Атлантически океан в средните ширини съответно през лятото. За първата половина на 20-ти век във вековите реанализи съществуват несъответствия що се отнася до ниско-честотните промени (бавните промени) (Befort et al., 2016). Като цяло съвременните набори от данни от реанализите подкрепят заключението на AR5, че няма ясен сигнал за тенденциите в силата и позицията на постоянните и сезонните центрове на действие на налягането от 50-те години на миналия век насам. Вместо това те подчертават многогодишни вариации. Глобалните характеристики на налягането на морско ниво се характеризират с моди в изменчивостта. (IPCC, 2021).

2.4. Наблюдавани промени в циркулацията през XX век

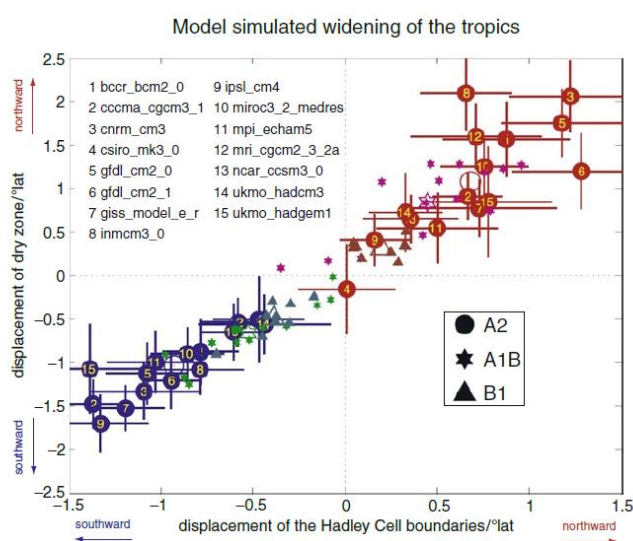
Силата, посока, и устойчивостта на преобладаващите ветрове са от решаващо значение за климата. Ветровете, свързани с атмосферната циркулация, водят до пренос на топлина и влага от отдалечени райони и по този начин значително променят локалните особености на климата. На някои ветрове са дадени и имена, като например западните ветрове в умерените ширини, пасатите, екваториалената зона на безветрие, ни напомнят колко са важни ветровете за климата на региона и за човешките общества, които живеят в тях (Reichler, 2009).

Два важни примера за такива промени: 1) промените на тропичната циркулация, свързани с разширяването към полюсите на клетките на Хадли и 2) промените на циркулацията в умерените ширини, проявена като отместване към полюсите на зоната на силни западни ветрове в умерените ширини, познати като засилена положителна фаза на ануларните моди. Въпреки че и двете промени са свързани с подобни премествания към полюса, не е ясно дали двете явления са пряко свързани.

Меридионалните циркулации, свързани с клетката на Хадли, са от значение и за извънтропичната циркулация. Например въздухът, който се движи към полюсите, движи въздуха към горния клон на клетката на Хадли и има тенденция за запазване на ъгловия момент, завъртайки част от високите зонални ветрове над затихващия клон на клетката на Хадли. Това е субтропичното струйно течение.

Една от най-съществените промени, които се наблюдават в меридионалната циркулация е разширяването на клетките на Хадли и Ферел към полюса.

В докладите на IPCC (2013) е описано, че моделите показват най-голямо увеличаване на тропиците в размерите на 0.7° ширина на десетилетие, за последните три десетилетия, което е в съответствие с наблюденията. Въпреки това, други модели симулират много по-малки стойности, а някои даже и отрицателни. Когато средната меридионална циркулация се използва като индикатор за тропичната граница, същите симулации, осреднени във всички модели, показват разширяване на 0.2° ширина на десетилетие през периода 1970-1999 (Фиг. 2.1). В най-новият IPCC (2021) доклад са използват проучвания след 2013 година спрямо които клетката на Хадли за последните 40 години се измества към полюса с около $0.1^\circ - 0.5^\circ$ на десетилетие (Allen and Kovilakam, 2017; Davis and Birner, 2017; Grise et al., 2018; Staten et al., 2018, 2020; Studholme and Gulev, 2018; Grise and Davis, 2020). Наблюдаваното разширяване на клетката на Хадли, се дължи предимно на изместването ѝ в Северното полукълбо към полюса.



Фиг. 2.1. Преместване на границите на клетката на Хадли към полюса и субтропичните сухи зони за няколко климатични модели по 3 различни климатични сценарии. Червените кръстчета се отнасят за северното полукълбо, а сините – за южното. (Li et al., 2007)

Циркулацията в умерените ширини, също претърпява важни промени във връзка с климатичните промени, както се вижда от наблюдения и моделни резултати. Най-известните примери са т.нар. ануларни моди (Annular modes AM), които са доминиращите климатични осцилации в макромасщаб в умерените ширини (Thompson and Wallace, 2000).

И двете AM показват положителни тенденции в двете полукълба в последните десетилетия (Thompson et al., 2000, 2002). Те са свързани с по-ниско от нормалното налягане над полюсите, меридионалните премествания на циклоните и антициклоните на умерените ширини и съответно зоната на западните ветрове. Тези тенденции са причинени от увеличаване на емисиите на парникови газове и намаляване на озона в стратосферата (Kushner et al., 2001).

Промените в циркулацията в умерените ширини до голяма степен са свързани с тенденциите в тропическата циркулация.

2.5. Наблюдавани промени в глобалния приземен вятър

От десетилетия вятърът над сушата се измерва с анемометри в световен мащаб, но доскоро данните рядко са се използвали за анализ на тенденции.

В най-новия оценъчен доклад AR6 са актуализирани In situ набори от данни за вятъра и са подобрени процедурите за контрол на качеството, като е обърнато специално внимание на хомогенността и по-доброто запазване на истинските екстремни стойности (Dunn et al., 2012, 2014, 2016).

От 70-те години на миналия век, приземния вятър над сушата отслабва в световен мащаб, което е особено силно изразено в северното полукълбо, с ниска степен на сигурност след 2010 г. Различията между наличните оценки на скоростта на вятъра водят до ниска степен на увереност по отношение на тенденциите в световния океан като цяло, но повечето оценки показват засилване в световен мащаб през периода 1980-2000 г. и през последните четири десетилетия в Южния океан.

В Националния институт по метеорология и хидрология доста интензивно се работи по въпроса за климатичните промени в района на Черно море и Балканския полуостров, като повече е обърнато внимание на температурата и валежите, отколкото на циркулацията, което е основното в нашите проучвания.

3. Методология и източници на данни

3.1. Климатични реанализи и проекции

Данните за емисиите и концентрациите на парниковите газове се използват на входа на глобалните климатични модели, за да се изчислят глобалните климатични проекции. Моделирането на процесите се извършва чрез дискретизация на изследваните параметри в рамките на т.нар. 3-D моделна мрежа и с определени времеви стъпки (на 3, 6, 12 часа и т.н) за изследваните променливи, което позволява да се интегрират пространствените и времевите характеристики в единен пространствено-темпорален модел. Главният недостатък на глобалните климатични модели е относително ниската хоризонтална разделителна способност на резултатите от симулациите с тях (над 100 км). Възможно решение за проблемите, породени от относително ниската хоризонтална резолюция на глобалните модели, е моделирането да се концентрира към конкретен регион, представляващ интерес. Тъй като обаче в климатичната система няма териториални граници, очевидно е, че трябва едновременно да се поддържат общите характеристики на климатичната система, описани чрез глобалния модел, и едновременно с това да се увеличава пространствената резолюция за даден регион. В настояща дипломна работа са използвани резултати от регионален климатичен модел на базата на подход „нестинг“: При този подход се използва регионален модел, вграден в някой от глобалните модели (т.нар. Nested Limited-Area Model, NLAM). Така чрез регионалния модел се поддържа по-висока разделителна способност за ограничена територия, чиито странични граници са „вложени” в глобалния модел с по-ниска резолюция. Обикновено при моделирането на климатичните промени с регионални модели се правят последователно симулации с нарастваща хоризонтална резолюция – ~50 км, ~25 км, ~10-12 км, като при резолюцията от ~50 км се покрива площ от ~5000 × ~5000 км.

При моделирането на очакваните климатични промени към бъдещи времеви хоризонти най-вече се отчитат промените на парниковите газове. Счита се, че това е най-значимият принос на антропогенното влияние върху климата. Обикновено се използват стандартизирани набори от сценарии, които осигуряват сравнимост на резултатите от климатичното моделиране. Чрез сценариите се описват възможните траектории на бъдещото развитие на човечеството, които трябва да се вземат предвид на входа на използвания климатичен модел. Използването на различни сценарии при един и същи модел дава на изхода на модела различни резултати за очакваните климатични промени. Разработваните досега набори от сценарии като цяло са възприети с консенсус от международната научна общност, поради което са залегнали в публикуваните по различно време оценъчни доклади за изменението на климата, изготвяни от IPCC (FAR IPCC, 1990, SAR IPCC, 1995, TAR IPCC, 2001, AR4 IPCC, 2007, AR5 IPCC, 2013)

(http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml).

В настояща дисертация ще работим с два от сценариите използвани при изготвянето на предпоследния *Пети оценъчен доклад* на IPCC (IPCC AR5, 2013). (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>). Този набор от сценарии е известен като

„Представителни пътища на концентрациите” (Representative Concentration Pathways, RCPs).

RCP сценариите, използвани в AR5, са отправна точка поне до 2020 г. за всички научни изследвания в областта на климатичните промени, както и за разработването на анализи, стратегически документи и политики за адаптиране и смекчаване на последиците от очакваните изменения на климата в страните от целия свят, вкл. в страните от Европейския съюз. В дипломната работа са използвани резултати от сценариите RCP4.5 и RCP 8.5.

В шестия оценъчен доклад се използва нов набор от сценарии т.нар социално-икономически сценарии (SSP) на парниковите емисии, като са използвани симулации от CMIP6 (Eyring et al., 2016). Сценариите са изготвени на база съображения за възможни социално-икономически развития, на база степен предприети мерки срещу промените в климата, мерки за контрол на замърсяването на въздуха.

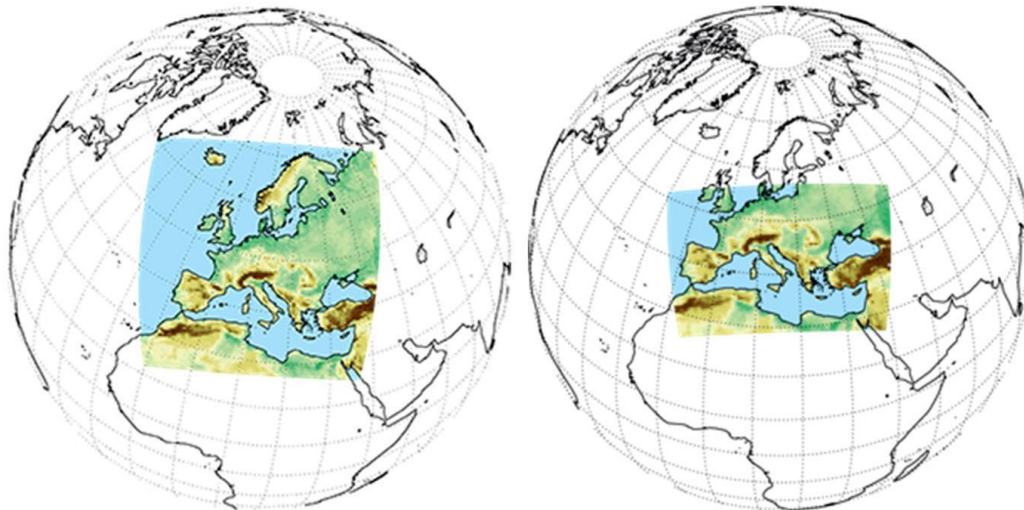
Ключовото предимство на SSP сценариите в сравнение с RCP сценариите е по-широкият обхват на допускания върху мерките за качество на въздуха, а оттам и за краткосъществуващите газови съставки на въздуха, които са климатични фактори (Rao et al., 2017; Lund et al., 2020).

Въпреки разработения нов набор от сценарии, в AR6 са използвани и SSP сценариите и RCP сценариите за симулации на бъдещия климат.

Числените модели оценяват очакваните климатични промени като разлика между получената стойност на климатичната променлива за съответен бъдещ период и стойността ѝ през някакъв исторически период, приет за базов (или референтен). За сравнение се използват резултатите от т. нар. метеорологични реанализи „*reanalysis*” (повторен анализ) на историческите данни от наблюденията.

Масщабни проекти за сравнение на глобални климатичните проекции, оценени от различни метеорологични центрове и екипи от учени са например Climate Models Intercomparison Project (CMIP3) и последвалия го CMIP5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>). Над 40 глобални модела участват в сравнението. Подобни проекти за сравнение на регионални климатични модели са ENSEMBLE, CECILIA и CORDEX.

Един от мащабните проекти е CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Той е инициран през 2009 г. от Световната програма за изследване на климата към Световната метеорологична организация. Целта на проекта CORDEX е да се създаде единна координирана международна рамка за осъществяване на симулации за климатичните проекции за различни части на света с регионални модели. Използват се архивите на CMIP5 за RCP сценариите по Петия оценъчен доклад на IPCC (IPCC AR5, 2013) и множество нови глобални и регионални модели. В регионален аспект проектът включва под-проекти, покриващи 13 региона в света, в два от които попада територията на България – Регион 4. Европа и Регион 12. Средиземноморие (Фиг. 3.1).



Фиг. 3.1. Региони, в които попада територията на България по проекта CORDEX

В настоящата дисертация са използвани симулации от модела ALADIN 5.2 регионален модел. ALADIN 5.2 е локална версия на френския глобален модел ARPEGE, разработван от CNRM, Météo-France. Използва Ламбертова конформна проекция и има 31 вертикални нива. Моделът е центриран към координати: LON0=15°E, LAT0=43°E. Захранването на модела става със стъпка всеки 6 часа от глобалния климатичен модел от CMIP5 CNRM-CM5. Пространственият домейн на модела е 10° з.д., 50° и.д., 60° с.ш. и 25° ю.ш. В радиационната схема са включени всички класове парникови газове – CO₂, CH₄, N₂O, CFC11, CFC12. Моделът съдържа шест класа аерозоли – пустинен прах, морска сол, сулфати, карбон, органични аерозоли, вулканичен прах. Продължителността на настройването на модела (spin-up) е две моделни години. В Таблица 2.1 са дадени основните характеристики на пространствената мрежа на модела, както и литературни източници за подмрежовите процеси.

Таблица 2.1. Основни характеристики на регионалния климатичен модел Aladin 5.2.

ALADIN 5.2	
Институт	Météo-France
Резолуция на мрежата	0.11° x 0.11°
Грид (ширина/дължина)	432*288 (total grid number)
Вертикални нива	31
Схема за граничен слой	Ricard and Royer 1993
Ширина на зона за релаксация	8
Конвекция	Mass flux, Bougeault 1985
Микрофизика на облаците	Ricard and Royer 1993
Радиационен обмен	Morcrette 1990
Схема на земната повърхност	Douville et al 2000
Основна референция	Colin et al. 2010; Herrmann et al. 2011

Данните за целият район Балкански полуостров и Черно море са изтеглени от интернет-страницата на проект Med-Cordex <http://www.medcordex.eu>. Данните са свободни, като се изисква регистрация. Общият обем на данните е ~ 5 GB. Резултатите са обработени и визуализирани с Grid Analysis and Display System (GrADS) ver. 2.0.9a

3.2. Данни от наблюдения

При изследването на зимните условия в района на Черно Море, синоптичните данни за температурата на въздуха на 2m височина са събрани от 9 брегови метеорологични станции по крайбрежието на Черно море – Бургас, Варна, Одеса, Херсон, Мариупол, Батуми, Трабзон, Синоп и Истанбул. Източникът на данни са редовните доклади SYNOP, разпространявани от архива с данни на Global Surface Summary of the Day (GSOD) на адрес ncei.noaa.gov. Данните обхващат периода от 1950 г. до днес, но има много пропуски, особено в началото на периода.

Данните за размера на морския лед са взети от продукта на Националния център за данни за сняг и лед на САЩ Multisensor Analysed Sea Ice Extent—Northern Hemisphere (MASIE-NH) (<https://nsidc.org/data/g02156>). Това осигурява ежедневни данни за морския лед от 1 януари 2006 г. до момента за Северното полукълбо и 16 арктически региона в полярна стереографска проекция. (NICNSIDC, 2010 г.).

Историческите архиви и литературата за ледената покривка на Черно море и температурата на въздуха през 20 век са взети от „Черно море” том 4 от поредицата книги „Хидрометеорология и хидрохимия на моретата на СССР”, глава IV.5, „Лед” (Симонов и Алтман, 1991). Доколкото ни е известно, това е най-изчерпателният анализ на ледената покривка на Черно море. За съжаление, данните обхващат периода само до 1985 г. и обработката не е добре документирана.

Комбинирали сме метеорологични карти на геопотенциална височина от 500 hPa, налягане на морското ниво и относителна топография, с разлика между 500 и 1000 hPa в геопотенциална височина, копирани от wetter3.de. Те се използват за представяне на синоптичните условия за няколко случая на интензивно замръзване.

За да категоризираме качествено колко студена е била зимата, сме следвали подхода на Симонов и Алтман (1991), както и Крайдин: индексът на суровостта на зимата (WSI) се определя като сбор от отрицателните дневни температурни стойности (замръзнали дни) от декември до март за всяка от 9-те станции. Зимите се считат за меки, умерени или студени, като се използват праговите стойности от 200 и 400 °C.

Изчислили сме линейните трендове в графиките, като сме написали точките от данни с линеен полином, използвайки `gnuplot` имплементацията на нелинейния алгоритъм на най-малките квадрати на Марквард–Левенберг.

Целта на това проучване е да комбинира различни източници на данни за ледената покривка на морето и температурата на въздуха, за да проучи скорошното замръзване и като цяло междугодишната променливост през последните десетилетия.

