



РЕДАКТОРСКИ БЕЛЕЖКИ

Уважаеми читатели,

В ръцете ви е книжка 5 на том 22 на Българското списание по метеорология и хидрология (Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology (BJMH)).

Издаването на този том се осъществява с финансовата подкрепа на Фонда на научни изследвания към Министерството на образованието и науката съгласно Договор ДНП 05/43 от 22.12.2016 г.

През 2017 г. BJMH получи ISSN номер за своята online версия. Можете да намерите всички публикувани книжки от vol. 19 (2014), vol. 20 (2015) и vol. 21 (2016) на уеб-страницата на списанието <http://meteorology.meteo.bg/global-change/index.html>.

Книжка 5 съдържа 8 оригинални научни статии с акцент върху редица метеорологични и климатични проблеми и явления: класификация на бризова циркулация, качество на атмосферния въздух, климатична оценка на зимата 2016-2017 г., метод за прогноза на някои опасни за авиацията метеорологични явления, поливни режими свързани с климатичните промени. Три статии са посветени на различни подходи при изследването на интензивни валежи, проблем особено актуален през последните няколко години, причина за наводнения, свлачища и огромни щети не само в България, но и в голяма част от Европа и по света. Последната статия представлява обзор на актинометричните наблюдения в България и е адресирана към ползвателите на информация за слънчевата радиация и към всеки интересуваш се от тази проблематика.

Най-учтиво каним български и чуждестранни автори да предоставят свои оригинални научни изследвания за публикуване в списанието. Целта ни е да осигурим регулярно излизане/публикуване и да го популяризираме сред българската и чуждестранна научни среди.

Екатерина Бъчварова (Главен редактор)
Татяна Спасова (Изпълнителен редактор)



Breeze circulation classification in the coastal zone of the town of Ahtopol based on data from ground based acoustic sounding and ultrasonic anemometer

Damyan Barantiev^{*a}, Ekaterina Batchvarova^a, Mikhael Novitsky^b

*^aNational Institute of Meteorology and Hydrology - BAS (NIMH - BAS),
66, Tsarigradsko Shose blvd., Sofia 1784, Bulgaria*

*^bScientific-Production Association "Typhoon" Roshydromet, 4, Pobedy str., Obninsk, Kaluga region
249038, Russia*

Abstract: This paper presents the results of a study of the vertical structure and evolution of the Atmospheric Boundary Layer (ABL) under sea breeze conditions obtained from ground based measurements with a three-dimensional ultrasonic anemometer and remote sensing with SCINTEC MFAS sodar in Ahtopol for a period of more than 4 years. The high spatial and temporal resolution of the acoustic measurements allows more detailed analysis of the atmospheric processes and possibility for innovative study of the meteorological processes at the Black-sea coast of Bulgaria. Three main classes of breeze circulation are defined, characterized with typical changes in the values of the measured meteorological parameters and result of the interaction between local and mesoscale processes in the studied region. The proposed classification is focused on the presence of local fronts at the beginning and/or at the end of the recorded sea breeze circulation. The relation between surface values and vertical profiles of the measured meteorological parameters is studied as well.

Keywords: Atmospheric boundary layer (ABL), Breeze circulation, Remote sensing, Sodar, Classification of breeze circulation.

* Damyan.Barantiev@meteo.bg

Класификация на бризова циркуляция в крайбрежната зона на град Ахтопол на основата на данни от наземно базирано акустично сондиране и ултразвуков анемометър

Дамян Барантиев^{*а}, Екатерина Бъчварова^а, Михаил Новицкий^б

*^аНационален институт по метеорология и хидрология - БАН (НИМХ-БАН),
бул. „Цариградско шосе” 66, 1784 София, България*

*^бНаучно-производственное объединение (НПО) „Тайфун“, Росгидромет,
Россия, 249038, Калужская область, г.Обнинск, ул. Победы, 4*

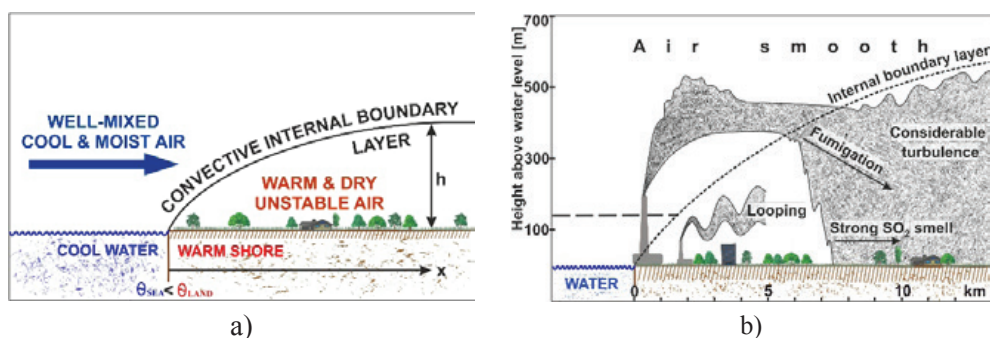
Резюме: В тази статия са представени резултати от изследване на вертикалната структурата и развитието на Атмосферен Граничен Слой (АГС) в условията на бризова циркуляция, получени от приземни измервания с тримерен ултразвуков анемометър и от дистанционни сондирання на атмосферата със содар SCINTEC MFAS в гр. Ахтопол за период от над 4 години. Високата пространствена и времева резолюция на акустичните измервания позволява по-детайлен анализ на протичащите процеси в атмосферата и възможност за иновативно изучаване на метеорологичните условия по Черноморското крайбрежие на България. Определени са три основни класа бризова циркуляция, характеризиращи се с типични изменения в стойностите на измерваните метеорологични параметри, обусловени от взаимодействието между локални и мезометеорологични процеси в изследвания район. Предложената класификация е фокусирана върху наличието на локални фронтове в началото и/или в края на регистрирана бризова циркуляция. Изучена е и връзката между приземните стойности и вертикалните профили на измерваните метеорологични параметри.

Ключови думи: Атмосферен граничен слой (АГС), Бризова циркуляция, Дистанционни измервания, Содар, Класификация на бризова циркуляция.

1. УВОД

Наблюденията и теоретичното описание на метеорологичните процеси протичащи в крайбрежните зони са важна изследователска задача поради наличието на различни дифузионни характеристики и сложни процеси на разпространение на замърсители в крайбрежен АГС, определени от трансформацията на въздушните маси (ВМ) при прехода им от една над нова подложна повърхност с различни физични характеристики (Бъчварова, 2006). Трансформацията на по-хладните морски ВМ над нагрятата суша (лятно време, през деня) води до формирането на конвективен вътрешен граничен слой (КВГС) с височина нарастваща с разстоянието от брега, Фиг. 1а според Hsu (1986) и зависеща от скоростта на вятъра и турбулентния обмен. При емисията или проникването на замърсители на

въздуха в КВГС се наблюдава явлението „задимяване“ (fumigation), Фиг. 1b според Simpson (1994). КВГС ограничава обема въздух за разреждане на замърсяването, като ограничава височината, до която се разпространяват замърсителите. Образуваният конвективен слой е недостатъчно висок за самоочистване на атмосферния въздух от разпространили се в него замърсители и това води до тяхното акумулиране в крайбрежни зони, особено в случаи със сложна орография в крайбрежната зона (Batchvarova and Gryning, 1998). В комбинация с локалната циркулация (затворени дневни и нощни бризови клетки) формирането на КВГС може да доведе до по-дългосрочни неблагоприятни условия за самоочистване на атмосферата и съответно до неколнократна рецикулация на замърсителя в атмосферата над крайбрежния район. Изучаването на спецификите и развитието на този слой, чрез провеждането на детайлни метеорологични измервания в крайбрежни райони, е важен елемент от научна и практическа гледна точка. Съвременните мезометеорологични модели се нуждаят от усъвършенстване на използваните параметризационни схеми (особено в крайбрежни райони), което е възможно само на основата на модерни измервания с висока времева и пространствена резолюция. Постигането на по-надеждни прогнози на времето в крайбрежните райони е условие за подобряване и на дейностите свързани с опазване на качеството на атмосферния въздух.



Фиг. 1. Схематично представяне на: а) конвективен вътрешен граничен слой (КВГС) при преход на относително по-хладни морски въздушни маси над сравнително по-топла земна повърхност; б) задимяване в резултат на разпространяване на замърсител от източник в крайбрежен КВГС и извън него

Fig. 1. Schematic representation of: a) Convective Internal Boundary Layer (CIBL) in the transition of relatively cooler marine air masses over a comparatively hotter land surface; b) Fumigation as a result of the emission of a pollutant from a source within a coastal CIBL and above it upwind

Структурата на АГС в крайбрежни райони е обект на изследване в много страни поради факта, че много градове и индустриални дейности са разположени на бреговете на морета, океани или големи езера. Концепцията за трансформация

на въздушните маси е приложима и за други граници между различни постилащи повърхности, като поле-град, поле-гора, пустиня-град и други, но процесите при прехода море-суша през топлите сезони са най-интензивни. От друга страна модерната апаратура за дистанционно измерване на вертикални профили на основни атмосферни физически параметри дава възможност за сканиране в непрекъснат режим, осигурявайки данни с висока резолюция в пространството и времето. Значителното технологично развитие на наземно базираните уреди за дистанционни измервания на атмосферните характеристики през последните 10 години ги поставя сред надеждните и незаменими прибори при редица иновативни научни методи за изследване на основните метеорологични параметри и на турбулентността в АГС (Coulter and Kallistratova, 2004; Dirk, 2009; Cimini, 2010; Emeis, 2010; Illingworth et al., 2013; Peña et al., 2016).

Дистанционното акустично сондиране на атмосферата започва в най-южната морска синоптична станция от системата на НИМХ - Метеорологична обсерватория (МО) Ахтопол през юли 2008 г. в рамките на сътрудничество между НИМХ-БАН и Научно-производствено обединение (НПО) «Тайфун»-Росгидромет. Акустичният локатор (содар) е със среден обхват и производство на немската компания SCINTEC, а автоматизираната метеорологична станция с тримерен ултразвуков анемометър е произведена от НПО «Тайфун». Така се поставя и начало на непрекъснати измервания с висока времева и вертикална резолюция на профилите на стандартни метеорологични параметри и турбулентни характеристики в крайбрежен район в България.

Представените в тази статия резултати по дългогодишни данни са в синхрон с наблюдавания в световната и европейска практика преход от експериментални изследвания в ограничени периоди от време (Kerman et al., 1982; Portelli, 1982; Wilczak et al., 1991) към продължителни/оперативни измервания с прибори даващи данни с висока пространствена и времева резолюция - радари, лидари, содари, микровълнови радиометри (Floors et al., 2013; Gryning et al., 2016).

2. ДОСЕГАШНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ПО БЪЛГАРСКОТО ЧЕРНО-МОРИЕ

През 50-те години на XX век в НИМХ се реализират редица изследвания на базата на климатични, синоптични и експериментални наблюдения по българското крайбрежие. В този период е публикувана студията за климатично райониране на България (Събев, 1963). Редица специализирани експериментални изследвания са осъществени от учените в НИМХ през 70-те и 80-те години на XX век във връзка с началото на дейностите по мониторинг на околната среда и моделиране на разпространението на примеси в атмосферата. Такива са експериментите във Варна (1973) и Бургас (1976 и 1990), резултати от които са публикувани в Бъчварова & Донеv, 1983; Бъчварова, 1984a; Бъчварова, 1984b; Бъчварова, 1985;

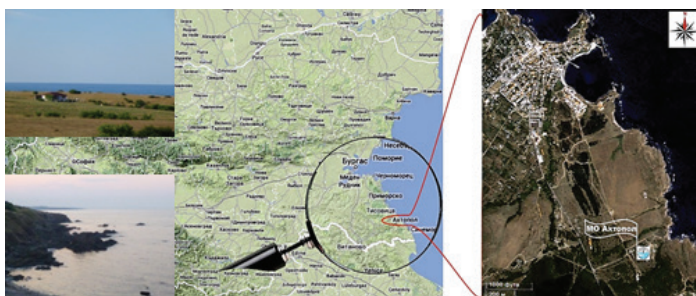
Йорданов & Бъчварова, 1985a; Йорданов & Бъчварова, 1985b; Бъчварова, 2006. С по-широка климатична тематика и международно участие са изследванията в Шкорпиловци (1978-1980, 1982-1983), отразени в Belberov et al., 1980; Belberov et al., 1982; Belberov et al., 1983; Корчев & Манолов, 1983. В района на Ахтопол през 90-те години са организирани наблюдения на аерозолния състав на атмосферата в рамките на проекти по международно сътрудничество. Направеният анализ на обратните траектории на въздушния пренос обяснява наблюдавания аерозолен състав (Wiman et al., 2002).

Липсата на финансиране за научни изследвания и приватизацията на големи индустриални обекти, като ЛУКОЙЛ Нефтохим Бургас, доведоха до многогодишен застой в НИМХ както по отношение на експерименталните изследвания, така и в модернизацията на измерванията както в страната, така и по черноморското крайбрежие.

През 2014 г. успешно се проведе съвместен българо-турски научен проект (SAAP4FUTURE), изследващ антропогенното замърсяване на въздуха в трансграничния район на Бургас-Къркларели и влиянието му върху населението и околната среда (Georgieva et al., 2015).

3. РАЙОН НА ИЗСЛЕДВАНЕ И АПАРАТУРА

Метеорологична обсерватория (МО) Ахтопол е разположена в югоизточна България на около 2 km в югоизточна посока от гр. Ахтопол. Обсерваторията попада в континентално - средиземноморската климатична област, Черноморска климатична подобласт, климатичен район на Странджанското Черноморие (Събев, 1963). Разположена е върху равнинен тревист терен на около 400 m навътре в сушата и е на 30 m над морското равнище. Брегът в близост до обсерваторията е стръмен с височина от около 10 метра, а разположението на бреговата ивица е с приблизителна посока от северозапад към югоизток (Фиг. 2.).



Фиг. 2. Местоположение на МО Ахтопол в югоизточна България и сателитна снимка на района (google map)

Fig. 2. Location of MO Ahtopol in southeastern Bulgaria and satellite image of the region (google map)

За изучаване на профили на вятъра и турбулентността в крайбрежен АГС се използва акустична моно статична Доплерова система за сондиране на атмосферата – SCINTEC Flat Array Sodar MFAS с честотен обхват 1650 – 2750 Hz, 9 ъгъла на излъчване/приемане ($0^\circ, \pm 9.3^\circ, \pm 15.6^\circ, \pm 22.1^\circ, \pm 29^\circ$), вертикален обхват от 150 m до 1000 m и вертикална резолюция от 10 m. Точността при измерване на скоростта на вятъра е 0.1 - 0.3 ms-1, за посоката на вятъра е 2 - 3 Deg. Содарната система е монтирана на покрива на административната сграда на МО Ахтопол (Фиг. 3. - дясно) на приблизителна височина 4.5 m и осъществява запис на всеки 10 минути, а периодът на осреднение е 20 минути. Първото ниво на измерване е 30 m, а максималният вертикален обхват при тези настройки достига до 720 m. Едновременно с измерванията на содара започва и изследването на турбулентните характеристики при земята чрез измервания от автоматична метеорологична станция (АМС) МК-15 (производство - НПО «Тайфун») с тримерен ултразвуков анемометър (соник) монтиран на метеорологична мачта на височина 4.5 m (Фиг. 3. – ляво горе). Честотата на измерванията на МК-15 е 0.5 Hz, а останалите ѝ елементи са: сензор за температура и влажност на атмосферния въздух (Фиг. 3 – ляво долу), сензор за валеж (количество и интензитет на валежа), сензор за атмосферно налягане, сензор за слънчева радиация, централно устройство и хранване.



Фиг. 3. Налична апаратура: тримерен акустичен анемометър (горе ляво), сензор за температура и влажност на атмосферния въздух (долу ляво), Содарна система върху покрива на административната сграда на МО Ахтопол (дясно)

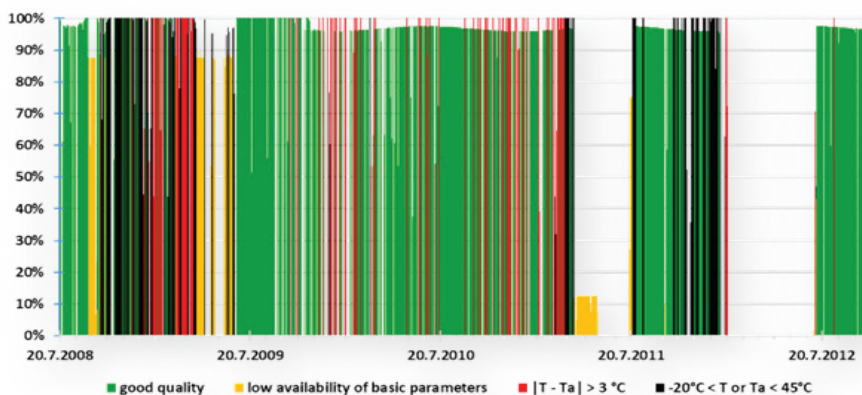
Fig. 3. Available equipment: three-dimensional acoustic anemometer (top left), air temperature and humidity sensor (bottom left), sodar system on the roof of the administrative building of MO Ahtopol (right)

Записът на данни до 20.06.2009 г. се извършва на всеки 10 s и от тях са калкулирани 20 минутни пълзящи осреднени стойности на всеки 10 минути

при наличност на записани данни по-висока от 60% в 20 минутния период на осредняване. След тази дата суровите данни от сензорите на АМС МК-15 са на всеки 2 s.

Подбраният период за анализи е от 20 юни 2008 г. до 10 октомври 2012 г. Непрекъснатостта на оперативния режим на инсталираната апаратура в началото е нарушавана от чести аварии на основното електрическо захранване на територията на МО, а в летните месеци на 2008 г. и 2009 г., работата на содара е била ограничавана през нощните часове. Същевременно, дистанционният контрол и техническата поддръжка на инсталираната апаратура са били практически затруднени поради липсата на достъп до интернет в МО Ахтопол до 2011 г. и от невъзможността на представителите от НПО «Тайфун» да осъществяват пътувания при възникване на проблеми в работата на АМС МК-15.

Оперативният режим на АМС МК-15 е търпял редица смущения през годините, които в определена степен са причинени от горе изложените факти и наложили прилагането на прости процедури за проверката на качеството на изходящите данни (поради различни технически проблеми със сензорите) преди те да бъдат използвани за анализ. За целта са използвани три критерия за оценка на качеството на приземните данни, резултатите от които са изложени на Фиг. 4.



Фиг. 4. Денонощна наличност на данни с приложен критерии за качество на данните на АМС МК-15 в МО Ахтопол през периода 20.07.2008 г. – 10.10.2012 г.

Fig. 4. Twenty-four hours data availability with applied data quality criteria to AWS MK-15 at MO Ahtopol for the period 20.07.2008 - 10.10.2012

Данните в жълт цвят (Фиг. 4) показват денонощна наличност по-ниска от 25% на едновременно 8 основни параметъра използвани при изследването на крайбрежния АГС (посока и скорост на вятъра – Dir и WS ; температура на атмосферния въздух – T ; акустична температура – Ta ; вертикална скорост – W ; дисперсия на акустичната температура – σTa ; дисперсия на посоката на вятъра

– σ_{Dir} ; дисперсия на вертикалната скорост – σ_W). Първият критерий изисква наличност над 25% на 8-те параметъра. Вторият критерий изисква разлика под 3 °C между сензора за температура и акустичния анемометър намиращи се на отстояние 10 m в хоризонтално и 2.5 m във вертикално направление (при данните в червено е нарушен). Третият критерий изисква данните да са в температурен диапазон от – 20 °C до 45 °C, определен съобразно месечните стойности на абсолютната минимална и абсолютната максимална температура за периода от 1931 г. до 1970 г. за метеорологични станции Царево и Резово (Кючукова, 1983). Данните, които не изпълняват този критерий са дадени в черно. В Таблица 1 са представени месечните наличности на данни от АМС МК-15 с добро качество през анализирания период, преминали през контрола на трите критерия за качество. Допълнително, данните с наличност над 70 % са дадени в зелен код, между 40 и 70 % с оранжев, а под 40 % - в червен.

Посочените наличности през първия и последен месец на периода са отнесени към броя на дните с измервания (12 дни през юли 2008 и 10 дни през октомври 2012). Месеците, през които се наблюдава рязко повишаване на наличността на данни с добро качество, са свързани с периодичните ежегодни гостувания на представителите от НПО «Тайфун», при които се осъществяваше поддръжка на АМС МК-15 и въвеждането ѝ в изправност.

Таблица 1. Месечна наличност на данни с добро качество от оперативния режим на АМС МК-15 в МО Ахтопол през периода 20.07.2008 г. – 10.10.2012 г.

Table 1. Monthly availability of good quality data from the operating regime of AMS MK-15 at the MO Ahtopol for the period 20.07.2008 - 10.10.2012

	I	II	III	IV	V	VI
2009	21.1%	28.4%	5.1%	0.0%	0.0%	23.3%
2010	15.5%	51.6%	42.4%	64.3%	85.3%	68.3%
2011	49.5%	44.7%	34.1%	0.0%	0.0%	0.0%
2012	9.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2008	67.8%	77.4%	42.1%	28.7%	31.7%	28.2%
2009	94.2%	98.6%	61.9%	54.8%	64.8%	15.5%
2010	76.7%	87.7%	74.2%	49.7%	58.8%	34.0%
2011	9.4%	90.0%	84.4%	61.4%	38.4%	36.1%
2012	61.3%	89.6%	87.1%	74.8%	-	-

Наличността на данни от содара е по-висока от тази при АМС МК-15 и е представена в Таблица 2. Ниската наличност на данни (жълти и червени обозначения) през лятото на 2008 г. и 2009 г. се дължи основно на поставените ограничения в нощния режим на работа, докато през зимните месеци, тя е вследствие на настъпили усложнения от прекъсване на електричеството в МО Ахтопол. Данните с наличност над 70 % са дадени в зелен, между 40 и 70 % в оранжев, а под 40 % - в червен код. Обхвата на содара също е представен графично, със запълване на един бар при височина над 510 m, 2 бара над 560 m, 3 бара над 610 m и 4 бара над 660 m.

Наред с месечната наличност в Таблица 2 е оказана и максималната ефективна височина, до която са достигнали измерванията на содара. Контролът за качество на данните при акустичното сондиране на атмосферата е стриктен и е заложен в софтуера на содара. За периода на анализ са използвани зададените по подразбиране от производителя настройки на содара.

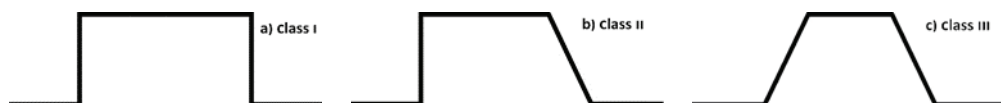
Таблица 2. Месечна наличност на данни и максимално достигната ефективна височина от оперативния режим на содара за периода 20.07.2008 г. – 10.10.2012 г.

Table 2. Monthly data availability and maximum effective height reached by the sodar operating mode for the period 20.07.2008 - 10.10.2012

	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2008	34.7%	45.2%	40.3%	57.7%	59.5%	88.4%
max range [m]	500	520	520	520	520	520
2009	94.6%	57.5%	59.9%	58.4%	96.7%	96.0%
max range [m]	680	680	680	680	680	680
2010	99.9%	98.3%	99.9%	92.6%	99.6%	99.8%
max range [m]	560	510	490	510	510	510
2011	92.2%	99.9%	38.8%	78.8%	99.2%	81.3%
max range [m]	510	510	560	620	620	620
2012	99.1%	31.9%	96.6%	30.6%	-	-
max range [m]	700	620	720	670	-	-
	I	II	III	IV	V	VI
2009	99.9%	99.6%	99.2%	96.7%	98.3%	99.3%
max range [m]	520	520	680	680	680	680
2010	97.5%	98.3%	89.0%	68.5%	96.8%	86.4%
max range [m]	680	680	680	680	680	680
2011	96.8%	94.8%	99.8%	96.7%	96.8%	96.2%
max range [m]	510	460	510	510	510	510
2012	75.3%	95.8%	99.7%	96.7%	99.3%	93.3%
max range [m]	620	620	620	620	620	620

4. КЛАСИФИКАЦИЯ НА БРИЗОВА ЦИРКУЛАЦИЯ

Систематичните наблюдения с висока времева резолюция на метеорологичните параметри в района, позволяват схематично да се представят три основни типа бризова циркулация в МО Ахтопол (Фиг. 5), класифицирани според начина на преминаване на бризовия фронт (Барантиев, 2016).

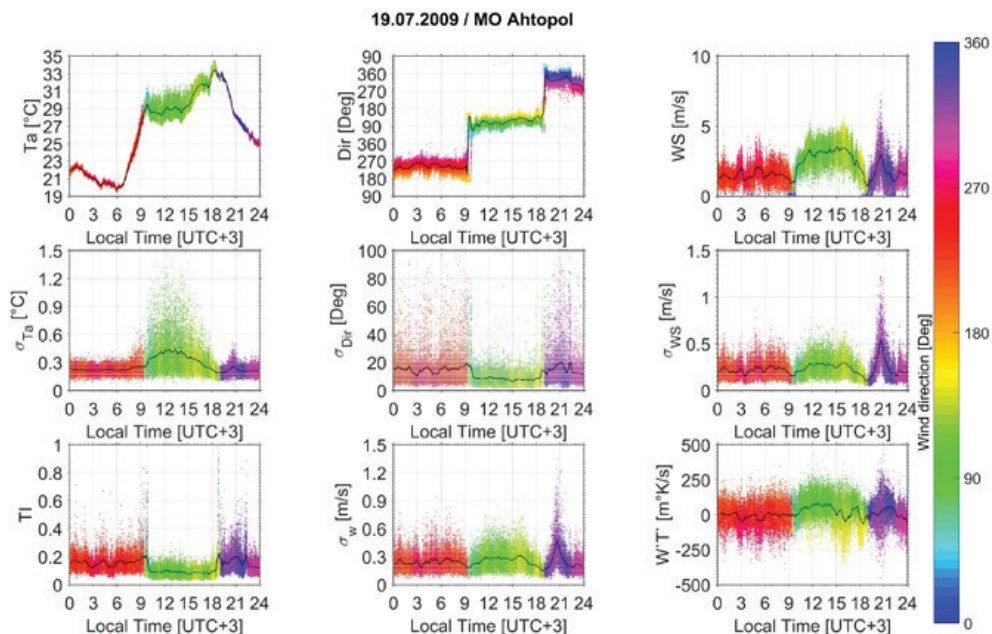


Фиг.5. Схематично представяне на трите основни типа бризова циркулация наблюдавани в МО Ахтопол: а) Клас I; б) Клас II; в) Клас III

Fig.5. Schematic representation of three main types of breeze circulation observed in the MO Ahtopol: a) Class I; b) Class II; c) Class III

4.1. Бризови циркуляции от Клас I

Бризовите циркуляции от Клас I се характеризират с бързи преминаващи фронтове в началото и в края на дневния морски бриз, придружени с рязка промяна в посоката на вятъра, Фиг. 5а. Този тип бриз е свързан с ясно изразена локална крайбрежна циркуляция, която се развива при слаби барични полета и големи температурни разлики между морето и сушата през лятото, но понякога се наблюдава и през студеното полугодие.



Фиг.6. Бризова циркуляция от Клас I по данни от акустичен анемометър (малки цветни точки - сурови данни на всеки 2 секунди; черна линия – 20 минутни пълзящи осреднени данни на всеки 10 минути;) От ляво на дясно и от горе на долу: Ta , Dir ; WS , σTa , σDir ; σWS , TI , σW и $W'T$.

Fig.6. Breeze circulation of Class I by acoustic anemometer data (small color dots - raw data every 2 seconds, black line - 20 minute moving averages at every 10 minutes). From left to right and from top to bottom: Ta , Dir ; WS , σTa , σDir ; σWS , TI , σW and $W'T$

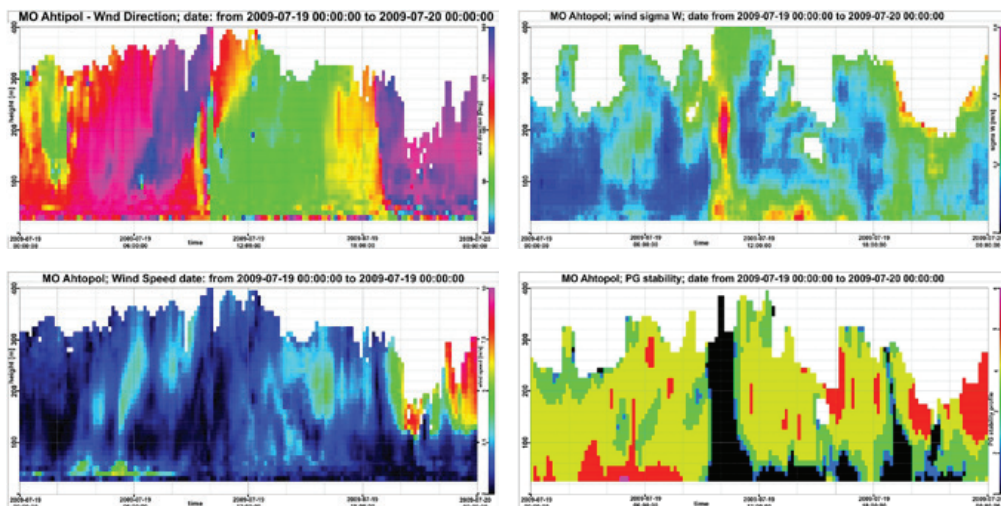
От прегледа на девет параметъра (акустична температура $/Ta/$, посока на вятъра $/Dir/$, хоризонтална скорост на вятъра $/WS/$, стандартно отклонение (дисперсия) на акустичната температура $/\sigma Ta/$, дисперсия на посоката на вятъра $/\sigma Dir/$, дисперсия на хоризонталната скорост $/\sigma WS/$, турбулентна интензивност $/TI/$, дисперсия на вертикалната скорост $/\sigma W/$ и вертикален поток топлина $/W'T/$) от приземните метеорологични измервания на 19 юли 2009 г. (Фиг. 6) се установява, че този тип ясно изразена бризова циркуляция се характеризира с:

- типично голяма за сезона денонощна температурна амплитуда (14 °C), която през летните месеци често надвишава 10 °C (горе - ляво);
- ясно изразени и бързо преминаващи фронтови системи в началото и в края на дневния бриз, които рязко изменят посоката на вятъра при земята с близо 180 Deg за около 10 минути (горе - среда);
- забележителни спадове в пулсациите на скоростта на вятъра (горе – дясно), както и при хоризонталната и вертикална турбулентни компоненти (съответно среда – дясно и долу – среда) непосредствено преди преминаването на фронталните системи сутрин и вечер;
- спад на хоризонтална скорост на вятъра, характеризиращ зоната на затишие на бризовата фронтова система (горе – дясно).

Данните от содара за 19 юли 2009 г. разкриват вертикалната структура на бризовата клетка (Фиг.7) и затвърждават изводите базирани на данните от приземните измервания за ясно изразен тип на бризова циркулация (Клас I). При графиката на посоката на вятъра на Фиг. 7 (горе - ляво) се виждат ясно изразени и бързо преминаващи фронтове (в началото и в края на дневния бриз), които рязко изменят посоката на вятъра за 10-20 минути в почти целия вертикален обхват на содара. В зависимост от сезона, поради различните пространствени мащаби на локалната крайбрежна циркулация, е възможно ефективният обхват на содара изцяло да покрие вертикалните пространствени мащаби на бризовата клетка (затворена бризова клетка попаднала в обхвата на содара). Друг характерен признак при вертикалната структура на Клас I е добре обособено ядро в полето на скоростта, където се достигат максималните за бризовата циркулация стойности (Фиг. 7, долу - ляво). Аналогично на приземните измервания, при акустичните сондажи, малко преди преминаването на фронта, както и в началото на неговото преминаване скоростта на вятъра намалява почти до тихо време. Началото на Клас I бризова циркулация е свързано също така със забележимо нарастване на стойностите в полето на дисперсията на вертикалната скорост в почти целия вертикален обхват на содара (Фиг. 7, горе - дясно). Наблюдава се и развитие на добре изразена неустойчива стратификация във височина, свързана отново с преминаването на фронталните системи и зоните на затишие (Фиг. 7, долу - дясно).

Изменението на посоката на вятъра откъм морето е в синхрон с приземните данни, според които това изменение настъпва след 09:20 часа. В този момент за 10 - 20 минути в слоя между 150 - 220 m над земната повърхност, може да се отчете преминаване на първичен фронт на дневния бриз, последван от същинския фронт на бриза в 10:00 часа, който трайно изменя посоката на вятъра във височина откъм морето. Такъв тип кратко и рязко изменение на посоката на вятъра (откъм морето за около 10 мин), при земята и/или във височина, последвано от кратко и рязко изменение на вятъра откъм сушата преди въздушния поток да се стабилизира окончателно откъм морето (т.е. преминаване на първичен фронт на морски бриз) би могло да се регистрира, както при бризови циркулации от Клас I, така и при

Клас II. Възможни са случаи, при които се наблюдава преминаване на вторичен фронт след първичния (Фиг.8), който е последван от същинския фронт на бризовата циркуляция. Този тип бризови циркуляции се случват сравнително рядко и често са повлияни от мезомасщабни процеси. Степента на влияние на синоптичните процеси върху локалната крайбрежна циркуляция обуславя една от съществените разлики между Клас I и Клас II бризова циркуляция.

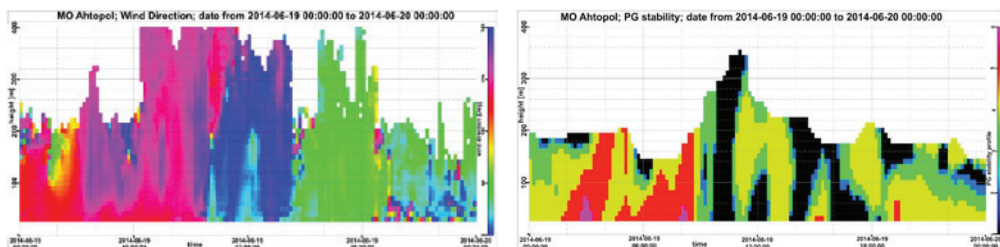


Фиг. 7. Пространствено-времеви сечения от акустично сондиране на атмосферата, характеризиращи бризова циркуляция от Клас I на дата 19 юли 2009 г. в МО Ахтопол. От горе на долу и от ляво на дясно: посока на вятъра, скорост на вятъра, дисперсия на вертикалната скорост на вятъра, клас на устойчивост по Pasquill-Gifford. Местно време (GMT + 3).

Fig. 7. Spatio-temporal cross-sections of acoustic atmospheric sounding characterizing breeze circulation of Class I on 19 July 2009 at the MO Ahtopol. From top to bottom and from left to right: wind direction, wind speed, vertical wind speed dispersion, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3).

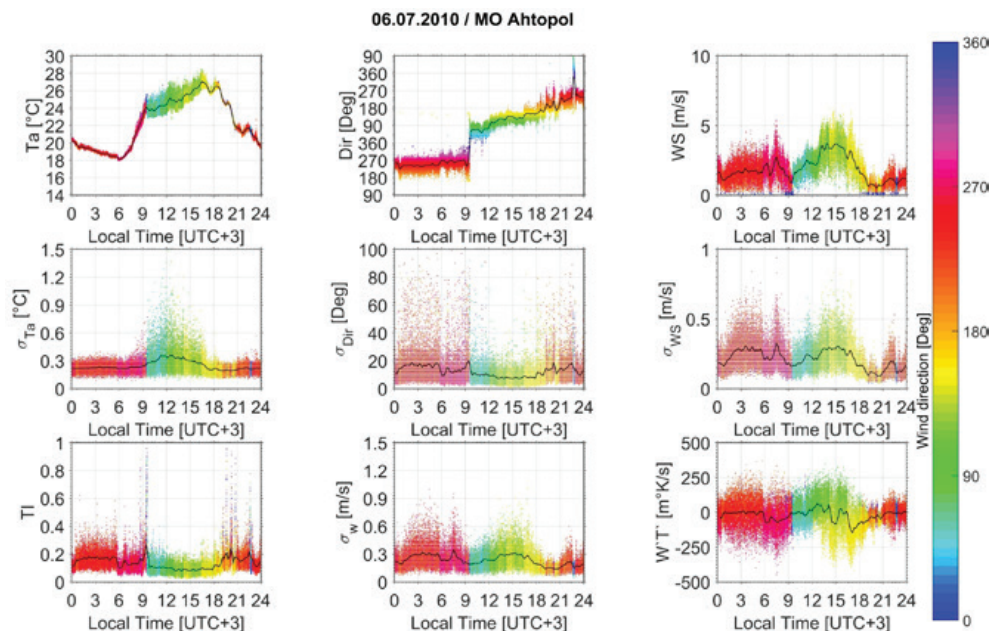
4.2. Бризови циркуляции от Клас II

Бризовите циркуляции от Клас II се характеризират с бързо преминаващ фронт на бриза в началото и постепенно изменение на посоката на вятъра в края на бризовата циркуляция (Фиг. 5b). При този тип бризова циркуляция също е възможно да се наблюдава преминаване на първичен и вторичен фронт в началото на бризовата циркуляция, Фиг. 8.



Фиг. 8. Пространствено-времеви сечения с регистриран вторичен фронт на бризова циркуляция на дата 19 юни 2014 г. в МО Ахтопол. От ляво на дясно: посока на вятъра, клас на устойчивост по *Pasquill-Gifford*. Местно време (GMT + 3)

Fig. 8. Spatio - temporal sections with a registered secondary front of breeze circulation on 19 June 2014 at the MO Ahtopol. From left to right: wind direction, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3)

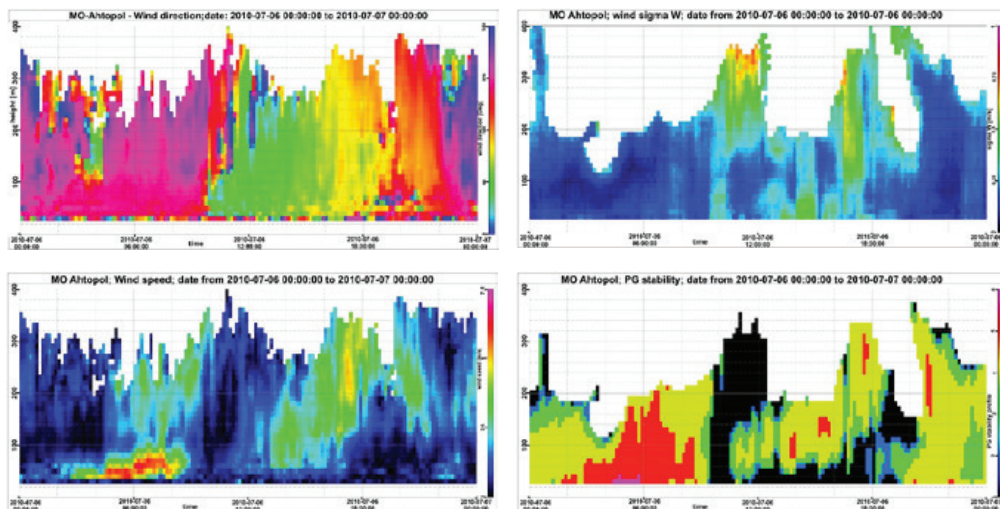


Фиг.9. Бризова циркуляция от Клас II (приземни данни представени като на Фиг.6)

Fig. 9. Breeze circulation of Class II (surface layer data presented as in Fig. 6)

Чрез акустичните дистанционни измервания в атмосферата също се установяват разлики в полето на вятъра между Клас I и Клас II (виж Фиг. 7 и Фиг. 10). При Клас II следобедният преход в посоката на вятъра е плавен във времето и във височина, а скоростта на вятъра след края на морския бриз е по-голяма в сравнение с Клас

I. Тези разлики са свързани и с различното влияние на синоптични процеси върху бризовия поток във височина в двата случая. По-подробен анализ на взаимодействието между локални и мезометеорологични процеси е представен в Barantiev et al. (2011) и Batchvarova et al. (2012).