3.3. Оценка на моделните симулации за района на Черно море Балканския полуостров за съвременния климат (1979 – 2005)

За да оценим доколко може да се вярва на моделните симулации за бъдещето през 21-ви век в тази глава е направено сравнение на резултатите за температурата, валежите, налягането на морско ниво и скоростта на приземния вятър на числените симулации на Aladin 5.2 и метеорологичния реанализ ERA-Interim за съвременния климат. Тъй като

метеорологичният реанализ е с доста по-груба разделителна способност (0.75 спрямо 0.11°) е направена процедура за прехвърляне на данните от по-грубата в по-фината мрежа, отчитайки моделната топография. Това е направено от разработчиците на модела, които предоставят и така процесирани данни от реанализ. Периодът на припокриване на данните е 1979-2005 г., който наричаме „исторически период“, и за него са направени сравненията.

За мярка на отклонението на моделните резултати от наблюденията са взети статистическите величини BIAS и RMSD (Root Mean Squared Deviation):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i^m - X_i^r)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N (X_i^m - X_i^r) \right)^2}$$

където

i - точките от моделната мрежа, покриващи територията на Балканския полуостров

N - общ брой на точките

X_i^m – данните за температура, количество валеж, налягане на морско ниво или приземен вятър от модела Aladin

X_i^r – данните за температура, количество валеж, налягане на морско ниво или приземен вятър от реанализа ERA-Interim

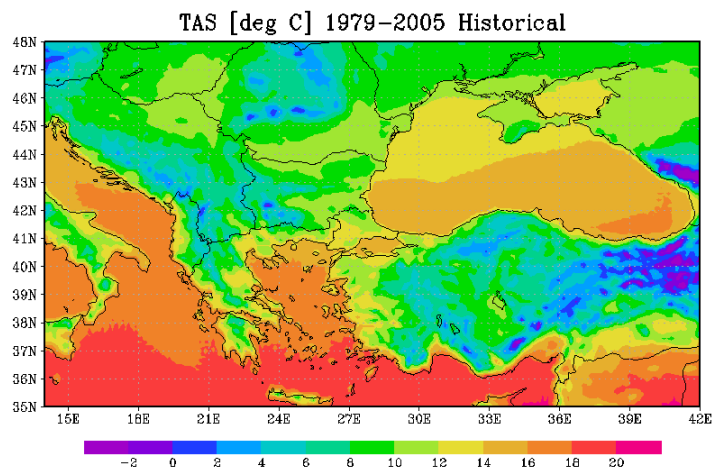
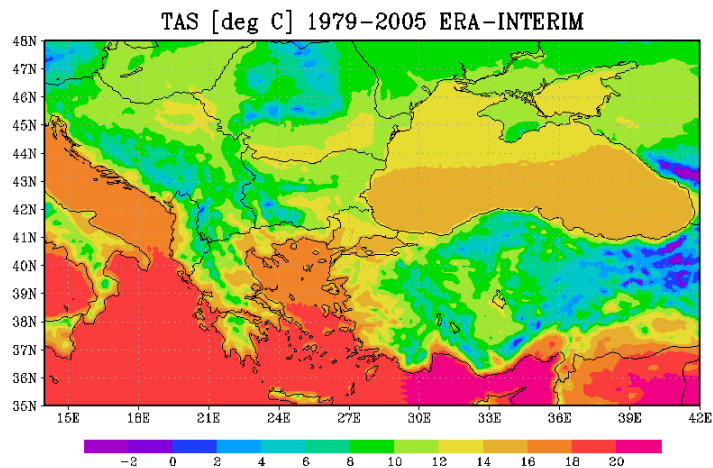
Според теорията на статистическия анализ, отклонението BIAS показва тенденцията за подценяване или надценяване на величината (качествена оценка), докато RMSD оценява абсолютната стойност на грешката (количествена оценка).

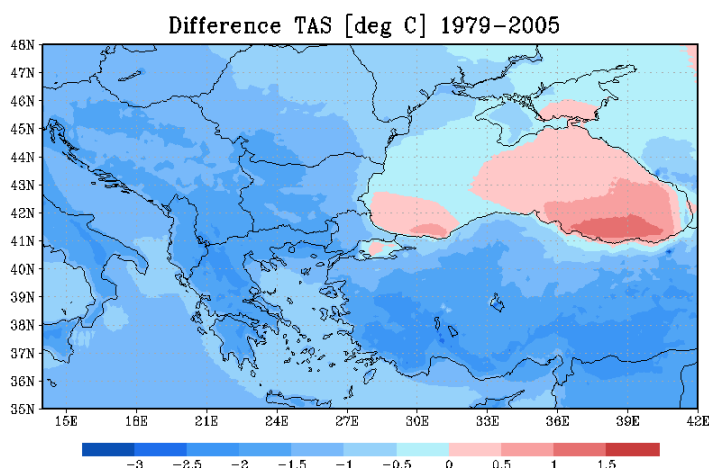
4. Промени на климата в региона Балкански полуостров-Черно море в настоящето (период 1979-2005)

4.1. Сравнение на температурата от моделните симулации и метеорологичния реанализ.

4.1.1. Средни за периода характеристики на температурата.

На Фиг 4.1 (а) и (б) е показана средната приземна температура за периода 1979-2005, като Фиг 4.1 (а) показва резултат от реанализа ERA-INTERIM, а Фиг 4.1 (б) резултат от модела ALADIN 5.2.





6

Фиг. 4.1. Сравнение между симулациите на Aladin 5.2 и данните на ERA Interim за средната температура за периода 1979-2005 г.

На двете фигури, като изключим планинските райони, над сушата на Балканския полуостров, стойностите на средната температура варират между 8°C и 14°C , като на Фиг 3.1 (а) областите където средната температура достига стойности над 12°C са малко повече отколкото са на Фиг 3.1 (б). На Фиг 3.1(б) температури над 12°C се забелязват само на юг, по бреговете на Гърция, докато на Фиг 3.1 (б) се забелязват такива области и в по-северната част на Балканския полуостров. Това се вижда и на Фиг 3.1 (в), където е показана разликата между Фиг 3.1 (а) и (б) за дадения период. Моделът над сушата подценява с около 2°C стойностите на средната приземна температура. Подобен резултат се наблюдава и за Средиземно море – средната температура над морето варира между 16°C - 18°C , като моделът малко подценява стойностите с около 0.5°C - 1.5°C . Различен резултат се наблюдава над югозападната, източната и югоизточната част на Черно море, където се вижда, че моделът надценява стойностите от реанализа с 0.5°C - 1°C в югозападната, с около 0.5°C в източната част и с до около 1°C - 1.5°C в югоизточната част на Черно море. В Таблица 4.1 се вижда, че за целия взет район BIAS е отрицателен. Този анализ е направен и по сезони, като резултатите са систематизирани в Таблица 4.1.

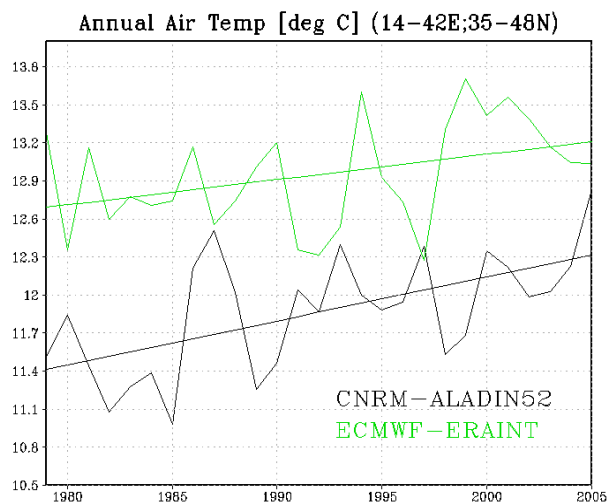
В Таблица 4.1 се вижда, че за целият период и за всички сезони върху цялата област, BIAS е отрицателен – моделът дава по-ниски стойности от реанализа, като моделът е най-точен за зимата (стойностите най-много се доближават до стойностите от реанализа) и най-неточен за лятото, що се отнася за средната температура на 2м височина. Синята гама показва, че моделът подценява реанализа, а червената - че моделът надценява реанализа. Яркостта на цвета расте с неточността на модела - колкото по-голяма е разликата спрямо реанализа, толкова по-ярък е цветът – по-син или по-червен.

Осреднена разлика на приземната температура за периода 1979-2005	Температура BIAS [°C]	Температура RMSD [°C]
Целия период	-1.08	1.29
Зима	-0.69	1.04
Пролет	-1.37	1.58
Лято	-1.30	1.86
Есен	-0.97	1.20

Таблица 4.1. Моделен BIAS и RMSD на температурата за площта на Балканския полуостров и района на Черно море за целия период 1979-2005 и по сезони.

4.1.2. Междугодишен ход на температурата

След като разгледахме средните характеристики за целия период, трябва да обърнем внимание дали моделът представя адекватно междугодишния ход на средната температура. За целта данните от моделните симулации и реанализа за осреднени за всяка година от разгледания период, като отново фокусът е само върху района на Черно море и Балканския полуостров. Резултатът е даден на Фиг. 4.2.



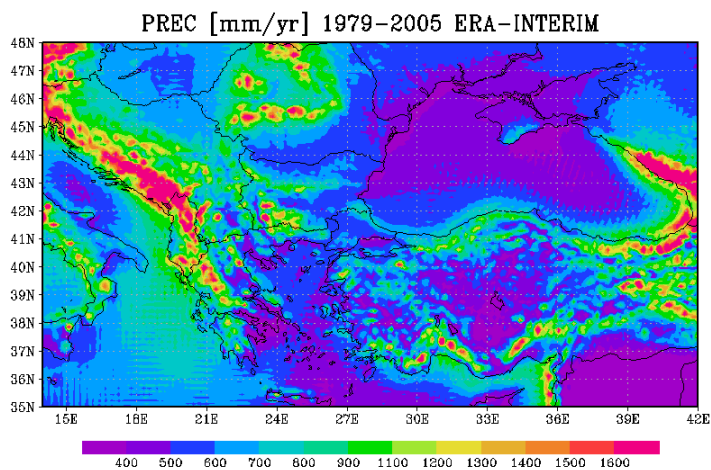
Фиг. 4.2. Сравнение на междугодишния ход на средната температура за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации (черно) и метеорологичния реанализ (зелено). Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

На Фиг 4.2 кривите от моделните симулации (черно) и метеорологичния реанализ (зелено) не си приличат много, даже на повечето места са противофазни, но изчисленият линеен тренд и в двата случая показва повишение на средната температура за дадения период, като при моделните симулации повишението на средната температура е $0.9^{\circ}\text{C}/26\text{год}$ за дадения период (2079-2005 г.), а при метеорологичния реанализ $0.5^{\circ}\text{C}/26\text{год}$ за същия период, обаче стойностите на осреднената температура от реанализа са малко по-високи спрямо тези от модела.

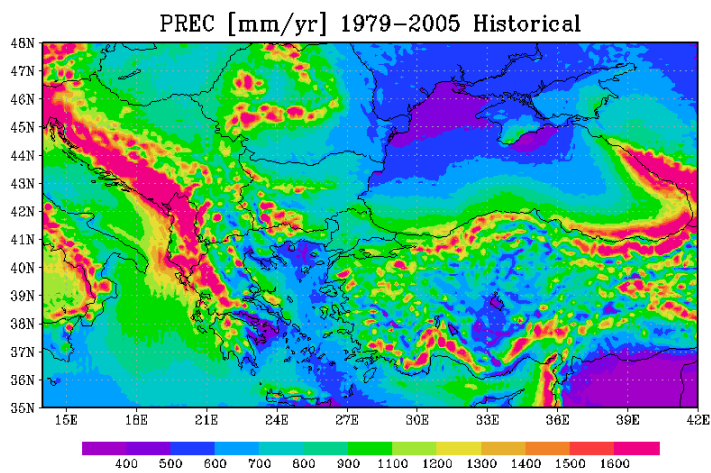
4.2. Сравнение на валежите от моделните симулации и метеорологичния реанализ.

4.2.1. Средни за периода характеристики на валежите.

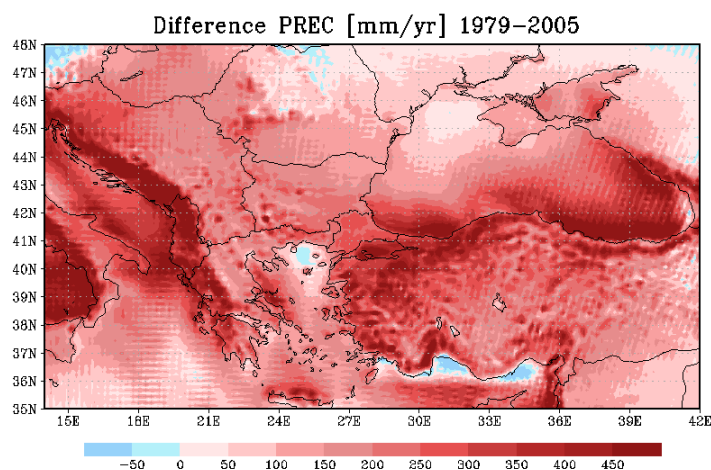
На Фиг 4.3 (а) и (б) е показано средното количество валежи за периода 1979-2005, като Фиг 4.3 (а) показва средното количество валежи от реанализа, а Фиг 4.3 (б) – от регионалния климатичен модел ALADIN 5.2.



a



б



6

Фиг. 4.3. Сравнение между симулациите на Aladin 5.2 и данните на ERA Interim за средното количество валежи за периода 1979-2005 г.

На сушата добре се идентифицират планинските райони, където количеството валежи е по-голямо, на повечето места над 1500 мм/година. Извън планинските райони, средното количество валежи на сушата на Балканския полуостров е между 600 мм/г до около 1000 мм/г, без западната част на Балканския полуостров, където стойностите са над 1600 мм/г поради оргографските валежи по планинската верига Динар-Пиндус. Данните от модела дават малко по-високи стойности на средното количество валежи, което се вижда и на Фиг 4.3 (в) където е показана разликата между моделните данни и данните от ERA-INTERIM (между Фиг 4.3 (а) и Фиг 4.3 (б)). Над Черно и Средиземни море средното количество валежи за дадения период е по-ниско отколкото над сушата, като отново моделът надвишава стойностите, като това е по-значително в южните части на Черно море - с около 400 мм/г. Забелязват се и няколко области, където моделът леко подценява средното количество валежи, с около 50 мм/г. Това са областите в Средиземно море по бреговете на Южна Турция и в северната част на Егейско море. В Таблица 3.2 се вижда, че BIAS за разглеждания район е положителен. Този анализ е направен и по сезони, като резултатите са систематизирани в Таблица 4.2.

В Таблица 4.2 са дадени BIAS и RMSD за средното количество валежи за целия период и отделно за всеки сезон за съвременния климат. Червената гама показва, че моделът надценява реанализа, а яркостта на цвета расте с неточността на модела - колкото е по-голяма надценката спрямо реанализа, толкова по-ярък е цвета. Съответно виждаме, че за лятото моделът е най-неточен, доста повече отколкото за другите сезони, като неточността намалява в следния ред – есен, пролет, зима където разликите между модела и реанализа са най-ниски. Това показва, че най-неточно са симулирани валежите от термична конвекция.

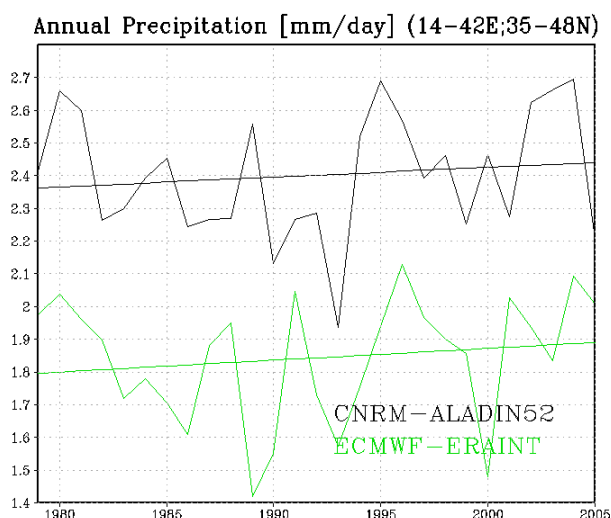
Осреднена разлика на валежите за периода 1979-2005	Валежи BIAS [mm/yr]	Валежи RMSD [mm/yr]
--	---------------------	---------------------

Целия период	202.9	241.8
Зима	33.9	236.7
Пролет	134.7	182.9
Лято	438.3	544.3
Есен	204.8	246.4

Таблица 4.2. Моделен BIAS и RMSD на валежите за площта на Балканския полуостров и района на Черно море за целият период 1979-2005 и по сезони.

4.2.2 Междугодишен ход на валежите

На Фиг 4.4 е представен междугодишният ход на валежите спрямо модела ALADIN5.2 и спрямо реанализа ERA-Interim. Наблюдават се години където двете криви си приличат и са във фаза, като например 1980, 1993 и 2004, но се наблюдават и години в които кривите са в противофаза, като 1988 и 2000 година. Въпреки разликите в кривите, линейният тренд и за модела и за реанализа е положителен – нараства с времето, като трендът от модела е 1.04 мм/26год, а от реанализа 2.34 мм/26год.



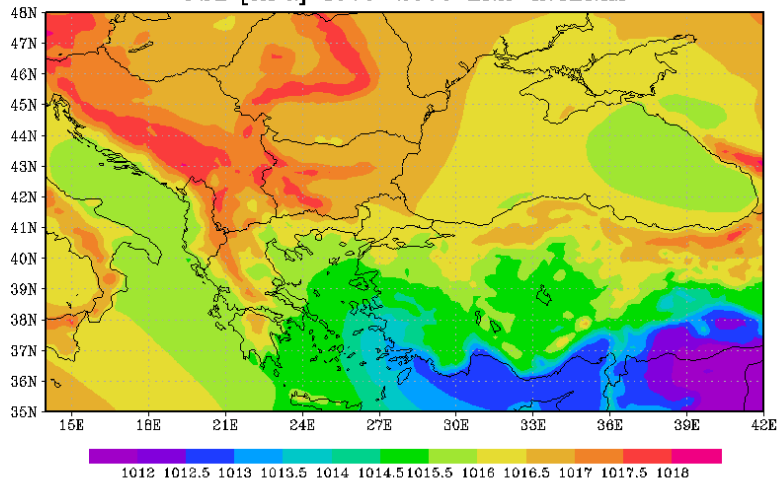
Фиг. 4.4. Сравнение на междугодишния ход на средното количество валежи за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации (черно) и метеорологичния реанализ (зелено). Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

4.3. Сравнение на налягането на морско ниво от моделните симулации и метеорологичния реанализ.

4.3.1. Средни за периода характеристики на налягането на морско ниво.

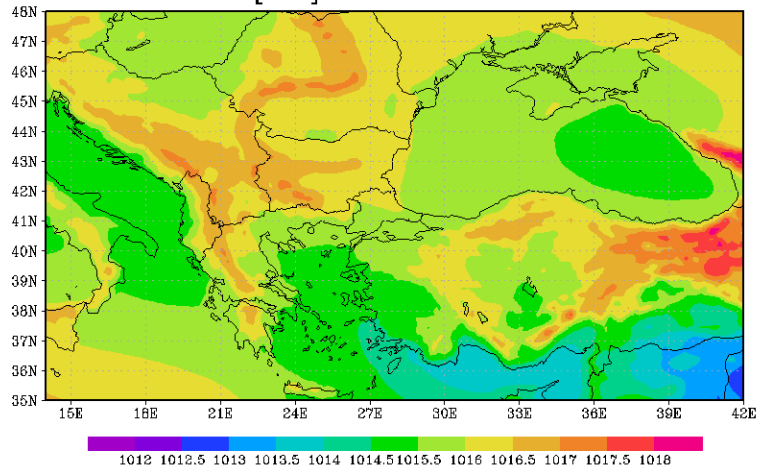
На Фиг 4.5 са дадени карти на осредненото налягане на морско ниво за периода 1979-2005 г. по ERA-Interim (а), Aladin 5.2 (б) и разликата модел минус данни (в).

PSL [HPa] 1979–2005 ERA-INTERIM



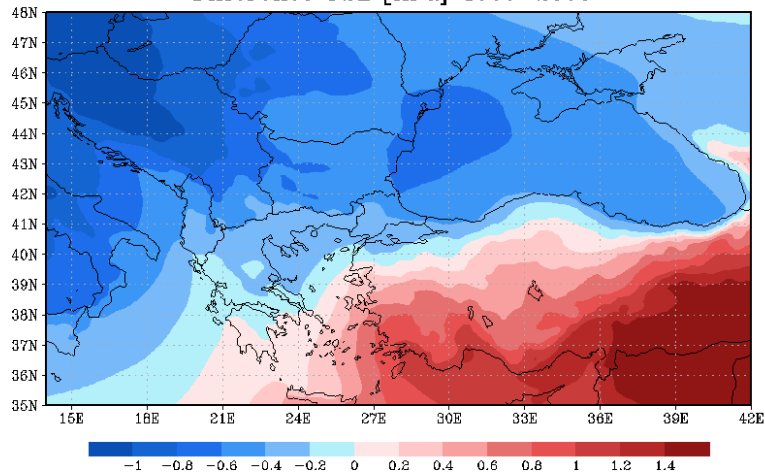
a

PSL [HPa] 1979–2005 Historical



b

Difference PSL [HPa] 1979–2005



c

Фиг. 4.5. Сравнение между симулациите на Aladin 5.2 и данните на ERA Interim за средното налягане на морско ниво за периода 1979-2005 г.

На Фиг 4.5 (а) средното приземно налягане над сушата на Балканския полуостров е между 1016.5 hPa и 1017.5 hPa, докато на Фиг 4.5 (б) за същата област то е понижено с около ½ hPa, което се вижда добре на Фиг 4.5 (в). В южните части на Гърция разликата между моделните стойности и реанализа е по-малка – около 0.2 hPa. И на двете карти (а) и (б) добре се вижда, че налягането зонално намалява в Средиземно море, посока запад-изток, което се получава заради високото налягане от Азорския максимум на запад и ниското налягане от Малоазиатската депресия на изток. На Фиг 4.5 (в) се вижда, че в Средиземно море моделът започва да надценява налягането, като движейки се на югоизток към Мала Азия разликата между модела и реанализа става все по-голяма, достигайки 1.4 hPa. Над западната част на Черно море средното приземно налягане е с около 0.5 hPa по-ниско отколкото над сушата на Балканския полуостров и около 1 hPa в източната. На Фиг 4.5 (в) се вижда, че моделът подценява стойностите на средното приземно налягане, като в западната част на морето разликата е около 0.8 hPa, а в източната част около 0.4 hPa. Бихме могли да обобщим, че в моделните симулации има засилен център на ниско атмосферно налягане Исландски минимум и подценяване на ниското налягане на Малоазиатската депресия. Този анализ е направен и по сезони, като резултатите са систематизирани в Таблица 4.3.

В Таблица 4.3 са дадени моделният BIAS и RMSD на осредненото налягане на морско ниво. Червената гама показва, че моделът надценява реанализа, което се наблюдава само през зимата, а синята, че моделът подценява реанализа – наблюдава се през всички останали сезони, както и за целия период. Яркостта на цвета расте с неточността на модела - колкото е по-голяма разликата спрямо реанализа, толкова по-ярък е цвета. Съответно виждаме, че за лятото и есента моделът греша най-малко, като BIAS е отрицателен, след това грешката е малко по-голяма през зимата, където BIAS е положителен и виждаме, че за пролетта разликата е най-голяма спрямо реанализа, като BIAS е отново отрицателен.

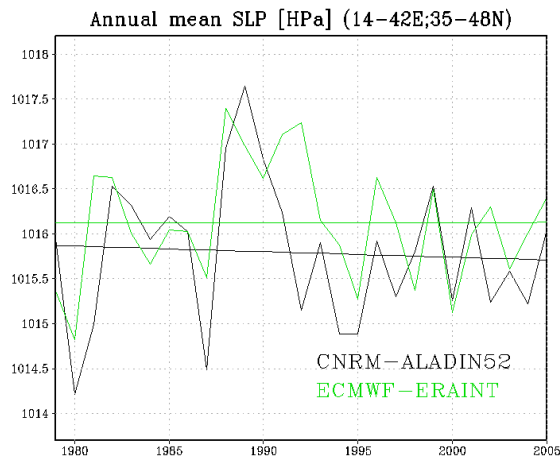
Осреднена разлика на приземното налягане за периода 1979-2005	Налягане BIAS [hPa]	Налягане RMSD [hPa]
Целия период	-0.10	0.73
Зима	0.90	1.56
Пролет	-0.87	0.98
Лято	-0.20	0.75
Есен	-0.23	0.67

Таблица 4.3. Моделен BIAS и RMSD на налягането на морско ниво за площта на Балканския полуостров и Черно море за целият период 1979-2005 и по сезони.

4.3.2. Междугодишен ход на налягането на морско ниво.

На Фиг 4.6 е даден междугодишният ход на приземното атмосферно налягане за целия период. Вижда се, че двете криви си приличат доста и почти навсякъде са във фаза,

като изключим 1993 и 2003 година където са в противофаза. През 1998 кривите съвпадат напълно. Странното е, че линейният тренд в реанализа е постоянен, докато при модела трендът намалява с около 0.2hPa/26 год.

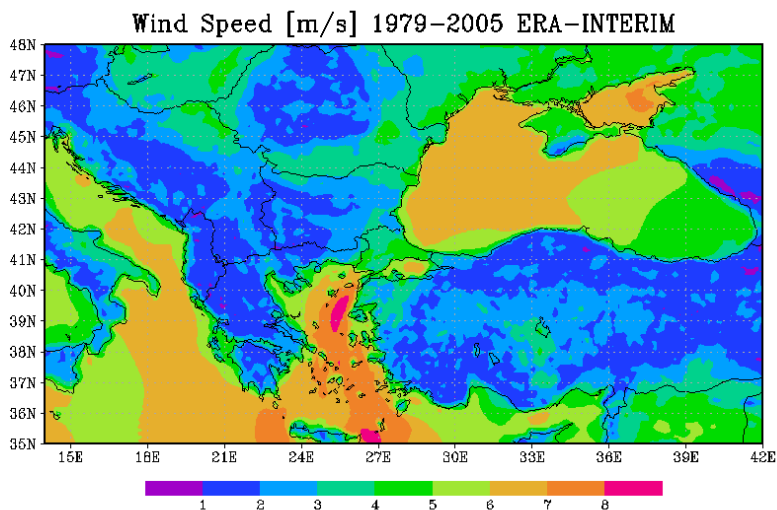


Фиг. 4.6. Сравнение на междугодишния ход на средното налягане на морско ниво за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации (черно) и метеорологичния реанализ (зелено). Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

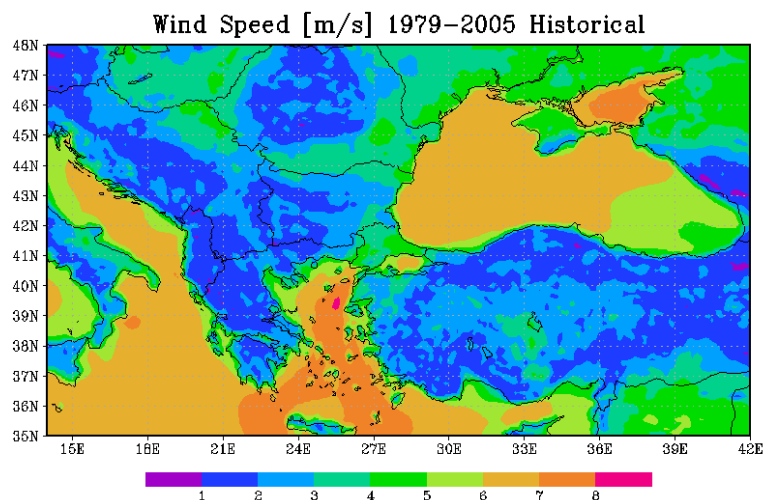
4.4. Сравнение на скоростта на приземния вятър от моделните симулации и метеорологичния реанализ.

4.4.1. Средни за периода характеристики на приземния вятър.

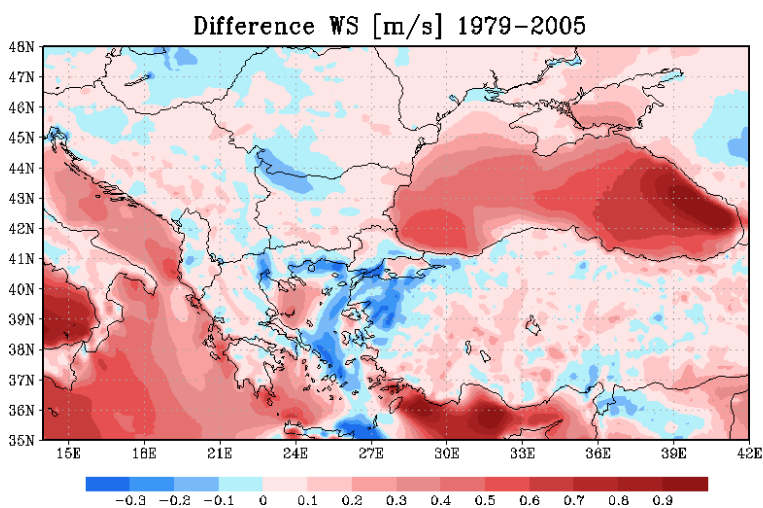
Фиг 4.7 показва осреднената скорост на вятъра за периода 1979-2005 г. по моделните симулации на Aladin 5.2 (а), по реанализа ERA-Interim (б) и разликата модел минус реанализ (в).



a



б



в

Фиг. 4.7. Сравнение между симулациите на Aladin 5.2 и данните на ERA Interim за приземния вятър за периода 1979-2005 г.

Между Фиг 4.7 (а) и Фиг 4.7 (б) има добра прилика - и моделът и реанализът дават подобни стойности на средната приземна скорост на вятъра за сушата на Балканския полуостров – между 1 м/с и 3 м/с, което се вижда и на фиг в – разликата между модела и реанализа е много малка, ± 0.1 м/с. Средната скорост на вятъра над моретата е по-висока отколкото тази на сушата, около 6 м/с - 7 м/с, като в северната част на Егейско море се наблюдава област със средната скорост на вятъра от около 8 м/с. В западната част на Черно море средната скорост на приземния вятър е по-ниска – 4 м/с - 5 м/с. Над водните басейни разликата между модела и реанализа е малко по-голяма, отколкото тази на сушата. В Черно море моделът надценява стойностите от реанализа с около 0.4 м/с в по-голямата част на морето, като в източната част скоростта се увеличава и достига 0.9

м/с. В северната и източната част на Егейско море моделът подценява средната скорост на приземния вятър с около 0.2 м/с - 0.3 м/с, както и в Средиземно море източно от Крит. В останалата част на Средиземно море моделът отново надценява стойностите от реанализа, като най-голяма разлика се наблюдава под югозападната част на турския бряг. За целия взет район изчисленият BIAS е положителен, което се вижда в Таблица 3.4. Този анализ е направен и по сезони, като резултатите са систематизирани в Таблица 4.3.

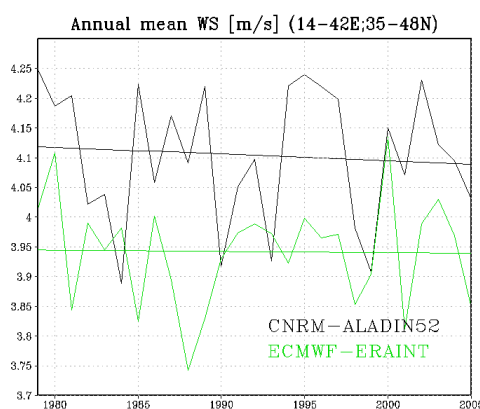
В Таблица 4.4 е даден BIAS и RMSD за целия период, както и за всеки сезон. Червената гама показва, че моделът надценява реанализа, а яркостта на цвета расте с неточността на модела - колкото е по-голяма надценката спрямо реанализа, толкова по-ярък е цвета. Съответно виждаме, че за лятото и есента моделът греша най-малко, като за зимата и най-вече за пролетта грешката расте. Вижда се, че за целия период грешката е между стойностите на зимните и стойностите на летните месеци.

Осреднена разлика на приземния вятър за периода 1979-2005	Вятър BIAS [m/s]	Вятър RMSD [m/s]
Целия период	0.17	0.29
Зима	0.21	0.37
Пролет	0.36	0.47
Лято	0.04	0.35
Есен	0.05	0.24

Таблица 4.4. Моделен BIAS и RMSD на приземния вятър за площта на Балканския полуостров за целия период 1979-2005 и по сезони.

4.4.3. Междугодишен ход на приземния вятър

На Фиг 4.8 е даден междугодишният ход на средната скорост на приземния вятър. Кривите не си съвпадат много, като най-много прилика се наблюдава 2000 година, като след 2000 кривите са във фаза. Линейният тренд, и от модела, и от реанализа показва лек спад на средната скорост на приземния вятър за периода 1979 – 2005 г., като спрямо модела този спад е 0.04 м/с/26год, а спрямо реанализа 0.01м/с/26год.



Фиг. 4.8. Сравнение на междугодишния ход на приземния вятър за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации (черно) и метеорологичния реанализ (зелено). Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

5. Проекция на климата в региона Балкански полуостров и Черно море до края на 21-ви век.

На базата на получените оценки за способността на моделът Aladin 5.2 да симулира климатът в района на Черно море и Балканския полуостров ще направим заключения за бъдещите климатични изменения, които могат да се очакват през 21-ви век. В тази глава са представени резултатите получени от симулациите на климата по два използвани сценария: RCP4.5 и RCP8.5. Настоящият век е разделен на три 30-годишни периода: 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.

Получените резултати за очакваните климатични промени се отнасят до средните стойности за температурата на 2м височина, валежите, приземното налягане и приземния вятър на база осреднените им стойности за определените периоди и за съответните сценарии, спрямо историческия период 1979-2005 година.

5.1. Очаквани промени в температурата

5.1.1 Очаквани промени в температурата на 2м височина за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.

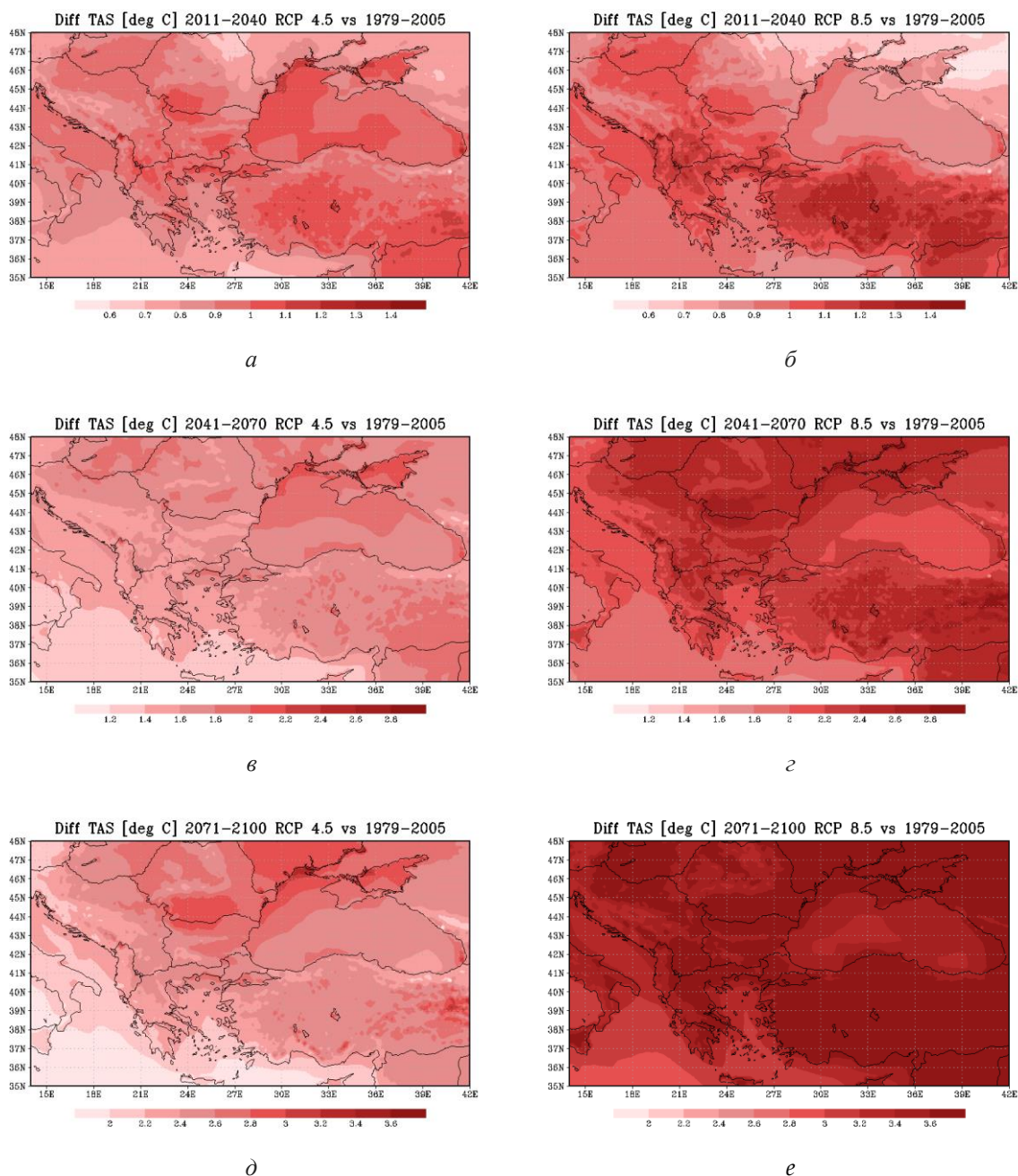
На Фиг. 5.1 в са дадени карти на разликите на средната температура спрямо историческия период по сценарий RCP 4.5 (*a, в, д*) и сценарий RCP 8.5 (*б, г, е*) за трите бъдещи периода – (*a*) и (*б*) за периода 2011-2041, (*в*) и (*г*) за периода 2041-2070 и (*д*) и (*е*) за периода 2071-2100.