Фиг. 10. Пространствено - времеви сечения характеризиращи бризова циркулация от Клас II на дата 06 юли 2010 г. От горе на долу и от ляво на дясно: посока на вятъра, скорост на вятъра, дисперсия на вертикалната скорост на вятъра, клас на устойчивост по Pasquill-Gifford. Местно време (GMT + 3).

Fig. 10. Spatio-temporal sections characterizing breeze circulation of Class II on 06 July 2010. From top to bottom and from left to right: wind direction, wind speed, vertical wind speed dispersion, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3).

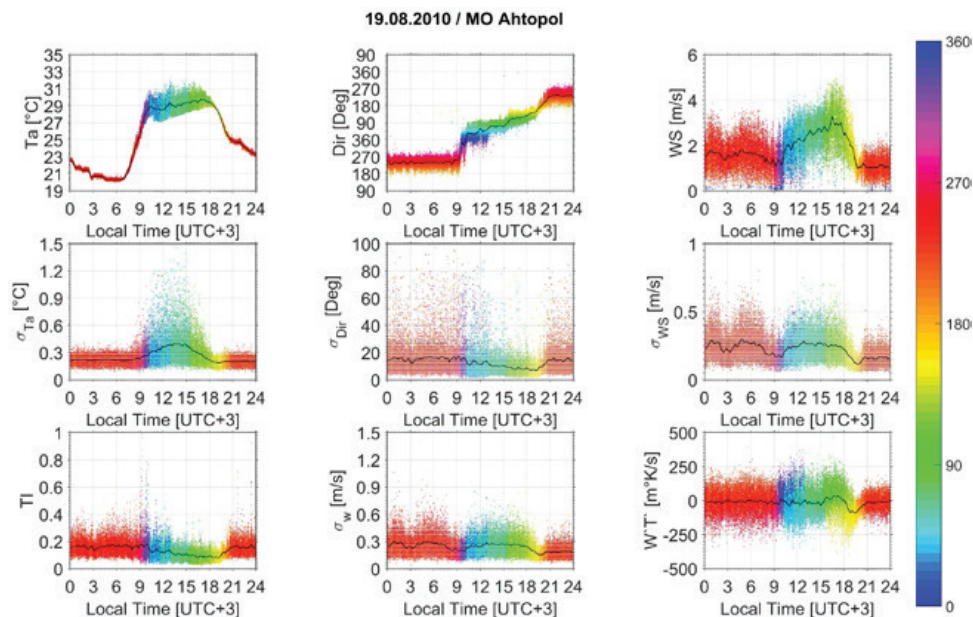
От приземните метеорологични измервания се установява (Фиг. 9), че наблюдаваните изменения на параметрите при този тип бризова циркулация са доста близки до тези на ясно изразения тип бриз (Клас I) с изключение на плавно изменящата се посока на вятъра в края на дневния бриз. Като основни разлики могат да се почертаят стойностите на денонощните температурни амплитуди и дисперсиите на акустичните температури на атмосферният въздух, които са по-ниски при Клас II (Фиг. 9, горе - ляво) в сравнение с Клас I (Фиг. 6, горе - ляво). Разлики между двата класа се наблюдават и при изменението на посоката на вятъра при преминаването на фронта в началото на бризовата циркулация, като при Клас II изменението рядко надвишава 120 Deg. Разлики има и при квазистационарните условия, свързани с устойчивостта на наблюдаваните метеорологични параметри, характеризиращи въздушния поток откъм морето при дневен бриз. Причината за тези различия може да се асоциира със слабо влияние на мезомасштабни процеси

върху локалната крайбрежна циркулация. При Клас II е възможно преминаването на фронта близо до земната повърхност да протече за по-дълъг период от време в сравнение с този от Клас I. Последвалите след фронта по-слабо квазистационарни условия на дневният бриз от Клас II водят до по-голяма нестабилност при насочеността на въздушния поток откъм морето с изменения достигащи ± 30 Deg от характерната посока на дневния бриз в района (Фиг. 9, горе - среда), по-ниски стойности на хоризонталната скорост на вятъра и вертикалния топлинен поток в началото на бризовата циркулация, както и по-кратко времетраене на задържане на характерните средни стойности на тези параметри при дневен бриз (Фиг. 9 в сравнение с Фиг. 6).

4.3. Бризови циркулации от Клас III

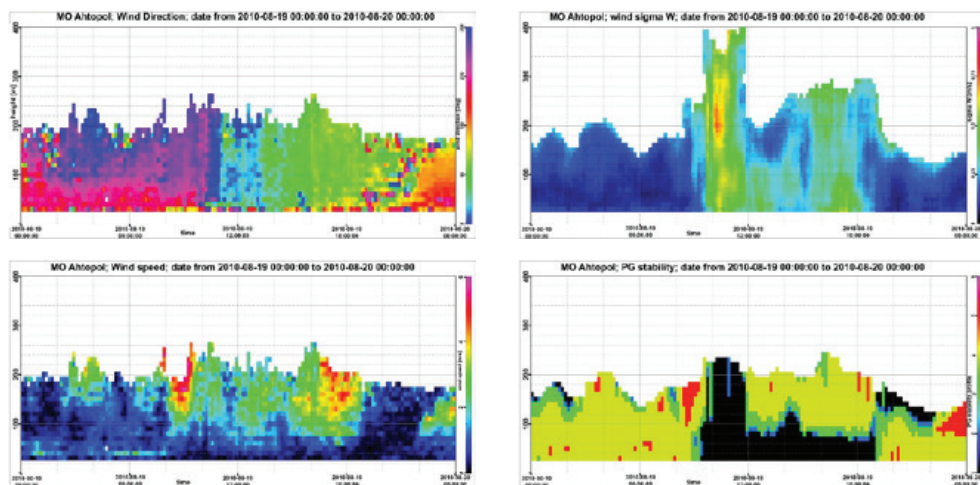
Бризови циркулации от Клас III се характеризират с постепенно изменение на посоката на вятъра, както в началото, така и в края на дневния бриз (Фиг. 5 – с). Такава бризова циркулация се регистрира сравнително често в изследвания район. При този клас в повечето случаи се наблюдава влияние на мезомасщабни процеси, което в голяма степен може да доминира над локалните процеси в крайбрежния район. На Фиг. 11 са представени данни от приземните метеорологични измервания характерни за бризова циркулация от Клас III. Съществено за този клас са наблюдаваните по-големи изменения на посоката на вятъра откъм морето, които изменения могат да достигнат отклонение от ± 45 Deg от характерната посока на локалната крайбрежна циркулация. Скоростта на вятъра при земята може да варира в доста по-големи граници по време на дневния бриз в сравнение с Клас I и Клас II, в зависимост от това дали синоптичните процеси подсилват или отслабват влиянието на възникналите локални сили. Характерното плавно изменение на посоката на вятъра, в началото и края на бризовата циркулация отнема над 10 мин при земята и над 20 мин във височина. Продължителността и височината, до която могат да достигнат пространствените и времевите мащаби на бризовата циркулация от този клас, зависят от сезона и от степента на влияние на мезомасщабните процеси. При вертикалната структура на бризова циркулация от Клас III се наблюдава нормално изразена бризова клетка в полетата на скоростта и посоката на вятъра (Фиг. 12).

Измененията в хомогенността в полето на посоката на вятъра по време на този дневен тип локална циркулация са ясно изразени в началото и в края на морския бриз. В полето на скоростта на вятъра също се наблюдава не постоянност на потока, като често максималните стойности се достигат малко преди края на дневния бриз. По-слабото въздействие на локалните сили от своя страна, също биха могли да се проявят с преминаване на първичен и вторичен фронт в началото на бризовата циркулация.



Фиг.11. Бризова циркуляция от Клас III (приземни данни представени като на Фиг. 6)

Fig. 11. Breeze circulation of Class III (surface data presented as in Fig. 6)



Фиг. 12. Пространствено-времени сечения характеризиращи бризова циркуляция от Клас III на дата 19 август 2010 г. От горе на долу и от ляво на дясно: посока на вятъра, скорост на вятъра, дисперсия на вертикалната скорост на вятъра, клас на устойчивост по Pasquill-Gifford. Местно време (GMT + 3).

Fig. 12. Spatio-temporal sections characterizing breeze circulation of Class III on 19 August 2010. From top to bottom and from left to right: wind direction, wind speed, vertical wind speed dispersion, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3).

5. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРЕДЛОЖЕНАТА КЛАСИФИКАЦИЯ

Класификацията на бризови циркулации, определена схематично на Фиг. 5, ни позволява да сравняваме броя и вида на бризовите клетки отчетени чрез провежданите акустични измервания в МО Ахтопол. В Таблица 3 са представени обработени данни от тримерния ултразвуков анемометър на AMC MK-15 и сондиранията на SCINTEC MFAS Sodar, оказващи броя на дните, в които са се провеждали измервания със съответната апаратура (втора колона), брой на дни с регистрирана бризова циркулация (трета колона), както и тяхното класифициране според начина на преминаване на локалните им фронтове в периода юли-септември на 2009 г (последните три колони). Наличността на данни при содара е малко по-висока, отколкото при ултразвуковия анемометър през разглеждания период, но броят на регистрираните дни с бризова циркулация е по-висок при приземните измервания. Това се дължи на по-силното влияние на подложната повърхност върху измерванията на височина 4.5 m. Влиянието на подложната повърхност може да се отчете и чрез наблюдавания максимум на регистрирани бризови циркулации от Клас II при приземните измервания, който максимум се измества към Клас III при акустичните сондирания на атмосферата.

Таблица 3. Анализ на регистрирани дневни бризови циркулации в МО Ахтопол през периода от юли до септември на 2009 г. и класифицирането им в трите основни класа според начините на преминаване на локалните им фронтални системи (тримерен ултразвуков анемометър на AMC MK 15 – червен цвят; SCINTEC MFAS Sodar – син цвят).

Table 3. Analysis of registered sea breezes at MO Ahtopol during the period from July to September 2009 and their classification in three basic classes depending on the type of passage of their local frontal systems (three-dimensional ultrasonic anemometer of AMC MK 15 - red colour; SCINTEC MFAS Sodar - blue colour).

2009 Месец	Брой дни със соник и содарни данни	Брой дни с бризова циркулация	Клас I	Клас II	Клас III
Юли	30 / 31	28 / 18	6 / 1	16 / 7	6 / 10
Август	30 / 30	18 / 12	2 / 0	15 / 3	1 / 9
Септември	26 / 29	16 / 11	2 / 0	13 / 4	1 / 7

Броят на регистрираните от содара бризови циркулации и тяхното класифициране през едни и същи месеци варират от година на година в зависимост от броя на създалите се благоприятни условия за развитие на локална циркулация, определена от динамиката на мезометеорологичните процеси над Южното Българско Черноморие. В Таблица 4 са представени статистически данни за над четири годишен период на измерване в МО Ахтопол. Показани са броят на дните с оперативен режим на содара, броят на регистрираните дневни бризови циркулации и съответно тяхното класифициране през различните разглеждани месеци и години. От данните в таблицата се вижда, че най-благоприятната

календарна година за развитие на бризова циркулация през разглеждания период е била 2009 г., а тази с най-нисък брой регистрирани е била 2010 г.

Таблица 4. Брой регистрирани дневни бризови циркулации по данни от акустично сондиране на атмосферата (SCINTEC MFAS Sodar) и тяхното разпределение по класове през различните месеци и години от период на измерване -20 юли 2008 г. до 10 октомври 2012 г. в МО-Ахтопол

Table 4. Number of registered sea breezes according data from acoustic atmospheric sounding (SCINTEC MFAS Sodar) and their distribution by classes during the different months and years of the measurement period -20 July 2008 to 10 October 2012 in MO Ahtopol

Класификация на бриз SCINTEC MFAS Sodar (Ахтопол)		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Годишно
2008	дни с измервания	-	-	-	-	-	-	10	29	26	31	30	31	157
	дни с бриз	-	-	-	-	-	-	2	15	11	15	6	2	51
	Клас I	-	-	-	-	-	-	0	1	1	0	0	0	2
	Клас II	-	-	-	-	-	-	1	1	2	2	0	0	6
	Клас III	-	-	-	-	-	-	1	13	8	13	6	2	43
2009	дни с измервания	31	28	31	30	31	30	31	31	30	20	30	31	354
	дни с бриз	6	10	17	15	23	27	18	12	11	5	14	2	160
	Клас I	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3
	Клас II	0	1	0	1	3	6	7	3	4	1	1	0	27
	Клас III	5	9	17	14	20	20	10	9	7	4	13	2	130
2010	дни с измервания	31	28	29	23	31	27	31	31	30	30	30	31	352
	дни с бриз	4	7	10	9	27	15	9	9	10	4	10	3	117
	Клас I	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4
	Клас II	0	3	3	2	3	4	1	2	2	0	0	2	22
	Клас III	4	3	6	7	23	10	8	7	8	4	10	1	91
2011	дни с измервания	31	28	31	30	31	30	29	31	13	25	30	28	337
	дни с бриз	9	7	11	9	12	19	23	18	4	9	11	2	134
	Клас I	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	Клас II	1	2	1	2	1	1	3	0	0	3	2	0	16
	Клас III	8	5	8	7	11	18	20	18	4	6	9	2	116
2012	дни с измервания	24	29	31	30	31	30	31	13	25	10	-	-	254
	дни с бриз	2	9	13	12	18	20	11	5	7	8	-	-	105
	Клас I	0	0	1	1	0	1	0	0	0	2	-	-	5
	Клас II	1	3	2	2	6	4	2	1	2	1	-	-	24
	Клас III	1	6	10	9	12	15	9	4	5	5	-	-	76
Общо	дни с измервания	117	113	122	113	124	117	132	135	124	116	120	121	1454
	дни с бриз	21	33	51	45	80	81	63	59	43	41	41	9	567
	Клас I	1	1	4	1	1	3	1	1	1	2	0	0	16
	Клас II	2	9	6	7	13	15	14	7	10	7	3	2	95
	Клас III	18	23	41	37	66	63	48	51	32	32	38	7	456

Подробен анализ на 2009 година е представен в Novitzky et al. (2012). Увеличаване на бризовите циркулации се наблюдава през топлото полугодие, през месеците от май до август. Рекордна наличност на регистриран бриз се наблюдава през месец юни (малко над 70% от дните с измервания), а като месец с най-нисък регистриран брой може да се отбележи декември, последван от януари и февруари. Броят на локалните крайбрежни циркулации определени като Клас III доминира с един порядък над останалите два класа. Поради често доминиращо влияние на мезометеорологичните процеси над локалните такива в изследвания район най-рядко са регистрирани бризови циркулации описани от Клас I – едва 16 от общо 567 дни, което се равнява на по-малко от 3% от случаите на регистриран бриз.

Крайбрежният АГС е сложно разслоен поради рязкото изменение на физичните свойства на постилащата повърхност и в условията на бриз се създава инверсно разпределение на температурата определено от нахлуването на по-хладна въздушна маса, която като клин измества във височина топлата въздушна маса. Поради тази причина температурата в по-високите слоеве на атмосферата достига по-големи стойности отколкото при земната повърхност, създавайки условия за стабилност в атмосферата. Като резултат от това, в крайбрежните зони през летните месеци, образуването на конвективна облачност и свързаните с нея явления, като валежи и гръмотевични бури намаляват, докато при слънчевото греење се наблюдава увеличаване с близо 10% (Сиракова, 2000). През 2014 г. в рамките на съвместния българо-турски научен проект SAAP4FUTURE (Georgieva et al., 2015), бе проведено изследване на суха, мокра и обща депозиция, за което също бяха използвани данни от акустичното сондиране на атмосферата и се извърши анализ на регистрирани бризови циркулации в изследвания район, указани в Таблица 5.

Таблица 5. Максимален обхват и наличност на данни от содара с приложена бризова класификация (Фиг. 5) от юни до ноември на 2014 г.

Table 5. Maximum range and sodar data availability with applied breeze classification (Fig. 5) from June to November 2014

SCINTEC MFAS Sodar	(Ахтопол) 2014					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
максимален обхват [m]	720	720	720	630	750	630
наличност на данни	99.8%	90.0%	61.4%	51.7%	98.5%	97.4%
брой профили	4310	4016	2739	2233	4398	4207
дни с измервания	30	28	19	15	31	30
дни с бриз	15	20	14	7	6	7
Клас I	0	1	0	1	0	1
Клас II	5	1	3	2	3	1
Клас III	11	18	11	4	3	5

Първият ред от таблицата показва максималния обхват достигнат от содара, а вторият и третият ред наличността на данни изразени съответно в проценти и брой времеви серии на измерване през различните месеци на проведената кампания. Ниската наличност на данни през август и септември се дължи на сериозен

проблем в основното електрическо захранване на обсерваторията през периода 20.08.2014 - 15.09.2014. Последните четири реда от Таблица 5 показват общия брой на дните с регистрирана бризова циркулация и тяхното разпределение по класове. Най-висок брой на дни с бриз е наблюдаван през юли, а като доминиращ тип бризова циркулация през разглеждания период (отново като в Таблица 3) може да се определи Клас III. Изключение прави единствено месец октомври, при който се наблюдават еднакъв брой на регистрирани дни с бриз от Клас II и Клас III. Най-ниска наличност се наблюдава отново при Клас I. Обособените сухи периоди по време на проведената кампания на проекта SAAP4FUTURE (от юни до ноември 2014 г.) са указани в първата колона на Таблица 6, а във втората броя на дните с измервания в самите сухи периоди, като големината на баровете в тази колона е определена от максималния по времетраене сух период.

Таблица 6. От ляво на дясно: определени сухи периоди, брой на дните с измервания от содара, процентно наличие на дневен бриз, разпределение на бризовите циркулации по класове

Table 6. From left to right: certain dry periods, number of days with sodar measurements, percentage of sea breeze, distribution of breeze circulations by classes

Сухи периоди (2014)	Дни с измервания	Наличие на бриз	Клас I	Клас II	Клас III
02 - 04 VI	3	66,7%	0,0%	0,0%	66,7%
05 - 14 VI	8	25,0%	0,0%	12,5%	12,5%
16 - 18 VI	3	100,0%	0,0%	66,7%	33,3%
21 VI - 04 VII	14	57,1%	0,0%	7,1%	50,0%
04 - 12 VII	9	77,8%	0,0%	11,1%	66,7%
12 - 16 VII	5	80,0%	0,0%	0,0%	80,0%
16 - 23 VII	8	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%
24 VII - 01 VIII	6	66,7%	16,7%	0,0%	50,0%
01 - 08 VIII	8	75,0%	0,0%	0,0%	75,0%
08 - 17 VIII	10	70,0%	0,0%	30,0%	40,0%
17 - 25 VIII	3	33,3%	0,0%	0,0%	33,3%
25 VIII - 03 IX	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
07 - 14 IX	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
17 - 23 IX	7	42,9%	14,3%	14,3%	14,3%
23 - 26 IX	4	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%
27 IX - 08 X	12	25,0%	0,0%	8,3%	16,7%
08 - 23 X	16	25,0%	6,3%	6,3%	12,5%
31 X - 13 XI	14	21,4%	0,0%	7,1%	14,3%
16 - 19 XI	4	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%
20 - 24 XI	5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
25 - 30 XI	6	16,7%	0,0%	0,0%	16,7%

При всички разглеждани сухи периоди, при които се е осъществявало акустично сондиране на атмосферата, са налични дни с бризова циркулация (Таблица 6 - третата колона). Последните три колони на Таблица 6 оказват процентното разпределение на отчетените дневни бризови циркулации според представената

класификация. Като относително дълги сухи периоди с регистриран висок брой на дни с бризова циркулация (над 70%) могат да бъдат посочени следните периоди: 04-12 юли, 01-08 август и 08 -17 август. При последния от посочените периоди се наблюдава високо наличие на бризови циркулации от Клас II. През един от най-кратките сухи периоди (13-15 юли) са регистрирани бризови циркулации от Клас III през всички му дни.

6. ИЗВОДИ

Предложената класификация на бризовата циркулация в района на Ахтопол систематизира наблюдаваните особености в режима на метеорологичните параметри за дълъг период от непрекъснати наблюдения с висока пространствена и времева резолюция. Бризова циркулация се наблюдава по Българското Южно Черноморие целогодишно. През студеното полугодие честотата е по-ниска, а времевите и пространствени мащаби – по-малки. Това от своя страна води до сезонни и дори месечни изменения в характеристиките на бризовата циркулация във всеки един от класовете. Множество различни ситуации на взаимодействие между локални и синоптични процеси е причина наред с основните класове на бризовата циркулация да се наблюдават и различни частни случаи.

Предложената типизация на бризови клетки по приземни и/или вертикални сондирания е новост, позволяваща да се охарактеризират наблюдаваните процеси по редица признаци в изменението на основни метеорологични елементи и турбулентността, както близко до земната повърхност, така и във височина. Тя е приложена за първи път на Българското Черноморие и разкрива значими детайли в еволюцията и структурата на дневния бриз. Границите на нейната приложимост са с широк обхват от научна и практическа гледна точка. Тя би могла да се използва при бъдещи метеорологични и климатични проучвания в крайбрежни зони, при проверка на резултатите от мезометеорологично моделиране, във връзка с опазването на качеството на атмосферния въздух и редица други научни изследвания, при които локална крайбрежната циркулация е значим фактор.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тези научни изследвания станаха възможни в резултат от успешното сътрудничество между НПО «Тайфун» – Росгидромет и НИМХ-БАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Barantiev, D., Novitsky, M. and Batchvarova, E., 2011. Meteorological observations of the coastal boundary layer structure at the Bulgarian Black Sea coast. *Advances in Science and Research (ASR)*, (6): 251-259.
- Batchvarova E. and S.-E. Gryning, 1998: Wind climatology, atmospheric turbulence and internal boundary layer development in Athens during the MEDCAPHOT-TRACE experiment. *Atmospheric Environment*, v 32, 2055-2069.
- Batchvarova, E., Barantiev, D. and Novitsky, M., 2012. Coastal Boundary layer wind profile based on SODAR data – Bulgarian contribution to COST Action ES0702, The 16th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing – ISARS Boulder, Colorado, USA.
- Belberov, Z.K., Zahariev, V.I., Kuznetsov, O.A., Massel, S., Pykhov, N.V., Rojdestvensky, A.V. and Filyushkin, B.N., 1980. Interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the nearshore zone -results of the international experiment „Kamchiya 78“, I. Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- Belberov, Z.K., Antsyferov, S.M., Zahariev, V.I., Zats, V.I. and Pykhov, N.V., 1982. Interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the nearshore zone -results of the international experiment „Kamchiya 78“, II. Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- Belberov, Z.K., Zahariev, V.I., Kuznetsov, O.A., Pykhov, N.V., Filyushkin, B.N. and Zaslavski, M.M., 1983. Interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the nearshore zone -results of the international experiment „Kamchiya 78“, III. Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- Cimini, D., Visconti, G. and Marzano, F.(eds), 2010. Integrated Ground-Based Observing Systems, 10.1007/978-3-642-12968-1_1. Springer.
- Coulter, R.L. and Kallistratova, M.A., 2004. Two decades of progress in SODAR techniques: a review of 11 ISARS proceedings. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 85: 3-19.
- Dirk, A.M.E.e.a.E., 2009. COST 720 - Final Report: Integrated ground-based remote-sensing stations for atmospheric profiling : . Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg 422 pp.
- Emeis, S., 2010. Surface-based remote sensing of the atmospheric boundary layer. *Atmospheric and oceanographic sciences library*. Springer Berlin Heidelberg, New York.
- Floors, R., Vincent, C.L., Gryning, S.-E., Peña, A. and Batchvarova, E., 2013. The wind profile in the coastal boundary layer: wind lidar measurements and numerical modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 147(3): 469-491.
- Georgieva, E., Oruc, I., Hristova, E., Velchev, K., Kirova, H., Syrakov, D., Prodanova, M., Neikova, R., Veleva, B., Barantiev, D., Petrov, A., Kolarova, M., Nikolov, V., Batchvarova, E. and Branzov, H., 2015. Joint study of anthropogenic air pollution in the Burgas - Kırklareli cross-border area as a step towards future assessments on its impact on the population and the environment. Scientific Report, co-funded by EU through the Bulgaria – Turkey Cross-Border Programme CCI number 2007CB16IPO008.
- Gryning, S.-E., Floors, R., Peña, A., Batchvarova, E. and Brümmer, B., 2016. Weibull wind-speed distribution parameters derived from a combination of wind-lidar and tall-mast measurements over land, coastal and marine sites. *Boundary-Layer Meteorology*, 159(2): 329–348.

- Hsu, S.A., 1986. A note on estimating the height of the convective internal boundary layer near shore. *Boundary-Layer Meteorology*, 35(4): pp 311-316.
- Illingworth, A.J., Ruffieux, D., Cimini, D., Lohnert, U., Haeffelin, M. and Lehmann, V., 2013. COST Action ES0702 Final Report: European Ground-Based Observations of Essential Variables for Climate and Operational Meteorology, COST Office, PUB1062.
- Kerman, B.R., Mickle, R.E., Portelli, R.V., Trivett, N.B. and Misra, P.K., 1982. The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978 - II. Internal boundary-layer structure. *Atmospheric Environment*, 16(3): 423-437.
- Novitsky, M., Kulizhnikova, L., Kalinicheva, O., Gaitandjiev, D., Batchvarova, E., Barantiev, D., Krasteva, K., 2012. Characteristics of speed and wind direction in atmospheric boundary layer at southern coast of Bulgaria. In Russian, *Meteorologia i Gydrolgia* 37(3): 159-164.
- Peña, A., Floors, R.R., Sathe, A., Gryning, S.-E., Wagner, R., Courtney, M., Larsén, X.G., Hahmann, A.N. and Hasager, C.B., 2016. Ten Years of Boundary-Layer and Wind-Power Meteorology at Høvsøre, Denmark. *Boundary-Layer Meteorology*, 158(1): 1-26.
- Portelli, R.V., 1982. The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978—I. Experimental design and program overview. *Atmospheric Environment*, 16(3): 413-421.
- Simpson, J.E., 1994. Sea breeze and local winds. Cambridge University Press.
- Wilczak, J.M., Dabberdt, W.F. and Kropfli, R.A., 1991. Observations and Numerical Model Simulations of the Atmospheric Boundary Layer in the Santa Barbara Coastal Region. *Journal of Applied Meteorology*, 30(5): 652-673.
- Wiman, B.L.B., Velchev, K., Gaydarova, P.N., Donev, E.H. and Yurukova, L., 2002. A Note on Aerosol Mass-versus-size Distributions in the South-East Bulgarian Black Sea Coastal Region. *Bulgarian Journal of Meteorology & Hydrology*, 13((1-2)): 26-39.
- Баратиев, Д., 2016. Характеристики на атмосферния граничен слой в крайбрежната зона на град Ахтопол по содарни и моделни данни, Дисертация за получаване на научната и образователна степен Доктор, София, 217 стр.
- Бъчварова, Е. и Донеv, Е., 1983. Спектрални оценки на концентрацията на някои замърсители на атмосферата и някои метеорологични параметри в гр. Бургас. *Хидрология и метеорология*, XXXII(2): 70-72.
- Бъчварова, Е., 1984a. Някои предварителни резултати от микрометеорологичен дифузионен експеримент с трасер. *Хидрология и метеорология*, XXXIII(3): 53-57.
- Бъчварова, Е., 1984b. Някои предварителни резултати от микрометеорологичен дифузионен експеримент с използване на серен шестофлуорид като трасер. *Българско геофизично списание*, X(4): 19-29.
- Бъчварова, Е., 1985. Изследване на развитието на термичен вътрешен граничен слой и разпространението на примеси в него. Автореферат на дисертация за получаване на научната степен “Кандидат на физическите науки”, София: 36 стр..
- Бъчварова, Е., 2006. Теоретични и експериментални изследвания на височината на конвективния граничен слой в атмосферата при различни постилащи повърхности, Дисертация за научната степен Доктор на физическите науки, София, 153 стр.
- Йорданов, Д. и Бъчварова, Е., 1985a. Върху използването на теорияна подобие при изучаване на дифузията в условията на бризова циркулация. *Българско геофизично списание*, XI(3): 19-29.

- Йорданов, Д. и Бъчварова, Е., 1985b. Върху височината на вътрешния граничен слой при морска бризова циркулация. Българско геофизично списание, XI(2): 21-28.
- Корчев, Г. и Манолов, Л., 1983. Експеримент за изучаване на бризовата циркулация по Българското Черноморско крайбрежие. Хидрология и метеорология, година XXXII(кн. 2): 72-74.
- Кючукова, М., 1983. Климатичен справочник за НР България - том III. Температура на въздуха, температура на почвата, слана, III. ДИ «Наука и изкуство», София, България, 440 стр.
- Сиракова, М., 2000. Атмосфера и климат. Херон Прес, София, 243 стр.
- Събев, Л.С., Св., 1963. Климатичните райони на България и техния климат. Земиздад, София, България.



Influence of climate change (by 2050) on the intensive rainfall on the territory of Bulgaria

Valery Spiridonov, Snezhanka Balabanova*

*National Institute of Meteorology and Hydrology- BAS (NIMH- BAS),
Tsarigradsko shose 66, 1784 Sofia, Bulgaria*

Abstract: The change of the intensive precipitation with a threshold above 10 mm has been investigated. This is done directly by determining the proportion of such rainfall from the future to the reference period. The Monte Carlo method has been used to test the sustainability of trends by identifying areas where rainfall is most commonly observed in all developments of the model's internal variability for the integration period. The climate change signal indicates an increase in precipitation where it prevails so far. The least affected area is Eastern Bulgaria, except Strandja Mountain. The most affected are West and Northwestern Bulgaria.

Keywords: intensive rainfall, climate changes

Влияние на климатичните промени (до 2050 г.) върху интензивните валежи на територията на България

Валери Спиридонов Снежанка Балабанова*

*Национален Институт по Метеорология и Хидрология – БАН,
бул. „Цариградско шосе 66“, 1784 София*

Резюме: Проучена е промяната на интензивните валежи с праг над 10 мм. за 6 часа. Това се прави директно, като се определи делът на такива валежи от бъдещето до референтния период. Методът „Монте-Карло“ е използван за тестване на устойчивостта на тенденциите чрез идентифициране на областите, в които валежите

* snezana.balabanova@meteo.bg

най-често се наблюдават при всички развития на вътрешната вариабилност на модела за интеграционния период. Сигналът за изменението на климата показва увеличение на валежите там, където то доминира и досега. Най-слабо засегнатата област е Източна България, с изключение на Странджа планина. Най-засегнати са Западна и Северозападна България.

Ключови думи: интензивни валежи, климатичните промени

1. УВОД

В значителна част от изследвания на климатичните промени се акцентира върху общите промени на температурата и валежите. Отбелязва се и тенденция за нарастване на интензивните валежи, дори когато валежните суми като цяло намаляват. Когато тези изследвания се основават на симулации с глобални климатични модели (ГКМ) тяхната резолюция, която е от порядъка на 150-300 км, не позволява по-детайлно изследване на климатичните тенденции. За да се преодолее този недостатък се използват техники за уточняване на промените (downscaling). За целта се прилагат два подхода, статистически (Sunyer et al., 2015) или динамични с регионални климатични модели (РКМ). В литературата втория метод често се означава като ‘dynamical downscaling’. При трях РКМ се «захранват» чрез граничните условия от ГКМ, но имайки по-добра резолюция те позволяват да се отчетат повече детайли в изследвания регион. Има различни статистическите методи за downscaling, като аналогови, използващи връзки между циркулационните характеристики на различни метеорологични полета с приземните наблюдения, регресионен анализ, невронни мрежи, генератори на време. Обзор на тези методи е даден в Trzaska et al., 2014. Всички те са ограничени от гъстотата и честотата на наблюденията, чрез които се определят статистическите характеристики на изследвания елемент. Например, в България наблюдения на валежите на всеки 6 часа за достатъчно дълъг период (30 год.) се правят в 40 синоптични станции, Тази мрежа е недостатъчна за оценка на риска от наводнения в отделните водосбори. Оценка основана на 24 часови суми на валежите за периода 1961-2005 е дадена в Bocheva et al., 2009. За праг е избран денонощен валеж с количество над 30 мм. Сравнени са двата периода 1961-1990 и 1991-2005. Отбелязва се повече от 32% увеличение на валежите над посочения праг за втория период, като за топлото полугодие това увеличение достига 60%. Съобщава се за увеличение на такива валежи и в райони, където количеството валежи остават от порядъка и по-малки в сравнение с първия период. В настоящето изследване първият период е референтен, а промените през втория следва да намерят отражение в тенденциите на бъдещия период, което се отчита и тук. То е с по-малък процент и заради приетия по-рестриктивен праг от 10 мм за 6 часа. В тази работа целта е да се оцени изменението на интензивните валежи разпределени в 1088 водосбора. В този смисъл използването на регионален климатичен модел с

достатъчно гъста мрежа дава повече възможности за изследване на изменението на интензивните валежи в следствие на климатичните промени. Изследванията са проведени с климатичния модел ALADIN, успешно използван в проекта от 6-та рамкова програма CECILIA (Belda et al., 2015; Farda et al., 2010; Skalák et al., 2014; Spiridonov et al. 2005). Неговата резолюция е 10 км, а изходът му е на 6 часа. Това дава възможност за оценка на тези валежи с използване на 6 часов интервал.

2. МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

2.1. Обща постановка

Климатичният експеримент (симулация) е продължително интегриране на климатичния модел до установяване на устойчив режим на промени в атмосферната циркулация, което се предполага да се случи за период до 30 години. Под промени в атмосферната циркулация тук се разбира промени във възникването и развитието на системите от циклони и антициклони водещи до характерните зимно-летни периоди. При това, неявно се предполага ергодност на моделите. Това означава, че ако външните параметри не се менят, то каквото време може да се случи, то се случва в този 30 годишен период. Продължаването на интегрирането няма да доведе до нищо ново при съответния сценарий за промяната на парниковите газове. Въпреки че климатичните и прогностичните модели са много сходни, климатичният експеримент е задача без начални данни, за разлика от прогнозата на времето. Математическото естество на задачата налага да се тръгне от някакви начални условия, но те са произволно взети и след интегриране от една-две години (т.н. Spin up), атмосферата влиза в режим съответстващ на външните условия и състав на атмосферата. При достатъчно продължителен период на интегриране, какъвто е възприетият от Световната метеорологична организация (СМО) 30 годишен период, се предполага, че атмосферната циркулация ще е преминала през различните възможни по-чести или по-редки състояния и ще се е формирал климат, съответстващ на заложените външни и вътрешни фактори, т.е. получили са се „климатичните норми“. Ако интегрираме системата за 30 години при нивото на парниковите газове през периода 1961-1990, „климатът“ който ще намерим би трябвало да прилича на реално осъществилия се. Ако моделът е прецизен и параметризациите са релевантни, то статистическите разпределения на случаите с различните стойности на температура, валеж, вятър и други метеорологични елементи от климатичната симулация трябва да съответстват на случилите се в действителност.

На практика, това не е така и за да се оцени ефектът от промените за бъдещия период, се използват симулации за т.н. „референтен период“, отразяващ състоянието до момента. За референтен период съгласно СМО е взет периода

1961-1990г. Това е условно, доколкото симулацията зависи от заложените парникови газове, а не от началните условия, както бе отбелязано. На практика се използват стойности отразяващи глобалните концентрации измервани около и малко след 2000 г. Иначе казано, референтният период е симулация на зададен изтекъл климатичен период. Някои хидроложки модели изискват ежедневни данни и тогава се прилагат методи за т.н. bias correction, въпреки че с това се модифицира и функцията на плътността на разпределение (probability density function – PDF). Прилаганите техники могат да се обобщят, като определяне на PDF от наблюденията или друг еталон, напр. ре-анализи, бази данни, като CRU и E-OBS, (вж. адресите в литературата), към която функция, чрез трансформация (transfer function) се модифицират резултатите от климатичния експеримент. Тази корекция се прави, за да се редуцират неопределеностите (uncertainties) в моделите породени от различни причини например, неотчитане на различни външни фактори, неточността на параметризационните схеми, влиянието на областта на интегриране при РКМ и други (вж. Teutschbein & Seibert, 2012).

Критичен анализ и обзор на най-често използваните методи е даден в Marau (2016). Повечето методи са включени в софтуера разработен в Cattaneo et al. (2015).

Тук ще използваме различен подход, приемайки хипотезата, че систематичните грешки (bias) на избрания модел са приблизително еднакви през референтния и бъдещия периоди и ако се разглеждат измененията от бъдещия период спрямо референтния, тези грешки взаимно ще се компенсират. Тук ще разглеждаме промяната на бройките на 6 часовите валежи с количества над определения праг, независимо от разликите в PDF между симулациите за референтния период и евентуалните наблюдения, каквито нямаме в нужното количество с необходимата гъстота.

Сценариите за климатичните промени се определят, като се предполага различно развитие на човешката дейност и различно отделяне на парникови газове. Те се разработват от IPCC. Обобщени са 40 ‘сценарии’, систематизирани в няколко големи групи в SRES (IPCC Special Report on Emissions Scenarios, IPCC, 2007). Тяхната цел е да се уеднаквят симулациите за климатични промени с климатичните хидродинамични модели ГKM и РКМ. На практика, до 2050 година, различните сценарии са статистически неразличими. В разглежданите симулации е използван сценарият A1B, който се счита за най-вероятен, но направените изводи са еднакво статистически значими за всички сценарии до този период. Новата класификация AR5 на IPCC използва т.н. Representative Concentration Pathways (RCP) на практика остава в същите граници за периода до 2015г.

2.2. Определяне на тенденциите

Използваната версия на ALADIN е с резолюция от 10 км. Граничните условия са от глобалния модел ARPEGE_CLIMATE (Déqué, 2007; Déqué et al., 1994).

Областта на интегриране покрива значителна част от Балканския полуостров, но представените резултати са само за територията на България. Изходът от модела е на 6 часа и затова се разглеждат само 6 часовите количества валеж от дъжд. За праг за интензивен валеж е прието количество от 10 мм/м² за 6 часа. Този праг умишлено е избран под възприетия 15 мм, който се използва при изготвяне на предупреждения за опасност от поройни наводнения вече няколко години и е доказал своята релевантност. По такъв начин се компенсира донякъде т.н. ‘drizzling’ ефект. Това е характерен недостатък на моделите, при който значителна част от валежите се образува от ‘ръмене’. За всеки възел от мрежата се пресмята броят на валежите над този праг за референтния и бъдещия периоди. Определени са две граници на изменение. Едната е, когато нарастването на броя на тези валежи е над 5%, а другата за увеличение над 10%, с което се елиминират малобройните случаи.