И по двата сценария, за всички времеви периоди се очаква средните стойности на температурата да се повишат, което е логично с хода на глобалното затопляне.

За първия бъдещ периода по RCP4.5, на Балканския полуостров се очаква температурата да се повиши с около 1°C, а в Мала Азия с около 1.1°C, докато за RCP8.5 за същите региони повишението е съответно 1,1°C за Балканския полуостров и около 1,2°C за Мала Азия. Над по-голямата част от морските басейни повишаването на средната температура се очаква да се случи малко по-бавно отколкото това над сушата. За Средиземно море по RCP4.5 моделът показва, че температурата би трябвало да се повиши с около 0,8°C - 0,9°C, докато по RCP8.5 – около 1°C. Странна картина се получава за Черно море, където сценарий RCP4.5 дава малко по-високи стойности за средната температура над морето, отколкото RCP8.5, съответно 0,9°C - 1°C и 0,8°C.

За периода 2041-2070 разликата между двата сценария (*в*) и (*г*) е доста по-съществена, отколкото за първия период 2011-2040. По RCP4.5 в южната част на Балканския полуостров и Адриатическо море повишението се очаква да е с около 1,6°C, в Средиземно море около 1,2°C, в северната част на Балканския полуостров, Мала Азия и Черно море моделът предвижда температурата да се повиши с около 1,8°C, като на места достига и 2°C (северната част на Черно море и на изток в Мала Азия). Най-голяма разлика се наблюдава в областта на Азовско море и северното крайбрежие на Черно море с около 2,2°C. За песимистичния сценарий разликите са още по-високи. За целият Балкански полуостров и Мала Азия разликата спрямо историческия период е 2°C - 2,4°C. Над Средиземно море по RCP8.5 средната температура се очаква да се повиши с около 1,8°C - 2°C, а в Адриатическо море и източната част на Черно море с около 2°C - 2,2°C. В западната част на Черно море разликата нараства и достига около 2,4°C, като на север

и до 2,6°C. В Азовско море симулациите показват, че също с около 2,6°C се очаква да се повиши температурата по песимистичния сценарий.



Фиг. 5.1. Сравнение по RCP 4.5 и RCP 8.5 за средната температура за периода 2011-2040 г. (а,б), 2041-2070 г. (в,з) и 2071-2100 г. (д,е) спрямо историческия период 1979-2005 г.

За последния период (д) и (е) разликите са най-съществени, както между двата сценария, така и спрямо историческия период. По RCP4.5 се очаква средната температура да се повиши с около 2,4 °C - 2,6°C на Балканския полуостров и Черно море, като в северната част на Черно море и над 3°C. Над Средиземно море се очаква повишението на средната температура да е около 2°C. За сценарий RCP8.5 на Фиг 4.3

(д) се вижда, че почти навсякъде се очаква температурата да се повиши с над 3°C, като на повечето места надвишава 3,6°C. Такова нарастване на температурата би повлияло на изключително много неща – например едно от ези неща е екосистемата - много от растенията и животните биха рязко намалили броя си, а някои би изчезнали. Също е вероятно да се стигне до недостиг на вода в голмите градове, засушаване на някои места, наводнения на други.

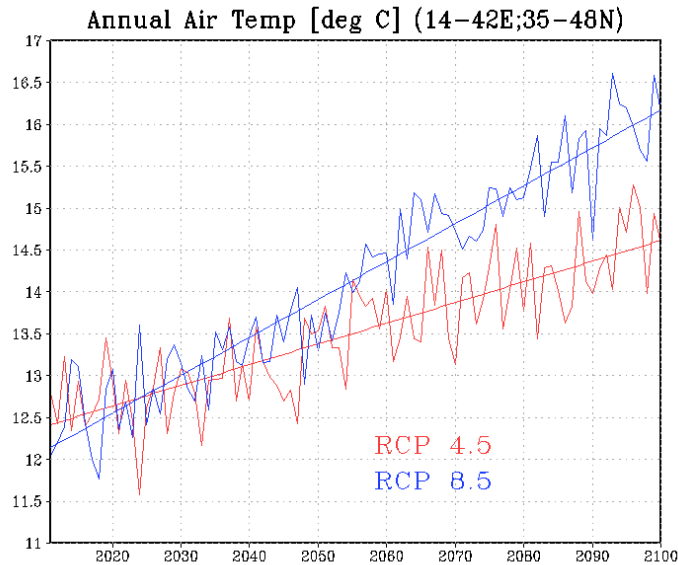
В Таблица 5.1 е даден BIAS и RMSD за всеки от трите периода и по двата сценария спрямо историческия период. Червената гама показва, че симулациите показват повишение на температурата за всички периоди и за трите бъдещи периода. Колкото по ярък е цвета, разликата спрямо настоящия период е по-голяма. В таблицата се вижда добре, че за всеки сценарий, всеки следващ период се очаква да е по-топъл спрямо съвременния климат, като за RCP8.5 разликите са по-големи.

Разлика спрямо историческия период 1979-2005	Температура BIAS [°C]	Температура RMSD [°C]
RCP 4.5 2011-2040	0.90	0.91
RCP 4.5 2041-2070	1.64	1.65
RCP 4.5 2071-2100	2.42	2.43
RCP 8.5 2011-2040	0.96	0.98
RCP 8.5 2041-2070	2.27	2.28
RCP 8.5 2071-2100	3.65	3.67

Таблица 5.1. Стойности на средното и средноквадратичното отклонение на моделните резултати за температурата по двата сценария RCP 4.5 и 8.5 и трите тридесетилетия на 21-ви век, осреднени за площ, покриваща Балканския полуостров и Черно море.

5.1.2 Междугодишен ход на температурата по сценарии RCP4.5 и RCP8.5.

На Фиг 5.2 е даден междугодишният ход на температурата за целия бъдещ период 2011-2100 г. - сценарий RCP4.5 (червен цвят) и RCP8.5 (син цвят). Въпреки че двете криви на много места не съвпадат, ясно е видимо, че трендовете и за двата сценария нарастват във времето, като симулациите показват, че затоплянето доста по-бързо би се случило по RCP8.5. Линеиният тренд за RCP4.5 е 1,8°C /90год, което е 0,2 °C /10 год. По този малко по-оптимистичен сценарий средната температура през 2100 година се очаква да е около 14,2°C. Линеиният тренд за RCP8.5 е оценен с 4°C/90 год, което е 0,4°C/10 години. Това означава, че 2100 г. по изчисленията на симулациите, средната температура по този сценарий би достигнала стойност от 16,2°C, което е с 2°C повече отколкото по RCP4.5.



Фиг. 5.2. Сравнение на междугодинния ход на средната температура за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации за сценарий RCP 4.5 (червено) и сценарий RCP 8.5 (синьо) за периода 2011-2100 г. Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

5.2. Очаквани промени на средното количество валежи

5.2.1 Очаквани промени на средното количество валежи за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.

На Фиг. 5.3 са дадени карти на разликите спрямо историческия период по сценарий RCP 4.5 (а, в, д) и RCP 8.5 (б, г, е) за средното количество валежи за трите бъдещи периода – (а) и (б) за периода 2011-2041, (в) и (г) за периода 2041-2070 и (д) и (е) за периода 2071-2100.

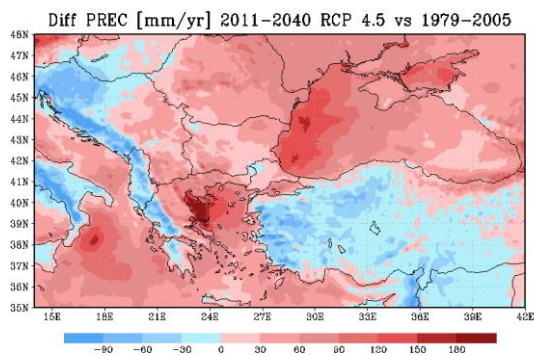
Доста по-трудно можем да направим проекция за валежите отколкото за температурата, тъй като по-трудно можем да определим промяната в средното количество валежи и в миналото, заради недостиг на досатъчно данни (IPCC, 2021).

На първия ред на Фиг 5.3 (а) и (б) са дадени разликите по двата сценария спрямо историческия период за периода 2011-2040. Картините са доста сходни. Интересно е, че по RCP4.5 изпъкват няколко области където моделните симулации показват, че валежите ще се увеличат за първия бъдещ период който разглеждаме – в западната част на Егейско море – с около 180 мм/г и в западната част на Черно море с около 120 мм/г, докато по RCP8.5 за тези области се очаква малко по-малка промяна във количеството валежи спрямо историческия период – между 60-90 мм/г. В западната част на Балканския полуостров над Динарските Алпи и по двата сценария се очаква намаляване на средното количество валежи с около 90мм/г. В източната част на полуострова по RCP4.5 се очакват малко по-високи стойности на средното количество валежи, с около 30-60 мм/г, докато за RCP8.5 е наблюдават области където се очаква леко увеличение – с около 30 мм/г, но и области с леко намаляване на средното количество валежи, с около 30 мм/г.

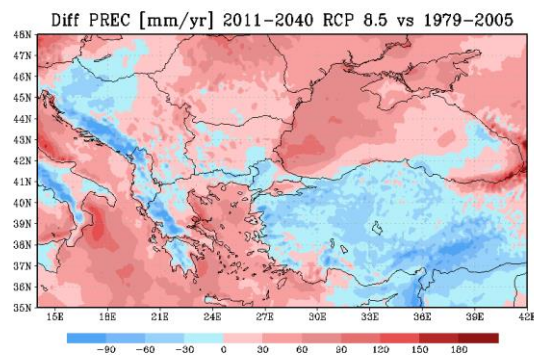
Над Средиземно море и по двата сценария се очаква увеличение на валежите с около 90мм/г, като стойностите отново са леко по-високи по сценарий RCP4.5. Интересно е, че над Турция и по двата сценария моделът предвижда намаляване на средното количество валежи с около 30-60 мм/г. Над Черно море и по двата сценария се очаква увеличение на средното количество валежи (повече в западната му част), като по RCP4.5 то е малко по-голямо. Даже по RCP8.5 се наблюдава област в източната част на морето където се очаква средното количество валежи леко да отслабне.

За втория период (в) и (з) над всички морета които обхваща взетият регион се очаква увеличение на средното количество валежи и по двата сценария – с около 60-90 мм/г като в западната част на Черно море с над 120 мм/г и в северозападната част на Егейско море с над 180 мм/г. Над целия Балкански полуостров се очаква същото, да се увеличи средното количество валежи и по двата сценария (по RCP4.5 повече), като изключим Динарските Алпи, където се очаква засушаване спрямо историческия период. Над Турция и по двата сценария се очаква засушаване спрямо базисния период, което вероятно се дължи на разширяването на субтропичните зони на север.

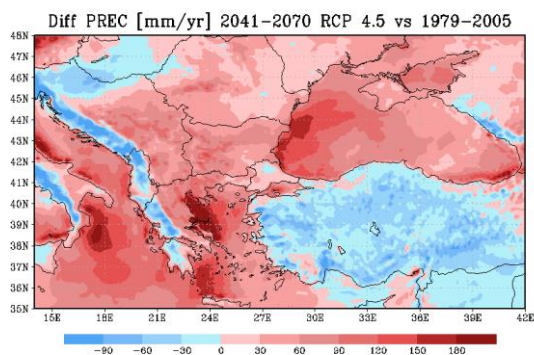
За последния период (д) и (е) и по двата сценария в едни и същи райони се очаква валежите да се увеличат, както и в едни и същи райони, да отслабнат, но по сценарий RCP8.5 и засушаването и увеличението на валежите е по-интензивно в съответните райони.



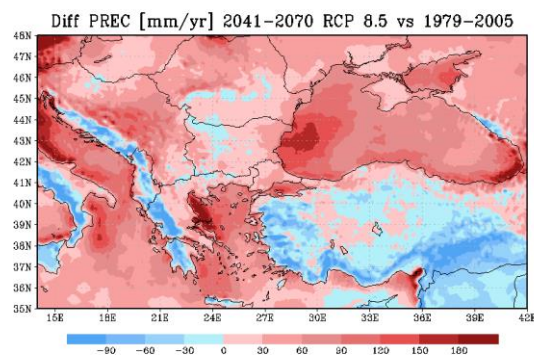
a



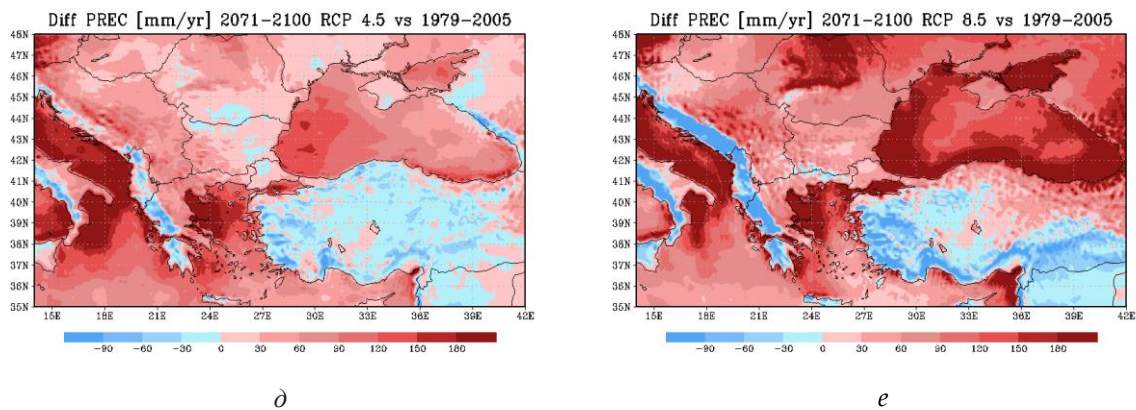
б



в



з



Фиг. 5.3. Сравнение по RCP 4.5 и RCP 8.5 за средното количество валежи за периода 2011-2040 г. (а,б), 2041-2070 г. (в,г) и 2071-2100 г. (д,е) спрямо историческия период 1979-2005 г.

В Таблица 5.2 е даден BIAS и RMSD за всеки от трите периода и по двата сценария спрямо историческия период. Червеният цвят показва, че се очаква увеличение на средното количество валежи, а яркостта показва интензивността – колкото по-червен е цветът, очакването за увеличение на средното количество валежи е по-голямо. Както се вижда и по двата сценария за всеки следващ период се очаква увеличението да е по-голямо спрямо предния период. За първия период средните стойности са по-високи при сценарий RCP4.5, за втория увеличението за една година е почти еднакво и за двата сценария, а за третия период, увеличението е доста по-голямо по RCP8.5.

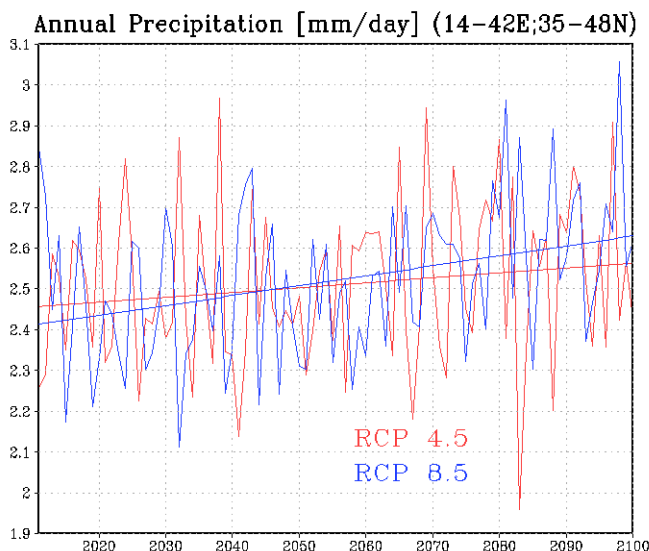
Разлика спрямо историческия период 1979-2005	Валежи BIAS [mm/yr]	Валежи RMSD [mm/yr]
RCP 4.5 2011-2040	30.9	58.5
RCP 4.5 2041-2070	34.8	69.6
RCP 4.5 2071-2100	52.7	83.7
RCP 8.5 2011-2040	17.5	47.8
RCP 8.5 2041-2070	35.3	68.3
RCP 8.5 2071-2100	79.7	128.8

Таблица 5.2. Стойности на средното и средноквадратичното отклонение на моделните резултати за валежите по двата сценария RCP 4.5 и 8.5 и трите тридесетилетия на 21-ви век, осреднени за площ, покриваща Балканския полуостров и Черно море.

5.2.2 Междугодишен ход на средното количество валежи по двата сценария.

На Фиг 5.4 е даден междугодишният ход на средното количество валежи за целия бъдещ период 2011-2100 г. по сценарий RCP4.5 (червен цвят) и RCP8.5 (син цвят). Вижда се, че двете криви не си приличат много и двата сценария за една година могат да дадат съвсем различен резултат, но ако погледнем линейният тренд, добре се вижда, че във времето средното количество валежи нараства и по двата сценария. Тук интересното е, че до 2041 г. то е по-високо по RCP4.5, но не защото средното количество е увеличава по-бързо, а защото от самото начало на графиката средната стойност на

средното количество валежи е по-голяма по RCP4.5. От 2011-2041 г. по RCP8.5 стойността на средното количество валежи е по-ниско от това на RCP4.5, но с времето то по-бързо нараства отколкото по RCP4.5, като около 2041 г. настига средната стойност по RCP4.5, като напред във времето продължава да се увеличава по-бързо отколкото средното количество валежи по RCP4.5. За първите 30 години до 1941 г. линейният тренд по RCP4.5 е 0.04 мм/ден, а по RCP8.5 0.07 мм/ден. За целия период по RCP4.5 линейният тренд е 0.1 мм/ден, а по RCP8.5 0.2 мм/ден.



Фиг. 5.4. Сравнение на междугодишния ход на средното налягане на морско ниво за Балканския полуостров по моделните симулации за сценарий RCP 4.5 (червено) и сценарий RCP 8.5 (синьо) за периода 2011-2100 г. Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

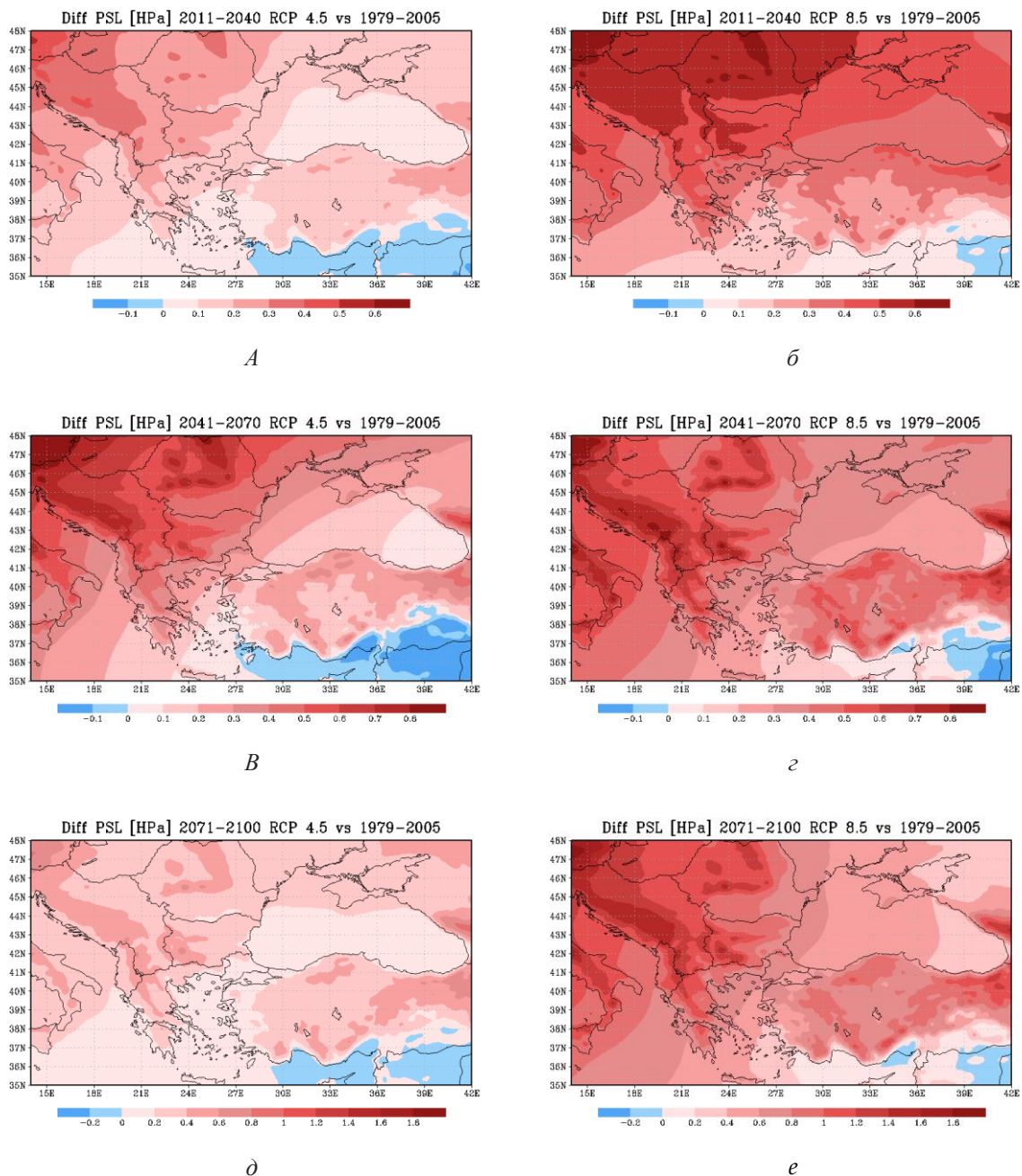
5.3. Очаквани промени в налягането на морско ниво

5.3.1. Очаквани промени в налягането на морско ниво за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.

На Фиг. 5.5 са дадени карти на разликите спрямо историческия период по сценарий RCP 4.5 (a, в, д) и RCP 8.5 (б, г, е) за средното налягане на морско ниво за трите бъдещи периода – (a) и (б) за периода 2011-2041, (в) и (г) за периода 2041-2070 и (д) и (е) за периода 2071-2100.

На Фиг 5.5 (a) и (б) са дадени разликите по двата сценария спрямо историческия период за периода 2011-2040. Разликите отново са малки. По сценарий RCP4.5 се наблюдава леко засилване на Малоазиатската депресия – с около 0.1 hPa. Над Черно и Средиземно море се наблюдава леко увеличение на налягането на морско ниво – около 0.1 hPa - 0.2 hPa, над Гърция и източна България увеличението е около 0.3 hPa, в Западна България и, Румъния, Сърбия е около 0.4 hPa, като на северозапад достига и до 0.5 hPa, което ни навежда да мисълта, че Исландският минимум, който има влияние над цяла Европа, се очаква да отслабне. По сценарий RCP8.5 се очаква средното пръзменно налягане да се увеличи повече отколкото по сценарий RCP4.5. Над Черно море с около 0.4hPa на

юг и 0.5hPa на север. Над южните части на Балканския полуостров с около 0.5 hPa, като над планинските райони в България и на север към Централна и Западна Европа средното налягане на морско ниво се очаква да се увеличи с над 0.6 hPa по сценарий RCP8.5.



Фиг. 5.5. Сравнение по RCP 4.5 и RCP 8.5 за средното налягане на морско ниво за периода 2011-2040 г. (а,б), 2041-2070 г. (в,з) и 2071-2100 г.(д,е) спрямо историческия период 1979-2005 г.

На Фиг 5.5. (б) и (в) са дадени разликите спрямо историческия период за периода 2041-2070 г. Отново се вижда, че разликата е по-голяма при сценарий RCP 8.5. Като цяло, както и спрямо съвременния климат, така и спрямо първия бъдещ период който

разгледахме, във втория период при сценарий RCP 4.5 се очаква средното приземно налягане да се увеличи още повече за разглеждания район, като на югоизток над Турция и централните и източни части на Черно море то е минимално, но в посока северозапад нараства и над Балканския полуостров достига около 0.6 hPa - 0.7 hPa по-високи средни стойности отколкото във съвременния климат. Над Балканския полуостров средното приземно налягане за този период при сценарий RCP8.5 се очаква да се повиши с около 0.7 hPa - 0.8hPa спрямо съвременния климат.

За последния бъдещ период който разглеждаме (d) и (e) средните стойности на приземното налягане стават още по-високи и по двата сценария, като отново при сценарий RCP 8.5 стойностите са по-високи. Симулациите при сценарий RCP 8.5 отново дават по високи стойности за средното приземно налягане, отколкото при сценарий RCP 4.5. Над Средиземно и Черно море, средното приземно налягане се очаква да е по-високо с около 0.2 hPa - 0.4 hPa, като на Балканския полуостров с около 0.4 hPa - 0.6 hPa. При сценарий RCP8.5 разликата е доста по-голяма. В източната част на Черно море е около 0.4 hPa, но на запад нараства и в западната му част достига разлика от 0.8 hPa спрямо историческия период. На Балканския полуостров разликата е още по-голяма, като на изток и юг е около 1.2 hPa и на запад и северозапад достига и над 1.6 hPa. Като цяло, обаче, това не са съществени промени спрямо историческия период.

Количествена мярка даваме в Таблица 5.3 за целия район. Вижда се, че разликите се под 1 hPa, като най-съществена разлика се наблюдава за последния времеви период по сценарий RCP8.5. Червената гама показва, че средното приземно налягане се очаква да се увеличи в следващите 100 години и по-двата сценария, като колкото по-ярък е цветът, толкова е по-голяма разликата спрямо съвременния климат.

Разлика спрямо историческия период 1979-2005	Налягане BIAS [hPa]	Налягане RMSD [hPa]
RCP 4.5 2011-2040	0.15	0.18
RCP 4.5 2041-2070	0.29	0.37
RCP 4.5 2071-2100	0.25	0.29
RCP 8.5 2011-2040	0.35	0.38
RCP 8.5 2041-2070	0.40	0.43
RCP 8.5 2071-2100	0.71	0.80

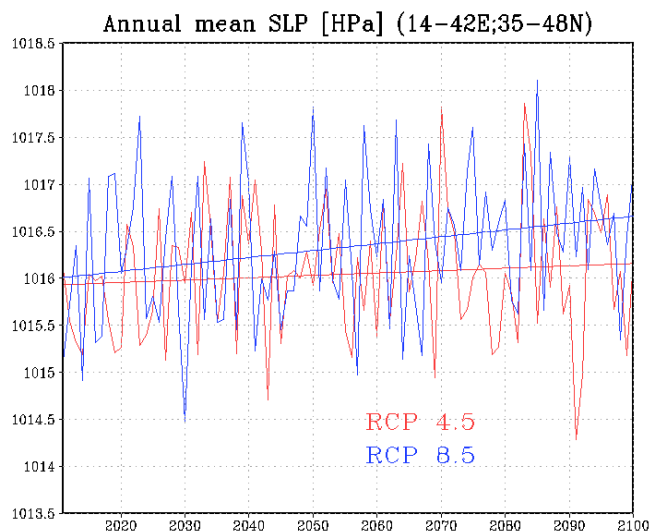
Таблица 5.3. Стойности на средното и средноквадратичното отклонение на моделните резултати за налягането на морско ниво по двата сценария RCP 4.5 и 8.5 и трите тридесетилетия на 21-ви век, осреднени за площ, покриваща Балканския полуостров.

5.3.4. Междугодишен ход на налягането на морско ниво по двата сценария за периода 2011-2100 г.

След като разгледахме средните характеристики и за трите периода по двата сценария, следва да изследваме как моделът представя междугодишния ход на налягането по двата сценария. За целта данните от моделните симулации са осреднени за всяка година за разглеждания период 2011-2100. Резултатът е даден на Фиг 5.6.

От Фиг 5.6 се вижда, че двете криви доста се различават. Почти еднакви стойности и двата сценария дават към 2061 г. и 2062 г. Най-голяма е разликата през 2068 г. и 2091 г. Изчисленият линеен тренд е с еднаква посока - и двете тенденции показват

нарастване на средното приземно налягане. Скоростта на нарастване на средното приземно налягането от RCP8.5 е по-голяма, отколкото тази от RCP4.5. Линейният тренд при RCP4.5 е 0.3 hPa/90 год, а при сценарий RCP8.5 е 0.7 hPa/90год.



Фиг. 5.6. Сравнение на междугодишния ход на средното налягане на морско ниво за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации за сценарий RCP 4.5 (червено) и сценарий RCP 8.5 (синьо) за периода 2011-2100 г. Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

5.4. Очаквани промени в скоростта на вятъра.

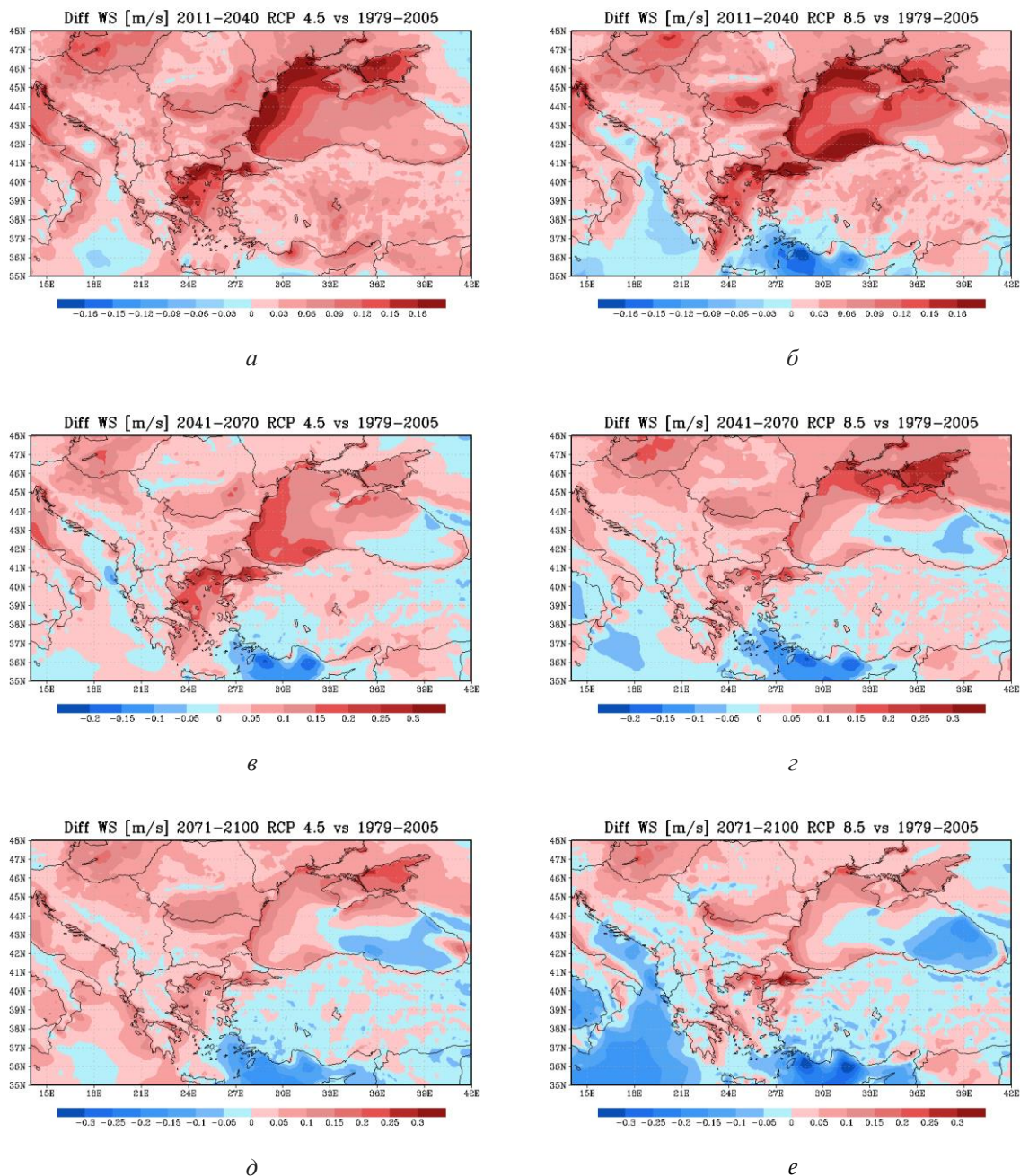
По аналогичен начин, както за останалите три метеорологични елемента в предните три параграфа, са разгледани разликите между моделните симулации за двата сценария, както и сравнението със съвременния климат за скоростта на вятъра при земята.

5.4.1. Очаквани промени в скоростта на вятъра за периодите 2011-2040, 2041-2070 и 2071-2100 г.

На Фиг. 5.7 са дадени карти на разликите спрямо историческия период по сценарий RCP 4.5 (a, в, д) и RCP 8.5 (б, г, е) за средната скорост на вятъра за трите бъдещи периода – (a) и (б) за периода 2011-2041, (в) и (г) за периода 2041-2070 и (д) и (е) за периода 2071-2100.

Спрямо историческия период за периода 2011-2040 г. (a) и (б) разликите не са големи: и по двата сценария за по-голямата част от разглеждания район средната скорост на вятъра се очаква леко да се повиши. Над Балканския полуостров и Мала Азия разликите спрямо историческия период са около 0.03-0.1 m/s. По-високи стойности се наблюдават в западната и Северната част в Черно море, Азовско море и северната и западна част на Егейско море, където средната скорост на вятъра се очаква да се повиши

с около 0.18 m/s при сценарий RCP 4.5. При сценарий RCP 8.5 картината е подобна, като и в югозападната част на Черно море се наблюдава повишение с около 0.18m/s. При сценарий RCP 8.5 над цялото Черно море повишението е малко по-голямо отколкото при сценарий RCP 4.5, спрямо историческия период.



Фиг. 5.7. Сравнение по RCP 4.5 и RCP 8.5 за приземния вятър за периода 2011-2040 г. (а,б), 2041-2070 г. (в,г) и 2071-2100 г.(д,е) спрямо историческия период 1979-2005 г.