Направен е и анализ доколко измененията в бъдещия период са устойчиви за конкретно използвания климатичен модел. Приложеният анализ е с идеологията на метода „Монте-Карло”, описана в Spiridonov&Valcheva, (2017). Казано накратко, ако за климатичната симулация на 30 годишен климатичен период формираме различни 10 годишни комбинации, които ще считаме за равно вероятни, броят им е равен на комбинациите от n -елемента от k -ти клас:

$$C(n, k) = n! / (k!(n - k)!)$$

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

$$C(30, 10) = 30045015$$

Методът „Монте-Карло” позволява да се определи достатъчно точно вероятността за събъждане на дадено събитие без да се разглеждат всички възможни случаи. За целта се правят серия случайни извадки M , които са много по-малко от всичките комбинации:

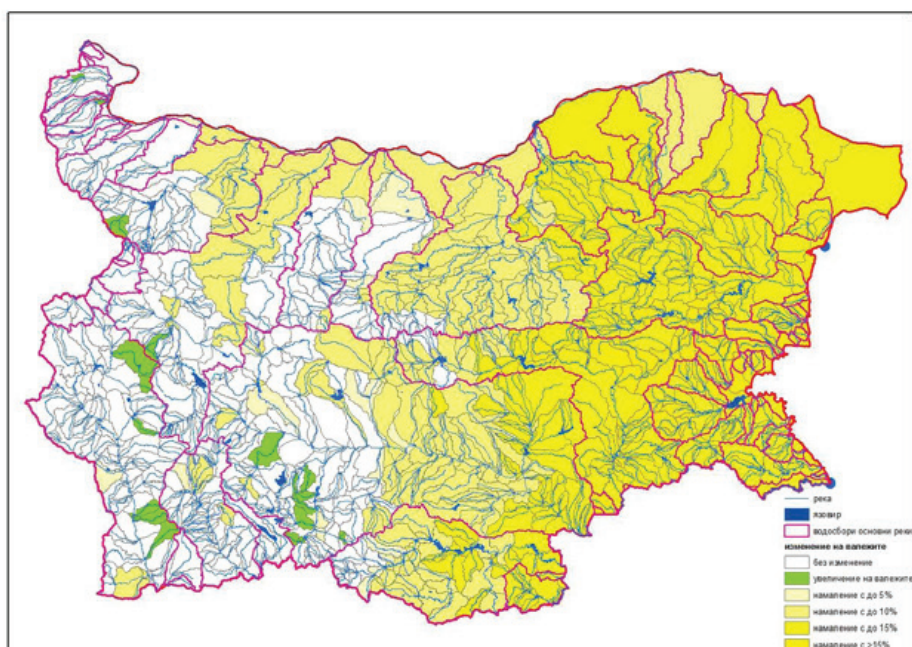
$$M \ll C(30, 10)$$

Ако за тези M случайни извадки направеното предположение се е сбъднало в X от тях, то вероятността въпросното предположение да се сбъдне определяме от съотношението X/M . Тази вероятност се изчислява поотделно за всяка точка от мрежата на модела. Така се получава разпределението ѝ в областта на интерес. Определят се като ‘УСТОЙЧИВИ’ измененията в тези възли, за които има над 95% попадения. Тези зони могат да се разглеждат и като ЗОНИ С ПОВИШЕН РИСК, защото степента на неопределеност е минимизирана чрез използвания метод.

От хидрологична гледна точка е необходимо оценките да се правят по водосбори. В страната са определени 1088 водосбора и за всеки от тях се определя дали има в него възли от модела с увеличение 5% и 10% на случаите с 6 часов валеж над 10 л/м².

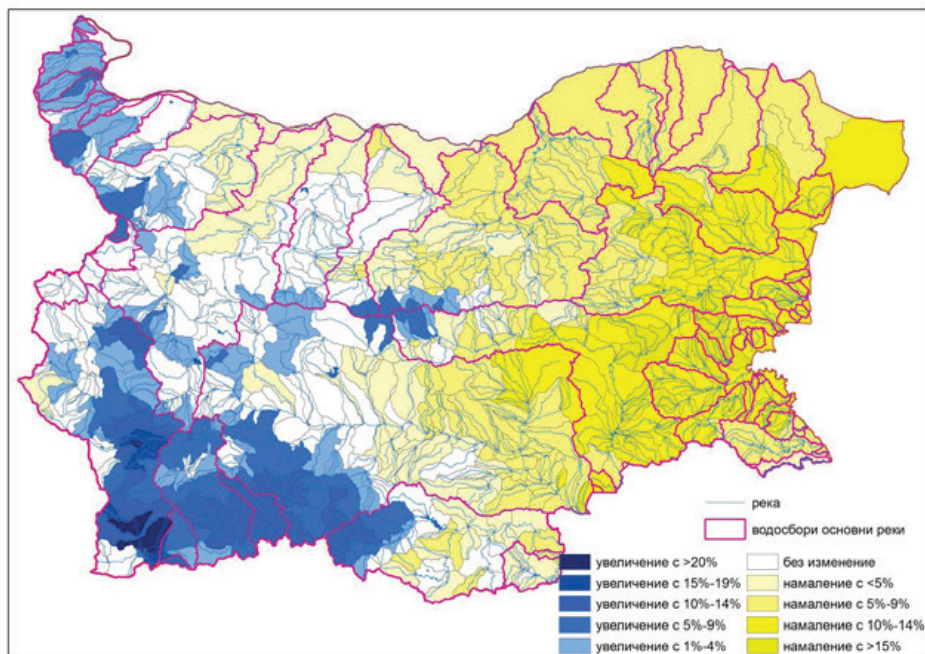
3. РЕЗУЛТАТИ

На долните две фигури (Фиг. 1. и Фиг. 2.) са показани измененията в проценти на общото годишно количество на валежите и на измененията само за количествата дъжд без зимния сезон.



Фиг. 1. Изменение в проценти на периода 2021-2050 спрямо референтния период за средногодишното количество валеж (дъжд и сняг)

Fig. 1. Percentage change in the period 2021-2050 compared to the reference period for the average annual rainfall (rain and snow)



Фиг. 2. Изменение в проценти на периода 2021-2050 спрямо референтния период за средногодишното количество валеж без зимния сезон (само дъжд)

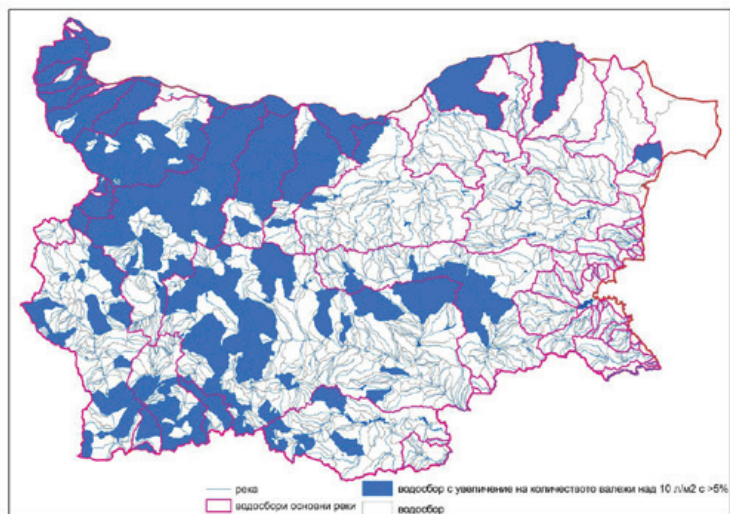
Fig. 2. Percentage change in the period 2021-2050 compared to the reference period for the average annual rainfall without the winter season (rain only)

Вижда се, че зад относително слабото изменение на общото количество валежи в западната половина на страната се крие увеличение на валежите от дъжд и намаление на снеговалежите. Логично е да се очаква и увеличение на количеството валежи над 10 л/м², поне в тази част на страната. Водосборите, в които увеличението е над 5% са показани на фиг. 3.

Сравнението с фиг. 2 показва, че увеличение на броя на интензивните валежи може да се случи и в области без увеличение на общото количество валеж и дори в области, където то намалява.

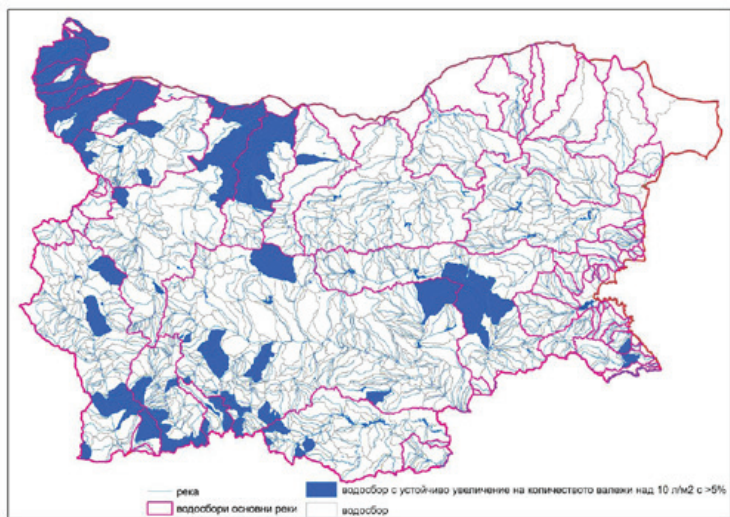
Областите определени чрез многократни случайни извадки по метода описан по-горе, определя водосборите, за които това изменение ще считаме за устойчиво. Те са показани на фиг. 4.

За водосборите с очаквано увеличение над 10% на броя на случаите с валеж над 10 мм/6 часа се отнасят фигури 5 и 6.



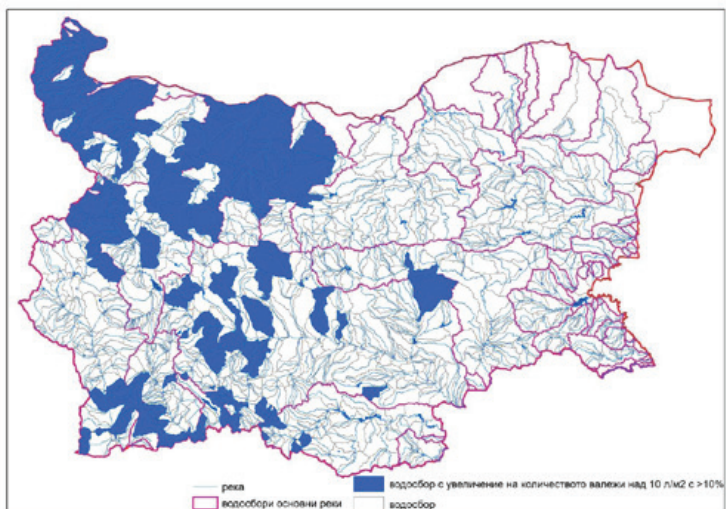
Фиг. 3. Водосбори, в които има 5% увеличение на количеството валежи с интензивност над 10 л/м²

Fig. 3. Ponds where there is a 5% increase in the amount of precipitation with an intensity above 10 l / m²



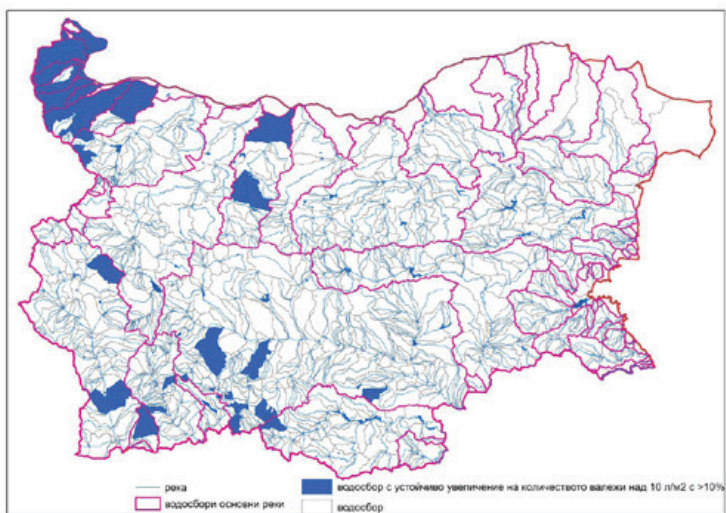
Фиг. 4. Водосбори, в които 5% увеличение на количеството валежи с интензивност над 10 мм/6 часа е устойчиво. Интересна е появата на повишен риск в Странджа.

Fig. 4. River catchments in which a 5% increase in the amount of precipitation with an intensity exceeding 10 mm / 6 hours is sustainable. Interesting is the emergence of increased risk in Strandzha mountain



Фиг. 5. Водосбори в които има 10% увеличение на количеството валежи с интензивност над 10 мм/6 часа

Fig. 5. Ponds where there is a 10% increase in the amount of precipitation with an intensity above 10 l / m².

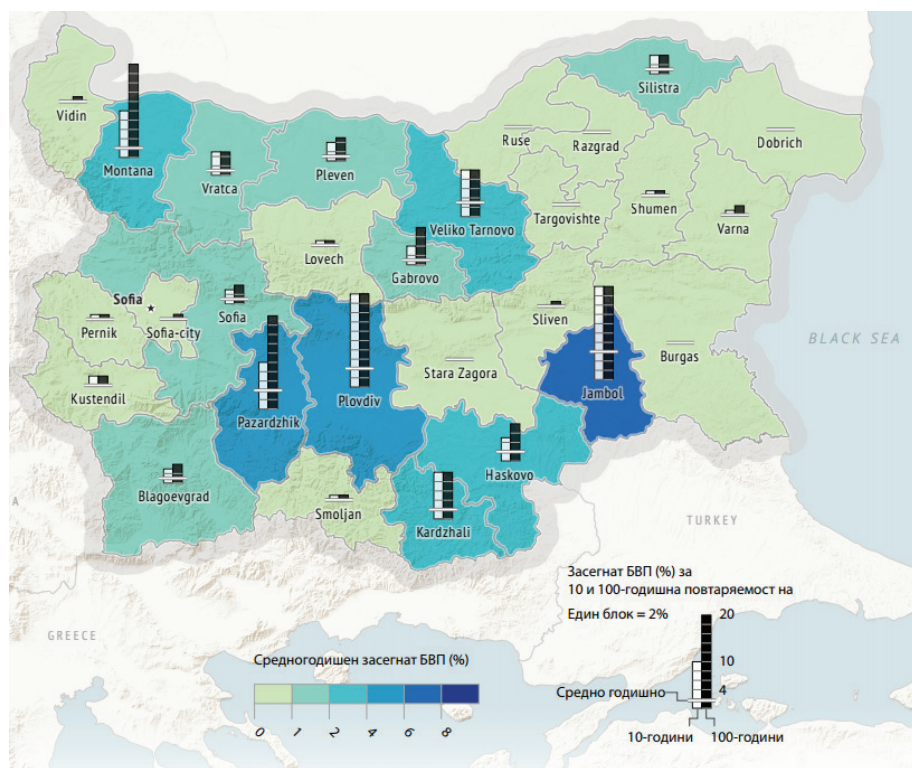


Фиг. 6. Водосбори, в които 10% увеличение на количеството валежи с интензивност над 10 мм/6 часа е устойчиво

Fig. 6. River catchments in which a 10% increase in the amount of precipitation with an intensity above 10 mm / 6 hours is sustainable.

Водосборите на реките, които са по-уязвими към възникването на екстремни хидрологични явления, като речни и поройни наводнения са: реките западно от р. Огоста (р. Тополовец, р. Войнишка, р. Витбол, р. Арчар, р. Скомля, р. Лом, долното течение на р. Цибрица), горното течение на р. Огоста (р. Превалска, р. Лопошанска, р. Слатинска), средното и долното течение на р. Вит, горното и долното течение на р. Струма, р. Места (р. Туфча, р. Матан), р. Марица (р. Чепинска, р. Въча, р. Харманлийска), р. Арда (р. Черна река).

На фиг. 7 за сравнение е показана оценка на Световната банка (вж. адреса в литературата) за очакваните щети от наводнения спрямо БВП и оценка за 10 – 100 годишна повторяемост с техни рискови модели. Вижда се сравнително доброто съгласуване и с посочените тук резултати, особено за 5 процентните увеличения.



Фиг. 7. Щети от наводнения съгласно оценка на Световната Банка

Fig. 7. Damages from floods according to the World Bank assessment

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази работа бе използван метод за пряка оценка на промяната в броя на случаите с валежи над определен праг, като се сравнява директно тяхното съотношение. Този метод се оказва подходящ за оценка на сигнала от климатичните промени за случаите на интензивни валежи. Пространственото разпределение на такива валежи съвпада с наблюдаваното, както и с оценките от други източници. Обобщено казано, освен че интензивните валежи преобладават в западната част на страната, то и тенденциите са за тяхното увеличение. Устойчиво най-рисковата област е Северозападна и Централна северна България.

ЛИТЕРАТУРА

- Belda, M., Skalák, P., Farda, A., Halenka, T., Déqué, M., Csimá, G., Spiridonov, V. (2015), CECILIA Regional Climate Simulations for Future Climate: Analysis of Climate Change Signal. *Advances in Meteorology*, Volume 2015, Article ID 354727.
- Cattaneo, L., V. Rillo, M.P. Manzi, V. Villani, and P. Mercogliano (2015), Climate data processing in GIS environment., *CMCC Research Papers*, Issue RP0257.
- Claudia Teutschbein, Jan Seibert (2012), Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, *Journal of Hydrology* 456–457 12–29.
- Déqué M. (2007) , Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values, *Global and Planetary Change*, vol. 57, no. 1-2, pp. 16–26.
- Déqué M., Dreveton C., Braun A., Cariolle D. (1994), The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics* 10:249-266.
- Douglas Marau (2016), Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review, *Curr Clim Change Rep.*, DOI 10.1007/s40641-016-0050-x.
- Farda A., Déqué M., Somot S., Horányi A., Spiridonov V., Tóth H. (2010): Model ALADIN as a Regional Climate Model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 54: 313–332.
- IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change.
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Lilia Bocheva, Tania Marinova, Petio Simeonov, Ilian Gospodinov (2009), Variability and trends of extreme precipitation events over Bulgaria (1961–2005), *Atmospheric Research* 93 490–497.
- Petr Skalák, Michel Déqué, Michal Belda, Aleš Farda, Tomáš Halenka, Gabriella Csimá, Judit Bartholy, Mihaela Caian, Valery Spiridonov (2014), CECILIA regional climate simulations for the present climate: validation and inter-comparison, *Clim Res*, Vol. 60: 1–12.
- Spiridonov, V., Deque, M., and Somot, S. (2005), ALADIN-CLIMATE: from the origins to present date, *ALADIN Newsletter* 29.
- Sunyer Pinya, M. A., Hundechea, Y., Lawrence, D., Madsen, H., Willems, P., Martinkova, M., Yücel, I. (2015). Inter-comparison of statistical downscaling methods for projection of

extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1827-1847.
DOI: 10.5194/hess-19-1827-2015.

Sylwia Trzaska, Emilie Schnarr (2014), A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections, U.S. Agency for International Development (USAID) , Center for International Earth Science Information Network (CIESIN).

Valery Spiridonov, Rilka Valcheva (2017), Stability of climate change at a given interval in a 30-year future period. Example for the territory of Bulgaria (2021-2050), *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences*, Tome 70, No 3.

Електронни адреси:

Св. Банка: <http://pubdocs.worldbank.org/en/165721485242077366/risk-profiles-bulgaria-Jan-17-bg.pdf>

CRU: <http://www.cru.uea.ac.uk/data>

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



Seasonal climate assessment of the winter 2016-2017

Krastina Malcheva*, Lyubov Trifonova, Tania Marinova, Lilia Bocheva, Cvetan Dimitrov, Dimitar Nikolov, Vulcho Pophrystov, Kaloyan Ivanov, Radoslav Evgeniev, Vanya Maneva, Rozeta Neykova

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

Abstract: Severe weather conditions in January 2017 in South East Europe have sparked intense media interest and renewing of the debate on global warming and climate change. In the present study, the severity of winter 2016-2017 in Bulgaria is evaluated on the basis of indicative climatic characteristics and temperature indices established from the European project STARDEX (Statistical and Regional Downscaling of Extremes). Daily data for months December, January and February in the period 1961-2017 from the meteorological network of the National Institute of Meteorology and Hydrology at the Bulgarian Academy of Sciences (NIMH-BAS) are used for revealing the spatio-temporal peculiarities of climatic conditions during the winter season. Despite prolonged cold spell and heavy snowfall in January, the winter 2016-2017 can be ranked as a moderate-severe.

Keywords: Winter 2016-2017, climatic characteristics, climate indices

Сезонна климатична оценка на зимата 2016-2017 г.

Кръстина Малчева*, Любов Трифонова, Таня Маринова, Лилия Бочева, Цветан Димитров, Димитър Николов, Вълчо Попхристов, Калоян Иванов, Радослав Евгениев, Ваня Манева, Розета Нейкова

*Национален институт по метеорология и хидрология - БАН
бул., Цариградско шосе" № 66, 1784 София*

Резюме: Неблагоприятните метеорологични условия през януари 2017 г. в Югоизточна Европа провокираха интензивен медиен интерес и пореден дебат относно глобалното

* krastina.malcheva@meteo.bg

затопляне и климатичните промени. В представената тук сезонна климатична оценка суровостта на зимата 2016-2017 г. в България е оценена на базата на индикативни климатични характеристики и температурни индекси (утвърдени в рамките на Европейския проект STARDEX). За оценка на пространствено-времевите особености на сезонните климатични условия са използвани ежедневни данни за месеците декември, януари и февруари за периода 1961-2017 г. от метеорологичната мрежа на Националния институт по метеорология и хидрология при Българската академия на науките (НИМХ-БАН). Въпреки продължителното застудяване и обилния снеговалеж през януари, зимата 2016-2017 г. може да се оцени като умерено сурова.

Ключови думи: Зима 2016-2017 г., климатични характеристики, климатични индекси

1. УВОД

През ноември 2016 г., 16-ият форум за климатични прогнози в Югоизточна Европа SEECOF-16 (2016) потвърди вероятността за по-топла от нормалното или нормална зима в Югоизточна Европа. В действителност зимата 2016-2017 г. в региона беше много по-студена от очакваното. Тежките зимни метеорологични условия през януари 2017 г. доведоха до значителни социално-икономически последици – медиите съобщаваха за сериозни проблеми с инфраструктурата, затруднени социални и стопански дейности и значително повишаване на енергопотреблението. Корабоплаването по река Дунав беше спряно по протежение на 900 km.

Въпреки че сезонните прогнози не успяха да предскажат ледения период през януари 2017 г. в Югоизточна Европа, наблюдаваното изключително студено време не е необичайно. Зимните застудявания, с достигане на много ниски температури, са естествени за климата на България и са най-интензивни при спускане на подвижни арктични антициклони от Скандинавския полуостров на юг. Температурите в Северна България, а често и в цялата източната половина на страната, се понижават под минус 15-20°C. Пулсациите на вятъра могат да надминат 20 m/s. При снеговалеж обстановката се усложнява допълнително от снежни виелици и снегонавявания. При сурови зими, с повече нахлувания на арктичен въздух, е възможно замръзването на река Дунав, а понякога и замръзване на морето, както през 1929 г. и 1954 г. (Събев и Станев, 1959). Средната продължителност на арктичните нахлувания е около 5 дни, но в някои случаи и при подходящи циркулационни условия продължителността на интензивните застудявания нараства до 8-10 или повече дни. Зимите 1928-1929 г., 1941-1942 г., 1953-1954 г., 1962-1963 г., 1984-1985 г. се характеризират с неколkokратни нахлувания на арктичен въздух и продължително задържане на много ниски приземни температури.

Зимата 2016-2017 г. в България е една по-тежка зима, с няколко нахлувания на полярен студ. В последните дни на декември 2016 г. в периферията на антициклон с център над Германия и в тилната част на висока барична долина

от района на Карско море към Балканския полуостров се спускат студени въздушни маси. Впоследствие от долината се откъсва висок циклон с център над Егейско море, а на приземното ниво се образува двуцентров циклон. Около 30 декември се създава сложна метеорологична обстановка с валежи от сняг и силен северен вятър, с наваявания на преспи и проблеми по пътищата в Източна България. През първите дни на януари 2017 г. по източната периферия на добре изразен при земя и във височина антициклон с център западно от Британските острови, от северния Атлантически океан на югоизток към Източна Европа се спуска дълбок приземен циклон по оста на висока долина от североизток. Към 5 януари се образува нов Средиземноморски циклон, движещ се южно от страната от Йонийско към Черно море. Отново се създават условия за значителни валежи от сняг и за продължително нахлуване на много студен въздух по ултраполярна ос от района на Карско море към Централна Европа и Балканите. В периода от 16-19 януари се създават за пореден път условия за снеговалежи в резултат на блокирана, комбинирана синоптична обстановка със Средиземноморски циклон с център над Тиренско море и обширен антициклон на север, с ос разположена в направление запад-изток от Франция към Русия.

2. МЕТОДИКА И ДАННИ

Климатичните условия и особености на дадена територия се характеризират чрез климатичните норми и климатичните индекси, а особеностите на метеорологичното време в конкретен момент или период – чрез отклоненията от нормите и достигнатите стойности на климатичните индекси. Закономерностите и пространствено-времето разпределение на слънчевата радиация, температурата на въздуха, валежите, снежната покривка, относителната влажност на въздуха, облачността, вятъра и по-значимите наблюдавани метеорологични явления се явяват основа за комплексната месечна, сезонна или годишна оценка на климатичните условия в страната. Оценката на суровостта на зимата се основава на анализа на индикативни климатични характеристики като средната сезонна температура, най-ниската средноденонощна температура, най-ниската максимална температура, средната минимална температура, абсолютната минимална температура, количеството валежи и максималната височина и устойчивост на снежната покривка за зимните месеци.

В представената сезонна климатична оценка са използвани ежедневни данни за атмосферно налягане, продължителност на слънчевото греене, температура на въздуха, валеж, обща облачност, относителна влажност на въздуха, скорост на вятъра и снежна покривка за месеците декември, януари и февруари за периода 1961-2017 г. основно от 47 станции в непланинската част на страната (до 1000 m н.в.), разпределени относително равномерно, както и от 8 високи и високопланински станции от метеорологичната мрежа на НИМХ-БАН (Фиг. 1).

При анализа на екстремните температурни условия са използвани подходящи температурни индекси от Европейския проект STARDEX (2004) – Таблица 1.

Текущият референтен период, определен от Световната метеорологична организация, е 1961-1990 г., но за някои метеорологични елементи са използвани други базови периоди: 1981-2010 г. (продължителност на слънчевото греене) и 1931-1970 г. (средна скорост на вятъра).



Фиг.1. Метеорологични станции, използвани в изследването

Fig.1. Meteorological stations used in the study

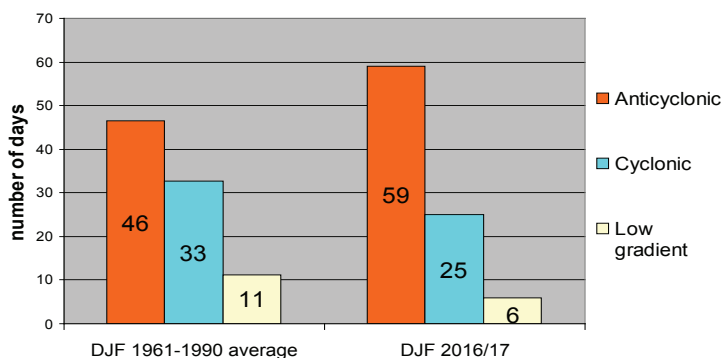
Таблица 1. Описание на STARDEX-индексите, използвани в анализа на температурните екстремуми

Table 1. Description of STARDEX indices used in the analysis of temperature extremes

Abbr.	Indicator Name	Indicator Definitions	Unit
tnf10	% days T_{max} (T_{min}) < 10th percentile	Let T_{nij} be the daily minimum temperature at day i of period j and let T_{nin10} be the calendar day 10-th percentile calculated for a specified period. Then the percentage of time is determined where: $T_{nij} < T_{nin10}$	no dim.
tnfd	Number of frost days $T_{min} < 0^{\circ}C$	Let T_{nij} be the daily minimum temperature at day i of period j , then counted are the number of days where: $T_{nij} < 0^{\circ}C$	days
txice	Number days without defrost (ice days) $T_{max} < 0^{\circ}C$	Let T_{xij} be the daily maximum temperature at day i of period j Then counted is the number of days where: $T_{xij} < 0^{\circ}C$	days
tncwd	Cold Wave Duration	Let T_{nij} be the daily minimum temperature at day i of period j and let T_{ninorm} be the calendar day mean calculated for a 5 day window centred on each calendar day during a specified period. Then counted is the number of days per period where, in intervals of at least 6 consecutive days: $T_{nij} < T_{ninorm} - 5$	days

3. АТМОСФЕРНО НАЛЯГАНЕ И ОСОБЕНОСТИ НА АТМОСФЕРНАТА ЦИРКУЛАЦИЯ

Полето на приземното атмосферно налягане (приведено към морско ниво) над България през деветдесетте дни на зимния сезон (декември 2016 г., януари и февруари 2017 г.) е с антициклонална циркулация в 59 от дните, с циклонална – в 25 дни, а в 6 от дните приземното барично поле е безградиентно (Фиг. 2). Средните сезонни стойности за периода 1961-1990 г. са съответно 46 дни за антициклонално, 33 за циклонално и 11 дни за безградиентно барично поле. Дните с антициклонално барично поле през зимния сезон 2016-2017 г. надвишават с 13 дни средната сезонна стойност, а тези с циклонално поле са с 8 по-малко, тоест антициклоналната циркулация преобладава над циклоналната на приземно ниво. Това се вижда и от картата на отклоненията от средните сезонни стойности на атмосферното налягане (Фиг. 3). По-големи положителни отклонения се наблюдават в северозападната и североизточната части на страната и по Черноморието, като най-големите стойности на отклоненията са в метеорологичните станции Добрич и Враца (7.9 hPa) и Велико Търново (6.5 hPa). Отклонения под сезонната норма се наблюдават основно в Южна България – Елхово (-2.4 hPa), Кърджали (-1.8 hPa) и Хасково (-1.0 hPa). Най-често срещаната приземна барична обстановка през зимния сезон е антициклон с център над Централна Европа, Британските острови или Скандинавския полуостров.

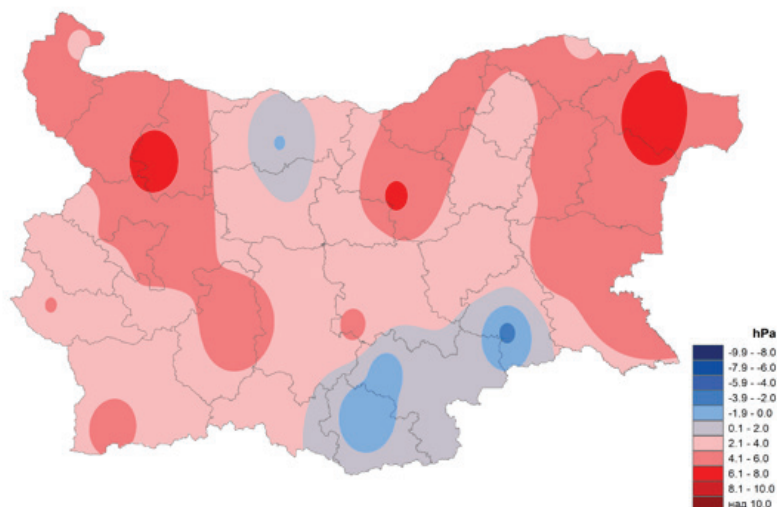


Фиг. 2. Брой на дните с антициклонална/циклонална/слабоградиентна циркулация на приземно ниво през зимата 2016-2017 г. и съответните средни стойности за периода 1961-1990 г.

Fig. 2. Number of days with anticyclonic/cyclonic/low gradient types of circulation at sea level in the winter 2016-2017 (DJF) and respective average values for the period 1961-1990

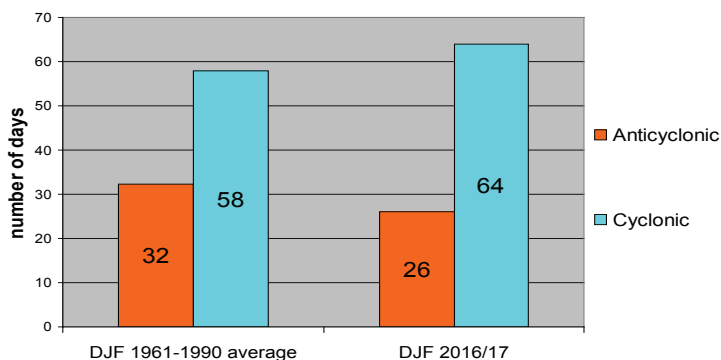
За разлика от приземното ниво, на изобарно ниво 500 hPa през зимата 2016-2017 г. преобладава циклоналната циркулация. Средният брой дни с циклонална циркулация е 64 и надвишава с шест дни средния брой за периода 1961-1990 г.

Антициклоналната циркулация е 26 дни, спрямо 32 за същия климатичен период (Фиг. 4). Най-често срещаната барична обстановка над страната на ниво 500 hPa е висока барична долина от североизток.



Фиг. 3. Отклонения на атмосферното налягане (hPa) през зимния сезон 2016-2017 г. от средните сезонни стойности за периода 1961-1990 г.

Fig. 3. Atmospheric pressure anomaly (hPa) in the winter 2016-2017 from the seasonal average values for the period 1961-1990



Фиг. 4. Брой дни с антициклонална/циклонална циркулация на ниво 500 hPa през зимния сезон 2016-2017 г. и среден брой дни за периода 1961-1990 г.

Fig. 4. Number of days in the winter 2016-2017 (DJF) and 1961-1990 averages of anticyclonic/cyclonic types of circulation at 500 hPa

4. ПРОДЪЛЖИТЕЛНОСТ НА СЛЪНЧЕВОТО ГРЕЕНЕ И СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ

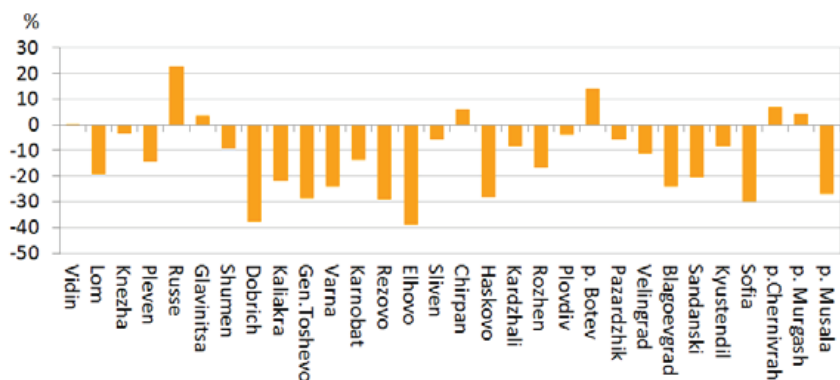
Особеностите на местните условия, като релеф и надморска височина, както и особеностите на атмосферната циркулация, имат съществена роля при разпределението на продължителността на слънчевото греене през зимата в България. Според изследванията на Лингова (1981), през зимните месеци продължителността на слънчевото греене е най-ниска в северната част на Дунавската равнина и в някои затворени полета на Западна България. По-слънчево е в западната част на Тракийската низина, в някои от южните крайгранични райони, както и по високите части на планините.

Продължителността на слънчевото греене през зимата 2016-2017 г. не се отличава особено от описаното по-горе разпределение, като е около и над средната многогодишна стойност за периода 1981-2010 г. Средната продължителност на слънчевото греене в равнините части на Северна България е около 306 часа (най-ниска е в районите на Лом и Добрич, а най-висока – по северното черноморско крайбрежие и в района на Шумен), в Южна България е около 355 часа с максимуми в крайните югозападни райони и Горнотракийската низина, а във високите части на планините (над 1500 m) – около 380 часа.

Положителните сезонни отклонения се дължат главно на месец декември, през който за почти всички равнинни части на страната положителните отклонения надхвърлят 50% от нормата. Отклоненията са в големи граници – от 23 до 128%. За високите части на планините отклоненията от нормите са също положителни, но в по-малки граници (между 10 и 45%). През февруари 2017 г. отклонението от нормата на продължителността на слънчевото греене е отново положително почти за цялата територия на страната (между 10 и 38%), като само в Югозападна България и около Шумен продължителността на слънчевото греене е около нормата, но с малки отрицателни отклонения от нея. Единствено през януари 2017 г. продължителността на слънчевото греене почти за цяла България е под нормата, като изключение правят части от Централна Северна България, високите части на Стара планина и Витоша (Фиг. 5).

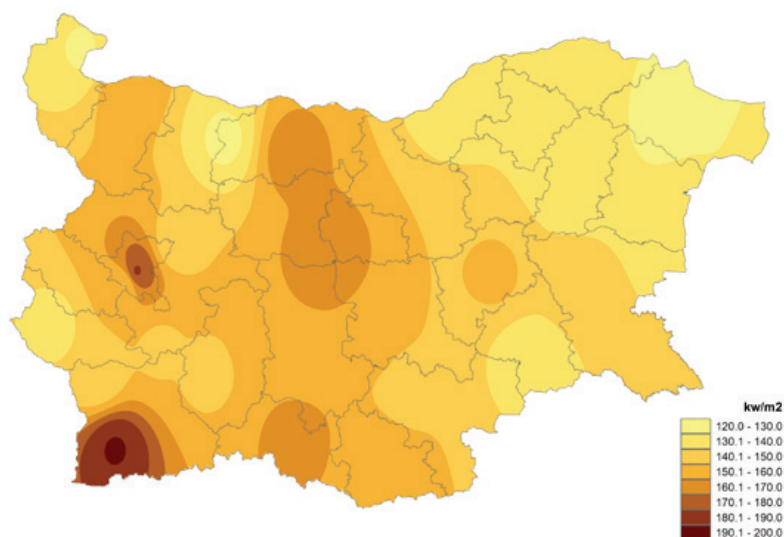
В метеорологичната мрежа на НИМХ-БАН слънчева радиация се измерва само в 4 точки, като за районите в които няма измервания тя се определя по изчислителен път по данни за продължителността на слънчевото греене. Относителното отклонение между изчислените и измерените стойности на сумарната слънчевата радиация е в рамките на 10-15%. През зимата 2016-2017 г. в равнинните части на Северна България най-ниските стойности на сумарната слънчева радиация са в района на Добрич (125 kW/m^2), а най-високите – в района на Плевен (149 kW/m^2). В равнинните части на Южна България най-ниски са стойностите на слънчевата радиация в района на Елхово (139 kW/m^2), а най-високи – в района на Сандански (195 kW/m^2). За високите части на планините (над 1500 m) сумарната слънчевата радиация през зимния сезон е около 165 kW/m^2 , а за тези над 2000 m, средно

145 kW/m² (Фиг. 6). Като цяло, най-ниски са стойностите на сумарната слънчева радиация за месец януари 2017 г. – от 33 kW/m² до 53 kW/m².



Фиг. 5. Отклонения на продължителността на слънчевото греене (в %) през януари 2017 г. от средните стойности за периода 1981-2010 г.

Fig. 5. Sunshine duration anomaly (in %) in January 2017 from average values for the period 1981-2010



Фиг. 6. Разпределение на сумарната слънчевата радиация (kW/m²) през зимата 2016-2017 г.