Фиг. 5.7 (в) и (г) показва разликата спрямо историческия период на осреднената скорост на вятъра за периода 2041-2070 г. по моделните симуляции на Aladin 5.2 за сценария RCP 4.5 (в), за сценария RCP 8.5 (г). И при двата сценария в по-голямата част на Балканския полуостров се наблюдава леко увеличение на средната скорост на вятъра,

с около 0.05-0.1 m/s. При сценарий RCP 4.5 малко по-висока средна скорост на вятъра се наблюдава в югозападната част на Черно море и западната и северна част на Егейско море – с около 0.2 m/s. При сценарий RCP 8.5 в северната част на Черно море и в Азовско море също се наблюдава подобно увеличение. В източната част на Черно море се очаква леко отслабване на вятъра и по двата сценария с около 0.05 m/s, като при сценарий RCP 8.5 се наблюдава област и с 0.1 m/s по-ниска стойност на средната скорост на вятъра.

Последния бъдещ времеви период е доста интересен за сценарий RCP 8.5 защото на повечето места се наблюдава отслабване на средната скорост на вятъра спрямо историческия период, най-вече над Средиземно море с около 0.25 m/s в западната част, до 0.3 m/s в източната част. Над Черно море също се наблюдава отслабване на средната скорост на вятъра и по двата сценария, като то е по-изразено при сценарий RCP 8.5.

За приземния вятър можем да направим извод, че за района на Балканския полуостров и Черно море не се очаква съществено изменение. Това се вижда и от Таблица 5.4, където са дадени стойностите от Фиг. 5.7, осреднени както и в предишните глави. Червеният цвят показва, че средната скорост на вятъра е по-висока спрямо историческия период, а синия, че е по-ниска. Колкото по-ярък е цветът, разликата спрямо историческия период е по-голяма. Вижда се, че по сценарий RCP4.5 първоначално се очаква повишение на средната скорост на вятъра спрямо историческия период, като с времето намалява, но остава малко над средната скорост за разглежданата област. При сценарий RCP8.5 се наблюдава също първоначално повишаване на средната скорост на вятъра спрямо съвременния климат, но не колкото при RCP4.5, а с времето се наблюдава по-бързо отслабване на средната скорост на приземния вятър, като за последния бъдещ времеви период средната скорост пада под тази от съвременния климат.

Разлика спрямо историческия период 1979-2005	Вятър BIAS [m/s]	Вятър RMSD [m/s]
RCP 4.5 2011-2040	0.05	0.065
RCP 4.5 2041-2070	0.03	0.068
RCP 4.5 2071-2100	0.02	0.067
RCP 8.5 2011-2040	0.04	0.071
RCP 8.5 2041-2070	0.03	0.073
RCP 8.5 2071-2100	-0.007	0.077

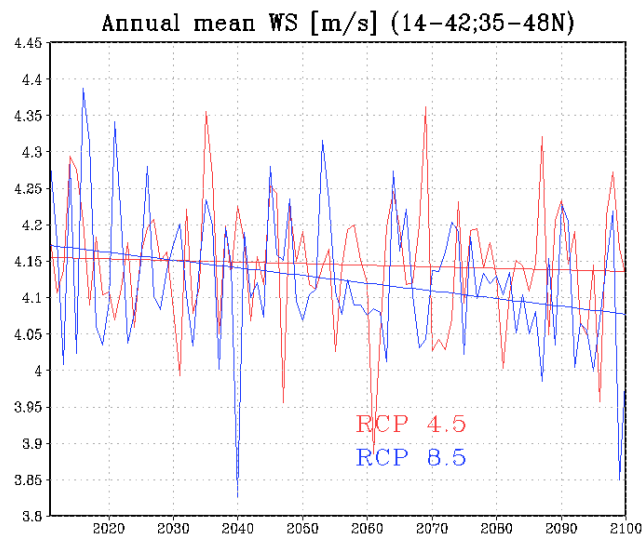
Таблица 5.4. Стойности на средното и средноквадратичното отклонение на моделните резултати за приземния вятър по двата сценария RCP 4.5 и 8.5 и трите тридесетилетия на 21-ви век, осреднени за площ, покриваща Балканския полуостров и Черно море.

От изследването в Глава 3 стана ясно, че грешката на модела при представяне на приземния вятър е от порядъка на 0.5 m/s, следователно промените, които се идентифицират по симулациите за 21-ви век са в рамките на грешката.

5.4.2. Междугодишен ход на приземния вятър по двата сценария за периода 2011-2100 г.

След средните пространствени характеристики ще разгледаме и междугодишния ход на вятъра по двата сценария за разглеждания период 2011-2100 г. Резултатът е даден на Фиг 5.8.

От Фиг. 5.8 се вижда, че разликата между двете криви не е чак толкова голяма, но на места са доста различни. Подобни стойности можем да видим през 2038, 2045, 2090 г. Най – голяма разлика виждаме през 2040 г., където RCP4.5 дава с 0.45 м/с по-силен вятър. Големи разлики се виждат и през 2061, 2067, 2087, 2099 г. Изчисленият линеен тренд е с еднаква посока – средната приземна скорост на вятъра намалява във времето. Интересно е обаче, че RCP8.5 в началото на периода дава по-високи стойности на вятъра от RCP4.5, но с времето много по-бързо стойностите намаляват. В края на периода RCP8.5 показва с около 0.15 м/с по-ниски стойности на вятъра отколкото показва RCP4.5. При сценарий RCP4.5 за 90 години линейният тренд е 0.02м/с, а при RCP8.5 е 0.1м/с /90год.



Фиг. 5.8. Сравнение на междугодишния ход на приземния вятър за Балканския полуостров и Черно море по моделните симулации за RCP 4.5 (червено) и RCP 8.5 (соньо). Дадени са и съответните линейни трендове със съответен цвят.

6. Очаквани последици от климатичните промени през 21-ви век.

6.1. Промени на зимните условия в Черноморския регион.

Черно море е голям дълбоководен басейн на границата между европейския и азиатския континент, разположен в средните ширини в континенталната климатична зона. Той е важен климатичен фактор за всички гранични страни (България, Румъния, Украйна, Русия, Грузия и Турция).

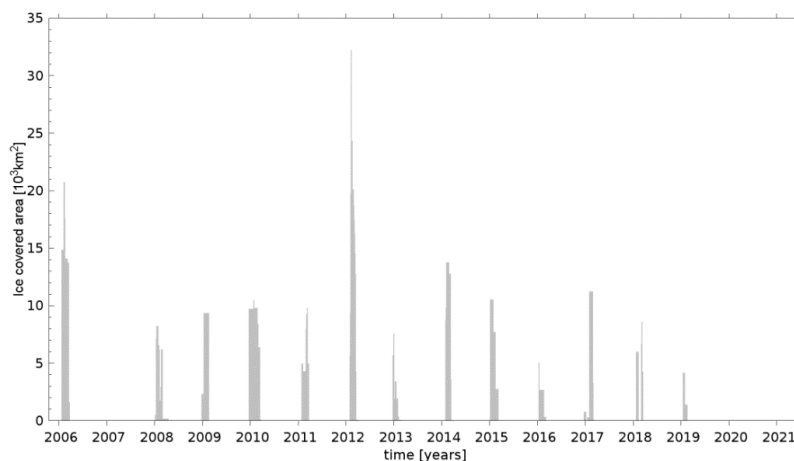
Замръзването на Черно море се наблюдава редовно в северните му части и в близост до Керченския пролив, а понякога, когато зимите са много студени, се простира на юг, достигайки румънския бряг (Симонов и Алтман, 1991).

След 1972 г. в Черно море се наблюдава умерено заледяване, но въпреки това се наблюдават и няколко изключително студени зими с висока степен на замръзване.

Нашата цел тук, е да анализираме дългосрочната променливост на топлинния режим и суровостта на зимите в региона във връзка със замръзване, въз основа на наличните данни за 20 век и след това. Това може да хвърли светлина върху атмосферните условия, водещи до замръзване, и да подобри предсказуемостта на подобни събития. Резултатите показват, че зимните условия са били по-меки през 20-ти век и началото на 21-ви век, но това не е пряко свързано със замръзванията. По този начин образуването на лед може да се приеме като мярка за местните и регионалните атмосферни зимни условия.

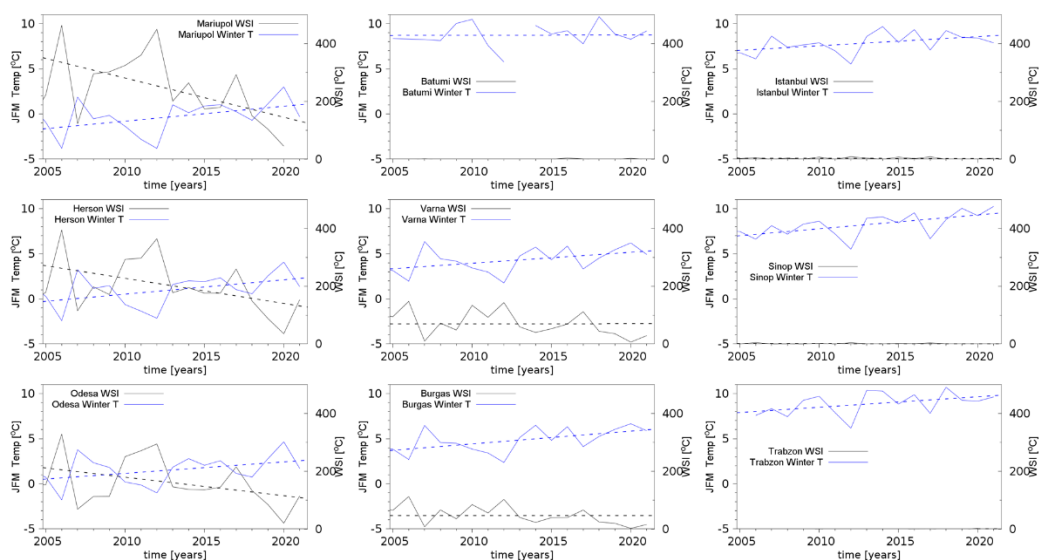
Новото в нашето изследване е, че ние количествено определяме площите, покрити с лед в Черно море, като използваме продукта от сателитни данни на NSIDC, така че, идентифицирането на интензивните събития на замръзване от 2006 г. насам е възможно. Нова информация получаваме и от качествения анализ на метеорологичните условия, благоприятни за образуване на лед.

Резултатите за ежедневното покритие на леда през зимата за периода 2006–2021 г. са показани на Фиг 6.1. Заледяване е имало почти всяка година, с изключение на зимите на 2007 г., 2020 г. и 2021 г. (Matov et al, 2022). Максималната площ на леда е достигната през февруари 2012 г., но за сравнително кратък период. Максималните ледена покривка през 2006 и 2010 г. например е по-малка от тези през 2012 г., но образуването на лед е по-стабилно и е продължило по-дълго.



Фиг. 6.1. Дневният обхват на морския лед в периода 2006–2021 г. от MASIE-NH.

За да направим връзка между замръзванията и температурата на въздуха, използваме данни от NOAA Global Surface Summary of the Day—GSOD (<https://www.ncsl.noaa.gov>). В GSOD сме използвали ежедневни данни от девет метеорологични станции по Черноморското крайбрежие – Бургас и Варна в България, по западното крайбрежие; Одеса, Херсон и Мариупол на север, в Украйна; Батуми в Грузия на източното крайбрежие; и Истанбул, Трабзон и Синоп в южното крайбрежие на Турция. Данните са налични от 1950 г., но в началото на периода има много пропуски. Средната зимна температура е изчислена за месеците януари, февруари и март и графиките са представени на Фиг 6.2. (сини линии). Както се очаква, северните крайбрежни станции (Одеса, Херсон и Мариупол) са много по-студени от южните (Истанбул, Синоп и Трабзон), а източната (Батуми) е подобна на южните, тъй като се намира на югоизточното крайбрежие. На западното крайбрежие зимните температури в Бургас и Варна са между южните и северите стойности. Като цяло вариациите в деветте станции са много сходни (с изключение на тези в Трабзон и Батуми). Изчислените коефициенти на корелация на Pearson по отношение на зимната температура на Одеса са както следва: 0,98 за Херсон; 0,94 за Мариупол; 0,9 за Бургас; 0,93 за Варна; 0,7 за Истанбул; 0,62 за Синоп; 0,41 за Трабзон; и 0,22 за Батуми. Тези резултати предполагат, че зимните условия са еднакви над по-голямата част от басейна, с изключение на югоизточната част. Това може да се обясни с доминиращите североизточни ветрове през зимата.



Фиг 6.2. Средните зимни температури (януари, февруари и март) в синьо и WSI в черно в Мариупол, Херсон, Одеса, Батуми, Варна, Бургас, Истанбул, Синоп и Трабзон за периода 2006–2021 г. Тенденциите на кривите са дадени с пункрна линия в съответния цвят. WSI е близо до нула по южното крайбрежие в Батуми, Истанбул, Синоп и Трабзон. Периодите с повече от 20% липсващи данни не са взети предвид в този анализ.

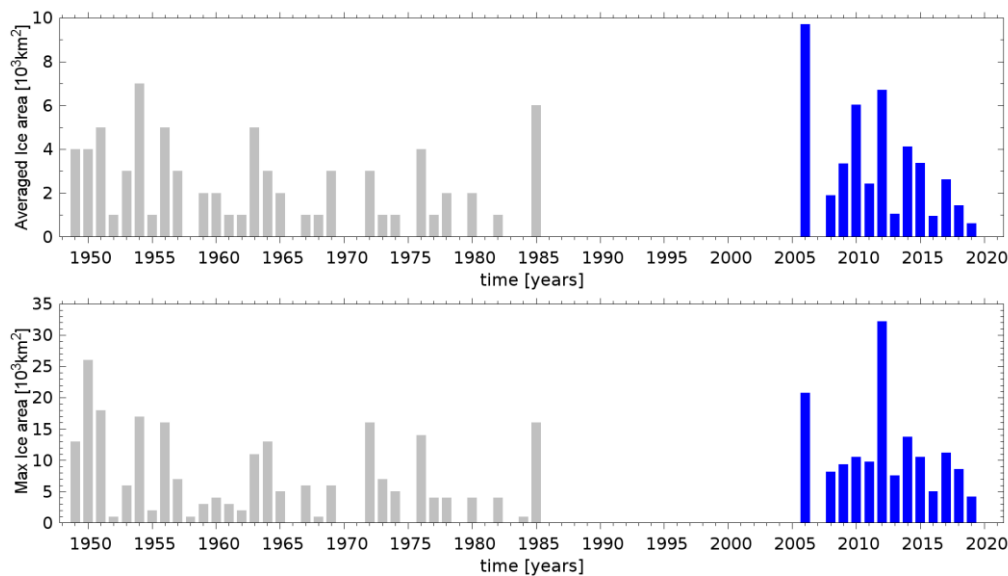
Интересно е да се отбележи асиметрията в посоките север-юг и запад-изток: средната зимна температура се повишава от север на юг и от запад на изток (последното се дължи на западните ветрове, които обикновено разпространяват влиянието от морето в посока изток, за тази географски ширини).

Интензивността на зимата в деветте метеорологични станции е представена на Фиг 6.2 чрез WSI. Черните линии показват, че в Одеса, Мариупол и Херсон редовно имаме дни със заледяване през зимата, докато в Истанбул и Синоп те са много редки. Бургас и Варна, на западния бряг, са подобни на северните части. Трабзон и Батуми практически никога не страдат от цшлодневни минусови температури на въздуха (WSI ~ 0). За разглеждания период има няколко години с типични зимни условия – 2006, 2012 и 2017 г. Последните зими на 2019, 2020 и 2021 г. определено са меки с много нисък WSI.

Положителният тренд на средната температура на въздуха през зимата е придружен от отрицателен тренд в суровостта на зимата, която е особено силно изразена по северното крайбрежие. Ясната тенденция за по-меки зими (линейният тренд е показан с пунктирана синя линия) е в съответствие с тенденцията за затопляне през зимата в Северното полукълбо (IPCC, 2013).

Чрез сравняване на Фиг 6.1 и Фиг 6.2 може да се заключи, че връзката между замръзванията и WSI (зимната температура) не е пряка: тенденцията към по-меки зими не е толкова очевидна на Фиг 6.2. Замръзването през най-студените години, 2006 г. и 2012 г. всъщност е най-интензивното и дълго. Въпреки това, през 2017 г., която също е била много студена, залеद्याването е умерено и по-малко интензивно, отколкото през по-топлите години 2010 и 2014 г, затова е направен анализ на метеорологичните условия през периодите на максимален размер на морския лед, който показва, че относително дълги периоди под Сибирски максимум, последвани от проникване на арктическа въздушна маса в периферията на атлантически циклон от високите географски ширини, са основните метеорологични условия, отговорни за образуване на морския лед.

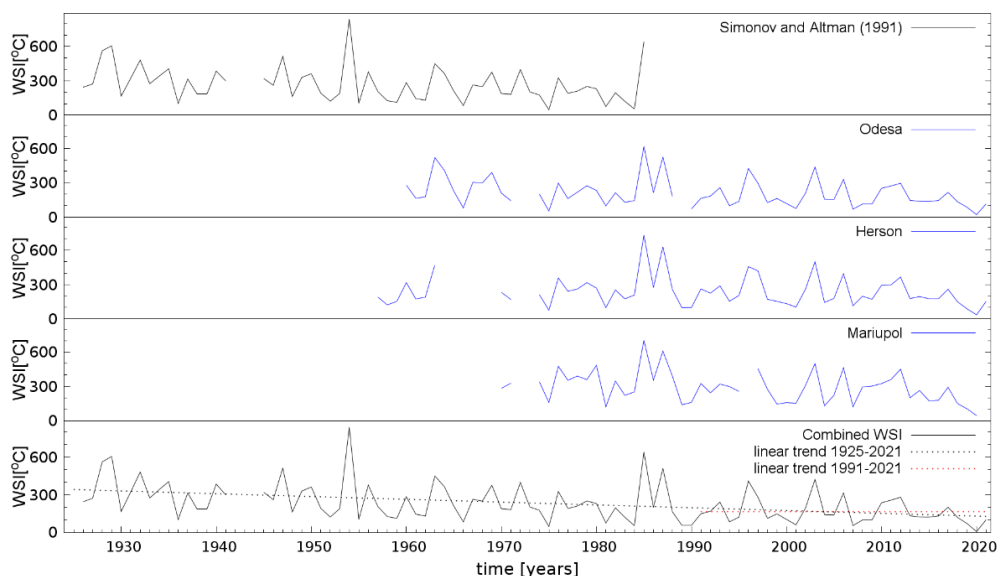
На Фиг 6.3 сме комбинирали двата източника от данни, като не се стремим да адаптираме данните в единична хомогенизирана времева серия, тъй като няма припокриване между двата източника на данни. Ясно е, че MASIE-NH има по-големи стойности и смятаме, че причината за това са различните области, избрани за оценка. Важен тук е фактът, че въпреки тенденцията за глобално затопляне, замръзването се случва доста редовно. Това ни навежда на мисълта, че това се дължи на синоптичните условия, а не на средните сезонни стойности. Интересно наблюдение е, че периодите на липса на образуване на лед обикновено продължават само една година и рядко се случват две години подред. Такъв е случаят през последните зими 2020 г. и 2021 г.