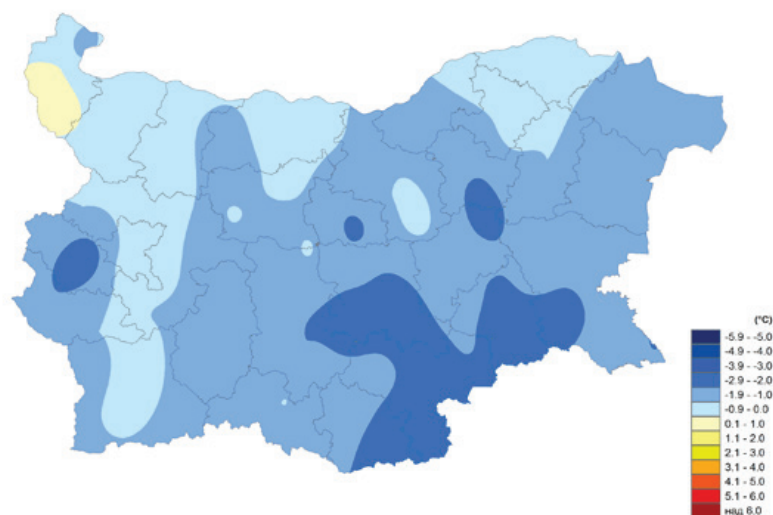
Fig. 6. Spatial distribution of the total solar radiation (kW/m²) in the winter 2016-2017

5. ТЕМПЕРАТУРИ И ВАЛЕЖ

Зимата 2016-2017 г. е студена и относително суха в по-голямата част на страната. Отклоненията на средната сезонна температура от нормата за периода 1961-1990 г. са в границите от -2.6°C (Стара Загора) до 0.4°C (Белоградчик). Сезонната аномалия за страната е -1.2°C , като е по-голяма в Южна България – средно -1.4°C . В планинските райони отклоненията на средната сезонна температура от нормите са съответно: около -0.7°C за върховете и около -1.4°C за районите с надморска височина до 1800 m (Фиг. 7).

Отклоненията на сезонните валежни количества в % от нормите за периода 1961-1990 г. са в границите от 37.3% (Сатовча) до 138.7% (Омуртаг). Сезонната аномалия за страната е 73.6%, като е незначително по-малка в Южна България – средно 71.7% (Фиг. 8).

Валежите са около и над нормата основно в Източна България (в областите Търговище, Разград, Силистра и Бургас) и Горнотракийската низина (в областите Хасково, Стара Загора и Пловдив).

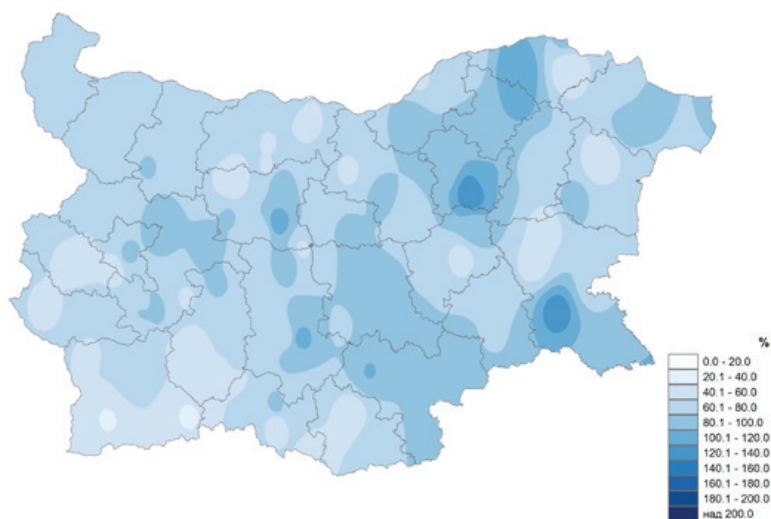


Фиг. 7. Отклонения на средната сезонна температура ($^{\circ}\text{C}$) през зимния сезон 2016-2017 г. от средните сезонни стойности в периода 1961-1990 г.

Fig. 7. Seasonal temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$) in the winter 2016-2017 from the seasonal averages for the period 1961-1990

Декември 2016 г. е умерено студен и много сух. Валежните суми в Северна България са средно 36.3% от съответните норми за базовия период (с изключение на област Ловеч, до 110.7% от нормата в Троян) и средно 21.6% от нормите за Южна България. Средните месечни температури са около или под нормата. Отклоненията

са най-големи в Южна България – средно -2.1°C (от 0.4°C в София до -4.9°C в Котел), следвани от Североизточна България (средно -1.9°C , от -0.5°C в Силистра до -3.1°C в Омуртаг) и централните части на Северна България (средно -0.8°C , до -2.7°C в Габрово). В Северозападна България отклоненията са положителни (около 0.6°C). Средните минимални температури във всички станции са под съответните стойности за базовия период. Отклоненията са между -0.8°C (Самоков) и -5.6°C (Рила) в Южна България, и между -0.2°C (Лом) и -3.6°C (Горен чифлик) в Северна България. През декември 2016 г. абсолютните минимални температури са около и под 10-ия процентил на минималните температури за периода 1961-2016 г.



Фиг. 8. Отклонения на валежните количества (в %) през зимния сезон 2016-2017 г. от средните сезонни стойности за периода 1961-1990 г.

Fig. 8. Precipitation anomaly (in %) in the winter 2016-2017 from the seasonal averages for the period 1961-1990

Януари 2017 г. е снежен и изключително студен. Валежите достигат средно 147% от нормата в Северна България и средно 150% от нормите в Южна България, като отклоненията са най-големи в източните части на страната (до 257.1% в Омуртаг и 287.4% в Средец). Средните месечни температури са по-ниски от нормите средно с около 3.6°C за непланинските райони. Отклоненията са от -2.1°C (Шабла) до -5.3°C (Омуртаг) за Северна България и от -2.5°C (Резово) до -6.1°C (Перник) за Южна България. В планинските райони отклоненията са: около -2.6°C за върховете и около -3.9°C за районите с надморска височина до 1800 m. Средните минимални температури през януари 2017 г. са значително по-ниски от нормите за базовия период. Отклоненията са между -1.8°C (вр. Ботев) и -8.1°C (Перник) в Южна България, и между -2.3°C (Калиакра) и -6.1°C (Видин и Монтана) в Северна

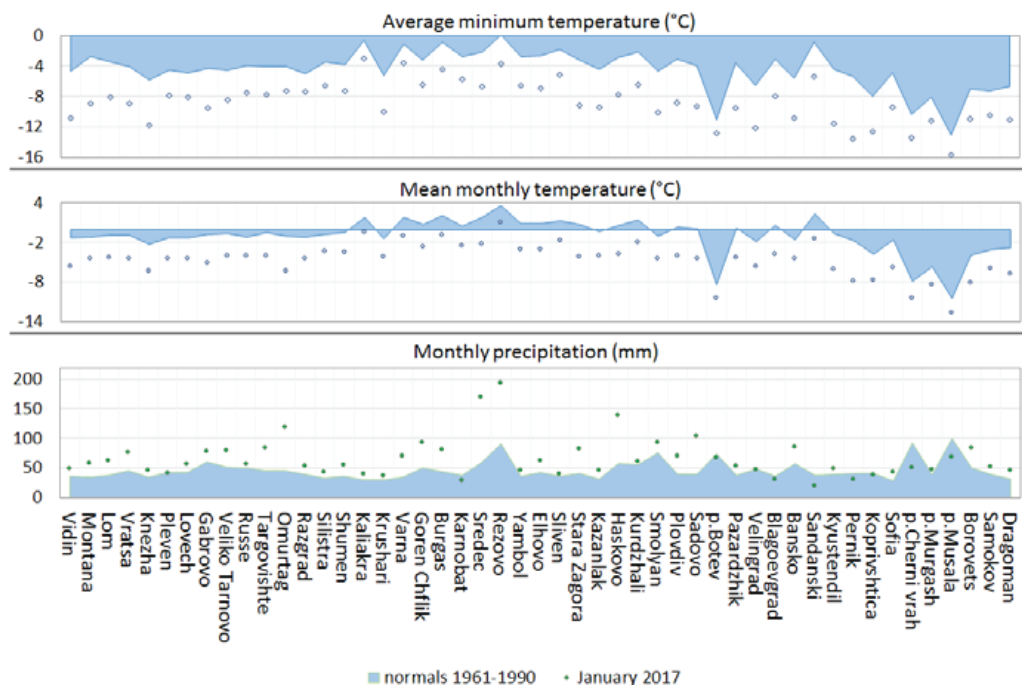
България (Фиг. 9). Най-ниските средноденонощни температури са по-високи от съответните стойности за периода 1961-2016 г., освен в Перник и Кюстендил. Най-ниските максимални температури са по-високи средно с 4.1°C за Северна България и средно с 2.6°C за Южна България от съответните стойности за периода 1961-2016 г. Само в Кюстендил и Перник са измерени най-ниските стойности след 1961 г., съответно: -13.5°C и -12.4°C. Абсолютните минимални температури през януари не достигат минимумите за периода 1961-2016 г., с изключение на измерените рекордно ниски стойности в Кюстендил (-26°C) и Перник (-27°C), които са близки и до минималните температури възможни поне веднъж на 50 години.

Февруари 2017 г. е мек и сравнително сух, с валежи около или под нормата в повечето от станциите – средно 54.8% в Северна България, с изключение на област Силистра (до 131%), и 67.1% в Южна България (до 118.8% в област Стара Загора и 119.7 % в София). Средните месечни температури са около и над нормата. Като цяло диапазонът на отклоненията в непланинската част на страната е по-голям в Южна България (от -1.0°C в Раднево до 3.1°C в Самоков) и по-малък в Северна България (от 0.4°C в Свищов до 3.4°C в Белоградчик). По върховете отклоненията са средно 3.2°C, а за планинските райони с надморска височина до 1800 m – около 1.7°C. Средните минимални температури в непланинската част на страната са около и над нормата – средно с 0.6°C в Северна България и с около -0.2°C в Южна България. Под нормата са отклоненията предимно в Горнотракийската низина и Югоизточна България. В районите с надморска височина над 1000 m отклоненията са над нормата с около 2.8°C. Абсолютните минимални температури са около или под 10-тия процентил на минималните температури за периода 1961-2016 г. Най-ниските стойности са регистрирани в Южна България (-15.8°C в Пловдив и -15°C в Казанлък).

6. СНЕЖНА ПОКРИВКА

Снежната покривка през зимата 2016-2017 г. в непланинската част от страната е сравнително висока и устойчива (задържа се през целия януари и почти през целия февруари). Декември започва със стара снежна покривка от предишния месец, варираща между 2 и 10 cm за повечето райони, която бързо се стопява и след това месецът е безснежен почти до края си. Нова снежна покривка от около 10 cm в повечето райони и 30 cm в Североизточна България се образува към 28-29 декември. Тази снежна покривка се задържа около седмица, но преди да се стопи окончателно, в периода 5-6 януари 2017 г. започват интензивни снеговалежи, които образуват нова снежна покривка с височина от около 10 до 64 cm. Най-ниска (8 cm) е снежната покривка в района на Сливен, а най-висока – в Хасково (64 cm). В цялата страна, с изключение на крайните югозападни и крайбрежните райони, снежната покривка варира от 25 cm (Казанлък) до 53-55 cm (Враца, Търговище).

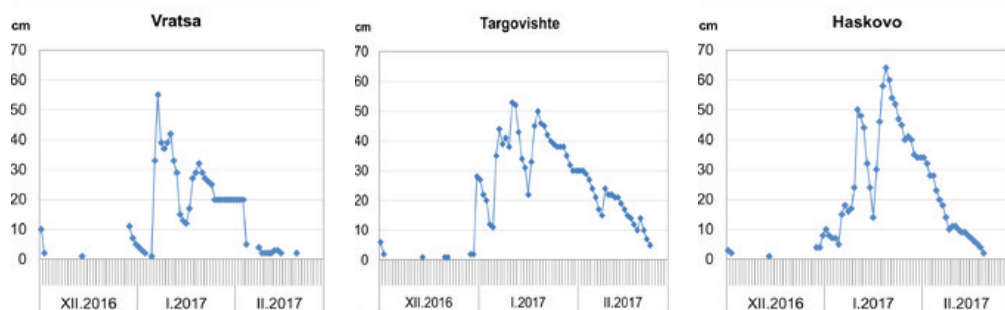
Тази снежна покривка постепенно сляга до 19-20 януари, когато нови снеговалежи отново повишават височината ѝ, но без да се превишат максимумите от първата половина на януари в повечето райони (Фиг. 10). Измерените максимуми на снежната покривка през месеца превишават многогодишните средни максимуми, но са далеч под регистрираните абсолютни стойности, например – абсолютният максимум за района на Хасково за месец декември е 95 cm, а за месец януари е 75 cm. Пространственото разпределение на максималната височина на снежната покривка в изследвания период е представено на Фиг. 11.



Фиг. 9. Средна минимална температура (°C), средна температура (°C) и валеж (mm) през януари 2017 г. по станции

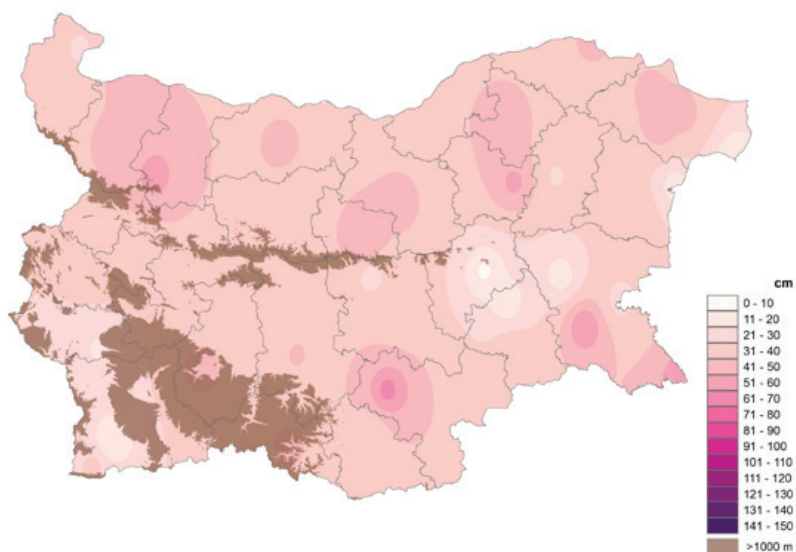
Fig. 9. Average minimum temperature (°C), average temperature (°C) and monthly precipitation (mm) in January 2017 by stations

Броят на дните със снежна покривка е представен на Фиг. 12. Най-продължително снежната покривка се е задържала в Централна Северна и Североизточна България, както и в районите на Хасково, Чирпан и Смолян в Южна България, като дните със снежна покривка варират от около 40 до 65.



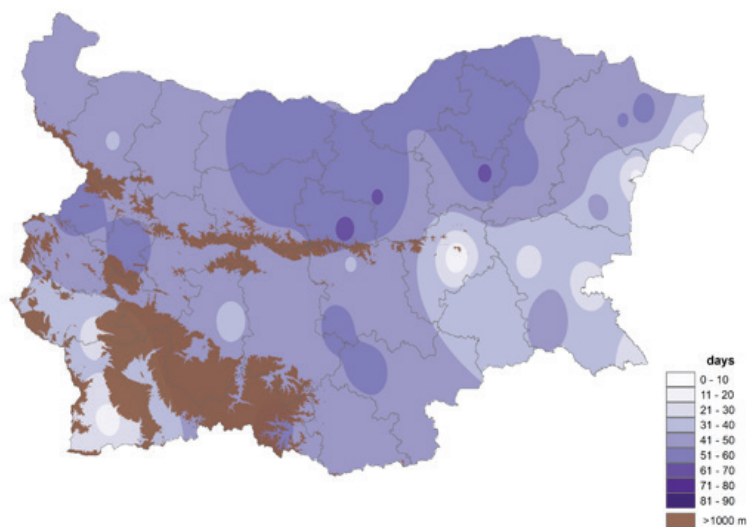
Фиг.10. Изменение на височината на снежната покривка (cm) през зимата 2016-2017 г. в избрани станции

Fig. 10. Variations of the snow cover depth (cm) in the winter 2016-2017 at selected stations



Фиг.11. Максимална височина на снежната покривка (cm) през зимата 2016-2017 г.

Fig. 11. Distribution of the maximum snow cover depth (cm) in the winter 2016-2017



Фиг.12. Разпределение на броя на дните със снежна покривка през зимата 2016-2017 г.

Fig. 12. Distribution of the number of days with snow cover in the winter 2016-2017

7. ВЯТЪР

През зимата 2016-2017 г. средната за сезона скорост на вятъра е около и над нормите за периода 1931-1970 г., за който е направено цялостно изследване на полето на вятъра в България (Климатичен справочник – том IV, 1982). Отклоненията са положителни в почти цялата Дунавска равнина (до 91.8% в Русе) и Източна България (до 106.2% в Горен чифлик), в западната част на Тракийската низина (64.4% в Садово), на места в Родопите (66.6% в Смолян), по поречието на р. Струма (Сандански 34.3%), както и в някои котловинни полета от Западна България (Перник 53.5%). Под нормите за сезона са скоростите на вятъра в източната част на Горнотракийската низина (Стара Загора -23.7%, Ямбол -23.6%), в Родопите (Велинград -62.9%, Чепеларе -52.6%), както и в районите с надморска височина над 1000 m (до -21.8%, вр. Мургаш). През декември 2016 г. в почти цялата страна се наблюдават значителни положителни отклонения на средномесечната скорост на вятъра от нормите: в Дунавската равнина (Лом 217.2%), Предбалкана (Габрово 135.1%), Задбалканските котловинни полета (Казанлък 139.9%), високите полета на Западна България (Перник 122.0%), Горнотракийската низина (Садово 128.4%) и някои райони на Родопите (Смолян 130.6%).

Случаите на силен вятър (със скорост над 14 m/s) през зимата 2016-2017 г. са повече през първата половина на сезона и най-много през декември 2016 г.,

достигайки до 15 дни в Източна България (Русе и Сливен). През остатъка от зимата те отново са по-чести в източната част на страната. Регистрираните максимални срочни скорости на вятъра и скоростта на максималните пулсации в различни части на страната са представени в Табл. 2. Силен западен вятър (W) е регистриран още в началото на сезона (на 2 декември) в Източна България и Дунавската равнина. На 12-13 декември той е от север (N), основно в Източна България и долината на р.Струма. Силни ветрове от запад-северозапад (WNW) духат отново на 25 и 27-28 декември в Западна България, а на 28-31 декември север-северозападни ветрове (NNW) засягат основно Източна България. В периодите 5-8 и 12-13 януари силните ветрове обхващат Дунавската равнина, Източна България и долината на р. Струма, с ориентация съответно североизток (NE) или северозапад (NW) и югозапад (SW). На 10 и в периода между 16-19 януари те са от NE, главно в Източна България. На 3-4 февруари е регистриран силен SW вятър по северните склонове на планините, главно в Западна България. В периода 20-25 февруари е регистриран силен западен вятър в Дунавската равнина и Източна България.

Табл. 2. Максимална скорост на вятъра ($V_{\max}$, m/s) и скорост на максималните пулсации ($V_{\max}^p$, m/s) в отделни станции през зимата 2016-2017 г.

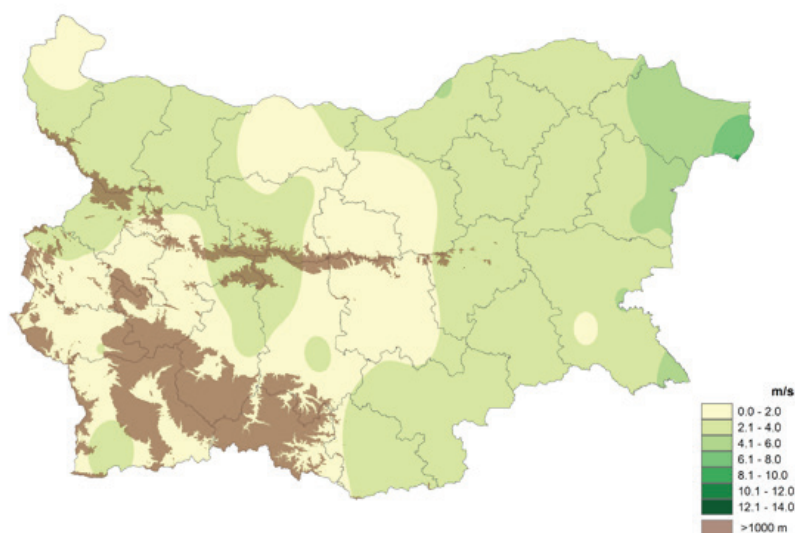
Tabl. 2. Maximum wind speed ($V_{\max}$, m/s) and maximum speed of wind gusts ($V_{\max}^p$, m/s) in the winter 2016-2017 in selected stations

Станция	$V_{\max}$, m/s	$V_{\max}^p$, m/s	Посока	Дата
Разград	20	20	ENE	06.01.2017
Русе	17	28	S	02 и 13.12.2016
Силистра	14	24	NNE	06.01.2017
Калиакра	24	28	N	06.01.2017
Варна	20	28	N	30-31.12.2016
Бургас	24	28	NNE	10.01.2017
Средец	20	20	SW	29.12.2016
Ямбол	20	20	NNE	10.01.2017
Сливен	34	40	W	02-03 и 29.12.2016
Стара Загора	12	20	N	31.12.2016, 06.01.2017
Кърджали	20	24	N	29, 30 и 31.12.2016
Хасково	17	20	NNW	07.01.2017
Пловдив	20	24	W	02.12.2016, 07.01.2017
Ивайло	20	20	WNW	27.12.2016
Перник	20	20	SSE	13.12.2016
вр. Ботев	40	40	NW	02-03.12.2016, 12.01.2017 и 22.02.2017
Черни връх	34	40	WSW	02.12.2016, 10 и 14.01.2017, 24.02.2017
вр. Мургаш	40	40	S, SW	25.12.2016, 13.01.2017
вр. Мусала	28	40	WSW	02.12.2016

Средната продължителност на пулсациите на вятъра в ниската част на страната варира от 10 min (Кюстендил) до 845 min (Резово), а максималната – от 30 min (Кнежа) до 1440 min (Резово и Ямбол). За високите части на страната средната продължителност е от 221 min (вр. Мургаш) до 429 min (вр. Мусала), а максималната от 840 min (Копривщица) до 1390 min (вр. Мусала).

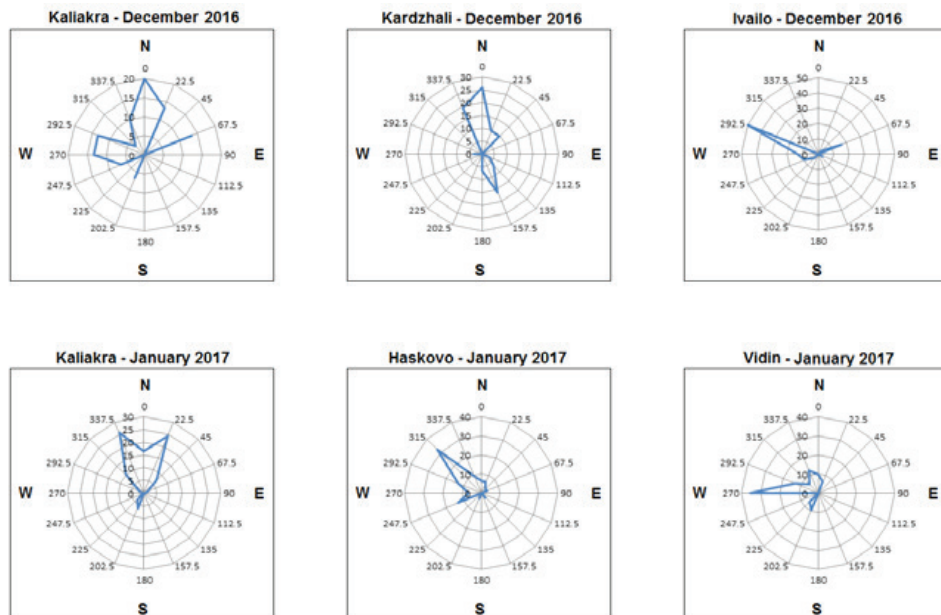
На Фиг. 13 е представена карта на осреднената за зимния сезон 2016-2017 г. скорост на вятъра за непланинската част от страната. В Северна България стойностите са в интервала от 0.9 m/s (Велико Търново) до 4.2 m/s (Русе), по Черноморското крайбрежие – от 4.2 m/s (Бургас) до 8.1 m/s (Калиакра), в Южна България те варират от 0.5 m/s (Велинград) до 3.1 m/s (Сливен) и 3.2 m/s (Драгоман). Във високите части на страната (над 1000 m н.в.) стойностите са между 2.9 m/s (Копривщица) и 11.1 m/s (Черни връх).

На Фиг. 14 са показани рози на вятъра по посока (в %) за максималната денонощна скорост на вятъра за райони с регистриран силен вятър (със скорост над 14 m/s) през зимата 2016-2017 г. Използвани са данни от автоматични ветромери MS&E-Wind2, които са с два отделни сензора (за скорост и за посока на вятъра) с оптронни преобразуватели и диапазон на измерване на скоростта на вятъра от 0.4 m/s до 50.0 m/s. Измерванията са напълно автоматични, като на всеки кръгъл час във вградената памет на уреда се записват средната 10 минутна скорост и посока на вятъра (получени чрез аритметично усредняване на 120 измервания).



Фиг.13. Средна скорост на вятъра (m/s) през зимата 2016-2017 г.

Fig. 13. Average wind speed (m/s) in the winter 2016-2017

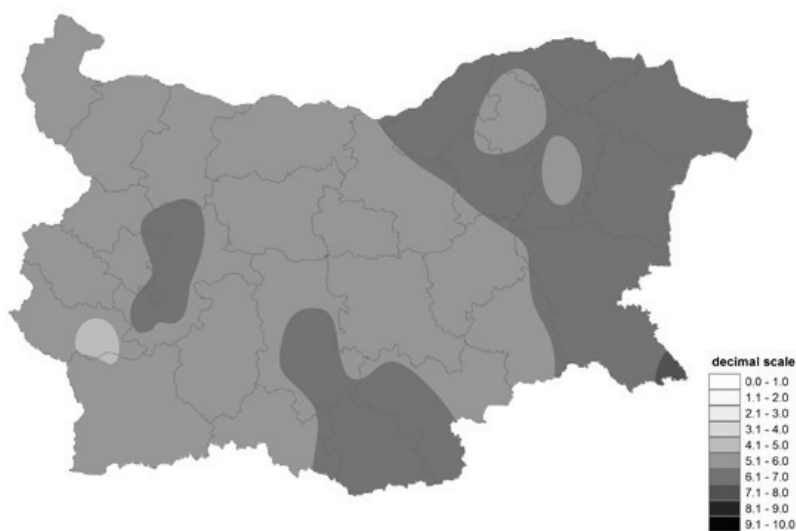


Фиг. 14. Рози на вятъра по посока (в %) за максималната денонощна скорост на вятъра за райони с регистриран силен вятър (със скорост над 14 m/s) през зимата 2016-2017 г.

Fig. 14. Frequency distribution of wind direction (in %) of the maximum 24-hour wind speed for areas with registered wind gusts in the winter 2016-2017

8. ОБЛАЧНОСТ

Анализът на количеството обща облачност през зимата 2016-2017 г. е направен на базата на наблюденията от 57 метеорологични станции, разположени в равнинната и планинска част на страната. Количеството на общата облачност варира в границите между 4.2 бала (Рила) и 7.2 бала (Резово). Средно за страната облачността е 5.9 бала, отклоненията от нормите за Северна и Южна България са съответно -0.9 и -0.8 бала. По-голямо количество обща облачност е регистрирано в Североизточна България, по черноморското крайбрежие, в Източните Родопи, в районите на Самоков и вр. Мургаш, където облачността е от 6.1 до 7.2 бала. (Фиг.15). Най-облачен е месец януари – средно 6.9 бала, с най-малко количество облачност е месец декември – 4.8 бала, а през февруари средното количество обща облачност е 5.9 бала.

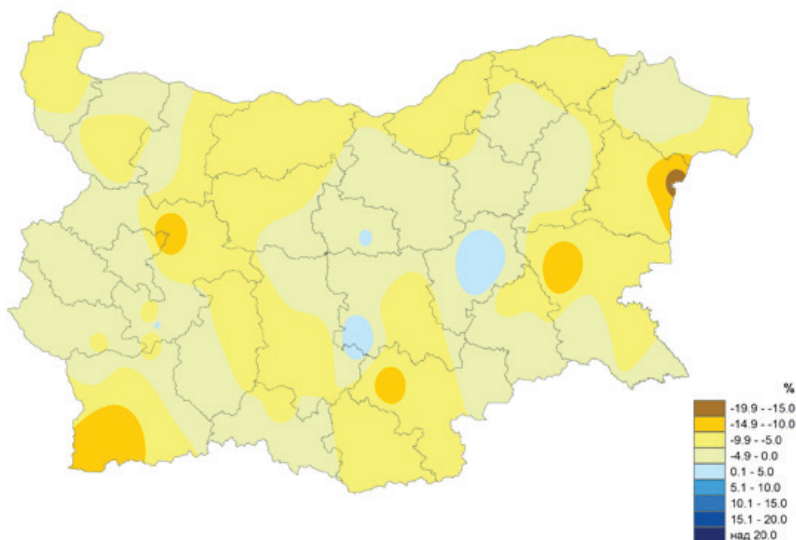


Фиг.15. Разпределение на общата облачност през зимата 2016-2017 г.

Fig. 15. Distribution of the total cloud cover in the winter 2016-2017

9. ВЛАЖНОСТ

Относителната влажност и през трите зимни месеца в почти всички изследвани станции е под климатичната норма (Фиг. 16). Най-големи са отклоненията по черноморското крайбрежие (-15.5% във Варна). Ниски стойности са отчетени и в станция Карнобат (отклонението е -11.8%). В станциите разположени в Източните Родопи отклоненията са от -6.5 до -10.9%, в Петричко-Санданския регион – до -13.2%, а на вр. Мургаш -11.5%. По-малки са отрицателните отклонения във високите котловинни полета на Западна България, Централна Стара планина и части от Западните Родопи. Единствено в три от изследваните станции се наблюдават положителни и близки до климатичната норма аномалии: Сливен (3.4%), Чирпан (2%) и Габрово (0.1%). Като най-влажен месец се откроява януари – със средна относителна влажност 80.6%, следван от февруари (77.9%) и декември (72.1%).



Фиг.16. Отклонения на относителната влажност (в %) през зимния сезон 2016-2017 г. от средните сезонни стойности за периода 1961-1990 г.

Fig. 16. Relative humidity anomaly (in %) in the winter 2016-2017 from the seasonal averages for the period 1961-1990

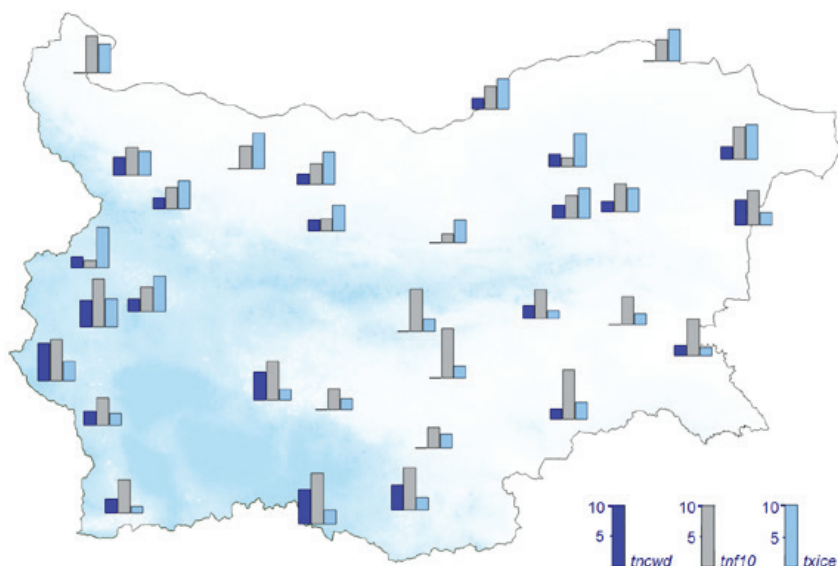
10. КЛИМАТИЧНИ ИНДЕКСИ

Суровостта на зимата е оценена на базата на комплексно изследване на пространствено-времето разпределение на три STARDEX-индекса (виж Табл. 1) – *tncwd* (продължителност на студената вълна), *tnf10* (брой дни с минимална температура под 10-ти перцентил на минималните температури за периода 1961-1990 г.) и *txice* (брой ледени дни). Изчислените индекси са нормализирани за периода 1961-2017 г. чрез формулата:

$$\bar{x}_i = \frac{(x_i - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \times 10$$

където отклонението на всяка стойност на параметъра x_i от най-малката стойност $x_{\min}$ е разделена на диапазона на изменение, а резултатът е умножен по 10, за да се получи удобна единна скала от 0 до 10. Нормализираните стойности клонят към 10 в най-студените зими. През зимата 2016-2017 г. достигнатите максимуми са 6.2 за *tncwd* (Кюстендил), 8.4 за *tnf10* (Смолян) и 6.6 за *txice* (Драгоман). Зимата

е студена (поне един от индексите е със стойност над 5) в по-голямата част на страната и много студена (най-малко два от индексите са със стойност над 5) в района на Перник, Кюстендил, Смолян и Добрич (Фиг.17). Индексът *tnfd* (брой мразовити дни) се изменя в границите от 59 (Сандански) до 88 (Смолян) – средно 73.5 дни за Северна България и 75.1 дни за Южна България.



Фиг.17. Пространствено разпределение на климатичните индекси *tncwd*, *tnf10* и *txice* през зимата 2016-2017 г.

Fig. 17. Spatial distribution of climate indices *tncwd*, *tnf10* and *txice* in the winter 2016-2017

11. ЕКСТРЕМНИ ЯВЛЕНИЯ

Опасни метеорологични явления на територията на страната са регистрирани основно в края на декември 2016 г. и през януари 2017 г. и са свързани с обилни снеговалежи, придружени със силен, на места бурен вятър, създаващ условия за навявания, както и с опасно ниски температури на въздуха. Бедствени обстановки, поради влошени метеорологични условия и снегонавявания, са обявявани на няколко пъти главно в Североизточна и Югоизточна България, както и в района на Родопите. Силният вятър нанася сериозни щети върху електропреносната мрежа в тези райони, а непроходимите пътища сериозно затрудняват възстановителните работи. Над 250 населени места в областите Силистра, Добрич, Шумен, Разград, Варна, Търговище, Русе и Смолян остават без електрозахранване, а част от тях и без водоснабдяване. В края на декември и през първото десетдневие на януари

два отделни атмосферни процеса водят до затваряне на много пътища и части от магистрали главно в Североизточна България, Бургаска и Смолянска области. Блокирани в преспите са стотици автомобили. Ниските температури през януари довеждат до върхово потребление на електроенергия и максимално натоварване на електропреносната мрежа. Според данни на Българска стопанска камара (БСК) загубите за българската икономика от снежните бедствия през януари са за десетки милиони лева, като най-потърпевши са секторите на търговията, спедиторските услуги, туризма, строителството и недвижимите имоти (БСК-новини, 2017). В периода 06-12.01.2017 г. поради студената вълна обхванала почти цялата страна, е удължена ученическата ваканция с различен брой дни във всички административни области на страната.



31.12.2016 г. - Блокирани автомобили в област Бургас (снимка: *btv novinite*)



08.01.2017 г. - Блокиран в пряспа влак (снимка ИА „Черноморие“)



10.01.2017 г. - Източна България (снимка: *EVN България*)



12.01.2017 г. - Замръзна морето край Бургас (снимка: *dariknews.bg*)



19.01.2017 г. - Триметрови преспи в Търговишко (снимка: *news.bnt.bg*)



02.02.2017 г. - Река Дунав замръзна изцяло край Русе (снимка: *OFFNEWS*)

През зимния сезон 2016-2017 г. са наблюдавани няколко случая на обледяване и образуване на поледици: на 14-15 януари, основно в Северозападна България (Видин, Монтана, Лом и Враца) и в централните части на Южна България (в района Ямбол – Елхово), а също така в периода 3-5 февруари в цяла Северна България (Видин, Монтана, Лом, Враца, Добрич, Генерал Тошево, Калиакра). Поинтензивен е бил процесът на образуване на поледица в Ямбол на 14-15 януари.

През януари е наблюдавано заскрежаване на много места по поречието на р. Дунав, поради ниските температури и високата влажност на въздуха. Зърнест скреж е регистриран в Хасково на 4-5 януари, в района на Ямбол, Елхово и Сливен (на 21 и 22 януари) и в края на януари в цяла Северна България, а също и в Кърджали на 5, 12, 13, 21 и 29 февруари.

12. ИЗВОДИ

През зимата 2016-2017 г. на приземно ниво преобладава антициклоналната циркулация. Положителните отклонения на атмосферното налягане от средните сезонни стойности за периода 1961-1990 г. са по-големи в северозападната и североизточната части на страната и по Черноморието. Отклонения под сезонната норма се наблюдават основно в Южна България. Най-често срещаната барична обстановка на приземно ниво е антициклон с център над Централна Европа, Британските острови или Скандинавския полуостров, а на изобарно ниво 500 hPa – висока барична долина от североизток.

Като цяло зимата е студена и суха в по-голямата част на страната и много студена в района на Перник, Кюстендил, Смолян и Добрич. Измерените рекордно ниски стойности на абсолютната минимална температура в Перник и Кюстендил са близки до съответните минимума възможни поне веднъж на 50 години. Аномалията на средната сезонна температура за страната е -1.2°C (в Южна България -1.4°C). В планинските райони отклоненията от нормите са съответно: около -0.7°C за върховете и около -1.4°C за районите с надморска височина до 1800 m. Средните минимални температури през януари 2017 г. са значително по-ниски от нормите за базовия период 1961-1990 г. Отклоненията достигат до -8.1°C (Перник) в Южна България и -6.1°C (Видин и Монтана) в Северна България.

Сезонната аномалия на валежите за страната е 73.6%, като е незначително по-малка в Южна България – средно 71.7%.

Екстремно време и опасни метеорологични явления са регистрирани основно в края на декември 2016 г. и през януари 2017 г. и са свързани с обилни валежи (до 257.1% от нормата за януари в Омуртаг и 287.4% – в Средец), силен вятър (с максимална скорост на места до 34 m/s и пориви до 40 m/s), създаващ условия за навявания, както и с много ниски температури на въздуха. Бедствени обстановки, поради влошени метеорологични условия и снегонавявания, са обявявани на

няколко пъти главно в Североизточна и Югоизточна България, както и в района на Родопите.

Въз основа на комплексното изследване на основните климатични характеристики и температурни индекси, зимата 2016-2017 г. може да бъде оценена като умерено сурова, въпреки продължителното застудяване и обилния снеговалеж през януари.