Фиг. 6.3. Комбинирани данни за площта на морския лед, публикувани в (Sionov and Altman, 1991) (сиви колони) и базирани на MASIE-NH в периода 2006–2021 г. (сини колони). Горният панел представя средната площ за сезона от декември до март, а долният показва максималната площ, покрита с лед през зимния сезон.

По отношение на средната температура през зимата, можем да сравним нашите резултати с публикуваните в (Симонов и Алтман, 1991). Тези автори дават наистина дълъг запис на WSI, базиран на наблюдения в северните метеорологични станции Одеса, Очаков и Хорли, обхващащи периода 1926–1985 г. Тъй като оригиналните температурни записи не са налични, ние сравнихме WSI, изчислен от данните на GSOD в Одеса, Мариупол и Херсон след 1950 г.

Графиките на Фиг 6.4 представят вариациите на WSI от историческите данни на Симонов и Алтман (1991) за периода 1926–1985 г.; по-долу нашето изчислено WSI от синоптични измервания в Одеса, Херсон и Мариупол е представено след 1950 г., когато има налични данни. Може да се види, че стойностите еволюират по много сходен начин. Мариупол е най-северният град и в резултат на това, индексът на суровост на зимите е най-висок там. Графиките на Одеса и Херсон са подобни. През 1954 г. в този район зимата е била изключително студена. Корелационните коефициенти на Pearson на WSI на Herson и Mariupol по отношение на WSI на Одеса са доста високи - 0,97 и 0,88. В Таблица 5.1 показваме изчисления коефициент на корелация на Pearson на WSI в Одеса, Херсон и Мариупол по отношение на WSI на Симонов и Алтман (1991) в периода на припокриване. Тази добра корелация на историческия WSI с WSI на Одеса ни позволява да удължим първия времеви ред с данните от Одеса. За да приспособим двата времеви реда, изравняваме средната стойност в припокриващия се период (WSI_{средно} 220 срещу 246 °C); стандартните отклонения са практически равни. Липсващата стойност в запис на Одеса за 1989 г. е заменена с данните на Херсон.



Фиг 6.4. WSI на историческите данни за северното крайбрежие на Черно море и WSI от Одеса, Херсон и Мариупол от базата данни GSOD; най-долният панел показва новата времева серия на WSI и изчислената линейна тенденция с пунктирна линия (черна за периода 1926–2021 г. и червена за последните 30 години, 1991–2021 г.).

Pearson CC	Odesa WSI	Herson WSI	Mariupol WSI
Simonov and Altman (1991)	0.97	0.96	0.92

Таблица 6.1. Линеен коефициент на корелация между кривите на Фиг 6.10 за припокривания се период 1950–1985 г.

По този начин направихме нова времева серия на WSI, в която липсва само периодът на Втората световна война, 1942–1944 г., показан в най-долния панел на Фиг 5.10. За да се оцени комбинираната съгласуваност на WSI, проведохме стандартен нормален тест за хомогенност, разработен от Alexandersson, за откриване на потенциални точки на промяна във времевата серия (от R: <https://cran.r-project.org/web/packages/snht/snht.pdf>, достъпен на 11 юни 2022 г.). При ниво на достоверност от 95%, тестът откри една точка на промяна през 1973 г. Не сме модифицирали допълнително оригиналния времеви ред на Симонов и Алтман (1991), тъй като има и пропуск в запис на Одеса през този период (1972–1973) от GSOD.

Най-забележителният факт в комбинирания времеви ред на Фиг 6.4 е отрицателният тренд на WSI през периода 1926–2021 г., оценен на ~ 25 °C/десетилетие (черна пунктирна линия). Представен е и линейният тренд за последните 30 години, 1991–2021 (червена пунктирна линия); двете линии почти съвпадат. Това предполага, че трендът към по-топли зими в този регион от началото на 20 век не се е променил съществено през почти 100-годишния период.

Замръзването документирано през 20-ти век има връзка със температура на въздуха през зимата, но тя не е пряка. Най-студените зими през 1954, 1963 и 1985 г. са довели до голяма средна площ на морски лед и обратното, зимите без лед през 1970, 1971, 1981 и 1983 г. не са най-топлите в историята. Площта, покрита с морски лед от зимата до зимата, не е задължително да следва WSI. Това отново ни води до

заклучението, че средната сезонна зимна температура не е единственият фактор, влияещ върху замръзването на Северно Черно море.

Направена е категоризация на дългосрочните зимни условия в Черноморския регион, като използваме индекса на сувровост на зимите (WSI). Граничните стойности на WSI са определени следвайки подхода на Симонов и Алтман (1991) и са дадени в Таблица 5.1 (Matov et al., 2022). Според тази класификация, е определен типът на зимите за периода 1926-2021. Интересно е, че от 2003 г. не са наблюдавани наистина „студени“ зимни условия (напр. WSI > 400).

WSI Стойност	Тип на зимата
[0, 200]	Мека
[200, 400]	Умерена
[400, -]	Студена

Таблица 5.1. Прагови стойности на WSI, използвани за зимна класификация Симонов и Алтман (1991).

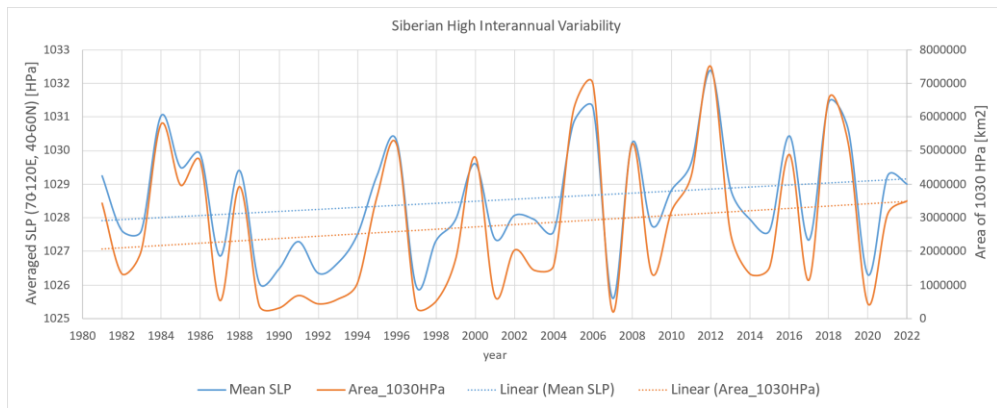
6.2. Промени в интензивността на сезонните центрове на действие, които имат влияние в Черноморския регион

Балканският полуостров и Черно море се намират в район който през зимата доста често се влияе от Сибирския максимум, който нахлува от североизток и от Средиземноморския минимум, който влияе от юг. Комбинацията от двете може да доведе до доста студени зими, придружени от валежи и заледяване на Черно море в северната му част, както е обяснено в предните параграфи. В този параграф ще разгледаме дали с течение на времето има някакви промени в тези центрове на действие, дали се променя тяхната интензивност и влиянието им върху разглеждания район и дали самите те не си сменят местоположението, вследствие на промените в климата.

6.2.1. Сибирски център на високо налягане

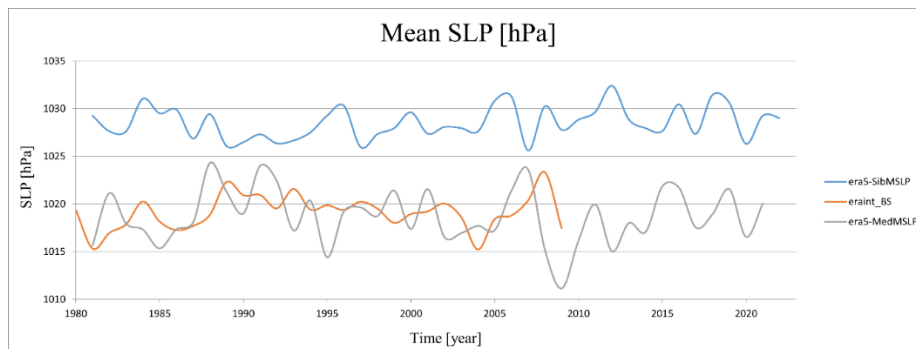
За да установим количествено как се променя интензивността на Сибирския максимум през зимата, сме използвали две мерки: 1) усредненото налягане за района 70-120E, 40-60N, и 2) площта, заградена от 1030 hPa изобара. Данните, които използваме са от реанализа ERA-5 за периода 1980-2022 г. и са само за зимните месеци (декември, януари и февруари).

На Фиг 6.5 показваме междугодишният ход на двете избрани количествени мерки за интензивност на Сибирския максимум (с оранжев и син цвят). Двете криви са доста подобни, като показват и еднакъв положителен линеен тренд. Изводът е, че интензивността на Сибирския максимум се засилва, независимо от публикуваните отчети за затопляне на континентите и високите ширини в Северното полукълбо.



Фиг 6.5 Междугодишен ход на Сибирския максимум за зимните месеци (декември, януари и февруари), представен чрез изобарата 1030 hPa – оранжев цвят и средното налягане – син цвят.

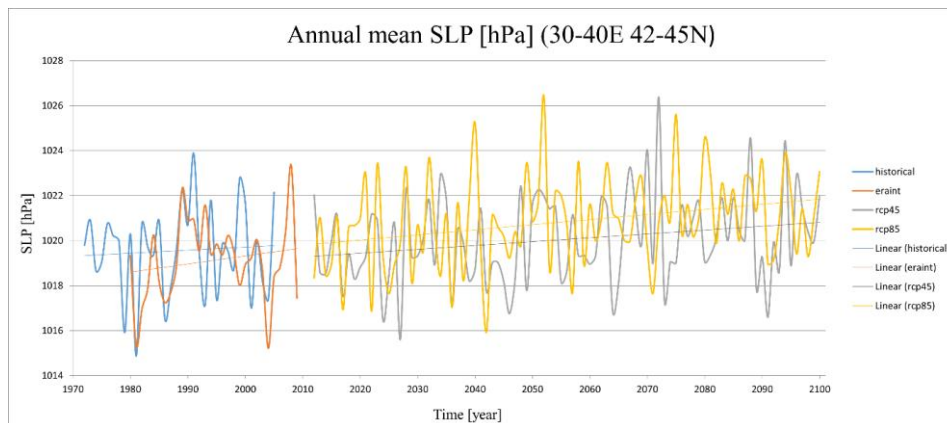
За да направим проекция на влиянието на Сибирския максимум над Черно море до края на 21-ви век, изчисляваме средното налягане през зимата в Черноморския регион по симулациите от Med-Cordex. По-високите стойности биха били свързани с по-голямо влияние на Сибирския максимум. Тъй като нямаме данни за Сибирския максимум от Med-Cordex, използваме тези от ERA-5. На Фиг 6.6 са сравнени данните за средното налягане в района на Черно море (30-40E, 42-45N) от Med-Cordex (оранжева линия) и от ERA-5 (синя линия) за настоящия период. Дадено е и средното налягане над Средиземно море, като мярка за другият активен през зимата климатичен център на действие – Средиземноморската депресия. Коефициентът на корелацията на Пийърсън между осредненото налягане над Черно море и това над Сибир е 0.2, докато с това над Средиземно море е 0.7. Това показва, че средното налягане над Черно море е повече повлияно от Средиземноморската депресия, отколкото на Сибирския максимум.



Фиг 6.6 Сравнение между междугодишените ходове на средното налягане за района на Черно море по ERA-5 (синя линия) и ERA-Int (оранжева линия) за периода 1979-2011. Сивата линия представлява средното налягане по ERA-5 за Средиземноморската депресия.

На Фиг 6.7 е даден междугодишен ход на средното налягане в района на Черно море, като са използвани данните от Med-Cordex (оранжев цвят), историческият период симулиран с Aladin5.2 (син цвят), както и проекция по сценарий RCP4.5 до края на века (сив цвят) и RCP8.5 до края на века (жълт цвят). Със съответните цветове линии е даден линейният тренд на всяка от кривите. Кривите за съвременния климат на места съвпадат, но на места се различават доста. Коефициентът на линейна корелацията между тях е 0.4, но линейният тренд и за двете криви е положителен, тоест и Aladin5.2 и реанализът

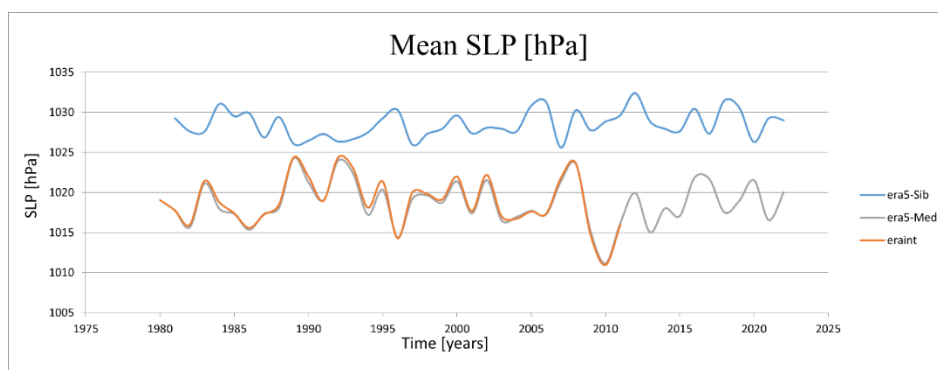
показват, че средното налягане за периода 1979-2005 се е увеличило. Що се отнася за бъдещия период до края на века (2011-2100г.), двете криви по двата сценария дават доста различни резултати, но и по двата сценария линейният тренд е положителен, като това е по-характерно за RCP8.5. Това съответства и с резултатите от Глава 5, че средното налягане на морско ниво се очаква да се повиши до края на века.



Фиг 6.7. Междугодишен ход на средното налягане на морско ниво за района на Черно море за съвременния климат по реанализа ERA-Interim (оранжесв цвят) и ALADIN5.2 (син цвят) и за бъдещия период 2011-2100 по сценариите RCP4.5 (сив цвят) и RCP8.5 (оранжесв цвят). Със съответните цветове са дадени и линейните трендове на различните криви.

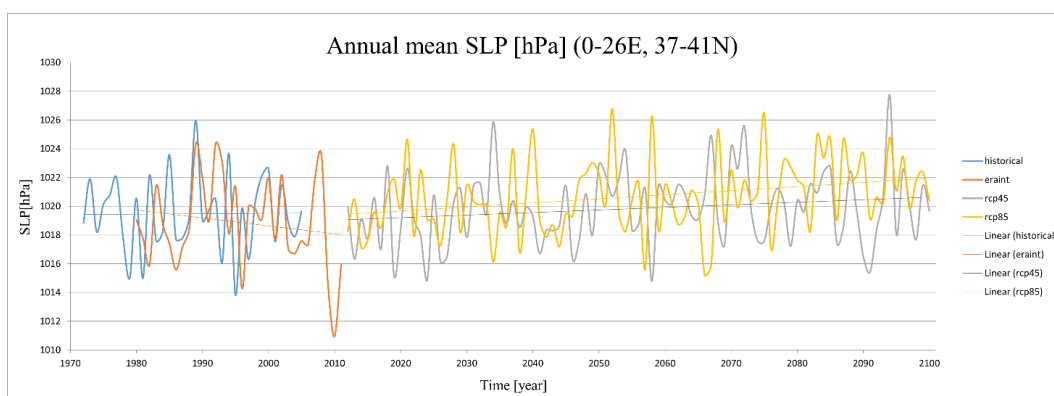
6.2.2. Средиземноморска депресия

Както и в предния параграф, на Фиг 6.7 правим сравнение на средното налягане между данните от ERA-5 (оранжева линия) от Med-Cordex (сива линия), само че този път за средиземноморския район (0-26E, 37-41N). Тук се вижда, че двете линии са почти еднакви, а корелацията между тях е 0.99. Това не е изненадващо, тъй като атмосферния реанализ на ECMWF е използван като гранични условия в симулациите на Aladin 5.2



Фиг 6.7. Сравнение между междугодишните ходове на средното налягане за района на Средиземно море по ERA-5(оранжева линия) и ERA-Int (сива линия) за периода 1979-2011. Синята линия представлява средното налягане по ERA-5 за Сибирския максимум.

В следващата стъпка целта е да направим проекция на Средиземноморската депресия. На Фиг 6.8 е даден междугодишен ход на средното налягане в района на Средиземно море, като са използвани данни от Med-Cordex (оранжев цвят), историческият период симулиран с Aladin5.2 (син цвят), симулацията по сценарий RCP4.5 до края на века (сив цвят) и симулацията по RCP8.5 до края на века (жълт цвят). Със съответните цветове линии е даден линейният тренд на всяка от кривите. Отново и тук, двата сценария дават различни криви като резултат, но трендовете и по двата сценария показват отслабване на Средиземноморската депресия, което съответства с резултатите от Глава 5, че средното приземно налягане се очаква да се повиши до края на века. Интересно да се отбележи, че тенденцията за 21-ви век е обратна на тази в историческия период.