ЛИТЕРАТУРА

- SEECOF-16 climate outlook for 2016/17 winter season, 2016, November 22-23, Sixteenth South-East European Climate Outlook Forum (SEECOF-16), Italy, <http://www.seevccc.rs>
- Събев, Л., Св. Станев, 1959, Климатичните райони на България и техният климат. Трудове на ИХМ, том V, изд. „Наука и изкуство“, София, 176 стр.
- STARDEX Diagnostic Extremes Indices Software User Information Version 3.3.1, 2004, https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf
- Лингова, С., 1981, Радиационен и светлинен режим на България. ИМХ, София, Изд. на БАН, стр. 228
- Под редакцията на М. Кючукова, 1982, Климатичен справочник за НР България – Вятър, том IV, Издателство „Наука и изкуство“, София.
- Загуби за десетки милиони търпи българската икономика заради зимната обстановка, 2017, Българска стопанска камара-новини, <http://www.bia-bg.com/news/view/22821>



Retrieval of 6-hour peak rainfall from 24-hour measurements

Valery Spiridonov, Snezhanka Balabanova*

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

Abstract: The article provides a methodology for retrieval of the 6 hour peak precipitation from the 24-hour measurements performed in the climatic and rainfall networks of NIMH. This is the maximum rainfall that can be measured for 6 hours within a 24 hour interval and is one of the indicators for issuing flash and rainy flood risk warnings. These are floods caused by torrential or excessive rainfall over a short period of time, usually within or less than 6 hours on a small area. The task of identifying areas with increased risk of such floods has not been enough reliably solved. The methodology developed here allows the accumulated precipitation records in the mentioned stations to be used more fully to identify the risk areas mentioned. The methodology only concerns summer rainfall with a 24-hour amount over a certain threshold. An analysis of their structure was carried out in one-hour periods, based on four yearly records from the system of objective analysis using ground and satellite information. Thus, the relationship between rainfall in both periods is determined, as well as the area in which it is reliable.

Keywords: intense precipitations, structure

Възстановяване на 6 часовия пиков валеж от 24 часовите измервания

Валери Спиридонов, Снежанка Балабанова*

*Национален Институт по Метеорология и Хидрология – БАН,
бул. „Цариградско шосе 66“, 1784 София*

Резюме: В статията се предлага методика за възстановяване на 6 часовия пиков валеж от 24 часовите измервания, осъществявани в климатичната и дъждомерна мрежи на

* snezana.balabanova@meteo.bg

НИМХ. Това е максималният валеж, който може да бъде измерен за 6 часа в рамките на 24 часов интервал и е един от показателите за издаване на предупреждения за повишен риск от наводнения. Задачата за определяне на областите с повишен риск от поройни и дъждовни наводнения не е решена достатъчно надеждно. Това са наводнения, причинени от проливни или прекомерни валежи в един кратък период от време, в рамките на 6 часа или по-малко върху малка площ. Разработената тук методика предоставя възможност натрупаните записи за валежите в споменатите станции да се използват по-пълноценно за определяне на споменатите рискови области. Методиката засяга само летните валежи с денонощно количество над определен праг. Извършен е анализ на структурата им в едночасови периоди, основан на четири годишни записи от системата за обективен анализ с използване на приземна и спътникова информация. Така е определена зависимостта между валежите в двата периода, както и областта в която тя е надеждна.

Ключови думи: интензивни валежи, структура

1. УВОД

Количеството дъжд паднал за 1, 3 и 6 часови интервали е съществено за определяне на оценката за риска от наводнения. Малко са работите засягащи проблема с определяне на връзка между количествата валеж паднал за различни периоди в рамките на един синоптичен процес (Kittell, 2012; Pendergrass & Deser, 2017). Развитите методи за ‘дизагрегация’ са значително количество, но са неподходящи по различни причини, например, необходимост от значителен период от едночасови наблюдения в областта, предположение за функцията за разпределение и други, обзор на които може да се види в Pui et al. (2009). Търсенето на такива връзки се налага от необходимостта от определяне на критичните стойности на валежа, когато интервалите на наблюдение нямат необходимата честота. Един от интервалите приет за критерий за валеж с вероятност да предизвика наводнение е 6 часовият. В практиката на хидропрогнози от доста време успешно се използва стойността от 15 mm, като долен праг за критично количество дъжд за 6 часа. В мрежата на НИМХ наблюдения на 6 часа се извършват само в синоптичните станции, които са недостатъчни за определяне на честотата на такива валежи и съответно риска от наводнения. От друга страна, има значително количество климатични и дъждомерни станции с архивни записи от преди 60 и много повече години. Целта на тази методика е да предложи инструмент за определяне на максималната 6 часова сума на валежа през 24 часов период.

2. БАЗА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

От 2013 година в НИМХ е внедрена система за обективен анализ на редица метеоеlementи с използване на спътникова и наземна информация от автоматични станции. Резултатите от тази система се визуализират на страницата <http://hydro.>

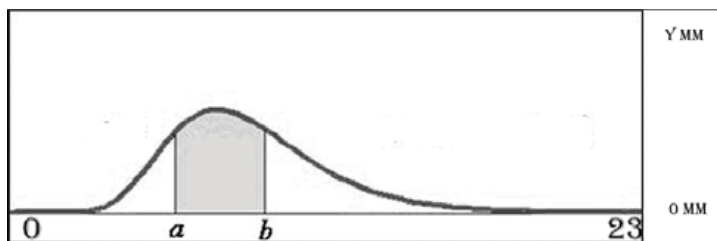
bg/, а стойностите са достъпни отвсякъде в мрежата на НИМХ на адреса <https://users.meteo.bg/ProData/>

Интервалът на измерване на автоматичните станции е 1 час, а честотата на спътниковата информация е 15 мин. Това даде възможност да се изгради надеждна система за определяне на валежите за всеки час в достатъчно гъста равномерна мрежа. Тя е 0.045×0.045 градуса по географски дължина и ширина, което приблизително съвпада с размера на пиксела на измерването от спътника.

Валежите с рискови за наводнения интензивност и продължителност са основно през лятото. През този период със сигурност няма и допълнителен отток от снеготопене. Вече има архивирани наблюдения от тази система за 4 лета и това даде възможност да се направи този опит за декомпозиция на 24 часовите наблюдения, въпреки че данните са нееднородни, защото през тези години системата се е подобрявала програмно, а броят на автоматичните станции се е увеличил. С натрупването на още информация и през следващите години тази методика има възможност за подобрене. Все пак ще отбележим, че предварителните оценки за всяка година поотделно показаха много сходни резултати. Това дава основание да се предположи, че интегрираната оценка за периода лято 2014-2017, ще елиминира случайните грешки, и че намерените резултати са достатъчно устойчиви.

3. МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

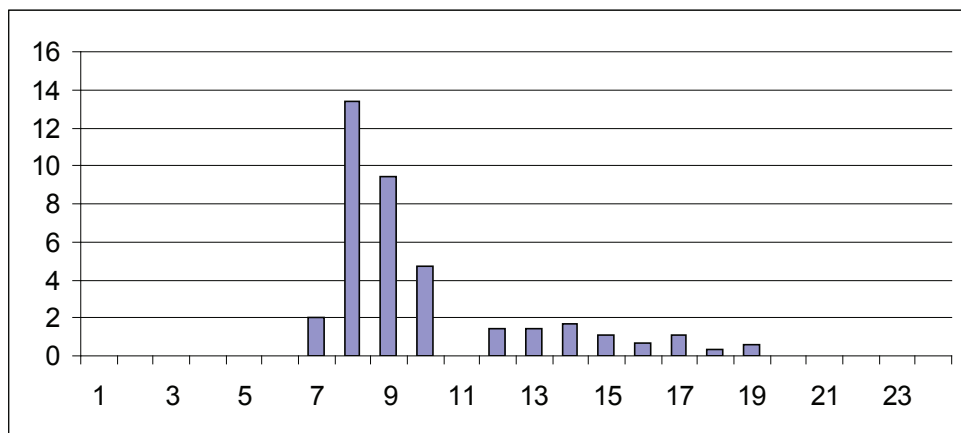
Идеята на метода е илюстрирана на Фиг.1. Схематично е представена интензивността на валежа през 24 часов период. Количеството валеж за периода между a и b е интеграл от кривата, представен чрез площта на затъмнената част, който в случая е 6 часов. Тази площ на фигурата е най-голямата от всички площи заключени в 6 часов интервал. Това количество всъщност съвпада с дефинирания по-долу ‘6 часов пиков валеж’. Методът се състои в определянето на тази площ или на съответно количество валеж.



Фиг.1. Интензивност на валежа, $b - a = 6$, тъмната област е най-голямата възможна, включена в такъв интервал

Fig. 1. Intensity of rainfall, $b - a = 6$, the dark area is the largest possible one included in such an interval

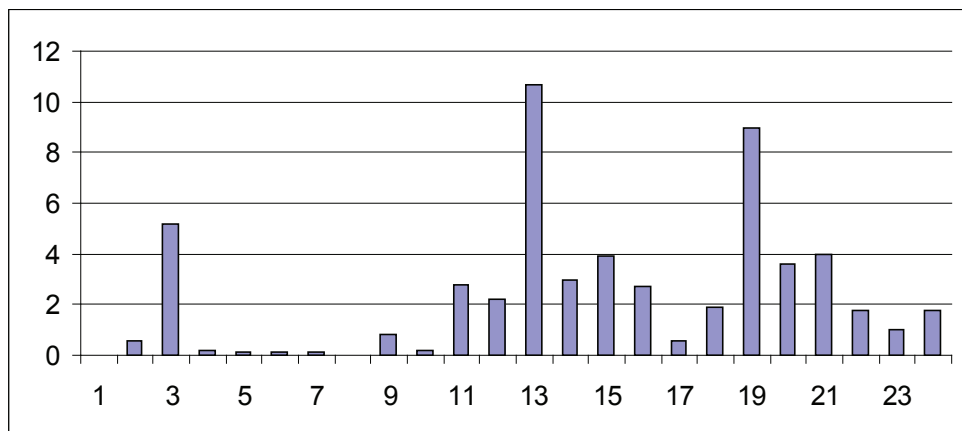
На фигурата е показан идеализиран вариант. Такава гладка крива би имало, ако дъждомерите измерваха на минута или по-малко. В нашия случай тя е стъпаловидна със стъпка 1 час. Друго идеализиране във фигурата е, че максимумът на интензитета през денонощието е в същия 6 часов интервал. На практика, не винаги е така. Валежите са с прекъсвания и с различен интензитет. Възможно е най-голямото количество валеж за 1 или повече часове да не попадне в 6 часовия пиков валеж, дефиниран по-долу, т.е кривата на Фиг.1 ще има втори и повече максимуми. Такива разпределения се виждат на следващите фигури (Фиг.2 и Фиг.3) с данни от валежите на 03.06.2017 и 03.07.2017 в два от водосборите.



Фиг.2. Разпределение на едночасовите количества валеж в mm през 03.06.2017 във водосбор No 84 (водосбор на р. Ружичка приток на р. Канагьол)

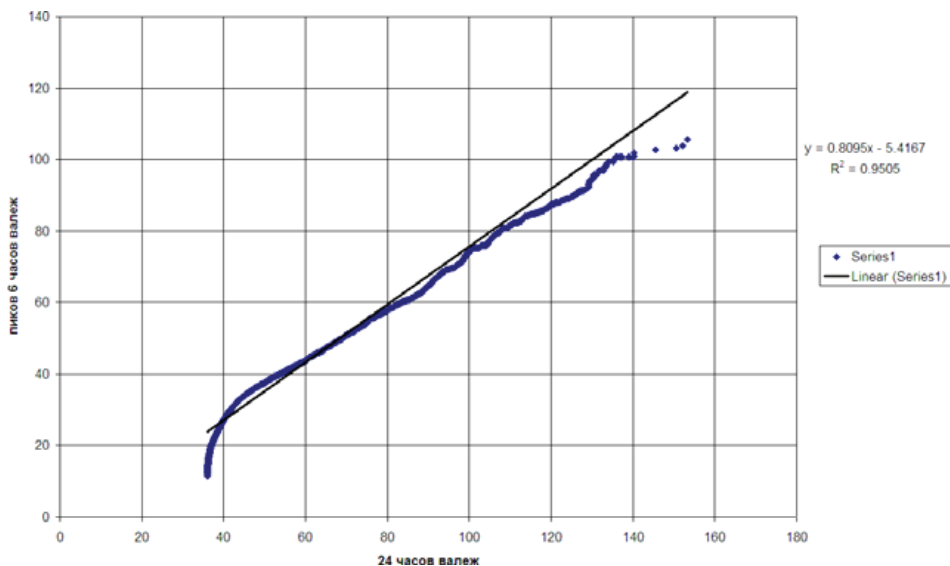
Fig. 2. Distribution of one-hour rainfall in mm on 03.06.2017, 84 river catchment (catchment of the river Ruzhikka tributary of the Kanagol River)

Методът, който ще предложим, се прилага за корекция на резултатите от климатичните експерименти, когато се използват в хидроложки модели, имащи за вход ежедневни данни (Teutschbein&Seiber, 2012). За анализ на някаква взаимовръзка между две величини често се използва линейното ѝ приближение. За да направим това, от данните за летните периоди от системата за анализ, първо отделяме случаите с денонощен валеж над зададен праг. След това отхвърляме случаите с валежи, за които 6-часовият пиков валеж е под друг зададен праг. **Шест часов пиков валеж** се нарича най-голямата сума от всички получени суми, когато 6 часовият интервал ‘пълзи’ по часовете на денонощието. Така формираме редица от 24 часови суми и редица от 6-часовите пикови валежи за тях. Накрая подреждаме във възходящ ред всяка от двете редици. Праговете, които са приети тук, доведоха до резултата, показан на Фиг. 4.



Фиг.3. Разпределение на едночасовите количества валеж през 03.07.2017 във водосбор No 184 (част от водосбора на р. Росица)

Fig. 3. Distribution of one-hour rainfall in mm on 03.07.2017, 184 river catchment (part of Rositsa river basin)



Фиг. 4. Връзка между 24 часовия валеж (mm) и 6 часовия пиков валеж (mm).

Fig. 4. Relationship between the 24-hour rainfall (mm) and the 6-hour peak precipitation (mm).

Горната крива е получена при минимален праг 35 mm за 24 часовия валеж и 10 mm минимален праг за 6 часовия пиков валеж. Областта на системата за анализ е

заклучена между $22^{\circ}.21$ и $28^{\circ}.78$ градуса западна дължина и между $41^{\circ}.26$ и $44^{\circ}.5$ градуса северна ширина. Броят на случаите нанесени на графиката надхвърля 20000, което не е учудващо, защото това са средно по 5000 валежа във възлите на мрежата за една година, а броят им е над 10000. Иначе казано, средно за всяка година е имало валежи при тези прагове над места обхващащи общо половината от площта на областта. Праговете са определени от съображението да се намали максимално лявата нелинейна част, която се спуска стръмно надолу. Тази област ще наричаме **област на неопределеност**. В нея на дадено количество 24 часов валеж могат да съответстват различни количества 6 часови пикови валежи в различните случаи. Това са някои от случаите, при които остатъчният валеж в 24 часовия интервал е по-голям от пиковия.

Избраните праг от 35 mm за 24 часовия валеж и 10 mm за 6-часовия пиков валеж е възможният компромис, за да не отпаднат много случаи, а графиката да остане близка до линейната. Освен това, при възстановяване на този валеж, интересът е и към високите стойности на денонощния валеж, доколкото целта е да се оценяват такива стойности на валежа, създаващи предпоставка за повишен риск от наводнения. Нещата не биха се променили съществено, ако се въведе праг от 15 mm за 6 часовия пиков валеж, който се използва за предупреждения. Може да се забележи, че ако приемем по-висок праг на денонощния валеж, например над 40, 45 mm, нелинейната част и областта на неопределеност ще отпаднат изцяло, но не налагаме такова ограничение, защото биха отпаднали и случаи с компактно разпределение на валежа. Този избор позволява, без особени ограничения за преобладаващата част от случаите, пиковият 6 часов валеж да се определи от линейната апроксимация на кривата от Фиг. 4:

$$P_6 = K * P_{24} - N, \quad (1)$$

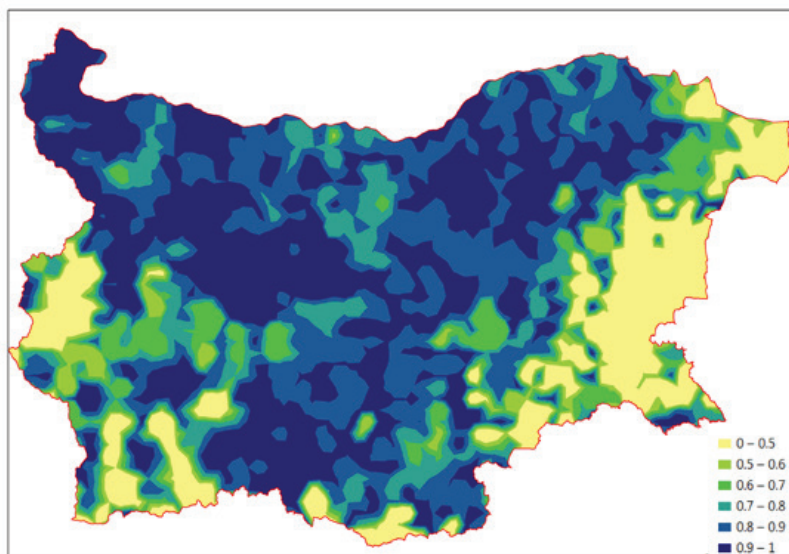
където P_6 е 6 часовия пиков валеж, P_{24} е общото количество за 24 часа, $K=0.8095$, $N=5.4167$.

Това важи само за лятото и за денонощни валежи над 35 mm.

Сега ще отговорим на въпроса къде са областите на неопределеност, за които споменахме по-горе. По-точно, ще потърсим има ли пространствено разпределение на 'надеждността' на горната формула. Съотношението P_6/P_{24} на пиковия 6 часов към денонощния валеж показва каква част е първият спрямо втория. Колкото по-голямо е това съотношение, толкова по-голям е делът на 6 часовия валеж от денонощния валеж. Граничният случай $P_6/P_{24}=1$ означава, че целият денонощен валеж е в рамките на 6 часа. Ако N е количеството валеж през някакъв интервал извън пиковия, съотношението $(P_6 + N)/P_{24}$ ще показва частта на остатъка $P_{24} - P_6 - N$. Колкото по-малко е това съотношение от коефициента K пред P_{24} в уравнение (1), толкова то ще е по-неточно. Фигуративно, това са валежи с обособени 'кълъстери' от интензивни валежи или такива със сравнително

постоянен интензитет през по-голямата част от денонощието. Ако съотношението е по-голямо от 1, избраната стойност за N е по-голяма от необходимото.

За да оценим уравнение (1), за N ще изберем за стойност на свободния член тази на линейната апроксимация. Тя е около два пъти по-малка от избрания праг 10 mm, което благоприятства приложението му. Пространственото разпределение на $(P_6 + N)/P_{24}$ ще покаже къде и колко горното уравнение е релевантно за определяне на 6-часовия пиков валеж. Може да се избере и друга стойност N , но тази ще показва точно релевантността на уравнението. Разпределението на това отношение е показано на Фиг.5.



Фиг.5. Пространствено разпределение на $(P_6 + N)/P_{24}$, $N=5.4$

Fig. 5. Spatial distribution of $(P_6 + N)/P_{24}$, $N=5.4$

В интервала 0.9 – 1 може да се счита, че уравнението ще дава достатъчно точно стойност за 6-часовия пиков валеж, стига N да се занижи малко, доколкото при праг за P_{24} от 35 mm се получава максималния възможен принос от N/P_{24} . (около 0.15 при тази стойност на свободния член). С нарастване на количеството на P_{24} , този принос намалява. В интервала 0.8 – 0.9 уравнението е най-представително. Това всъщност е областта отговаряща на средната, по-голяма част на линията от фиг.4. С малки промени на N (според случая, със стойности от 1 до 3 при денонощен валеж под 45 mm и стойности достигащи до 8 при денонощен валеж над 120 mm), с тази формула или най-добре чрез самата крива, в областите в синьо може

да възстановим 6 часовия пиков валеж с голяма достоверност. При останалите стойности, които са над 0.5, остатъчният валеж е по-малък от пиковия 6-часов, но са възможни много високи интензивности на валежа в 1 или 3 часови интервали, сравними с приетите за тях прагове за предупреждение. Долната част на скалата 0 – 0.5 евентуално се характеризира със сравнително равномерен валеж или ако има интензивни валежи, те ще са разпределени през цялото денонощие. Ако имаме информация за типа на валежа, а такава може да се намери от синоптичните карти и дневниците, възможно е да се възстанови с добра достоверност 6 часовия валеж и в тези области. Например, ако валежът е от стратусов тип и вали сравнително равномерно през целия период, може да се направи следната оценка за коефициента пред P_{24} . Да предположим че вали $X > 6$ часа с приблизително постоянен интензитет $Z \text{ mm/h}$. За съотношението ще получим $(6 \cdot Z + N)/(X \cdot Z) = 6/X + N/(X \cdot Z)$. Продължителността на валежа може да се прецени от синоптичните анализи и колкото $X \cdot Z$ е по-голям, толкова повече намалява значението на свободния член, т.е. на валежа извън 6 часовия интервал. Приетият 24 часов праг определя за $X \cdot Z$ минимална стойност 35 mm. Нарастването на общото количество над този праг ще прави уравнението (2) все по-точно.

$$P_6 = (6/X) \cdot P_{24} \quad (2)$$

Освен подобни благоприятни случаи, в тази област (най-светлата част) може да има и други разпределения от валежи от кумулусов тип с постоянна регенерация. Тази зона може да се разглежда като част от зоната на неопределеност отбелязана по-горе, защото не е ясен преобладаващия характер на летните валежи. По всяка вероятност, това е свързано с климатични особености на района, определящи облакообразуването. Източните части вероятно са повлияни от морето, а открояващите се долини на реките Струма и Места вероятно се дължат на орографски особености. От друга страна, там е значително и влиянието на Бяло море. Възможно е влиянието на моретата да е свързано и с микрофизиката на облакообразуването, доколкото солните аерозоли стимулират кондензационните процеси. Тогава капките издребняват и случаите на много интензивни, но и кратки поройни дъждове и градушки намаляват. Ако това е така, количествата от интензивен валеж извън пиковият 6 часов валеж ще са малки. В такива случаи оценката на пиковия валеж от уравнение (2) ще е напълно приемлива. Могат да се търсят различни обяснения, но важното е, че намереното разпределение на Фиг. 5 е устойчиво.

4. АЛГОРИТЪМ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА

За прилагането на тази методика са необходими следните последователни стъпки:

1. За избраната климатична или дъждомерна станция се отделят летните валежи с денонощни количества с и над 35 mm.
2. Ако станцията попада в областите с индекс 0.8 и над него, уравнението се прилага. При много големи количества на денонощния валеж (горната част на кривата) полученият 6 часов пиков валеж може да се увеличи средно с 5 mm, а при количества под 45 да се намали до 2. Най-добре е да се използва самата крива.
3. Ако станцията попада в областите с индекс 0.7 и 0.6, а денонощният валеж е над 40 mm, уравнението може да се приложи.
4. За валежите в областта (0.0 – 0.5) уравнението може да се приложи, ако 24 часовата сума е над 50 mm или се прилага уравнение (2).

Действието на тази методика може да се поясни и по друг начин. При валежите, които са много обилни, над 40 -50 mm, разпределението е върху по-голям период и оценката за 6 часовия пиков валеж е достоверна, защото тя се колебае около едно число. Да си представим 6 часов интервал 'да пълзи' през периода на валежа. Най-вероятно ще получаваме приблизително еднакви стойности на сумите при 'пълзенето' на този интервал, ако валежът е със значителна продължителност. Фиг.3 илюстрира това. При нея денонощната сума е над 56 mm и в интервала 11 -23 часа отделните 6 часови суми не се различават много. Фиг.2 илюстрира случаите с по-малко количество денонощен валеж, но разпределен в по-тесен интервал. В конкретния случай денонощното количество е 37.8 mm.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Голямото сходство между графиките, като тази на Фиг.4 и на разпределенията, като това на Фиг.5, за четирите години поотделно, дава основание за надеждност при прилагането на предлаганата методика. С други думи, коефициентът пред P_{24} в уравнение (1) се оказва устойчив и във времето. Описаният алгоритъм се кодира лесно и може да се приложи наведнъж за всички станции. За случаите на неопределеност може да се направи изход от програмата за съответната дата и станция. Тези случаи едва ли са много, доколкото областта на определеност е голяма и повечето климатични и дъждомерни станции ще попаднат в нея. За съмнителните случаи може да се потърсят записи в дневниците и да се направи експертна оценка на валежа по синоптичните карти.

ЛИТЕРАТУРА

Angeline G Pendergrass and Clara Deser (2017), Climatological characteristics of typical daily precipitation, Journal of Climate.

- Claudia Teutschbein, Jan Seibert (2012), Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, *Journal of Hydrology* 456–457 12–29
- Ryan Kittell (2012), Peak 1-Hour Rain Rates from 6-Hour QPF, National Weather Service, Los Angeles/Oxnard, California
- A.Pui, A. Sharma and R.Mehrotra, A Comparison of Alternatives for Daily to Sub-Daily Rainfall Disaggregation, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009 <http://mssanz.org.au/modsim09>



Stochastic models of daily precipitation totals with hybrid distributions for Zlatograd station

Nadya Neykova*, Plamen Neytchev

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

Abstract: A stochastic daily precipitation model for Zlatograd station in south Bulgaria conditional on atmospheric predictors that characterize the atmospheric circulation over Balkans is developed. The model consists of two components describing the occurrence and intensity precipitation series. The intensity component is based on a hybrid between gamma and generalized Pareto distributions(GP) and Weibull and GP. The results of simulations designed to compare the models based on the hybrid distributions and those based on the standard gamma and Weibull distributions are reported and some potential difficulties are outlined.

Keywords: stochastic precipitation modeling, gamma, Weibull, generalized Pareto distribution, hybrid distributions

Стохастични модели на денонощните суми на валежите с хибридни разпределения за станция Златоград

Надя Нейкова*, Пламен Нейчев

*Национален институт по метеорология и хидрология – БАН,
Бул. Цариградско шосе 66, 1784 София, България*

Резюме: Предложен е стохастичен модел на денонощните суми на валежите в климатична станция Златоград, който се състои от две компоненти: модел на вероятността за валеж и модел на количеството на валежа. Моделите включват атмосферни предиктори, характеризиращи тропосферата над Балканския

* nadya.neykova@meteo.bg

полуостров. За моделиране на количеството на валежа са използвани гама и Вейбул разпределенията, и хибридни разпределения между тях и обобщеното разпределение на Парето (GP). Сравнителният анализ между историческите и симулираните по моделите данни показва добро сходство. Симулираните редици от данни могат да бъдат използвани за оценка на риска от някои екстремални природни явления (наводнения, засушавания, ерозия на почвите и други).

Keywords: стохастично моделиране на валежите, гама, Вейбул, обобщено разпределение на Парето, хибридни разпределения

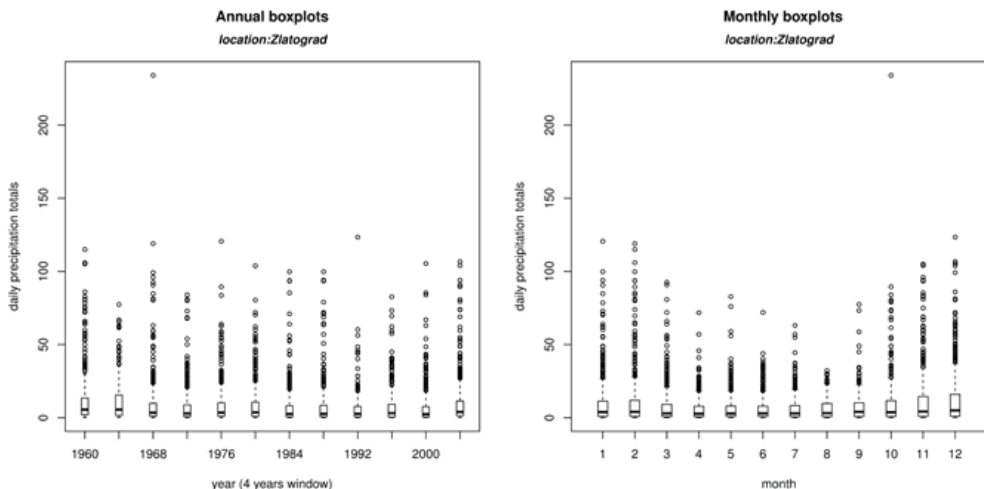
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Създаването на стохастични модели за валежите е актуална задача в социалната и стопанска дейност. Моделите на валежите се състоят от две компоненти, описващи появата на валеж и количеството на валежа. За моделиране на появата се използва бинарна логистична регресия. За целта данните за денонощните валежни суми се превръщат в бинарни, след което се моделира вероятността за поява на валеж. За моделиране на количеството се използват непрекъснати дясно скосени разпределения, като например гама и Вейбул или логнормално разпределение. За извършване на пресмятанията може да бъде използван стандартен софтуер за обобщени линейни модели (GLMs). Съществен недостатък на тези разпределения е, че чрез тях не могат да бъдат описани добре екстремалните валежни количества. За да избегнем това, ние адаптираме подхода на Furrer & Katz (2008), базиран на хибридни разпределения. По-точно, ние използваме хибридно разпределение между гама и обобщеното разпределение на Парето (GP), и хибридно разпределение между Вейбул и GP, за да направим стохастични модели на валежите за климатична станция Златоград. С помощта на хибридните разпределения става възможно симулирането (генерирането) на денонощни суми на валежите, разпределението на които наподобява разпределението на реалните данни. Целта на симулирането е да се увеличи обемът на извадката от налични данни и да се проведе статистически анализ върху симулираните данни – параметричен бутстрап (bootstrap), както бихме направили, ако разполагаме с дългогодишни наблюдения върху валежите. Симулираните моделни редици от данни могат да бъдат използвани за оценка на риска от някои екстремални природни явления (наводнения, засушавания, ерозия на почвите и други), наблюдавани в Източните Родопи и поречието на река Арда.

В тази статия е представено прилагането и адаптирането на подхода на Furrer & Katz (2008), базиран на хибридни разпределения и е предложен подобрен модел, използващ разпределение с по-тежка опашка за описване на денонощните валежи. Моделът описва редицата от денонощните суми на валежите, като за предиктори включва метеорологични променливи, характеризиращи тропосферата над Балканския полуостров.

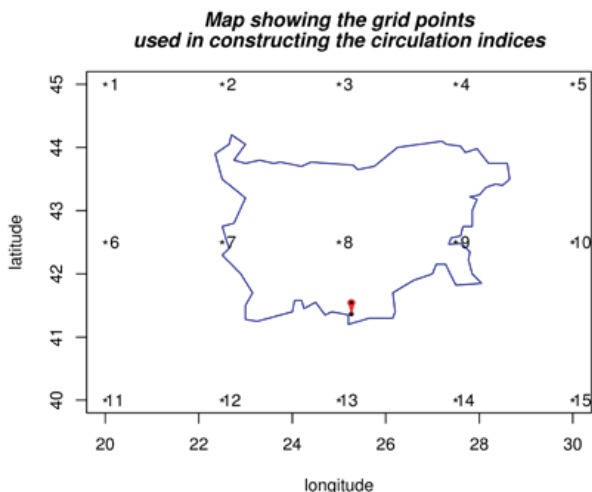
2. ОПИСАНИЕ НА ДАННИТЕ

Валеж са течните и/или твърдите продукти на водните пари, които падат от облаците на земната повърхност. В климатичните станции валежите се измерват веднъж в денонощието (към срок 06:00 GMT). В нашето изследване са използвани денонощните суми на валежите в климатична станция Златоград за 48 годишен период (01.01.1960 ÷ 31.12.2007). В тази станция на 03.10.1970 год. е бил измерен рекорден валеж от 234 литра за едно денонощие, а през периода са регистрирани 5402 дни с валеж от общо 17474 дни. На Фиг. 1. е представено разпределението на денонощните валежни суми по години (ляво) и по месеци (вдясно). При създаването на стохастичния модел са използвани атмосферни променливи, продукт на реанализ. Стойностите на променливите във възлите на мрежа (Фиг. 2), на стандартни нива от земната повърхност до 300 hPa, от един и същи срок (12:00 GMT), са комбинирани в конструкции, които отразяват облако- и валежо-образуващите условия над Балканския полуостров. Златоград се намира между възли 8 и 13, почти до границата на страната. С влажността на въздуха са свързани променливите shum (специфична влажност в kg/kg) и rhum (относителна влажност в %), prwtr (precipitable water в kg/m², възможен валеж от атмосферния стълб), prate (precipitation rate в kg/ m².s, интензивност на валежа).



Фиг. 1. Разпределение на денонощните суми на валежите по години (ляво) и по месеци (дясно). Екстремалната стойност от 234 мм е измерена на 03.10.1970г

Fig. 1. Allocation of daily rainfall amounts by years (left) and by months (right). The extreme value of 234 mm was measured on 03.10.1970



Фиг. 2. Разположение на възлите на атмосферната циркулация над територията на България

Fig. 2. Location of the atmospheric circulation nodes over the territory of Bulgaria

Конструкциите $prwtr.u$ и $prwtr.v$ са градиенти (разлики между стойностите във възли съответно 9 и 7, 13 и 3), а $prwtr.x$ е лапласиан (сумата от стойностите във възли 2, 4, 12 и 14, намалена с 4-кратната стойност в централния възел 8). Подобни са лапласианите $shum.x.850$ и $slp.x.2m$ съответно за $shum$ на 850 hPa и атмосферното налягане на средно морско ниво. Адвективните конструкции, например $adv.u.s.850$ и $adv.v.s.850$ са произведения на стойност на компонента (u или v) на вятъра във възел 8 и съответен градиент на $shum$ на посоченото ниво (в случая 850 hPa). Подобни са адвекциите $adv.u.t.sig$ и $adv.v.t.sig$ – за температурата на въздуха на sig ниво 995 hPa, $adv.v.s.10m$ – за $shum$ на 2 m и вятър на 10 m. Конструкциите $gamma850$ и $gamma700$ са вертикални температурни градиенти над възел 8 в слой съответно между 1000 и 850 и 700 hPa, а $sgama300$ е вертикалният температурен градиент в слоя между 1000 и 300 hPa, умножен по средната стойност на $shum$ на нива 850, 700 и 500 hPa. Конструкциите $ampl.t_{max}$ и $ampl.t_{min}$ са разликите между температурата на въздуха $air.2m$ и $tmax$ и $tmin$ за една и съща дата в централния възел 8. Стойностите на променливите са от предходната дата (лаг 1) спрямо денонощните суми. Използвани са също стойностите на северно-атлантическата (NAO) и арктическата (АО) осцилации с по-голям лаг.

3. МОДЕЛИРАНЕ НА ДЕНОНОЩНИТЕ СУМИ НА ВАЛЕЖИТЕ

3.1. Стохастичен модел на валежа

Нека Y_t е сумата на валежа в деня t , $Z_t = (Z_{1t}, \dots, Z_{kt})'$ е вектор от атмосферни променливи свързан с Y_t за $t = 1, \dots, T$. Денят t е сух (без валеж) ако $Y_t < c$, където c е предварително зададена константа, чиято стандартна стойност е $c = 0.1$ mm, и мокър (с валеж) ако $Y_t \geq c$. Редицата от сухи и мокри дни е представена с помощта на индикаторната функция $I_t = I_{[Y_t \geq c]}$, която приема стойност 0 ако денят t е сух и 1 ако денят t е мокър. Стойностите на Y_t , Z_t и I_t ще означаваме с малки букви. Да означим с $p_t(x_t)$ вероятността денят t да е с валеж, при наблюдавани стойности на вектора $x_t = (i_{t-1}, \dots, i_{t-m}, y_{t-1}, \dots, y_{t-m}, z_{1t}, \dots, z_{kt})'$, в който са включени лагове от ред m на индикаторната променлива и денонощната сума на валежа. Количеството валеж за деня t се дефинира като $R_t = Y_t$ ако $Y_t \geq c$ и $R_t =$ липсващата стойност в противен случай. Означаваме с $q(r_t|x_t)$ условната плътност на разпределение, което е от тип дясно скосено разпределение, понеже преобладават валежите с малко количество.

Редицата от денонощни суми на валежите се моделира като смес от две разпределения. Едното разпределение е дискретно с маса в нулата, отчитащо дните без валеж, докато второто разпределение е непрекъснато дясно скосено, отчитащо количеството валеж на дните с валеж, (Grunwald & Jones, 2000; Stern & Сое, 1984). Понеже двете състояния са взаимно изключващи се (несъвместими), то съответната преходна вероятност е:

$$\begin{aligned} f_t(y_t|x_t) &= (1 - p_t(x_t)) I_{[y_t < c]} + p_t(x_t) q_t(r_t|x_t) I_{[y_t \geq c]} \\ &= (1 - p_t(x_t)) (1 - I_{[y_t \geq c]}) + p_t(x_t) q_t(r_t|x_t) I_{[y_t \geq c]} \\ &= (1 - p_t(x_t))^{(1 - I_{[y_t \geq c]})} (p_t(x_t) q_t(r_t|x_t))^{I_{[y_t \geq c]}}. \end{aligned}$$

Най-често използваните разпределения в практиката за $q_t(r_t|x_t)$ са гама, Вейбул, лог-нормално. Ако се интересуваме от модели на екстремалните денонощни валежни суми, тогава се използват обобщеното разпределение на екстремалните стойности (GEV) или обобщеното разпределение на Парето (GP).

При условие, че $p_t(x_t)$ и $q_t(r_t|x_t)$ нямат общи параметри, функцията на правдоподобие за $(y_{t-m-1}, \dots, y_T)$ се дефинира както следва

$$\begin{aligned} L &= \prod_{t=m+1}^T f_t(y_t|x_t) = \prod_{t=m+1}^T (1 - p_t(x_t))^{(1 - I_{[y_t \geq c]})} (p_t(x_t) q_t(r_t|x_t))^{I_{[y_t \geq c]}} \\ &= \prod_{t=m+1}^T (1 - p_t(x_t))^{1 - I_{[y_t \geq c]}} (p_t(x_t))^{I_{[y_t \geq c]}} \prod_{t=m+1, y_t > c}^T q_t(r_t|x_t) \end{aligned}$$

От тази факторизация на функцията на правдоподобие се вижда, че за оценяването на неизвестните параметри могат да бъдат използвани стандартни програмни процедури за обобщени линейни модели (McCullagh & Nelder, 1989), като *glm*, *vglm* от *VGAM* и други от програмната среда R (R, Core Team 2017). Това е така, понеже първата компонента представлява функцията на правдоподобие на бинарен времеви ред, докато втората компонента е функцията на правдоподобие на количеството на валежа с някои от споменатите по-горе разпределения.