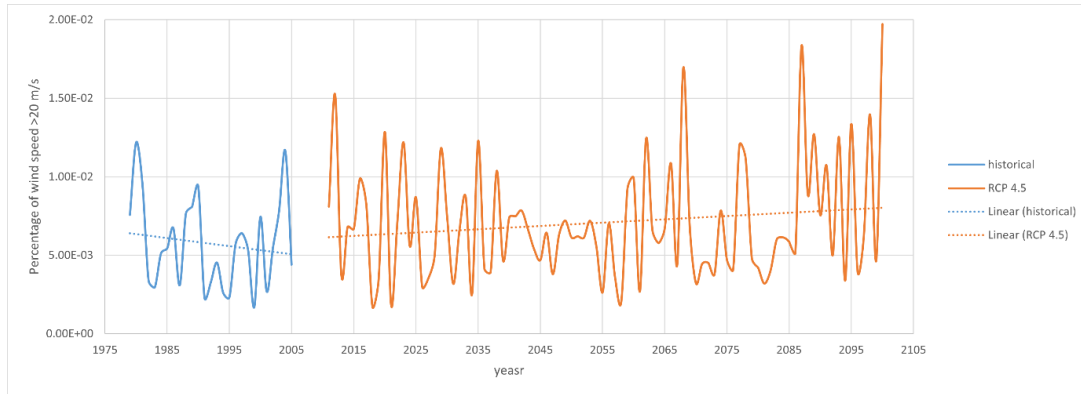


Фиг 6.8. Междугодишен ход на средното налягане на морско ниво за района на Средиземно море за съвременния климат по реанализа ERA-Interim (оранжев цвят) и ALADIN5.2 (син цвят) и за бъдещия период 2011-2100 по сценариите RCP4.5 (сив цвят) и RCP8.5 (оранжев цвят). Със съответните цветове са дадени и линейните трендове на различните криви.

6.3. Промени в честотата на явленията с бурен вятър

В много от изследванията на бъдещия климат през 21-ви век се споменава, че се очаква зачестяване на проявите на екстремни явления – интензивни дъждове, бури, и др. В този параграф правим анализ за бъдещия период (2011-2100) на честотата на приземните ветрове с различна скорост. Целта е да идентифицираме дали има преразпределение по сила на вятъра. За всяка година върху района Балкански полуостров – Черно море е пресметнат процента на точки със стойности на скоростта на вятъра в 5 интервала: (<5), (5-10), (10-15), (15-20) и (>20) м/с за всяка година. За тази цел не можем да използваме месечните данни, които досега представяхме. Използваните данни са три часови, като за простота е взета проекцията на един от сценариите RCP4.5 за периода 2011-2100 г.

Най-интересна е фигурата за ветровете със скорост над 20м/с, представена на Фиг 6.9. Честотата на тези ветрове е по принцип много ниска, но в периода 979-2006 тя намалява (отрицателен линеен тренд), докато при проекцията до края на 21-ви век тя се увеличава (положителен линеен тренд). Въпреки малкото число, увеличението е близо два пъти, което е значително.



Фиг 6.9. Междугодишен ход на процента на точките със стойности на скоростта на вятъра над 20 м/с за района на Черно море и Балканския полуостров по симулации от ALADIN5.2 за историческия период 1979-2005 г. (синя линия) и бъдещ период 2011-2100 г. (оранжева линия). Със съответните цветове са дадени и линейните трендове за двата периода.

7. Заключение

Настоящата дисертация цели да получи изводи за очакваните климатични промени, касаещи температурата, валежите, налягането на морско ниво и приземния вятър за района на Черно море и Балканския полуостров през 21-ви век, използвайки изходните данни от симулациите с регионалния климатичен модел Aladin 5.2 за два от RCP сценариите (4.5 и 8.5), дефинирани в AR5. Тези сценарии са отправна точка поне до 2020 г. за всички научни изследвания в областта на климатичните промени, като се счита, че първият е умерен, а вторият песимистичен сценарий. Данните, по които са направени оценките, са за осреднената температура, количество валежи, налягане на морско ниво и приземен вятър за територията на Балканския полуостров и Черно море за периода 1979-2005 г., който характеризира съвременния климат и за периода 2011-2100 г., което са климатичните проекции от модела. Резултатите са обработени и визуализирани с Grid Analysis and Display System (GrADS).

Като първа стъпка в анализа е направена оценка на грешката на използвания модел, т.е. с каква точност той симулира настоящия климат в Европа, що се отнася до температура, валежи, налягане и вятър. За сравнението са използвани данни от метеорологичния анализ ERA-Interim на ECMWF. Резултатите от сравнението показват, че за района на Балканския полуостров и Черно море, моделът над брега подценява температурата с около 1-2 градуса, докато над морето температурата е надценена от модела с около 1 градус. Грешката е най-малка през зимата, а най-голяма през пролетта и лятото, като общият BIAS е отрицателен. Що се отнася до валежите, за територията на Балканския полуостров и Черно море моделът има общ положителен BIAS и грешка от около 200 мм/г. Анализът по сезони показва надценяване от страна на модела за всички сезони, като грешката е най-малка отново през зимата и най-голяма през летния сезон. Разликите за налягането не са големи. Направеният анализ показва, че моделът подценява налягането с около 1 hPa за разглеждания район, като грешката е около 2 пъти по-голяма през студения сезон (зима и пролет), отколкото през летния. Що се отнася до вятъра, за района на Черно море и Балканския полуостров, моделът има общ положителен BIAS и грешка от около 0.17 м/с. Най-общо казано симулираният вятър в Средиземноморието и Черно море е завишен, но пък занижен в по-голямата част от Егейско море.

При сравнението на времевите редици от моделните симулации и реанализа на усреднените по площта на Черно море и Балканския полуостров температура, валежи, налягане и вятър се установява обща прилика и синфазност, но и наличие на периоди със съществени различия. Тенденцията при температурата, и в реанализа, и в модела показват съществено повишение, като при модела повишението е малко по-съществено, въпреки че стойностите са малко подценени. Що се отнася до валежите, отново и двата тренда са положителни. Трендът при налягането в модела е към леко понижаване, което е обяснимо с тенденцията за затопляне, докато в метеорологичния реанализ има много малък тренд. За приземния вятър, и моделът, и реанализът дават тенденция за понижение на скоростта с подобни стойности.

Следващата стъпка бе да проучим очакваните промени по двата сценария RCP4.5 и RCP8.5 отделно за три бъдещи времеви периода (2011-2040 г., 2041-2070 г. и 2071-2100 г.) по отношение на средногодишната приземна температура, количество валежи, приземно налягане и скорост на вятъра за района на Черно море и Балканския полуостров. При двата сценария се вижда тренд на нарастване на средногодишната

температура, приземно налягане и количество валежи в следващите 100 години, като нарастването е по-значително за всеки следващ период и съответно за сценарий RCP8.5 спрямо 4.5. Линеиният тренд на температурата се оценява на 2.2 °C/90 години и 4°C /90 години за целия период за RCP8.5. Що се отнася до валежите, линеиният тренд до края на века се оценява с 36.5 мм/ден за 90 години при RCP4.5 и с 76мм/ден за 90 години при RCP8.5. Приземното налягане се оценява на 0.2 hPa/90 години при RCP4.5 и 0.6 hPa/90 години за целия период за RCP8.5. Тенденциите на приземния вятър показват, че вятърът ще отслабва, като линеиният тренд на приземния вятър се оценява на -0.01 м/с/90 години при RCP4.5 и 0.1 м/с/90 години за RCP8.5. При втория сценарий RCP8.5 температурата, валежите и налягането нарастват повече и по-бързо, докато вятърът отслабва повече и по-бързо, отколкото при сценарий RCP4.5.

След анализа на четирите метеорологични елемента, правим анализ на последиците от климатичните промени за района на Черно море и Балканския полуостров като изледваме зимните условия и залежаванията в Черно море от 2050 до днес, промените в центровете на влияние за съвременния и бъдещ климат – Сибирски максимум и Средиземноморска депресия и очакваната промяна на ветровете със скорости в интервалите (<5), (5-10), (10-15), (15-20) и (>20) м/с за настоящия и бъдещ климат, като периодите са същите както при анализа на температурата, валежите, налягането и вятъра.

Анализът на залежаванията в Черно море показва, че въпреки положителната тенденция на глобалното затопляне, замръзването се случва доста редовно в еверната част на морето. Анализът на метеорологичните условия през периодите на максимален размер на морския лед показва, че относително дълги периоди под Сибирски максимум, последвани от проникване на арктическа въздушна маса в периферията на атлантически циклон с висока ширина, са основните метеорологични явления, отговорни за образуването на лед в Черно море. Тенденцията на WSI е отрицателна, което е нормално с хода на глобалното затопляне, като за периода 1926–2021 г. е оценена на ~25 °C/десетилетие.

За да видим как се мени интензивността на Сибирския максимум и Средиземноморската депресия използваме данни както от Cordex, така и от ERA-5, тъй като Cordex дава по-добра оценка за Средиземноморската депресия, а ERA-5 за Сибирския максимум. В този анализ тигаме до заключение, че средното налягане над Черно море повече си прилича с налягането над Средиземно море (корелация 0.7), отколкото налягането определящо Сибирския максимум (корелация 0.2). И за двата центъра на действие резултатите показват засилване на интензивността за съвременния климат, което за Сибирския максимум е доста странно, тъй като е логична да се случва обратното поради глобалното затопляне. За бъдещия климат до края на века моделът оценява засилване на Сибирския максимум и отслабване на Средиземноморския минимум.

Що се отнася до ветровете в интервалите (<5) (5-10) (10-15) (15-20) (>20) м/с, сме използвали само умерения сценарий RCP4.5. Промяната в скоростта на вятъра не е голяма, но интересното тук е, че най-силните вертове над 20м/с в съвременния климат са намалявали, докато за бъдещия период се наблюдава увеличение на честотата на тези ветрове. Числото е доста малко, но моделът показва съществено увеличение.

8. Приноси на дисертационния труд

- Систематизирани са очакваните промени на приземната температура, валежи, налягане приведено към морско ниво и скорост на вятъра за 21-ви век по тридесетилетия 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 г. за района Балкански п-в-Черно море по сценарии RCP4.5 и RCP8.5. Установена е тенденция за повишение на температурата, намаление на налягането
- За първи път са оценени по спътникови наблюдения площта и времетраенето на замръзванията в Черно море след 2006 г.; тези резултати са комбинирани с публикувани данни за 20-ти век, като е осъвременена класификацията на интензивността на зимите чрез индекса на суровост.
- Установено е, че замръзванията в северната част на Черно море са свързани със специфични синоптични условия, не непременно свързани с ниски зимни температури.
- Описано е влиянието на сезонните центрове на действие Сибирски максимум и Средиземноморски минимум върху зимните условия в Черноморския район, като се установява, че влиянието на Средиземноморската депресия е значително.
- Установява се, че според сценарий RCP4.5 Средиземноморския център на действие намалява като интензивност до края на 21-ви век (зимното налягане в Средиземноморието показва тенденция за увеличение).
- Установява се, че според сценарий RCP4.5 честотата на явленията с бурен вятър се увеличава до края на 21-ви век.

Част от резултатите в дисертацията са използвани от Световната банка при съставянето на Национален профил на риска от бедствия в България в глава 4 Климатичните промени и риска от бедствия.

8. Публикации и участия в събития

- Matov M., 2019, "Climate projections for 21st Century of ground pressure and wind on the Balkan peninsula based on CORDEX project data", Proceedings of the Second PhD Conference, 20th February, Sofia, pp. 183-217 (in Bulgarian)
- Matov M., Peneva E., Georgieva G., Black sea freezing and winter severity: Relation to the temperature, Proceeding of 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISKS – Part One, 2020, pages:134-143
- Mirna Matov, Elisaveta Peneva, Vasko Galabov, Black Sea freezing and relation to the winter conditions in 2006-2021, Atmosphere, 2022, 13(6), 974; <https://doi.org/10.3390/atmos13060974> (Q2)
- Elisaveta Peneva, Mirna Matov and Milen Tsekov, "Mediterranean Influence on the Precipitation Regime over Balkan Peninsula in the period 1901-2021 (submitted)

- Участие във Втора докторантска конференция, СУ „Св. Климент Охридски“, София, 2019.
- Участие на международна конференция „Copernicus Marine Service General Assembly“, Брюксел, Белгия. На конференцията участвах с постер на тема "Observed freezing on the Black Sea coast and relation to the air temperature variations", 2019.
- Участие в обучителен семинар "Физика и химия на Земята, атмосферата и океана", Вършец, 2019.
- Участие в "Ден на отворените врати" 2019 във Физически факултет със експерименти и демонстрации за атмосферното налягане, вятъра и облаците.
- Национален финалист в конкурса „Лаборатория за слава FameLab България“ 2019, провеждащ се в рамките на Софийския фестивал на науката и организиран от Британски съвет. FameLab е един от най-големите конкурси за комуникация на науката в света.
- Участие в обучение „Въведение във фундаментални принципи на научната комуникация към различни аудитории“, организирана от Science made simple, Лондон, Кардиф и Бристол, Великобритания, 2020.
- Участие в международната конференция "EGU General Assembly 2020", с доклад на тема „Climate feedbacks in the Black Sea region“.
- Участие в обучителен семинар на тема „Опазване на околната среда на черноморското крайбрежие“, 2020.
- Участие в лятно училище на тема „ Summer School on Effective HPC for Climate and Weather“, 2020.

- Участие в научната конференция „1st International conference on ENVIROnmental protection and disadter RISKS (EnviroRISks 2020)“
- Участие във втори национален семинар по програа Комерник на тема „Black Sea freezing in 2006-2020 as seen by the satellites”, 2020
- Учатие във Първия форум за съвременни космически изследвания на тема “Black Sea freezing in 2006-2020 and relation to winter temperature”, 2020
- Участие в обучителен семинар "Физика и химия на Земята, атмосферата и океана", Пчелин, 2020.
- Участие в обучителен курс „How to design and develop climate services”, 2021.
- Участие в лятно училище „ "First Summer School on Space Research, Technology and Applications", Рожен, 2021.
- Участие в 32-ри лагер за опазване на Атанасовско езеро като лектор на тема „Климатични проекции в района на Черно море и Балканския полуостров", 2021.
- Участие в обучителен семинар "Физика и химия на Земята, атмосферата и океана", Баня, 2021.
- Участие в лятно училище „ "Second Summer School on Space Research, Technology and Applications", Рожен, 2022.
- Участие в Национална научна програма „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“
- Участие в проект „Популяризация на научно-образователната дейност на астрономите, метеоролозите и геофизиците в България и приложимите високи технологии в тези природни науки“. Проектът е насочен към представяне на научната и образователна дейност на катедрите „Астрономия“ и „Метеорология и геофизика“ пред ключови аудитории от потенциални студенти

Използвана литература

1. Allen, R. J., & Kovilakam, M. (2017). The Role of Natural Climate Variability in Recent Tropical Expansion. *Journal of Climate*, 30(16), 6329–6350. <https://www.jstor.org/stable/26388540>
2. Befort, D.J., S. Wild, T. Kruschke, U. Ulbrich, and G.C. Leckebusch, 2016: Different long-term trends of extra-tropical cyclones and windstorms in ERA-20C and NOAA-20CR reanalyses. *Atmospheric Science Letters*, 17, 586–595, doi: 10.1002/asl.694.
3. Davis, N., & Birner, T. (2017). On the Discrepancies in Tropical Belt Expansion between Reanalyses and Climate Models and among Tropical Belt Width Metrics, *Journal of Climate*, 30(4), 1211-1231.
4. Dunn, R.J.H. et al., 2012: HadISD: A Quality Controlled global synoptic report database for selected variables at long-term stations from 1973–2011. *Climate of the Past*, 8(5), 1649–1679, doi: 10.5194/cp-8-1649-2012.
5. Eyring, V. et al., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958, doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
6. Grise, K. M., Davis, S. M., Staten, P. W., & Adam, O. (2018). Regional and Seasonal Characteristics of the Recent Expansion of the Tropics, *Journal of Climate*, 31(17), 6839-6856.
7. IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Nakićenović, N. and R. Swart (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 570 pp., www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios.
8. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:[10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
9. IPCC. AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2013; 1535p.
10. Kushner P.J., Held I.M., Delworth T.L., *J. Clim.* 14 (2001) 2238.
11. Lund, M.T. et al., 2020: A continued role of short-lived climate forcers under the Shared Socioeconomic Pathways. *Earth System Dynamics*, 11(4), 977–993, doi: 10.5194/esd-11-977-2020.
12. Matov, M.; Peneva, E.; Galabov, V. Black Sea Freezing and Relation to the Winter Conditions in 2006–2021. *Atmosphere* **2022**, *13*, 974. <https://doi.org/10.3390/atmos13060974>
13. Rao, S. et al., 2017: Future air pollution in the Shared Socio-economic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 346–358, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012.
14. Reichler T., Changes in the Atmospheric Circulation as Indicator of Climate Change. In Trevor M. Letcher, editor: *Climate Change: Observed impacts on Planet Earth*, The Netherlands, 2009, pp. 145-164.
15. Simonov, A.; Altman, E. (Eds.) *Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas; Gidrometeoizdat: St. Petersburg, Russia, 1991; Volume 4, p. 426. (In Russian)*
16. Staten, P. W., Grise, K. M., Davis, S. M., Karnauskas, K. B., Waugh, D. W., Maycock, A. C., Fu, Q., Cook, K., Adam, O., Simpson, I. R., Allen, R. J., Rosenlof, K., Chen, G., Ummerhofer, C. C., Quan, X., Kossin, J. P., Davis, N. A., & Son, S. (2020). Tropical

- Widening: From Global Variations to Regional Impacts, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6), E897-E904.
17. Staten, P.W., Lu, J., Grise, K.M. *et al.* Re-examining tropical expansion. *Nature Clim Change* **8**, 768–775 (2018)
 18. Studholme, J., & Gulev, S. (2018). Concurrent changes to Hadley circulation and the meridional distribution of tropical cyclones. *Journal of Climate*, 31(11), 4367-4389.
 19. Thompson D.W.J., Solomon S., *Science* 296 (2002) 895
 20. Thompson D.W.J., Wallace J.M., *J. Clim.* 13 (2000) 1000.
 21. <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>
 22. <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>
 23. <http://www.euro-cordex.net/>
 24. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml
 25. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
 26. <http://www.metoffice.gov.uk/>
 27. <https://cds.climate.copernicus.eu>
 28. <https://data.nodc.noaa.gov/>
 29. <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00516>
 30. <https://www.medcordex.eu/medcordex.php>