3.2. Модел за появата на валеж

За моделиране на вероятността за поява на валеж $p_t(x_t)$ ще използваме модел на логистичната регресия:

$$\begin{aligned} \text{logit}(p_t(x_t)) &= \log(p_t(x_t)/(1 - p_t(x_t))) = u(x_t) = \\ &= \alpha_0 + \sum_{l=1}^p (\alpha_l i_{t-l} + g_l(y_{t-l})) + \sum_{l=1}^k g_{p+l}(z_{lt}) + g_{p+k+l}(t). \end{aligned}$$

В линейния предиктор $u(x_t)$ се включват лагови предиктори на появата i_{t-l} и количеството y_{t-l} на валежа, краен ред на Фурие, за да бъде отчетена сезонността на валежите, както и атмосферни предиктори, където g_l за $l = 1, \dots, p + k + 1$ са непрекъснати функции. Пример за подобен модел:

$$\begin{aligned} \text{logit}(p_t(x_t)) &= \alpha_0 + \alpha_1 i_{t-1} + \alpha_2 C_t + \alpha_3 S_t + \alpha_4 NAO_{t-1} \\ &\quad + [\beta_2 C_t + \beta_3 S_t + \beta_4 NAO_{t-1}] i_{t-1}, \end{aligned}$$

където $C_t = \cos(2\pi t/365.25)$ и $S_t = \sin(2\pi t/365.25)$, а NAO е северно-атлантическата осцилация. Предикторите в този модел са $x_t = (1, i_{t-1}, C_t, S_t, NAO_{t-1}, C_t, i_{t-1}, S_t, i_{t-1}, NAO_{t-1}, i_{t-1})$, α_i са неизвестни параметри.

3.3. Разпределения на количеството валеж

За моделиране на разпределението на количеството на валежа са използвани гама, Вейбул и GP разпределенията. Поради различните параметризации на тези разпределения, в тази част са дадени техните плътности, които са използвани в библиотеката VGAM (Yee, 2015), за да бъдат избегнати недоразумения с други алтернативни представяния в литературата.

Плътност на гама разпределението:

$$f(r, a, b) = \begin{cases} \frac{b^a r^{(a-1)} \exp(-br)}{\Gamma(a)}, & r > 0 \\ 0 & r = 0, \end{cases}$$

където $\Gamma(a)$ е гама функцията, $a > 0$ е параметър на формата (shape), $b > 0$ е параметърът, свързан с мащаба (scale). При тази параметризация очакването и дисперсията са съответно равни на $\mu = a/b$ и $\sigma^2 = \mu^2/a = a/b^2$.

Плътност на обобщеното разпределение на Парето (GP) с праг u :

$$g(r, u, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \frac{\xi(r - u)}{\sigma} \right]_+^{-\frac{1}{\xi} - 1},$$

където $r > u$, $u, \sigma > 0$ и ξ са параметрите на положението, мащаба и формата, $[A]_+ = \max(A, 0)$. Параметърът ξ характеризира типа на GP разпределението, както следва: с тежка опашка ако $\xi > 0$, с крайна опашка ако $\xi < 0$ и експоненциално (изместено с u) разпределение ако $\xi = 0$.

При моделиране на данни с обобщени линейни модели (GLMs) и разпределения на екстремалните стойности се използват следните свързващи функции, чрез които се задава връзката между предикторните (регресионните) променливи и параметрите на гама, Вейбул и GP разпределенията

$$\log(a) = \theta_1^T x_{1t}, \quad \log(b) = \theta_2^T x_{2t}, \quad \log(\sigma) = \theta_3^T x_{3t}, \quad \xi = \theta_4^T x_{4t},$$

където θ_i са неизвестните векторни параметри, x_{it} са образувани от вектора на предикторите x_t за $i = 1, \dots, 4$. Използването на логаритъм като свързваща функция осигурява положителност на параметрите a , b и σ при максимизирането на функцията на правдоподобие. Пример за свързваща функция, състояща се от периодична компонента и лаг на северно атлантическата осцилация NAO за параметъра a , е:

$$\log(a) = \theta_0 + \theta_1 i_{t-1} + \theta_2 C_t + \theta_3 S_t + \theta_4 NAO_{t-1}.$$

Определянето на оценките на неизвестните параметри α_i в модела на поява и θ_i в модела на количеството се получава чрез максимизирането на функцията на правдоподобие.

3.4. Хибридни разпределения

Furrer & Katz (2008) дефинират хибридното разпределение (гама-GP) на основата на гама и GP разпределенията, както следва:

$$h(x) = \begin{cases} f(x), & x \leq u \\ (1 - F(u))g(x), & x > u \end{cases}$$

където $F(x)$ е функцията на гама разпределението, $f(x)$ и $g(x)$ са плътностите на гама и GP разпределенията, а $1-F(u)$ е нормиращ множител. За да осигурят непрекъснатост в праговата стойност u тези автори налагат условието

$$f(u) = [1 - F(u)]g(u) = [1 - F(u)]/\sigma.$$

В резултат на това за параметъра σ на GP разпределението получаваме $\sigma = (1 - F(u))/f(u)$. Това означава, че параметърът на мащаба на GP разпределението се дефинира изцяло в термините на гама разпределението, с което успешно могат да бъдат моделирани наблюденията с по-малки стойности от прага u . Авторите предлагат следната процедура за оценяване на параметрите на хибридного разпределение: (i) моделиране на количеството валеж със стандартна процедура за обобщен линеен модел с гама разпределение по пълната извадка от данни; (ii) моделиране на количествата валеж, превишаващи прага u , със стандартна процедура за анализ на екстремалните стойности, основана на GP разпределението, като за целта бъдат използвани подходящи свързващи функции; (iii) заместване на параметъра σ на GP разпределението в стойността на прага u . Предложената процедура за дефиниране на хибридни разпределения е универсална, тъй като не зависи от вида на разпределението $F(x)$. В работата на Neukov et al (2014) се разглеждат модели на денонощните суми на валежите за станция Ихтиман с гама, Вейбул и хибридни разпределения между гама и GP, и Вейбул и GP, в които модели NAO е използвана като предиктор.

4. РЕЗУЛТАТИ

4.1. Модел за поява на валеж

За моделиране на вероятността за поява на валеж е използвана логистичната регресия с линеен предиктор, в който са включени северно-атлантическата и арктически осцилации NAO и AO и PNA с лагове до 5 дни, краен ред на Фурие, за да бъде отчетена сезонността на появата на валеж, изброените в секция 2 атмосферни индекси с лаг 1 както и взаимодействия на състоянието поява на валеж в предишния ден I_{t-1} с някои от тях. Голям брой от включените атмосферни индекси в модела на появата на валеж се оказаха статистически незначими предиктори, според критерия на Студент при стандартните нива на съгласие. Това се потвърждава и от резултатите при проверката на хипотези за значимост на оценките на неизвестните параметри пред съответните атмосферни индекси със статистическия критерий (тест), основан на отношението на правдоподобие. Полученият модел е с изразен сезонен характер, а оценките на неизвестните параметри пред някои от атмосферните индекси, за които е известно че формират появата на валежа, са статистически значими. Някои от атмосферните индекси

като NAO, AO и PNA с лаг по-голям от 2, както и взаимодействията, формирани чрез сезонните компоненти с i_{t-1} са статистически незначими предиктори, понеже съответните им параметри са статистически незначими. Проведен бе допълнителен анализ чрез стъпковата процедура *stepAIC* от библиотеката MASS за избор на статистически значими предиктори с помощта на информационния критерий на Бейс (BIC). Резултатите се дадени в Таблица 1 на отклоненията (Deviance table) от изхода на *glm* процедурата. В резултат на това се достигна до редуциран модел на появата на валеж, включващ най-значимите предиктори със съответните оценени параметри:

$$\begin{aligned} \text{logit}(p_t(x_t)) = & -1.29130 + 0.12396 \sin(\arg1) + 0.24469 \cos(\arg1) - 0.14800 \sin(\arg2) \\ & + 0.03803 \cos(\arg2) + 0.50874 i_{t-1} - 0.50580 \text{prwtrv}_{t-1} - 0.20326 \text{prwtrx}_{t-1} \\ & + 0.43005 \text{gama850}_{t-1} + 0.53271 \text{gama700}_{t-1} + 0.42198 \text{shumx850}_{t-1} \\ & - 0.09687 \text{adv. u. s. 850}_{t-1} - 0.18907 \text{adv. u. s. 700}_{t-1} + 0.19096 \text{adv. u. s. 10m}_{t-1} \\ & - 0.35527 \text{adv. u. t. sig}_{t-1} - 0.08767 \text{adv. v. s. 850}_{t-1} - 0.20304 \text{adv. v. s. 700}_{t-1} \\ & + 0.10928 \text{adv. v. s. 500}_{t-1} - 0.28963 \text{adv. v. t. 300}_{t-1} - 0.09892 \text{adv. v. s. 10m}_{t-1} \\ & + 0.12684 \text{adv. v. t. sig}_{t-1} - 0.44172 \text{ampl. tmax}_{t-1} + 0.17676 \text{ampl. tmin}_{t-1} \\ & + 0.24329 \text{slpx. 2m}_{t-1} + 0.54637 \text{rhumv}_{t-1} + 0.21776 \text{airv2m}_{t-1}, \quad (1) \end{aligned}$$

където $\arg1 = 2\pi t / 365.25$, $\arg2 = 3\pi t / 365.25$ за $t = 1, \dots, T$ (01.01.1960 – 31.12.2007).

Ще отбележим, че стойността на функцията на отклоненията без предикторни променливи, т.е., само модел със свободен параметър a_0 (NULL), е 21579 в таблицата при 17473 степени на свобода. Стойността ѝ се редуцира до 14660 при 17448 степени на свобода след използването на 20те атмосферни индекса, двете сезонни компоненти и свободният член като предиктори в модела. Тези атмосферни индекси са статистически значими предиктори, понеже съответните им параметри са статистически значими. Така например, влажността в атмосферата shumx850_{t-1} и състоянието „валеж“ от предходния ден i_{t-1} редуцират стойността на функцията на отклоненията, съответно с 1575.73 и 1555.09. Линеината комбинация от $\sin$ и $\cos$, характеризираща сезонното поведение на появата на валеж, е статистически значима, тъй като поне една от нейните компоненти е значима. Резултатът от процедурата *stepAIC* е еквивалентен на определянето на оптимален модел сред множество от алтернативни модели по обучаваща и валидираща извадки от данните. Разгледаният модел за вероятността за поява на валеж характеризира много добре историческите бинарни данни.

Таблица 1. ANOVA таблица на модел на вероятността за поява на валеж – редуциран модел след използване на процедурата stepAIC

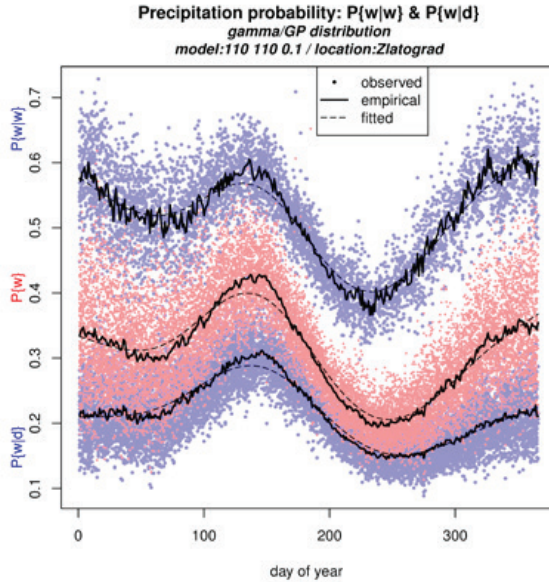
Table 1. ANOVA table of model of probability for the occurrence of rainfall - reduced model after using the stepAIC procedure

Terms	Df	Deviance	Resid.Df	Resid.Dev	Pr(>Chi)	Signif.
NULL			17473	21579		
sin(arg1)	1	181.82	17472	21397	< 2.2e-16	***
cos(arg1)	1	1.34	17471	21395	0.2468671	
sin2(arg2)	1	133.86	17470	21262	< 2.2e-16	***
cos2(arg2)	1	30.83	17469	21231	2.81E-08	***
i _{t-1}	1	1555.09	17468	19676	< 2.2e-16	***
prwtrv _{t-1}	1	410.52	17467	19265	< 2.2e-16	***
prwtrx _{t-1}	1	682.72	17466	18582	< 2.2e-16	***
gama850 _{t-1}	1	371.91	17465	18210	< 2.2e-16	***
gama700 _{t-1}	1	457.18	17464	17753	< 2.2e-16	***
shumx850 _{t-1}	1	1575.73	17463	16178	< 2.2e-16	***
adv. u. s. 850 _{t-1}	1	47.4	17462	16130	5.79E-12	***
adv. u. s. 700 _{t-1}	1	50.57	17461	16080	1.15E-12	***
adv. u. s. 10m _{t-1}	1	93.08	17460	15986	< 2.2e-16	***
adv. u. t. sig _{t-1}	1	236.57	17459	15750	< 2.2e-16	***
adv. v. s. 850 _{t-1}	1	143.79	17458	15606	< 2.2e-16	***
adv. v. s. 700 _{t-1}	1	12.39	17457	15594	0.0004309	***
adv. v. s. 500 _{t-1}	1	22.71	17456	15571	1.89E-06	***
adv. v. t. 300 _{t-1}	1	211.58	17455	15359	< 2.2e-16	***
adv. v. s. 10m _{t-1}	1	15.13	17454	15344	0.0001004	***
adv. v. t. sig _{t-1}	1	38.06	17453	15306	6.85E-10	***
ampl. tmax _{t-1}	1	193.92	17452	15112	< 2.2e-16	***
ampl. tmin _{t-1}	1	20.31	17451	15092	6.57E-06	***
slpx. 2m _{t-1}	1	127.86	17450	14964	< 2.2e-16	***
rhumv _{t-1}	1	243.86	17449	14720	< 2.2e-16	***
airv2m _{t-1}	1	60.17	17448	14660	8.69E-15	***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Използвайки (1) пресмятаме условните вероятности на нехомогенната Марковска верига на прехода с две състояния $p_{01}(t) = p_t(x_t)$ за $i_{t-1} = 0$ (вероятността да вали в деня t при условие, че предишния ден не е валило) и $p_{11}(t) = p_t(x_t)$ за $i_{t-1} = 1$. От формулата за пълната вероятност следва връзката между $\pi(t) = \Pr(I_t = 1|z_t)$ и вероятностите на матрицата на прехода $p_{01}(t)$ и $p_{11}(t)$:

$$\pi(t) = \Pr(I_t = 1|z_t) = \pi(t-1)p_{11}(t) + (1 - \pi(t-1))p_{01}(t) \quad (2)$$

При предположение, че вероятностите за валеж във всеки два съседни дни са близки, т.е. $\pi(t) \approx \pi(t-1)$ то за всяко t получаваме $\pi(t) \approx p_{01}(t)/(p_{01}(t) + 1 - p_{11}(t))$, Furrer and Katz (2007). Марковската матрица на прехода е хомогенна, когато $p_{01}(t)$ и $p_{11}(t)$ зависят само от $I_{t-1} = i_{t-1}$, т.е. не се използва информацията от данните $Z_t = z_t$, за $t = 1, \dots, T$.



Фиг. 3. Вероятност за поява на валеж. Точките представляват предсказаните стойности на условните вероятности $p(x_t)$ при $i_{t-1} = 1$ (горе в синьо), $p(x_t)$ при $i_{t-1} = 0$ (долу в синьо) и безусловната вероятност $\pi(t)$ (средата в розово), пунктирните линии са съответните им предсказани стойности чрез линеен предиктор.

Fig. 3. Probability of precipitation occurrence. The points represent the predicted values of conditional probabilities $p(x_t)$ for $i_{t-1} = 1$ (up in blue), $p(x_t)$ for $i_{t-1} = 0$ (below in blue) and the unconditional probability $\pi(t)$ (middle in pink), the dashed lines are the respective predicted values using a linear predictor.

На Фиг. 3 са представени: (а) с назъбени горна и долна линии честотите за поява на валеж пресметнати по данните при условие, че предният ден е бил с или без валеж; (b) оценените вероятности $p_{01}(t)$, $p_{11}(t)$ и $\pi(t)$, като функции само на двете хармоники (без атмосферни предиктори), са дадени с пунктирна линия; (с) сините точки (горе при $i_{t-1} = 1$ и долу при $i_{t-1} = 0$) съответстват на оценените вероятности $p_t(x_t)$, т.е. на p_{01} и p_{11} с предикторите от оптималния модел, докато розовите точки в средата съответстват на оценените вероятности $\pi(t)$ от рекурентната формула (2).

4.2. Модел за количеството валеж

За моделиране на количеството на денонощните валежи сме използвали гама и Вейбул разпределенията. В тази секция ще бъдат показани резултатите от моделирането с гама разпределението, т.к. резултатите за разпределението на Вейбул са подобни. По аналогия с модела на вероятността за валеж, при създаването на модел за количеството на денонощния валеж са използвани стойностите на всички атмосферни индекси от предходния ден както и някои взаимодействия с лаг на количеството от предишния ден, докато за NAO, AO и PNA са използвани лагове до 5 дни. За модела на количеството на валежа са използвани 5406 дни, в които е регистриран валеж в станцията Златоград. Голям брой от включените атмосферни индекси се оказаха статистически незначими предиктори, според критерия на Студент при стандартните нива на съгласие. Това се потвърждава и от резултатите при проверката на хипотези за значимост на оценките на параметрите пред съответните атмосферни индекси с теста, основан на отношението на правдоподобие. Полученият модел е с изразен сезонен характер, а оценките на неизвестните параметри пред някои от атмосферните индекси, за които е известно че формират количеството валеж, са статистически значими. Проведен бе допълнителен анализ чрез стъпковата процедура stepAIC. В резултат на това се достигна до редуциран модел, включващ най-значимите предиктори със съответните оценени параметри:

$$\begin{aligned}
 p_t(x_t) = & 1.445864 - 0.081567 \sin(\arg1) + 0.238677 \cos(\arg1) + 0.002521 \sin(\arg2) \\
 & + 0.064810 \cos(\arg2) + 0.013826 \sin(\arg3) - 0.057494 \cos(\arg3) \\
 & + 0.003447 y_{t-1} - 0.053933 AO_{t-1} + 0.078619 NAO_{t-2} - 0.185295 prwtrv_{t-1} \\
 & + 0.078402 prwtru_{t-1} + 0.162051 \gamma_{700,t-1} + 0.219000 s\gamma_{300,t-1} \\
 & + 0.055719 shumx_{850,t-1} - 0.072066 \text{adv. u. s. } 700_{t-1} - 0.191617 \text{adv. u. t. sig}_{t-1} \\
 & - 0.074729 \text{adv. v. s. } 850_{t-1} - 0.060022 \text{adv. v. s. } 700_{t-1} \\
 & - 0.178242 \text{adv. v. t. } 300_{t-1} - 0.064057 \text{adv. v. s. } 10m_{t-1} - 0.106929 \text{adv. v. t. sig}_{t-1} \\
 & + 0.223056 \text{slpx. } 2m_{t-1} + 0.074354 rhumv_{t-1} + 0.052751 pratev_{t-1} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Стойността на функцията на отклоненията, която е мярката за качеството на модела, без използването на атмосферни индекси е 11559.9 при 5380 степени

на свобода. Тя се редуцира до 8904.0 при 5356 степени на свобода в резултат на включването на значимите атмосферни величини и сезонни компоненти.

4.3. Поверка на хипотезата за тежка опашка на разпределението на екстремалните валежи

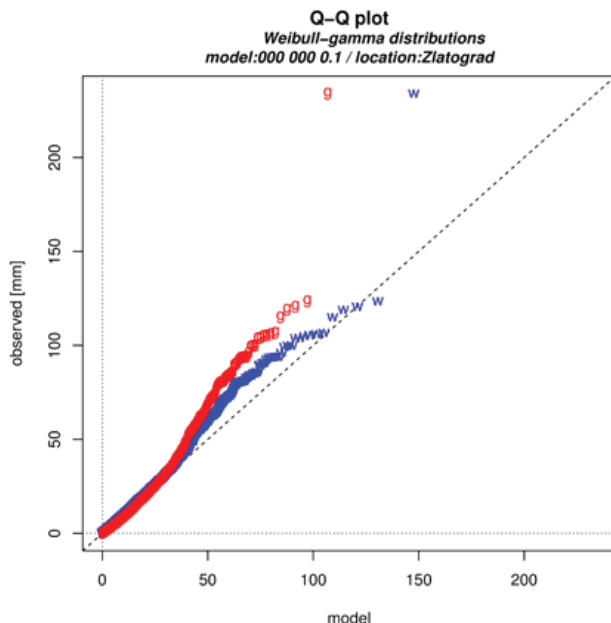
Създаването на хибридно разпределение е целесъобразно при условие, че данните са генерирани от разпределение с тежка опашка. Проверява се хипотезата $H_0: \xi = 0$ за експоненциален закон на разпределението срещу алтернативната $H_1: \xi > 0$, т.е. разпределението на количеството валеж да е с тежка опашка. За целта, денонощните суми на валежите се деклъстерират, като се извличат максималните стойности на всяка група от данни във времето, превишаващи предварително зададен праг (емпиричен квантил на количеството на денонощните валежи), след което се използва стандартната методология за оценяване на неизвестните параметри на GP разпределението на екстремалните стойности. Стойността на прага се избира между 80% и 95% емпиричен квантил на количеството на валежа, за който качеството на апроксимацията на теоритичните GP квантили спрямо емпиричните е удовлетворителна. Максимално правдоподобните оценки на параметъра ξ на GP разпределението за прагове 10 и 15 са 0.2214157 и 0.2016251, съответно. Съгласно критерия на отношението на правдоподобие, отхвърляме хипотезата за експоненциален закон на разпределението на количеството валеж за станция Златоград, тъй като стойностите на вероятността на опашката (p-value) са по-малки от стандартните нива на съгласие: 3.104358e-13 и 3.363121e-08, съответно. Т.е. разпределението на количеството на денонощните суми на валежа е с тежка опашка. Необходимите пресмятания са извършени в средата на *vglm* процедурата.

4.4. Хибридни разпределения. Сравнителен анализ

Известен недостатък на гама и Вейбул разпределенията е, че чрез тях не могат да бъдат описани добре екстремалните стойности на валежите. Това се вижда добре на Фиг. 4. За да избегнем този недостатък ние адаптираме подхода на Furrer & Katz (2008), базиран на хибридни разпределения .

Изборът на праг е от изключително значение за конструирането на хибридните разпределения. Разгледани са модели с прагове 5 мм, 10 мм и 25 мм. Така например: (1) ако бъде избран праг с голяма стойност, оценяването на параметрите на GP разпределението ще бъде по извадка с твърде малък обем, което ще се отрази на надеждността на резултатите, поради големите стойности на оценката на стандартните грешки; (2) ако бъде избран праг с малка стойност, тогава ще бъдат нарушени предположенията за валидност на GP разпределението, докато формалното му използване ще доведе до голяма тежест на опашката, вследствие

на което бихме получавали твърде големи предсказани квантилни стойности за денонощни валежни суми.

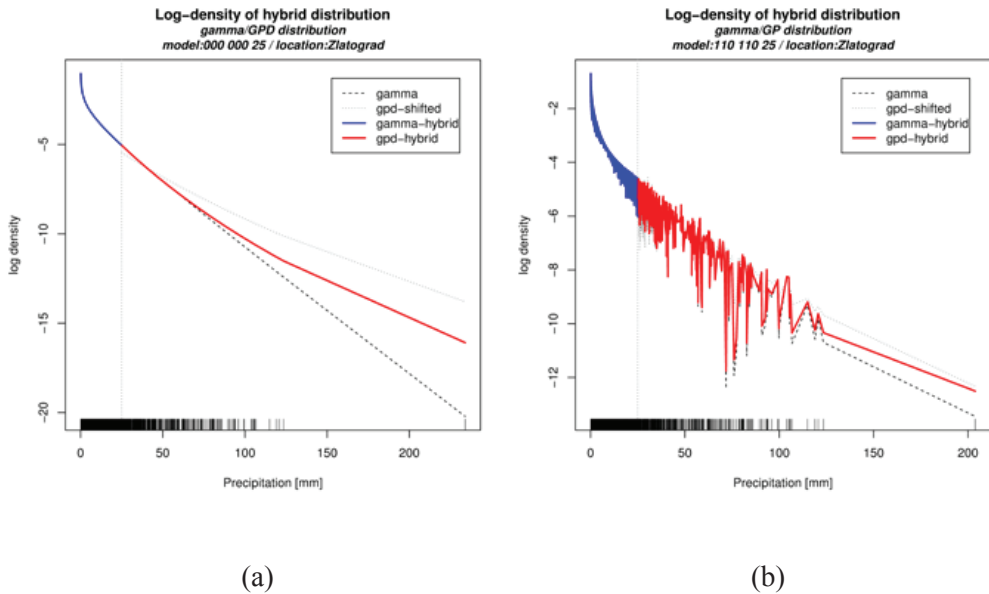


Фиг. 4. Q-Q плот на измерените денонощни количества и оценените квантили от модели на гама (g) и Вейбул (w) разпределенията за периода 1960 – 2007 г.

Fig. 4. Q-Q plot of measured 24-hour quantities and estimated quantils by models of gamma (g) and Weibull distributions (w) for the period 1960-2007

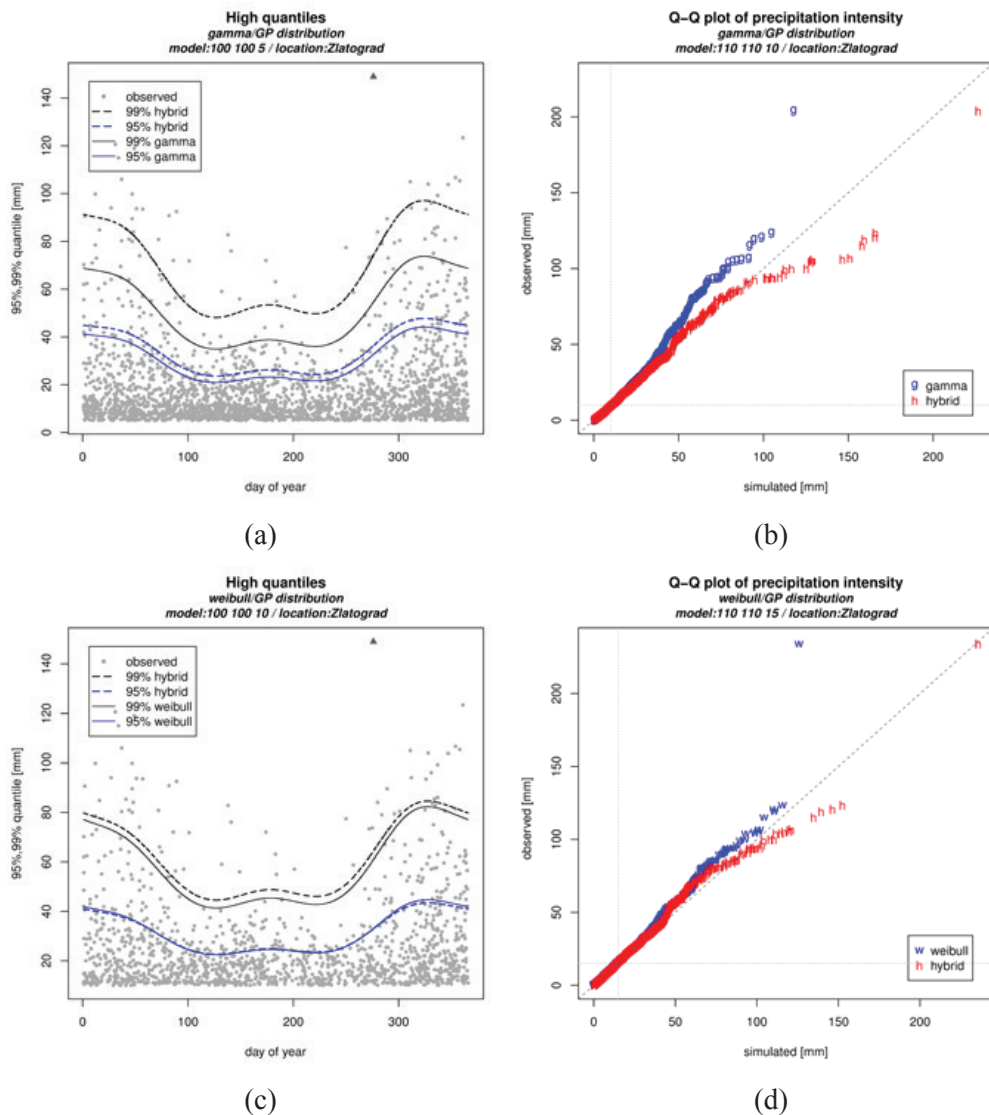
На Фиг. 5а) са показани логаритмите от максимално правдоподобните оценки на плътности с хомогенни (без използване на предиктори) параметри. Оценките на гама разпределението са представени с непрекъсната синя линия до праг с 25мм и пунктирна линия след съответния праг. Тези на GP са представени с линия от многоточие след прага, а на хибридно гама-GP – с непрекъсната линия (синя и червена). Вертикалната права на плота представлява прага, а количеството на денонощните валежи е дадена с малките вертикални черти по хоризонталната ос. Интерпретацията на резултатите от плота на Фиг. 5.б) е като на плот а), но за МП оценка на плътността на гама разпределението са използвани атмосферни предикторни променливи. Във връзка с надеждността и приложимостта на разглежданите модели на денонощните суми на валежа бе проведен сравнителен анализ между симулираните и наблюдаваните валежи. На Фиг.6. а) са показани 95% и 99% емпирични квантили (точките) и моделните квантили с гама (непрекъсната линия) и хибридно гама-GP (пунктирна линия) разпределения на денонощните количества валеж с праг 5мм за модел без атмосферни предиктори. Аналогични

резултати, но за Вейбул разпределението са показани на Фиг.6. с). Екстремната стойност от 234 мм, измерена на 03.10.1970 год., е маркирана с плътен триъгълник. Ефектът от хибридизацията на разпределенията се откроява ясно при по-високите квантили и по-малка стойност от 5мм за праг. На Фиг. 6. b) е показан Q-Q плот на наблюдавани и симулирани чрез гама (g) и хибридно гама-GP (h) квантили на денонощните суми на валежите с праг 10 мм. Ефектът от хибридизацията на разпределенията се откроява при избор на праг с по-малка стойност.



Фиг. 5. Логаритми от максимално правдоподобните оценки на плътностите на гама, GP и хибридно гама – GP разпределенията. (a) без използване на предиктори в модела; (b) с използване на атмосферни предикторни променливи

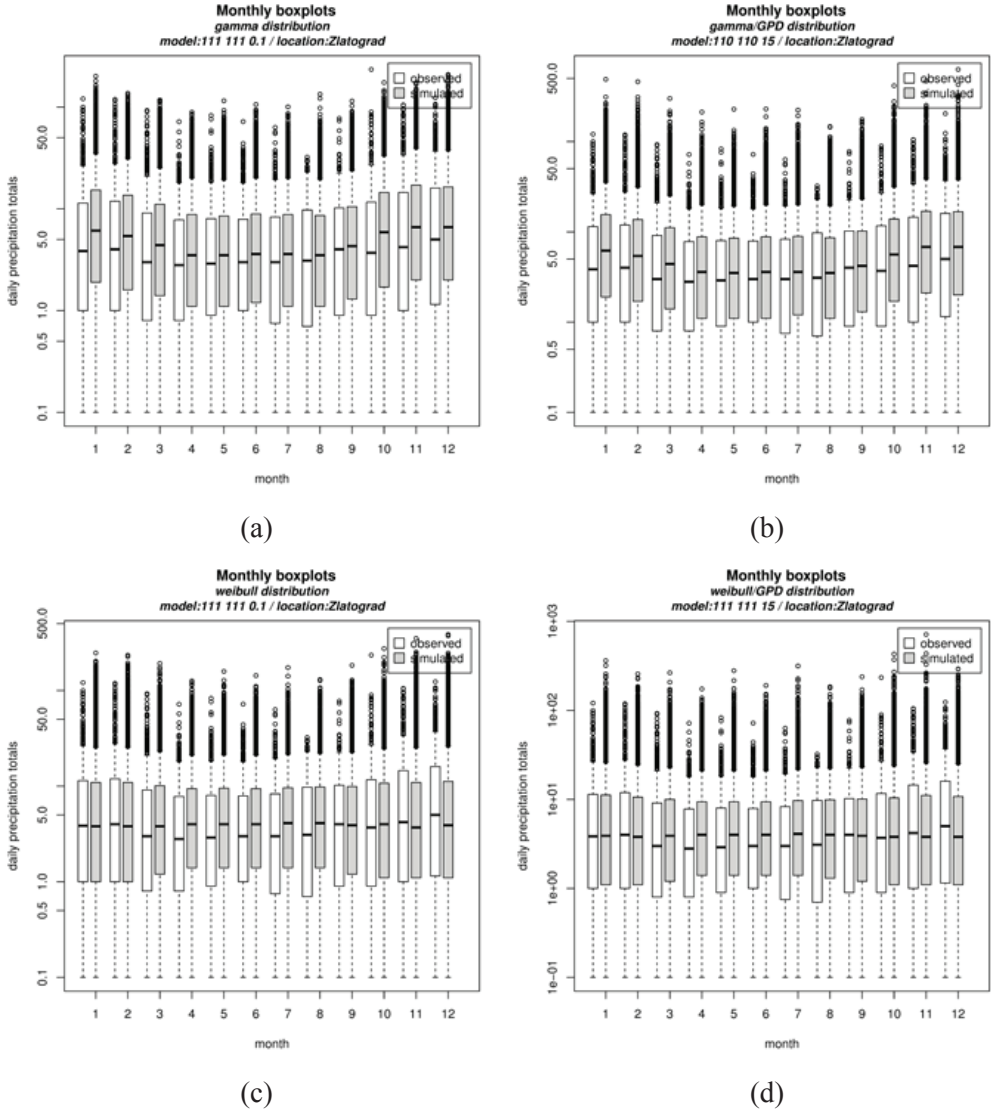
Fig. 5. Logarithms of the most plausible densities estimates of gamma, GP and hybrid gamma - GP distributions. (a) without using predictors in the model; (b) using atmospheric predictor variables



Фиг. 6. (a) и (c): 95% и 99% емпирични квантили (точките) и моделните квантили с гама и Вейбул (непрекъсната линия) и хибридно гама-GP и Вейбул-GP (пунктирна линия); (b) и (d) Q-Q плот на наблюдавани и симулирани чрез гама (g) и Вейбул(w) и хибридно гама-GP(h) и Вейбул-GP(h)

Fig. 6. (a) and (c): 95% and 99% empirical quantils (dots) and model quantiles with gamma and Weibul (solid line) and hybrid gamma-GP and Weibul-GP (dashed line); (b) and (d) Q-Q plot of observed and simulated by gamma (g) and Weibull (w) and hybrid gamma-GP (h) and Weibul-GP (h)

На Фиг. 7 са представени плотове (box-plots) на денонощните суми на наблюдаваните и симулирани валежи по месеци в логаритмична скала. Симулациите са базирани на 50 повторения над разглеждания 47 годишен период, т.е., генерирани са 2350 годишни денонощни суми на валежите с модел, включващ предиктори i_{t-1} , една хармоника, и значимите атмосферни предиктори.



Фиг. 7. Денонощни суми на наблюдаваните и симулирани валежи по месеци в логаритмична скала.

Fig. 7. Daily sums of observed and simulated rainfall by months in logarithmic scale.

На фигурата, симулациите са направени от модел: само с гама разпределение (a), с хибридно гама - GP разпределение, 15 мм праг (b); само с Вейбул (c) и хибридно Вейбул—GP, 15 мм праг (d). Вижда се, че моделите на количеството, използващи стандартните гама и Вейбул разпределения генерират сходни с наблюдаваните денонощни количества с изключение на екстремалните стойности на денонощните валежни суми. Ефектът от хибридизацията е виден: чрез хибридните модели можем да генерираме денонощни валежни суми в целия спектър на наблюдаваните валежи, дори по-големи от наблюдаваните, макар и с малка вероятност.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В това изследване бяха разгледани няколко модела за появата и количеството на денонощните валежи за станция Златоград, включващи атмосферни предиктори, характеризиращи поведението на атмосферната циркулация над Балканския полуостров. За моделиране на разпределението на количеството валеж бяха използвани гама и Вейбул разпределенията, и хибридните разпределения между тях и опашката на обобщеното разпределение на Парето. В резултат на изследването беше установено, че разпределението на денонощните суми на валежите за станция Златоград е с тежка опашка. Беше проведен сравнителен анализ на историческите данни със симулираните по моделите данни, основани на хибридни разпределения от тип гама - GP, Вейбул - GP и беше установено, че симулираните данни наподобяват наблюдаваната редица от данни. Необходимите изчисления бяха проведени със стандартни статистически процедури като *glm* и *vglm* от R. Определянето на прага за свързване на основното разпределение с GP разпределението е напълно субективен, което се оказва сериозен проблем дори при сравнително малък брой атмосферни предикторни променливи.

Придобитият опит ще бъде от полза при създаването на модели на часовите суми на валежите чрез хибридни разпределения, което е актуална задача, тъй като те се използват за оценка на риска от наводнения, при проектирането на канализационни мрежи за управление на водите и водните ресурси, за борба с ерозията на почвите и други.

REFERENCES

- Furrer, E. M. and Katz R. W., (2007), Generalized linear modeling approach to stochastic weather generators, *Clim. Res.*, 34, 129-144
- Furrer, E. and Katz R., (2008), Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators, *Water Resour. Res.*, 44, W12439
- Grunwald, G. and Jones, R., (2000), Markov models for time series with mixed distribution, *Environmetrics*, 11, 327-339

- Stern, R. D. and Coe, R., (1984), A model fitting analysis of daily rainfall data, J. Roy. Stat. Soc. A, 147, 1-34
- McCullagh P. and Nelder J., (1989), Generalized linear models. Chapman and Hall.
- R Development Core Team, (2017), A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0.
- Yee, T., (2015), Vector generalized linear and additive models with an implementation in R, Springer-Verlag New York
- Neykov, N., Neytchev, P. and Zucchini, W., (2014), Stochastic daily precipitation model with a heavy-tailed component, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2321-2335.



Irrigation scheduling under past and present weather conditions in Pleven, North Bulgaria

Prof. DSc Eng. Zornitsa Popova*, Assist. Prof. Dr Eng. Maria Ivanova

*N. Poushkarov Institute of Soil Science, Agrotechnology and
Plant Protection (ISSAPPNP), BG - 1080 Sofia, Bulgaria*

Abstract: Pleven agricultural region, the Danube plain, is affected by climate variability and increasing dryness. Detected climate change in May-September season creates uncertainties for maize irrigation scheduling and harvested yield. To cope with them, simulations have been performed for past (1951-1984) and present (1951-2004) weather conditions using the validated irrigation scheduling simulation WinISAREG model for two maize hybrids, the semi-early Pioneer P37-37 and the late H708, both grown on a Degraded chernozem soil of large Total Available Water ($TAW=168 \text{ mm m}^{-1}$) at Gorni Dabnik experimental field. The study compares several irrigation scheduling alternatives: (1) consists of refilling the soil reservoir by adopting a management-allowed depletion fraction (MAD) 0.47 TAW and 90 mm application depth both tuned to results of measurements under continuous furrow irrigation; (2) consists of refilling the soil reservoir by adopting $MAD=0.31$ and 60 mm application depth relative to surge furrow irrigation of improved distribution uniformity and reduced application depth or sprinkler irrigation; alternative (3) aims at better storage of seasonal precipitation by partially refilling soil reservoir adopting $MAD=0.47$ with 60 mm application depth; alternative (4) refers to the option of crop without irrigation. These alternatives are built in agreement with past studies to develop environmentally sound irrigation practices that avoid soil cracking, high non-uniformity of water distribution, water and yield losses. According to the regional irrigation practice and previous studies (Zahariev et al, 1986), the last allowed irrigation date is 31/07 for high and moderate demand years while it is 10/08 for the dry year having probability of exceedance $P_I=10\%$. These conditions are considered for all irrigation scheduling studies in addition to a free definition of irrigation timing aiming at water saving while avoiding yield losses. Simulations relative to past weather conditions show that when aiming at maximum yield in the dry years (1965, $P_I=8\%$) irrigation scheduling alternatives 1, 2 and 3 lead to different irrigation demands (ID) of 270, 300 and 240 mm. The results over a whole period using full required daily climate dataset show that the respective irrigation thresholds and application depths produce demands that are also different among them (Fig.8a). The ID relative to Alternative 2 is the highest among the three alternatives and is often larger than net irrigation requirements (NIR). Alternatives 1 and 3 allowing a larger depletion lead to

* zornitsa_popova@abv.bg

water saving of about 60 to 90 mm when compared with alternative 2. These results are compared to irrigation scheduling presently advised in the region and show that it covers crop requirements and irrigation timing computed with alternative 2. Adaptation to drought in the dry year ($P_i = 8\%$) representing the present weather consists only of precise irrigation timing due to the fact that Available Soil Water (*ASW*) and precipitation are very efficiently used. In the average demand year of the past weather (1972, $P_i = 50\%$) all three studied irrigation scheduling alternatives produce equal *ID* of 180mm while in the average year of present weather (1982, $P_i = 48\%$) an additional irrigation event could be required with alternative 2. Contrarily to the average 1972, in 1982 available soil water at the end of the season is depleted to the optimum yield threshold (*OYT*).

Keywords: Climate Variability/Change, North Bulgaria, Irrigation Scheduling, Maize, WinISAREG Model, Water Saving, Yield

Поливни режими при миналия и настоящ климат в района на Плевен

Проф. дсн инж. Зорница Попова, Гл. ас. д-р инж. Мария Иванова

*Институт по почвознание, агротехнологии и защита на растенията „Н. Пушкиarov“ (ИПАЗР),
BG – 1080 София, България*

Резюме: Районът на Плевен в Дунавската равнина е засегнат от нарастващата интензивност на колебания и засушаване при настоящия климат. Установените климатични промени през периода “Май-Септември” създават несигурност по отношение на поливните режими и добивите от царевица. За справяне с проблема са осъществени симулации чрез приложение на валидирания модел на поливния режим и въздействието на водния стрес върху добивите WinISAREG за два хибрида царевица, средно-ран Пионер Р37-37 и късен Н708, отглеждани на Излужен Чернозем с висок използваем воден запас на почвата ($TAW=168 \text{ mm m}^{-1}$) в Опитно поле Горни Дъбник при условията на миналия (1951-1984г) и настоящ (1951-2004г) климат. Изследването сравнява няколко варианта на поливен режим: (1) се състои от допълване на почвения резервоар чрез приемане на степен на изчерпване на използваемия воден запас (*MAD*) 0.47 *TAW* и на поливна норма 90 mm, измерени при оптимално напояване с непрекъснати струи по бразди; (2) се състои от допълване на почвения резервоар чрез приемане на *MAD* = 0.31 и поливна норма от 60 mm, адаптирани към технологиите дъждуване и импулсно напояване по бразди с подобрена равномерност на разпределение и редуциране на поливната норма; алтернатива (3) цели по-доброто използване на сезонните валежи чрез частично допълване на почвения резервоар, приемайки *MAD* = 0.47 и 60 mm поливна норма; алтернатива (4) се отнася до възможността за отглеждане на неполивна царевица. Изследваните алтернативи са построени на основата на изследвания, целящи разработването на екологосъобразни практики на напояване, при които се избягва напукване на почвата, неравномерно разпределение на поливната вода и загуби на вода, тор и добив. Съгласно местните

традиции и предишни изследвания (Захариев и др., 1986), последната поливка се планира до 31/07 през средните и средно сухите години и до 10/08 за сухите с обезпеченост на напоителната норма $P_I = 10\%$. При настоящото изследване тези условия са приети в допълнение на възможността за свободно определяне на датите за подаване на поливките с цел пестене на вода и избягване на загуби на добив. Симулациите за условията на миналия климат показват, че когато се цели получаването на максимален добив през сухите години (1965, $P_I = 8\%$) вариантите на поливен режим 1, 2 и 3 водят до различни напоителни норми (**ID**) от 270, 300 и 240 mm. Резултатите, получени за изследвания период при използване на всички необходими ежедневни данни за климата показват, че прилагането на съответните прагове за планиране на поливките и поливните норми водят до напоителни норми, които са също различни (Fig.8a). При вариант 2 нормите **ID** са най-високи и често надвишават нетната напоителна норма (**NIR**). Вариантите 1 и 3, които позволяват по-висока степен на изчерпване на почвения резервоар **MAD**, водят до икономии на вода от 60 до 90 mm в сравнение с вариант 2. Получените резултати са сравнени и с традиционните за района поливни режими, и показват че последните покриват изчислената потребност за напояване, отговаряща на вариант 2. Поради факта, че през сухите години ($P_I = 8\%$) на настоящия климат използваемият воден запас на почвата (**TAW**) и валежите са използват по-ефективно, адаптацията към засушаване се състои само от точно определяне на датите за поливане. През годините със средна необходимост от напояване за миналия климат (1972г, $P_I = 50\%$) трите изследвани варианта на поливен режим водят до равни напоителни норми **ID** = 180mm, докато през средната от настоящия (1982г, $P_I = 48\%$) е необходима допълнителна поливка при вариант 2. Обратно на средната 1972г, през 1982г използваемият воден запас на почвата в края на сезона е изчерпан до прага на оптималния добив (**OYT**).

Ключови думи: Колебания и промени на климата, Северна България, Поливен режим, Царевица, модел WinISAREG, Пестене на вода, Добив.

1. УВОД

При предишни изследвания, основаващи се на анализи на данни за валежите, температурата, еталонната евапотранспирация *ET₀-PM* (Allen et al., 1998), стандартизирания валежен индекс *SPI* (McKee et al., 1993), включително и чрез приложението на модифицираният тест на Ман-Кендъл, са доказани статистически значими тенденции към засушаване на климата, които засягат не само низините на Южна, но и на Северна България (Славов и др. 2003; Александров (ред.), 2011; Gregorič G. (Ed.). 2012; Popova et al., 2014;). Разгледани са периодите 1951-2004г и 1970-2004г, вторият от които е представителен за условията при съвременния климат. Като резултат са характеризирани в национален мащаб колебанията и промените на необходимостта на царевицата от вода за евапотранспирация и напояване през последните 54 години (Попова и колектив, 2013; Popova et al, 2014; 2015; 2016).

За района на Плевен е установено, че през последните 35 години вегетационните валежи „май-септември” намаляват годишно с $- 2.1 \text{ mm yr}^{-1}$, докато сезонната *ET₀-PM* се е увеличила с 2.3 mm yr^{-1} . В резултат, на черноземите със средна

влажност на царевичката са нарастнали със 130 mm. Логично, при неполивната царевичка водният стрес е също нарастнал, а добивите, в сравнение с потенциалните, са намалели с 32%.

Установените промени налагат адаптиране на поливните режими, публикувани от Захариев и кол. (1986), които се основават на данни от полски експерименти и изчисления по формулата на Делибалтов (1972) за периода 1950-1980г. Публикуваните резултати се отнасят за традиционен режим с поливни норми от 60 mm за три различни по влажност години с обезпеченост 10, 25 и 50%.

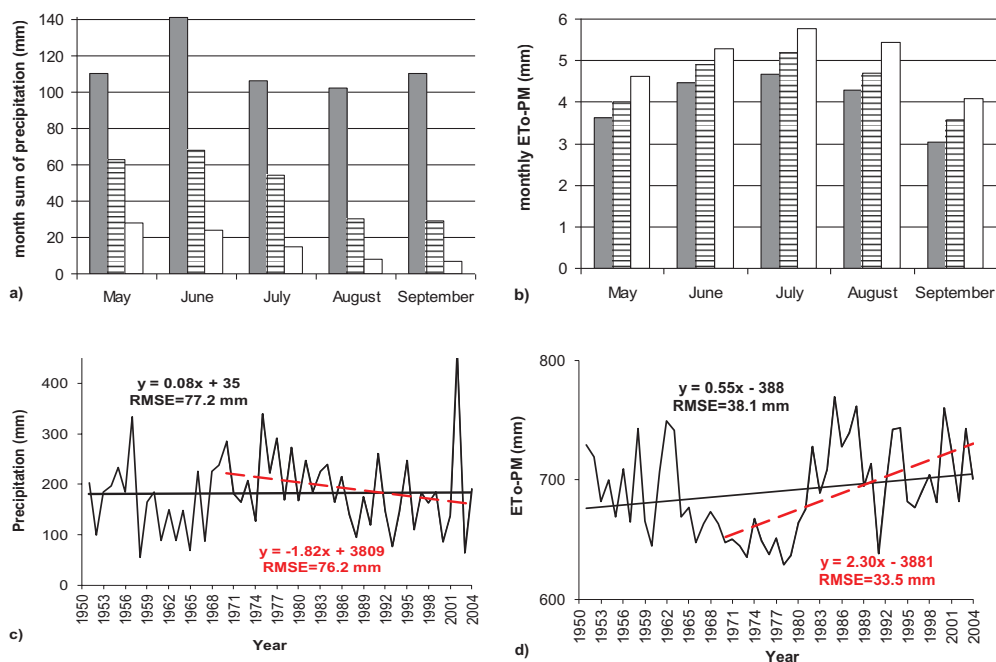
Целта на настоящото изследване е да разработи поливни режими за прецизно напояване на царевичка, отглеждана на Излужен Чернозем ($TAW=168 \text{ mm m}^{-1}$) на ОП Горни Дъбник в района на Плевен и да установи въздействията на колебанията и промените на климата през един по-дълъг период, 1951-2004г, върху режимите, напоителните норми и добивите при късни и средно-ранни хибриди. За целта, след съответна адаптация на параметрите на почвата и културата към местните условия, е приложен валидирания симулационен модел на баланса на водата в почвата, поливните режими и въздействието на водния стрес върху добивите WinISAREG (Pereira et al., 2003).

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

2.1. Характеристики на климата и почвата

Климатът в района на Плевен е умерено континентален. Валежите са високи през пролетта и намаляват през юли и август, когато месечната им сума за средната година (с обезпеченост $P=50\%$) е 55 mm. Вариацията им е съществена през годините, като през влажните сезони ($P=10\%$) сумата за юли достига 120 mm, а през сухите ($P=90\%$) е едва 15 mm (Попова (ред.) 2012) (фиг.1a). За разлика от валежите, еталонната евапотранспирация изчислена по уравнението на Penman-Monteith ET_0-PM (Allen et al., 1998), е значително по-стабилна през годините (фиг.2b). Установените средномногогодишни месечни стойности за ET_0-PM следват сезонен ход на изменение, аналогичен на съответните за Пловдив, като достигат максимум от 5.2 и 4.8 mm d⁻¹ през месеците юли и август, когато вариацията на валежите е максимална (Попова (Ред) 2012; Popova et al., 2014).

При условията на настоящия климат (1970-2005г) е установено, че вегетационните валежи „май-септември“ намаляват годишно с около 2,1 mm yr⁻¹ от които 1,8 mm yr⁻¹ (63 mm за 35г) се дължат основно на промени на климата през периода на усилено развитие и формиране на добива при царевичката „юни-август“ (фиг.1c), когато сезонната ET_0 се е увеличила с 2,3 mm yr⁻¹ (Фиг. 1d).



Фиг. 1. Месечни суми на валежите mm (a) и стойности на еталонната евапотранспирация mm day⁻¹ (b) за средна (P=50%), влажна (P=10%) и суха (P=90%) година; Колебания на валежните суми “Юни-Август” (c) и на сезонната еталонна евапотранспирация ETo “Май-Септ” (d) (—); тенденции за периодите 1951-2004 (—) и 1970-2004 (— —), Плевен.

Fig. 1. Average monthly precipitation (a) and reference evapotranspiration ETo-PM (b) for the average (P=50%), wet (P=10%) and dry (P=90%) seasons; Variation of: Precipitation totals for peak demand period “June-August” (mm) (c) and Seasonal ETo-PM “May-September” (mm) (d), (—); trends for 1951-2004 (—) and 1970-2004(— —), Plevna.

Почвата в опитното поле Горни Дъбник е Излужен Чернозем, тежко песъкливо-глинест по механичен състав във всички генетични хоризонти (Таблица 1, Стоянов, 2008). Диференциацията на профила е слаба. Данните за водно-физичните свойства, отразени в същата таблица показват, че обемната плътност на почвата при ППВ има най-ниски стойности в обработваемата част на профила, като в останалите генетични хоризонти стойностите варират слабо между 1,43 и 1,47g/cm³. Стойностите на пределната полска влагоемкост (ППВ) и влажността на завяхване (BЗ), изразени като част от обема на порите заети с вода, нарастват от хоризонт А към хоризонт В заедно с нарастването на съдържанието на физическа глина. Общите запаси от продуктивна вода за горните 100 cm почва са 168 mm m⁻¹, а само в орния хоризонт те са 50 mm m⁻¹ (Стоянов, 2008). Излуженият Чернозем

има голяма възможност да набъбва и се свива при изсушаване (Бонева, 2012). С оглед избягване на дълбоката филтрация следва напояването да се осъществява над границата на напукването на тези почви при предполивна влажност около/ над 78-80% ППВ.

Таблица 1. Механичен състав и водно-физични свойства на Излужен Чернозем, ОП Горни Дъбник

Table 1. Main soil physical and hydraulic properties of a Degraded Chernozem soil at Gorni Dubnik experimental site.

Дълбочина	Об. плътност	Почвени частици с размери, mm			Почвени частици с размери, mm		Съдържание на вода в почвата	
Depth,	Bulk density	Particle size distribution,%			Particle size distribution,%		Soil water,cm ³ cm ⁻³	
		(FAO, 1990)			(Качински, 1958)			
Cm	g cm ⁻³	Глина Clay	Прах Silt	Пясък Sand	Физ. Глина	Ил	ППВ Field capacity	ВЗ Wilting point
		<0.002mm	0.002-0.05mm	0.05-2.00mm	<0.01mm	<0.001mm	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³
0-10	1,26	37	49.2	13.8	50.3	32.4	37.8	20.29
10-20	1,26	37	49.2	13.8	50.3	32.4	37.8	20.29
20-30	1,31	37	49.2	13.8	50.3	32.4	38.78	20.44
30-40	1,43	43	43.4	13.6	54.9	37.5	40.33	22.02
40-60	1,45	43	43.4	13.6	54.9	37.5	37.41	22.19
60-80	1,47	37	44.5	18.5	51.2	35.2	38.22	22.64
80-100	1,45	38	49	13	41.1	27.2	37.85	21.32

2.2. Параметри на културата и симулационен модел

WinISAREG (Pereira et al., 2003) е симулационен модел на поливния режим и баланса на водата в почвата. Моделът приема обновената методология за изчисляване на нуждите от вода за евапотранспирация и напояване на културата, предложена от Allen et al.(1998). Две помощни програми изчисляват еталонната евапотранспирация, *ET₀-PM*, включително при използването на алтернативни методи, когато някои данни за променливите на климата липсват, а друга подпомага определяне на параметрите на културата. Входни данни за климата са валежите и еталонната евапотранспирация (*ET₀*).

Данните за почвата се отнасят за многослоен профил, като за всеки слой са включени стойността на ППВ и ВЗ, от които е изчислен използвания воден запас *TAW* (Таблица 1). Параметрите за основните фази на развитието на културата

и съответните дати на настъпването им, като коефициенти на културата (K_c) и оптимална степен на изчерпване на водния запас без предизвикване на воден стрес (p) са дадени в Таблица 2. Параметрите са определени на основата на наши предишни изследвания и резултати от полски експерименти с различни варианти на напояване (Върлев 2008, Popova and Pereira, 2011; Попова 2008, Попова (ред.) 2012; Varlev et al., 1994) след съответна адаптация към почвените и климатичните условия в ОП Горни Дъбник. Максималната дълбочина на коренообитаемата зона е 1.30 m.

Таблица 2. Дати на настъпване на фазите на развитие на културата и параметри на моделиране: коефициенти на културата K_c и степен на изчерпване на водата без предизвикване на стрес p , Излужен Чернозем, ОП Горни Дъбник.

Table 2. Dates of occurrence of the phases of development of the culture and model parameters: culture coefficients K_c and extent of depletion of the water without causing stress p , Degraded Chernozem soil, Gorni Dubnik experimental site.

Фази на развитие Growth phases	Дати Dates	K_c	p
Начална Initial Period	30/04 to 19/05	0.3	0.45-0,75
Ускорено развитие Mid-season period	10/07 to 26/07	1.26	0.60
Пълна зрелост End-season period	30/09 (harvest)	0.23	0.78

Реалната евапотранспирация на културата ET_a е изчислена от потенциалната ET_{max} в зависимост от съдържанието на достъпна вода в почвата. Евапотранспирацията ET_{max} е изчислена чрез подхода на коефициента на културата K_c ($ET_{max} = K_c ET_o$) (Doorenbos and Pruitt, 1977).

Въздействието на водния стрес върху добива се определя чрез еднофазовия модел на Stewart ($1 - Y_a/Y_{max} = K_y(1 - ET_a/ET_{max})$), когато факторът на добива K_y е известен (Doorenbos and Kassam, 1979). При неполивна царевица са разгледани два хибрида с различна чувствителност към воден стрес: единият е средно ранен (*Пионер P37-37*) с фактор на добива $K_y = 1.2$ (Popova et al., 2011), а другият е късен (*H708*) с $K_y = 1.6$ (Попова (ред.), 2012). За целта са използвани данни от дългосрочни полски експерименти (Рафаилов, Живков и др. във Върлев, 2008) и средномесечни данни за променливите на климата. При наличие на всички необходими ежедневни данни за метеорологичните елементи на климата и на основата на независими данни от експерименти с различни варианти на напояване на царевица е установен фактор $K_y = 1.05$ за сухо устойчивия хибрид царевица *Kn-2L-611* и $K_y = 1.5$ за чувствителния на воден стрес хибрид *H708* (Popova, Eneva, Pereira, 2006; Върлев, 2008; Попова, 2008). При поливните режими с умерен воден стрес е установен фактор $K_y = 1.32$ (Popova and Pereira, 2011).

Моделът WinISAREG е приложен за разработване на поливни режими при Излужен Чернозем и за оценка на напоителните норми и загубите на добив от воден дефицит при хибриди царевица с различна устойчивост на воден стрес.

Симулациите с модела са осъществени при приет на праг на изчерпване на използваемия воден запас MAD и поливни норми, установени при експерименти с напояване по бразди с постоянни и импулсно подавани струи или чрез стационарната система за дъждуване (Popova and Kuncheva, 1996; Popova et al, 1994; 1998; Varlev et al, 1998). Изследваните варианти на поливен режим включват:

* **Режим 1** приема степен на изчерпване на водата в почвата $MAD = 0.47$, т.е. до 79% от $ППВ$, поливната норма е 90 mm, измерена при полски експерименти с напояване по бразди при непрекъснато подавани струи (фиг. 5a);

* **Режим 2** се отнася за случая на допълване на почвения резервоар до $ППВ$, приемайки предполивна влажност 86% от $ППВ$, отговаряща на $MAD = 0.31$, поливни норми от 60 mm, адаптирани към резултати от импулсно напояване по бразди, целящо подобряване на равномерността на разпределение и намаление на попитата норма (фиг. 5b);

* **Режим 3** цели по-добро задържане и използване на валежите и поливната вода при стационарна система за дъждуване. Той се състои от допълване на почвения резервоар до 84 % от $ТАВ$, приемайки $MAD = 0.47$ и поливни норми от 60 mm. Около 30 mm от почвения резервоар остават незапълнени с цел акумулиране на евентуални валежи след подаването на поливките (фиг. 5c);

* **Режим 4** се отнася за култура без напояване.

Според поливната практика в района на Плевен и предишни изследвания на Захариев и кол. (1986) последната поливка не се допуска след 1/08 през средно-сухата (обезпеченост на напоителната норма $P_I = 25\%$) и средна ($P_I = 50\%$) години, докато през сухата ($P_I = 10\%$) този срок е удължен до 11/08. Това условие е спазено при всички режими, като определянето на датата на поливка в някои случаи е осъществено и при условието да не се допускат загуби на добив или подаване на ненужни поливки.

При симулациите е използван пълен набор от необходимите ежедневни данни, а именно за температури на въздуха T_{max} и T_{min} , среднодневни стойности за относителна влажност на въздуха и скорост на вятъра, продължителност на слънчевото греене и валежи за периода 1961-1984г (Агрометеорологични годишници 1952-1984). Като втори вариант са използвани хомогенизирани редици от средно месечни стойности за максималните и минимални температури на въздуха T_{max} и T_{min} и месечните суми на валежите за периода 1951-2004г. В този случай на ограничени данни, еталонната евапотранспирация ET_0-PM е изчислена по препоръчаните от ФАО процедури след съответната им валидацията за Умерено-континенталния климат (Popova, Kercheva, Pereira, 2006; Попова, 2008; Иванова и Попова 2012).

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИИ

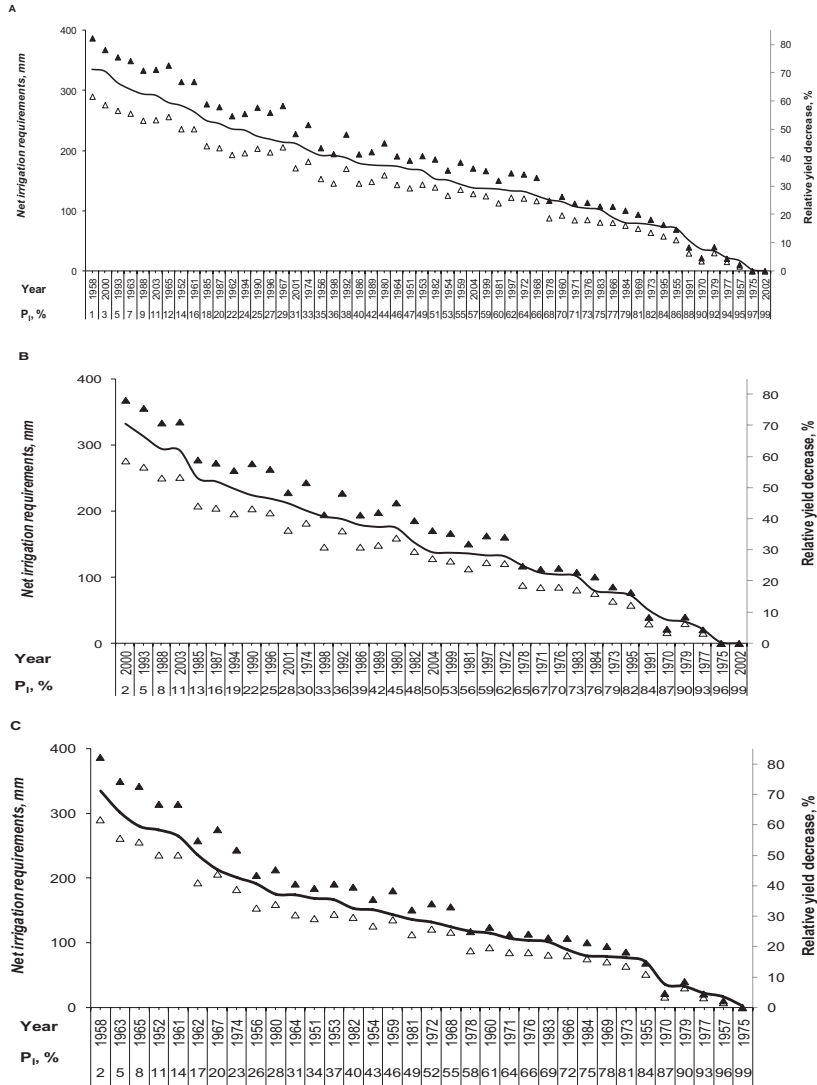
3.1. Добиви и необходимост от напояване при променящия се климат

На фиг. 2 са представени кривите на обезпеченост на нетната напоителна норма (mm) и съответните относителни загуби на добив от неполивна царевица (%) късни и средно ранни хибриди, изчислени за три периода. За целта е използвана редицата от средно месечните стойности на еталонната евапотранспирация *ЕТо-РМ* и месечните суми на валежите, както и калибрираните параметри на моделиране за почвата и културата (Таблицы 1 и 2). Фиг. 2А се отнася за целия разглеждан период 1951-2004г, фиг. 2В за периода 1970-2004г, а фиг. 2С за периода 1951-1984г. През периода на настоящия климат 1970-2004г най-сухи са 2000г (с обезпеченост $P_I=2\%$), 1993г ($P_I=5\%$), 1998г ($P_I=8\%$) и 2003г ($P_I=11\%$). Средно суха е 1974г с обезпеченост на напоителната норма $P_I=30\%$, а 1982г е средна ($P_I=48\%$) (фиг. 2В).

От фиг. 2А и 2В се вижда, че изредените по-горе сухи години ($P_I<11\%$) са практически с идентична обезпеченост и размер на необходимата напоителна норма *NIR* през периодите 1951-2004г и 1970-2004г. Това се отнася и за средно сухата 1974, средната 1982, средно влажната 1984 и влажната 1975 години. Следователно резултатите за двата периода 1970-2004г и 1951-2004г по отношение на необходимите напоителни норми и загубите на добив от воден стрес при неполивната царевица са практически идентични.

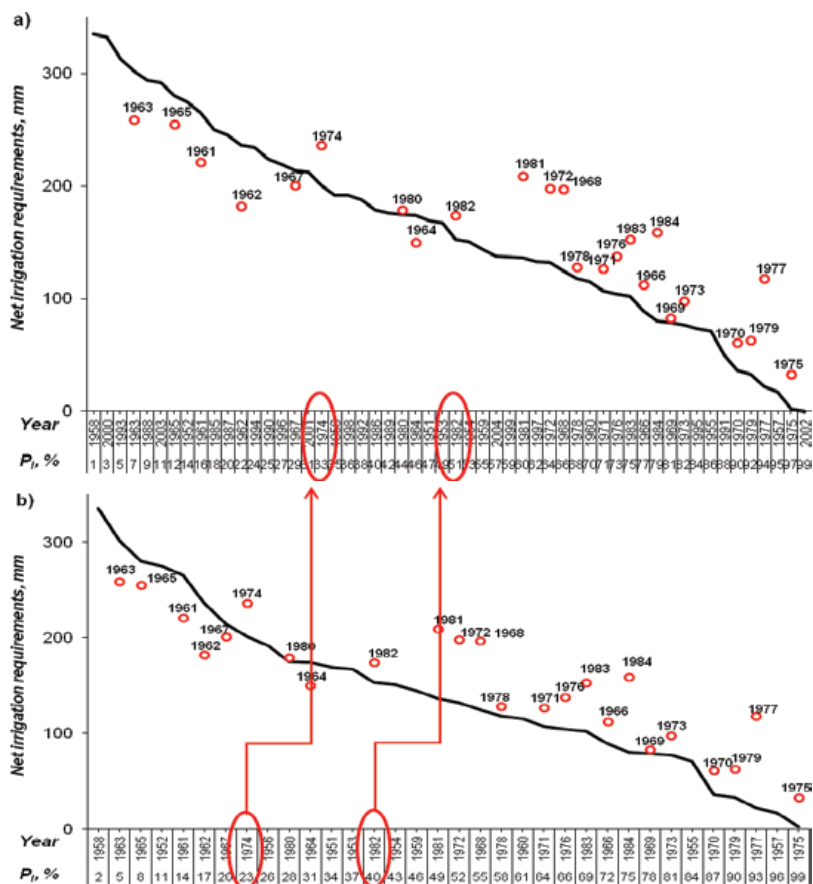
При условията на миналия климат 1951-1984г обаче се вижда, че вероятността P_I на случване на дадена нетна напоителна норма *NIR* намалява от 51 на 40% за средната 1982г, от 33 на 23% за средно-сυχата 1974г и от 12 на 8% за сухата 1965г (фиг.2А, 2С).

Следователно, в резултат на настъпилите климатични промени през последните 35 години, загубите на добив от неполивна царевица и нетните нужди от напояване за справяне с тези щети са се увеличили най-вече през средните и средно-сυχите години (фиг. 2В и 2С).



Фиг. 2 Криви на обезпеченост на нетната напоителна норма, *NIR*, mm, (—) и относителното намаление на добива при неполивна царевича, *RYD*, %, изчислени за средно ранни P37-37 (Δ), *Ky* = 1.2, и късни H708 (▲), *Ky* = 1.6, хибриди при използване на средно месечните стойности на температурите на въздуха *Tmax*, *Tmin* и месечните суми на валежите за три периода: а) 1951-2004г; б) 1970-2004г; в) 1951-1984г.

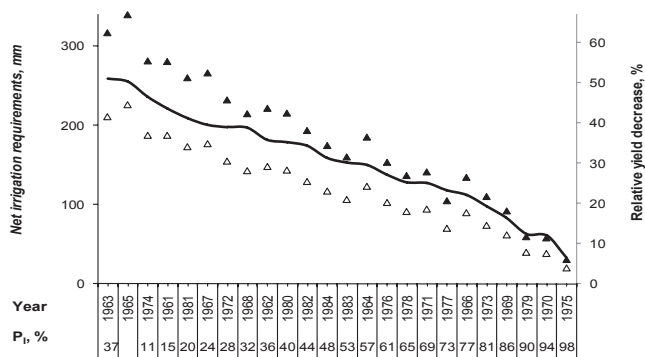
Fig. 2 Probability curves of occurrence of a Net Irrigation Requirements, *NIR*, mm, (—) and Relative Yield Decrease of rainfed maize, *RYD*, %, comparing the semi-early P37-37 (Δ), *Ky*=1.2, and late H708 (▲), *Ky*=1.6, hybrids relative to three periods: а) 1951-2004; б) 1970-2004; в) 1951-1984; Simulations when monthly temperatures *Tmax*, *Tmin* and precipitation data are used.



Фиг. 3 Сравняване на нетната напоителна норма NIR , mm, изчислена със *средно месечни* ограничени данни за климата (плътна черна линия) и с *пълна база* от *ежедневни* данни за метеорологичните елементи (○) за: **a)** *настоящия* (1951-2004г) и **b)** *миналия* (1951-1984г) климат

Fig. 3 Comparing probability curves of occurrence of a NIR , mm, when computed with *monthly T_{max} , T_{min} temperature and Precipitation data* (solid line) and *complete daily climate data* (symbols) relative to: **a)** *present 1951-2004/1970-2004* and **b)** *past 1951-1984* weather conditions.

Към резултатите, получени на основата на ограничени средно-месечни данни за елементите на климата, на Фиг. 3 са добавени със символ (○) и резултатите от симулациите за нетната напоителна норма при използване на пълна ежедневна информация за периода 1961-1984 г. Посочените със символ резултати отчитат по-точно нетната необходимост от напояване, най-вече през средните и влажни години, от резултатите дадени с плътна линия, за получаването на която са били на лице месечни стойности на валежите и температурите на въздуха T_{max} и T_{min} .



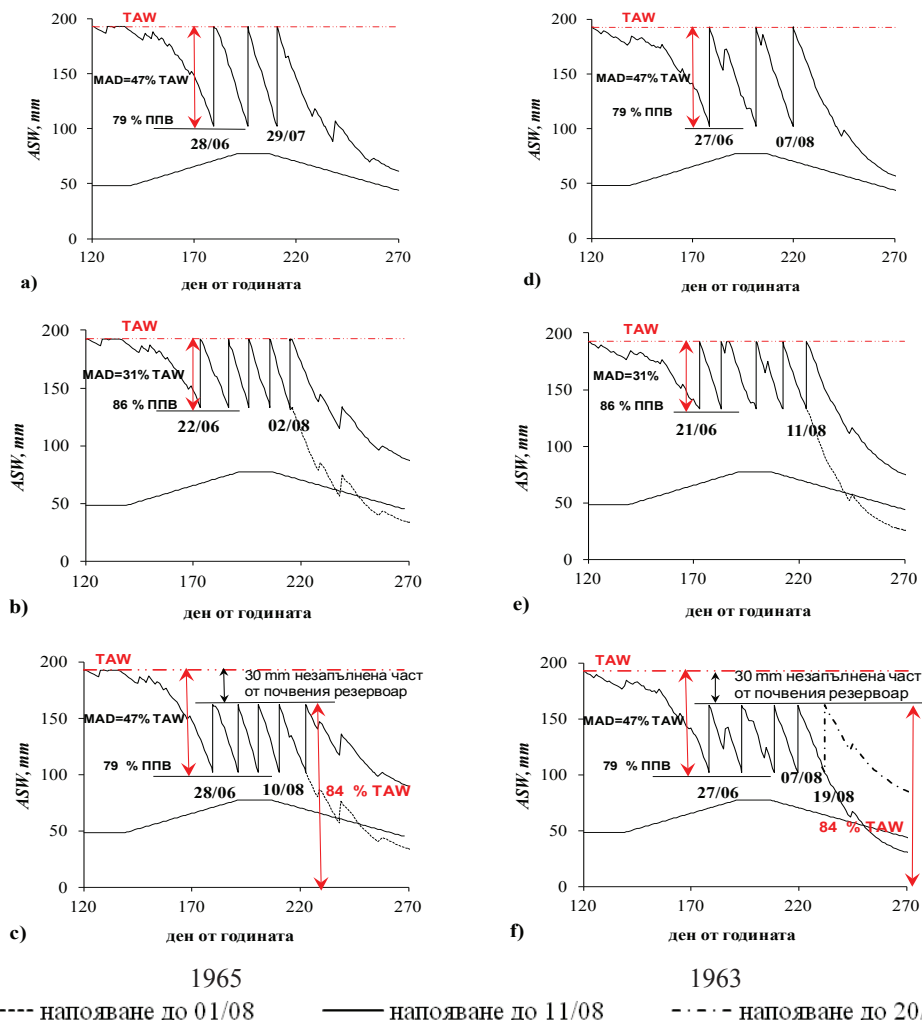
Фиг. 4. Крива на обезпеченост на нетната напоителна норма NIR , mm, и съответни загуби на добив от неполивна царевица RYD , %, за хибриди с различна устойчивост към засушаване: сухоустойчив $Kn-2L-611(\Delta)$, $Ky=1.0$, и късни $H708(\blacktriangle)$, $Ky=1.5$, изчислени с всички необходими ежедневни данни за 24 поредни години.

Fig. 4. Probability curve of occurrence for a net irrigation requirements NIR , mm, versus relative yield decrease RYD , %, of rainfed maize comparing a drought resistant $Kn-2L-611(\Delta)$, $Ky=1.0$, and a late $H708(\blacktriangle)$, $Ky=1.5$, maize hybrids, computed with all required daily climate data for each year of a 24-year period.

От фиг. 3 следва, че резултатите изчислени на основата на всички необходими данни за поредните 24 години (○) покриват диапазона на колебанията и измененията, не само на настоящия (фиг. 3а), но и на миналия (фиг. 3б) климат. Следователно година с дадена нетна необходимост от напояване за района на Плевен има различна обезпеченост P_i през периодите 1951-2004г и 1951-1984г: например P_i на напоителна норма с размер $NIR \geq 174$ mm за средната 1982г нараства от 40 на 51%, докато P_i за нормата $NIR \geq 236$ mm за средно-сухата 1974г се променя от 23 на 33%. Настоящите изменения на климата обхващат годините с обезпеченост на напоителната норма в диапазон $20 < P_i < 75\%$.

3.2. Поливни режими при миналия и настоящ климат

На фиг. 4 са представени резултатите от симулациите за нетните нужди от напояване NIR и съответните относителни загуби на добив от неполивна царевица RYD , изчислени за 24 поредни години, за които е налице пълен набор от необходимите ежедневни данни за метеорологичните елементи на климата. Вижда се, че нетните норми NIR се колебаят от 50 mm през най-влажната 1975г ($P_i = 98\%$) до 110-180 mm през средните сезони ($40 < P_i < 75\%$) и достигат 260 mm през най-сухите 1963 и 1965г ($P_i < 5\%$).



Фиг. 5. Наличен ползваем воден запас ASW^* при три поливни режима за **сухите 1965 и 1963** ($P_i=8\%$) от периодите **1951-1984г и 1951-2004г**: **а) и d)** режим 1; **б) и е)** режим 2; и **с) и f)** режим 3; Хоризонталната пунктирна линия отговаря на водния запас в коренообитаемата зона при **ППБ** (TAW , mm), а най-ниската начупена линия е оптимална граница на изчерпване без воден стрес (OYT^{**}).

Fig. 5. Available soil water (ASW , mm) for the three irrigation scheduling alternatives in the very high irrigation demand **1965 and 1963** ($P_i=8\%$) relative to past (**1951-1984**) and present (**1951-2004/1970-2004**) weather: **a) and d)** alternative 1; **b) and e)** alternative 2; and **c) and f)** alternative 3, with identification of the date of the first and last irrigation; The horizontal dashed line, above, corresponds to **TAW** and the broken line, below, to the non-stress threshold.

* ASW = Available soil water in the root zone, mm

** OYT = optimum yield threshold, $OYT = p \times TAW$, оптимална граница на изчерпване

При по-чувствителния на воден стрес късен хибрид царевица *H708*, отглеждан без напояване през същия период, относителните загуби на добив от воден стрес са незначителни (6%) през най-влажната 1975г, нарастват от 25 до 42% през средните години ($40 < P_f < 75\%$) и достигат 62-67% през най-сухите 1965 и 1963г. При устойчивия на засушаване хибрид *Kn-2L-611* въздействието на водния стрес върху добивите е смекчено, като през средните години загубите са в граници 14-28%, а през най-сухите те не надвишават 40-45%.

На фиг. 5a, 5b, 5c са сравнени измененията на наличния използваем воден запас ASW^1 при поливните режими 1, 2 и 3 през *сухата 1965г* за периода на миналия климат 1951-1984г ($P_f=8\%$, фиг. 2c). От резултатите на фиг.5a следва, че при напояване до 11.08. (непрекъсната линия) при режим 1 са подадени три поливки. Водният запас на почвата в края на сезона ASW_{end} е над оптималната граница на изчерпване, когато поливките са пет при режимите 2 (фиг. 5b) и 3 (фиг. 5c). По-ранното прекратяване на поливния сезон - преди 1/08 (пунктирна линия) води до спадане на влагозапаса ASW_{end} под оптималната граница и намаляването на броя на поливките с една при режимите 2 и 3. В резултат относителното намаление на добивите, 1%, е несъществено (Таблица 3, в края на статията). Резултатите от симулациите на режим 2 (фиг. 5b) съвпадат с утвърдените в практиката напоителна норма и препоръчани срокове за подаване на поливките на Захариев и кол.(1986).

Адаптацията на режимите през сухите години към условията на настоящия климат изисква удължаването на поливния сезон с една десетдневка (фиг. 5d, 5e, 5f). Това се дължи на факта, че през сухата 1963г от настоящия климат ефективността на използване на вегетационните валежи нараства до 100% при режимите 1 и 3, при които необходимите напоителни норми, в сравнение с режим 2, са по-ниски съответно с 30 и 60 mm (Таблица 3).

През средно-сухата 1974г за периода 1951-1984г ($P_f=23\%$, фиг. 2c) добивът е максимален и при трите разглеждани режима при краен срок за напояване 11/08 (фиг. 6a, 6b, 6c). При режим 2 (фиг. 6b) са необходими 4 поливки, като първата е през последната десетдневка на юни и следващите 3 са равномерно разпределени през юли, т.е. резултатите отново практически съвпадат със съответните публикувани от Захариев и др. (1986). При режимите 1 и 3 (фиг. 6a, 6c), поради по-високата степен на изчерпване на използваемия воден запас на почвата, напояването започва и приключва по-късно.

През средно-сухата за настоящия климат 1962 г., поради акумулирането на валеж от 60 mm през втората половина на юли (таблица 3 и фиг. 6d, 6f), режимите 1 и 3 са водоспестяващи по отношение на традиционния режим 2, при който датите на подаване на поливките и необходимата напоителна норма за разглежданата година (фиг. 6e) отговарят на установените от Захариев и колектив (1986).

През средната за условията на миналия климат 1972г ($P_f=50\%$, фиг. 2c) поливният сезон приключва преди 1/08 при пълно задоволяване на сезонните нужди на растението от поливна вода (180 mm) и при трите режима и остатъчен воден запас в почвата $ASW_{end} = 192-193$ mm (фиг. 7a, 7b, 7c), който надвишава два

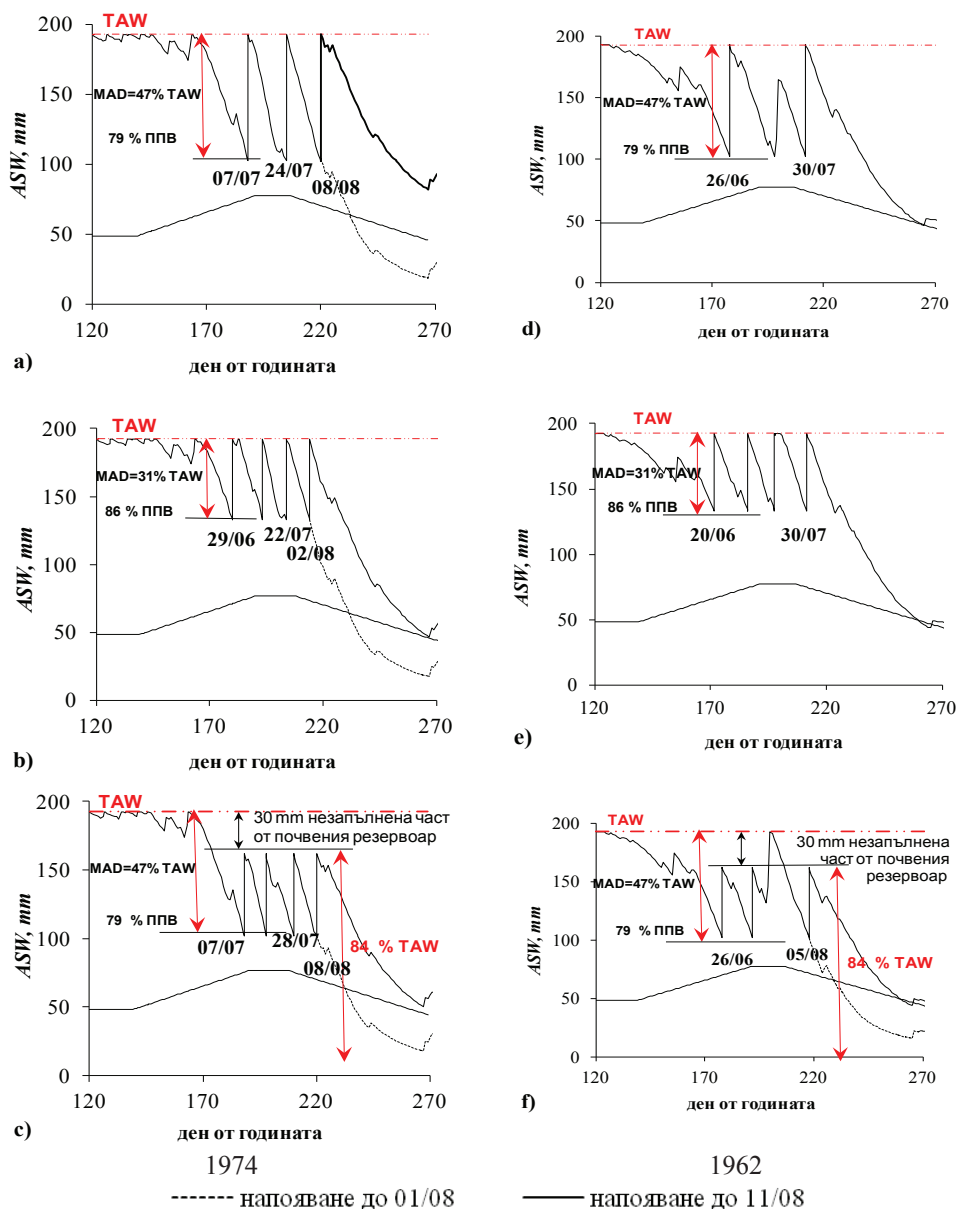
пъти установеният през средната 1982г за условията на настоящия климат (фиг. 7d, 7e, 7f; Таблица 3).

От фиг. 7 се вижда, че независимо от настъпилите промени на климата през периода 1951-2004г, необходимите напоителни норми, броят на поливките и датите на подаването им за получаването на максимален добив при разглежданите режими е практически идентичен през средните 1972 и 1982г. Това се дължи на факта, че през средната 1982г от настоящия климат използваемият воден запас в края на вегетационния период ASW_{end} е изразходван до границата на оптималния добив (фиг. 7d, 7e, 7f). През 1982г и спазване на традиционната дата за преустановяване на напояването 1/08 (Захариев и кол.1986), при режим 2 е подадена и четвърта поливка на 20/07, която е излишна.

На фиг. 8а са сравнени напоителните норми (ID_s) при трите разглеждани поливни режима за царевица, изчислени за 24 поредни години от периода на миналия климат, със съответните публикувани норми и поливни режими за условията на Излужен Чернозем, Кнежа (Захариев и кол., 1986). От фигурата се вижда, че когато поливният сезон приключва до 01/08, необходимите напоителни норми при режими 1, 2 и 3 са около нетните през средно-сухите, средни и влажни години ($P_f > 11\%$). През останалите по-сухи години с обезпеченост $P_f < 10\%$, през които последната поливка е планирана до 11/08, резултатите от симулациите водят до различни напоителни норми при изследваните режими – 270, 240 и 300 mm.

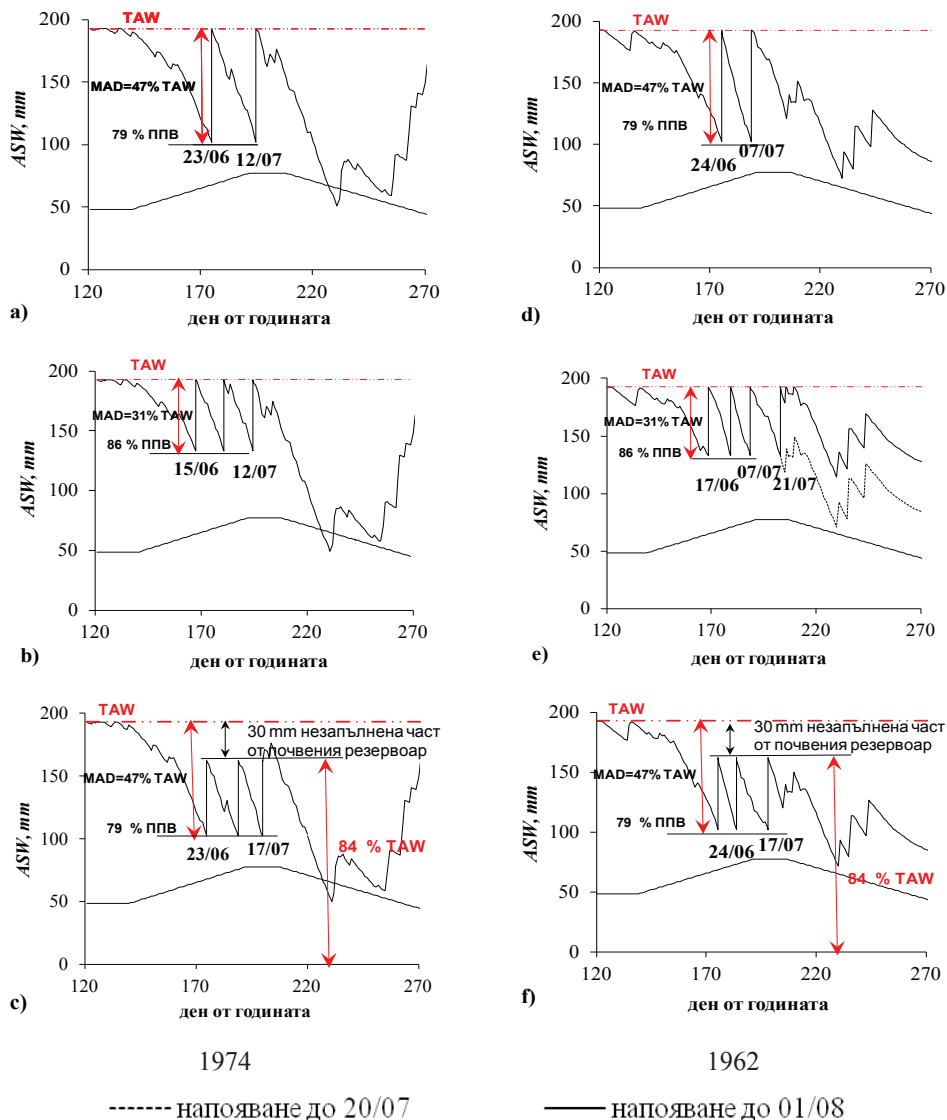
Резултатите за целия период при използване на всички необходими ежедневни данни за метеорологичните елементи на климата показват, че различните прагове на изчерпване на водния запас TAW и съответните поливни норми също водят до различни напоителни норми. При режим 2 нормите са най-високи и надвишават нетната необходимост на растенията от вода NIR . При режимите 1 и 3 с по-голяма степен на изчерпване MAD вегетационните валежи се използват по-ефективно, а напоителните норми са с 60 mm по-ниски през сухите, средно сухите и средни години ($P_f < 45\%$). През останалите средни и влажни години ($P_f > 55\%$) водоспестяващият ефект на режим 3, при който почвеният резервоар се запълва частично, се запазва на 60 mm, докато при режим 1 той е 30 mm или в някои случаи 90 mm. От фигурата се вижда, че резултатите от симулациите на режим 2 при условията на миналия климат съвпадат с утвърдените в практиката напоителна норма и срокове за подаване на поливките за годините с обезпеченост 10, 25 и 50% на Захариев и колектив (1986г).

На фиг. 8б са сравнени относителните загуби на добив (RYD), изчислени с фактор на добива $K_y = 1.32$ при прилагане на разглежданите поливни режими и срокове за преустановяване на напояването. Загубите на добив от воден дефицит са най-високи при поливен режим 3, при който средномногогодишните относителни загуби са 2.8% от потенциалния добив при максимум от $RYD = 10.4\%$ за 1971г, и най-ниски при режим 2 със средни загуби от 0.6% и максимална стойност от $RYD = 5.2\%$ за 1961г. При режим 1 средните загуби са 1.6% при максимум от $RYD = 9.9\%$ за 1978г.



Фиг. 6. Наличен ползваем воден запас ASW при три поливни режима за средно сухите 1974 и 1962г ($P_f=22$ и 23%) от периодите 1951-1984г и 1951-2004 (1970-2004г): Другите означения са като фиг. 5.

Fig. 6. Available soil water (ASW , mm) for the three irrigation scheduling alternatives in the high irrigation demand 1974 and 1962 ($P_f=22$ and 23%) relative to periods 1951-1984 and 1951-2004/ 1970-2004 : The rest is the same as in Fig. 5.



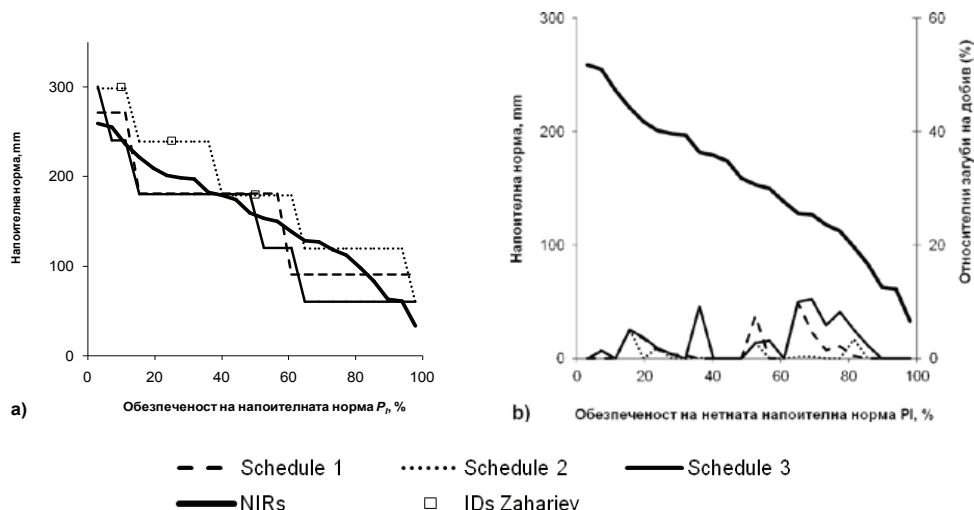
Фиг. 7. ASW, mm при три поливни режима за средните 1972 ($P_I=50\%$) и 1982 ($P_I=48\%$) за периодите 1951-1984г и 1951-2004г: Другите означения са като фиг. 5.

Fig. 7. ASW mm for the three irrigation scheduling alternatives in the average irrigation demand 1972 and 1982 relative to periods 1951-1984 and 1951-2004: The rest is the same as in Fig. 5.

Таблица 3. Резултати за баланса на водата в почвата и относителните загуби на добив, **RYD**, %, при поливните режими 1, 2 и 3 и за варианта без напояване (4) за средна, средно-суха и суха година от периодите **1951-1984*** и **1951-2004г** (1970-2004г.). Напояване до **01/08** за **средните** и **11/08** за **сухите** години.

Table 3 Summary water balance and relative yield decrease **RYD**, results of irrigation scheduling alternatives 1, 2, 3 and rainfed alternative 4 for the average, high and very high irrigation demand year, **1951-1984*** и **1951-2004**. Last allowed irrigation date **01/08** for the average demand and **11/08** for the high demand years.

Климат /Climate conditions	Средна година/Average irrigation demand				Средно суха година/High irrigation demand				Суха година/Very high irrigation demand			
	Минал климат Past climate	Настоящ климат Present climate	Минал климат Past climate	Настоящ климат Present climate	Минал климат Past climate	Настоящ климат Present climate	Минал климат Past climate	Настоящ климат Present climate	Минал климат Past climate	Настоящ климат Present climate	Минал климат Past climate	Настоящ климат Present climate
Година /Year	1951-1984	1951-2004 (1970-2004)	1951-1984	1951-2004 (1970-2004)	1951-1984	1951-2004 (1970-2004)	1951-1984	1951-2004 (1970-2004)	1951-1984	1951-2004 (1970-2004)	1951-1984	1951-2004 (1970-2004)
	Напояване до 01/08				Напояване до 11/08				Напояване до 11/08			
	1972*	1982	1972*	1982	1974*	1962	1974*	1962	1965*	1963	1965*	1963
P _p % 1951-2004 (1970-2004)	64 %	51 %	64 %	51 %	33 %	22 %	33 %	22 %	12 %	7 %	12 %	7 %
P _p % 1951-1984*	52 %	40 %	52 %	40 %	23 %	17 %	23 %	17 %	8 %	5 %	8 %	5 %
Валежи май-септ./ Precipitation May-Sep, mm	366	293	366	293	220	200	220	200	157	136	157	136
Валежи юли-авг. /Precipitation Jul-Aug, mm	139	195	139	195	104	130	104	130	44	62	44	62
Нетни напоителни норми /Net irrigation requirements, mm	198	174	198	174	236	182	236	182	255	259	255	259
Поливни режими /Irrigation alternatives	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Напоителни норми /Irrigation depths, mm	180	180	180	180	270	240	240	240	270	300	270	300
Брой на поливките /Number of irrigation events	2	3	3	0	3	4	4	0	3	5	4	0
Евапотранспирация на културата /Crop evapotransp (E _{Ta}), mm	522	521	522	540	538	538	538	538	511	511	511	511
Неизползвани валежи /Non-used precipitation, mm	25	24	24	36	54	57	54	54	55	56	55	55
Остатъчни водни запаси /ASW at harvest, mm	193	192	193	84	92	56	60	19	59	85	63	81
Относително намаляване на добива /RYD, % when K _y =1.32	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Относително намаляване на добива /RYD, % when K _y =1.2			37				44				54	
Относително намаляване на добива /RYD, % when K _y =1.6			49				59				71	



Фиг. 8. Напоителни норми, IDs , mm, (a) и относителни загуби на добив RYD , %, ($K_y = 1.32$) (b) при поливните режими 1, 2 и 3 в зависимост от обезпечеността на нетната напоителна норма P_r изчислени за 24 поредни години с всички необходими ежедневни данни за климата.

Fig 8. Irrigation Demands, IDs , mm, (a) and relative yield decrease, RYD ,%, (b) relative to irrigation scheduling alternatives 1,2 and 3 computed for each year of 24-year period using *all required climate data on a daily basis and sorted in relation to the probability curve of NIR.*

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на резултатите от изследването върху поливните режими на царевица, отглеждана на излужен Чернозем ($TAW=168 \text{ mm m}^{-1}$) в района на Плевен през периода 1951-2004г показва, че:

(1) При условията на миналия климат 1951-1984г нетните нужди от поливна вода NIR , mm, се изменят от 0-10 mm през екстремно влажните ($P_I > 95\%$) до 110 - 180 mm през средните ($40 < P_I < 75\%$) и достигат 260 mm през сухите години ($P_I < 5\%$). Промените през периода 1970-2004 засягат основно средно сухите и средни години ($20 < P_I < 75\%$), когато NIR , mm, нараства с 10–30 mm;

(2) Резултатите от симулациите на режим 2 за условията на миналия климат съвпадат с утвърдените в практиката напоителна норма и препоръчани срокове за подаване на поливките на Захариев и кол.(1986). Адаптацията на режимите към настоящия климат изисква удължаване на поливния сезон с една десетдневка през сухите години.

(3) През сухите и средно-сухи години от настоящия климат ефективността на използване на вегетационните валежи нараства до 100% при режимите 1 и 3, при които необходимите напоителни норми, в сравнение с режим 2, са пониски съответно с 30 и 60 mm. Водоспестяващият ефект на режим 3, при който почвеният резервоар се запълва частично, се запазва на 60 mm през **средните и средно-влажни години**, докато при режим 1 се пестят 30 mm или 90 mm;

(4) През средните години ($P_i=50\%$) напояването до утвърдения в практиката срок 1/08 води до идентични напоителните норми (от 180 mm) при разглежданите режими в резултат на изчерпване на влагозапасите на почвата в края на сезона до границата на оптималния добив. В този случай, мерките на адаптация към климатичните промени се свеждат само до точното избиране на датите за поливане или отглеждането на сухоустойчиви хибриди, при които загубите на добив при неполивни условия е в граници от 15 до 20% от потенциалния добив.

(5) Относителното намаление на добива без напояване при чувствителните на воден стрес късни хибриди царевица, *H708*, е до 10% през влажните години, нараства до 40% през средните и достига 80% през най-сухата година. При устойчивите на засушаване Кн-2Л-611 и средно ранните хибриди, *Пионер (P37-37)*, въздействието на водния стрес е смекчено, като през средните години загубите са 20-30%, а през най-сухата те не надвишават 50% от потенциалния добив.

5. ЛИТЕРАТУРА

- Александров В. (ред). 2011. Методи за мониторинг, оценка и въздействие на сушата в България. София, стр. 216
- Агromетeорoлoгични гoдишници. 1952-1984. Хидрoмeтeорoлoгичнa службa, Сoфия
- Бонeвa, К., 2012. Изслeдвaнe нa oснoвнитe хaрaктeристикитe нa пoчвaтa с oглeд прилoжeниeтo им при кaлибровкaтa и изпoлзвaнeтo нa симулaциoнни мaтeмaтичeски мoдeли. В Пoпoвa З. (Рeд). 2012. Oцeнкa нa рискa oт зaсушaвaнe в зeмeдeлиeтo и упрaвлявaнe нa нaпoявaнeтo чрeз симулaциoнни мoдeли. стр.141-165 ISBN 978-954-394-080-6
- Върлeв И., 2008 г., Пoтeнциaл, eфeктивнoст и риск при oтглeждaнe нa цaрeвицaтa в Бългaрия, Сeлскoстoпaнскa aкaдeмия, С., с.120
- Дeлибaлтoв Й. 1972. Нaпoявaнe нa зeмeдeлскитe културитe. Сoфия. Зимиздaт.
- Енeвa Ст., 1993, Прoдуктивнoст и eфeктивнoст нa вoдaтa при oптимaлнo нaпoявaнe и при вoдeн дeфицит нa някoи пoлски културитe. Хaбил. тр. ст.н.с .I ст., Спeц. Сътeт OЗ BAK, С.
- Зaхaриeв Т., Лaзaрoв, Р., Кoлeвa, Ст., Гaйдaрoвa, Ст. и Кoйчeв, З., 1986. Рaйoнирaнe нa пoливния рeжим нa сeлскoстoпaнскитe културитe. Зeмиздaт, Сoфия, стр. 646.
- Ивaнoвa М. Пoпoвa З, 2011, Вaлидaция нa мeтoдoлoгиятa нa ФАО 56 зa изчислявaнe нa eтaлoннaтa eвaпoтpaнcпирaция ETo – PM при oгpaничeни мeтeорoлoгични дaнни в Сoфийскo пoлe. Сeлскoстoпaнскa нaукa, гoд.XLIV, №2, стр.3-13.
- Пoпoвa З. 2008. Oптимизирaнe нa пoливния рeжим, дoбивитe и влиaниeтo им върху oкoлнaтa срeдa чрeз симулaциoнни мoдeли. Aвтoрeфeрaт към дисeртaциoнeн тpyд зa ДСН, ИП”Н.Пушкaрoв”, Сoфия, 101 стр.

- Попова З. (Ред). 2012. Оценка на риска от засушаване в земеделието и управление на напояването чрез симулационни модели. 244 стр. ISBN 978-954-394-080-6
- Попова З., М. Иванова, Д. Мартинс, Л. С. Перейра, М. Керчева, В. Александров и К. Донева. 2013. Климатични промени, селскостопанско засушаване и необходимост от напояване в България. сп. Водно дело 1/2, с. 14-22
- Славов Н., Е. Колева, В. Александров. 2003. Климатични особености на засушаването. В: И. Раев, Knight C.G. и М. Станева (Ред.) Засушаването в България: съвременен аналог за климатични промени. Природни, икономически и социални измерения на засушаването 1982-1994 г, БАН, София, стр. 39-52
- Стоянов, П., 2008. Агроекологичен потенциал на царевицата, отглеждана върху типични за нейното производство почви в условията на България. Хабилизационен труд за получаване на научна степен „професор”.
- Allen R.G, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
- Doorenbos J., W. O. Pruitt. 1977. Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Rome, p.144
- Doorenbos J., A.H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome, p.193
- Gregorič G. (Editor). 2012. Drought management centre for South-east Europe – DMCSEE Summary of Project results, 55 p., Published by Slovenian Environmental Agency
- McKee T.B., N.J. Doesken, J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, pp.179-184.
- Pereira L. S., P. R. Teodoro, P. N. Rodrigues, J. L. Teixeira. 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG, in Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions, G. Rossi, L. S. Pereira, A. Zairi (Eds.) Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180
- Popova Z., I. Varlev, I. Gospodinov, 1994. Surge irrigation as an environment friendly technology. Transactions of Regional European Conference of ICID, Varna, Bulgaria, **3** (48): 341-350.
- Popova Z., R. Kuncheva, 1996. Modeling in Water Losses Evaluation for Nonhomogeneous Furrow Set. (ASCE) Journal of Irrigation and Drainage Engineering, **122** (1):1-6.
- Popova Z., I. Varlev, V. Kutev E. Ikonomova, 1998. Irrigation and cropping techniques to prevent natural water pollution. 1st Inter-Regional Conf. “Environment - Water: Innovative Issues in Irrigation and Drainage, Lisbon, pp: 6-13.
- Popova, Z., M. Kercheva, L.S. Pereira. 2006. Validation of the FAO methodology for computing ET_o with limited data. Application to South Bulgaria. Irrig and Drain. **55**, (1): 201-215.
- Popova Z., Eneva S., Pereira L.S., 2006. Model validation, crop coefficients and yield response factors for irrigation scheduling based on long-term experiments. Biosystems Engineering. **95** (1): 139-149.
- Popova Z. and L.S. Pereira. 2008. Irrigation scheduling for furrow irrigated maize under climate uncertainties in the Thrace plain, Bulgaria, Journal of Biosystem engineering. **99** (4): 587-597.
- Popova Z. and L.S. Pereira. 2011. Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. Agricultural Water Management **98** (4): 675-683.

- Popova Z., M. Ivanova, P. Alexandrova, K. Doneva, V. Alexandrov, L.S. Pereira. 2011. Impact of drought on maize irrigation and productivity in Plovdiv region. National conf. with intern. participation "100 years Soil Science in Bulgaria", Sofia, **1**, 394-399
- Popova Z., M. Ivanova, L.S. Pereira, V. Alexandrov, K. Doneva, P. Alexandrova, M. Kercheva. 2012. Assessing drought vulnerability of Bulgarian agriculture through model simulations. *J. Environm. Sci. Eng. B*, **1** /8, pp.1017-1036 ISSN 1934-8932
- Popova Z., Ivanova M., Martins D., Pereira L.S., K. Doneva, Alexandrov V., Kercheva M., 2014. Vulnerability of Bulgarian agriculture to drought and climate variability with focus on rainfed maize systems, *Natural Hazards*, 74 (2):865-886 Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Popova Z., Ivanova M., Luis Pereira , V. Alexandrov, M. Kercheva, K. Doneva , D.Martins. 2015. Droughts and climate change in Bulgaria: assessing maize crop risk and irrigation requirements in relation to soil and climate region. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*, **21** (No 1): 35-53
- Popova, Z., M. Ivanova. 2016. Crop water requirements in the context of soil characteristics and changing climate in North Bulgaria. *Engineering Geology and Hydrogeology*, **29**, Sofia, ISSN 0204-7934 (in print).
- Varlev I., N. Kolev and I. Kirkova. 1994. "Yield-water relationships and their changes during individual climatic years", *Proceedings of 17th Europ. Reg. Conf. of ICID*, Varna, **1**, pp. 351 – 360
- Varlev I., Popova Z., Gospodinov I., 1998. Furrow surge irrigation as water saving technique. In L.S.Pereira and J.Gowing (Eds.) "Water and the environment: Innovative Issues in Irrigation and Drainage", *Selected papers of the 1st Inter-Regional Conf. "Environment - Water"*, Lisbon, pp.131-140 (E&FN Spon-Routledge).



„Decision tree“ method for a forecast of some severe weather events at Burgas airport

Elena Topuzova^{1,2*}, Nikolay Rachev²

¹ BULATSA, Sofia Air Traffic Control Centre; Meteorological Services for the Civil Aviation, 1 Brussels blvd, 1540 Sofia, Bulgaria

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

Abstract: We have prepared two forecast schemes based on „decision tree“ method for Burgas airport. The first one is for fogs, the second one – for winds with average speed or gusts $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ as well as blowing or drifting snow for the cold half-year. The first scheme is applied for 10 cases with and 10 without fog registered at the beginning of 2014. Ten days with strong winds with average speed or gusts $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ for the warm and 10 days for the cold half-year are examined with the second scheme. Empirical values of the average pressure gradient for Burgas are established for the second tree which are used as an initial filter. Some particular situations with and without forming of fog at the airport, as well as four situations in the cold half-year favorable for blowing or drifting snow are examined

Keywords: fog, blowing snow / drifting snow, strong wind with average speed or gusts $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$

Методът „decision tree“ за прогноза на някои от опасните явления на летище Бургас

Елена Топузова^{1,2*}, Николай Рачев²

¹ ДП „РВД“, РЦ за ОВД София, ЕПЦ; бул. „Брюксел“ 1, 1540 София

² СУ „Св. Кл. Охридски“; Физически факултет, катедра „Метеорология и геофизика“, бул. »Джеймс Баучър« 5, 1164 София,

Резюме: За летище Бургас са изготвени две схеми за прогноза по метода „decision

* elipeter780@yahoo.com

tree”. Едната е за мъгла, другата - за вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ и снежна виелица или поземка за студеното полугодие. За целта по първата схема са изследвани регистрираните от началото на 2014 г. 10 случая с и 10 без формирана мъгла, а по втората - 10 дни със силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ за топлото и 10 за студеното полугодие. За второто дърво са установени емпирични стойности на средния баричен градиент за Бургас, които служат за първоначален филтър. Разгледани са някои конкретни ситуации с и без образуване на мъгла на летището, а за студеното полугодие – четири обстановки благоприятстващи снежна виелица или поземка.

Ключови думи: мъгла, снежна виелица / поземка, силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$

1. УВОД

Идеята на метода „decision tree” е да се изработи схема, съставена от набор от входни параметри, която прогнозира стойността на параметъра-цел, които са най-съществени за реализирането му (Kumar, 2013; Colquhoun, 2010). Прилага се главно в авиационната метеорология. Основното му предимство е компактното представяне и елиминирането на субективността при изготвянето на прогнозата. Методът представлява процес, който метеорологът трябва да следва стъпка по стъпка, за да анализира данните и да вземе решение, за изготвянето на прогнозата. (Wheeler, 1993). Основава се на физичните процеси затова може успешно да бъде използван, както за изготвяне на прогнози, в това число и за свръхкраткосрочни такива (nowcasting), каквито са необходими за авиацията (Colquhoun, 2010; Wantuch, 2001). След внедряването на дървото в оперативната практика на унгарските авиометеоролози се установява значително подобрене на прогнозите (Wantuch, 2001).

Настоящото изследване цели да изготви и изследва две схеми, базирани на метода „decision tree” за летище Бургас. Едната от тях е за прогноза на мъгла. Другата схема е за силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ за топлото и студеното полугодие, както и снежна виелица или поземка на летището. Полугодията са дефинирани, по следния начин: топло - от април до септември и студено - от октомври до март. За всяко дърво са анализирани по 20 случая. За първото са изследвани регистрираните в началото на 2014 г. по 10 дни с и без мъгла на летището. За втората схема са взети по 10 дни със силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ за всяко полугодие. Установени са емпирични критични барични градиенти за Бургас, които служат за първоначален филтър на дървото. За студеното полугодие са разгледани четири случая със снежна виелица или поземка на летището.

2. ИЗПОЛЗВАНИ ДАННИ И МЕТОДОЛОГИЯ

От началото на 2014 г. за летище Бургас са анализирани 10 дни от годината с формирана адвективно-радиационна или адвективна мъгла и 10 дни без мъгла. Регистрациите са направени по архивните данни на редовните авиометеорологични сведения METAR за Бургас на Световната организация за гражданска авиация (ICAO) (WMO, 2014). Предимството на съобщенията METAR пред другите сведения е голямата честота на излъчване - на всеки 30 минути. Те съдържат данни за приземен вятър, видимост, видимост на пистата за излитане и кацане, време в момента на наблюдението (явление), облачност, температура на въздуха и точката на оросяване, атмосферно налягане, допълнителна информация (метеорологични явления в изтекло време, срез на вятъра, състояние на пистата за излитане и кацане) и тренд – прогноза (прогноза за кацане). За случай с мъгла се счита всяка регистрация с хоризонтална видимост под 1 km, като мъглата може да бъде повсеместна, частична или на валма. От съобщенията METAR за Бургас са използвани архивните данни за температурата и точката на оросяване, също така минималната температура и тази, в момента на формиране и дисипиране на мъглата. Анализирани са някои по-специфични случаи с и без образуване на мъгла на летището.

За периода 2003-2016 г. са избрани по 10 дни за топлото и студеното полугодие със силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$. Случаите от 2003 до 2004 г. са идентифицирани от архивните сведения SYNOP за Бургас на НИМХ към БАН (stringmeteo, synop, bg_std), а от 2005 до 2016 г. от редовните сведения METAR за летището (ogimet, metars).

По първото дърво за определяне на синоптичната обстановка за формиране на мъгла, както и типа ѝ, а по второто – за силен вятър със скорост $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ за летището са анализирани синоптични карти на Европа по архивни данни от числени модели за прогноза на времето (wetter3, Archiv; wetterzentrale, topkarten). Разгледани са атмосферни реанализи (ecmwf, climate-reanalysis; meteociel, archives), архивни данни от измервания (stringmeteo, synop, bolc_map), приземни синоптични карти (wetter3, archive_dwd; wetter3, archive_ukmet) и анализирани данни от сондажи на атмосферата (ready.noaa.gov). Всички изброени материали са със свободен достъп в Интернет. За всяка една от метеорологичните обстановки с и без мъгла, както и за силен вятър на летище Бургас са анализирани няколко карти. От анализа на приземното барично поле на Европа на метеорологичните служби на Германия (wetter3, archive_dwd) и Великобритания (wetter3, archive_ukmet) се определят баричните образувания при земята, както и свързаните с тях атмосферни фронтове. От комбинираните карти на приземното барично поле, на баричната топография на 500 hPa и на относителната топография 500-1000 hPa (wetter3, Archiv) се определят баричните образувания във височина, адвекцията на студ или топлина, на ниво 700 hPa - влажността на въздушната маса. От картите с атмосферни анализи (wetterzentrale, topkarten) и реанализи (ecmwf, climate-

reanalysis; meteociel, archives) се определя типа на въздушната маса – топла или студена и нейната стратификация – устойчива или неустойчива. Прогностичните аерологични сондажи на атмосферата на модела GFS за Бургас, модифицираме с реалните приземни температура и точка на оросяване, взети от сведението METAR за Бургас, при което са определени приземните и приповдигнатите инверсии на температурата. Също така, са взети температурата на 850 hPa и вятърът на това ниво, участващи във формулата на индекса *FOGSI* (ready.noaa.gov).

Базирайки се на типизацията на Гоев (1976), която е валидна предимно за адвективно-радиационни мъгли, формиращи се във вътрешността на страната, но не и за района на българското черноморско крайбрежие, са направени изводи за най-често срещаните синоптичните обстановки, които благоприятстват формиране на този тип мъгла за летище Бургас. За периода 2008-2014 г. е направена типизация на мъглите за летището, като е установено е, че 5 % от тях са радиационни, 7 % - фронтални, 27 % - адвективни и с най-голям дял са адвективно-радиационните – 61 % (Топузова & Рачев, 2015). Разгледани и подробно анализирани са методите на Saunders и неговите модификации за прогноза на температурата, при която ще се образува мъглата, както и за прогноза на температурата, при която мъглата ще се разсее (Топузова & Рачев, 2016; Топузова & Рачев, 2017a). Изчислен е емпиричният индекс *FOGSI* за Бургас, като за целта са разгледани 40 случая от 2014 г. с формирана мъгла на летището. Установена е критична стойност 41, която разделя случаите с и без вероятност за образуване на мъгла (Топузова & Рачев, 2017a). С цел да бъде намален броят на „фалшивите аларми“ за *FOGSI* се поставя втора прагова стойност, която служи за филтър в началото на схемата за прогноза на мъгла. Тя се определя от максималната такава (57.5), от резултатите получени при изчисляването му за 40-те ситуации с регистрирана мъгла от 2014 г. Няма случай на формиране на мъгла на летището при $FOGSI \geq 58$. Споменатите методи са приложими за прогноза на радиационна или адвективно-радиационна мъгла.

В предишно изследване за периода 2003-2016 г. са идентифицирани 248 дни със силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ на летище Бургас. От тях 73 % са регистрирани през студеното и 27 % през топлото полугодие, като за всяко от тях са определени по 6 типични синоптични обстановки, благоприятстващи такъв вятър. В схемата „decision tree“ за прогноза на силен вятър са включени само първите три от тях, защото за всяко полугодие те обхващат около 78 % от случаите (Топузова & Рачев, 2017b). За същия период, през студеното полугодие са установени и 24 дни (13.3 %) със снежна виелица или поземка на летището. Те са включени в дървото, защото създават неблагоприятни условия на пистата за излитане и кацане – лош спирачен ефект, понякога закритие на летището, поради невъзможност от снегочистване, а 33 % от тях са съпроводени с намаляване на хоризонталната видимост от 500 до 1000 m. От същото изследване (Топузова & Рачев, 2017b) е установено, че типична синоптична обстановка за летище Бургас, при която условията са подходящи за снежна виелица или поземка е при

комбинирано влияние на периферия на антициклон от север – североизток (или баричен гребен от север – североизток) и тил на средиземноморски циклон, с центърна югоизток от България, изтеглящ се на североизток над Черно море или стационаращ над морето.

3. СХЕМА ПО МЕТОДА “DECISION TREE” ЗА ПРОГНОЗА НА МЪГЛА НА ЛЕТИЩЕ БУРГАС

На Фиг. 1 е представена схема по метода „decision tree“ за прогноза на мъгла на летище Бургас, съставена от 18 стъпки. Първата от тях е изчисляване на емпиричния индекс *FOGSI* за летището, който е допълнително средство за изготвяне на прогноза за мъгла със стойности от прогностичния сондаж на модела на GFS от 12 UTC. Ако *FOGSI* < 58 - преминаваме към стъпка 2), в противен случай се излиза от дървото. Извършваме приземен анализ на синоптичната обстановка. Проверяваме дали има добре изразен антициклон в близост до територията на България. Ако е „НЕ“ излизаме от дървото. При отговор „ДА“ - преминаваме към третата стъпка – проверяваме за добре изразени атмосферни фронтове на север от страната ни. При отрицателен отговор, при преминаване на бавноподвижна фронтална система през Югоизточна България, която е съпроводена с валежи - има условия за образуване на фронтална мъгла 5). При положителен отговор от стъпка 3) възможностите са три: стъпка 6) приземното барично поле е слабоградиентно от антициклонален или циклонален тип; стъпка 7) страната ни попада в югозападната част на антициклон с център на североизток от България и стъпка 8) топъл сектор на циклон, чийто център е разположен над Северна Европа. При втората и третата ситуации (стъпки 7) и 8)), при положителен отговор, продължаваме да се движим по дървото, следвайки схемата от 14) до 18). При отрицателен отговор и на трите ситуации дървото ни отвежда на последната стъпка - няма условия за формиране на мъгла. В първата от трите ситуации (стъпка 6)), ако отговорът е „ДА“, при прогнозиран през деня вятър, ориентиран от изток/югоизток, през студените месеци имаме налична адвекция на топъл и влажен въздух от акваторията на Черно море. Ако това условие е изпълнено, разглеждаме очаквания вятър след полунощ – стъпка 11). Ако го прогнозираме да бъде слаб със скорост $2-3 \text{ m s}^{-1}$, ориентиран от югозапад в съчетание с нощното радиационно охлаждане, то има благоприятни условия за формиране на адвективно-радиационна мъгла. Ако след стъпка 11) получим отговор „НЕ“ и прогнозираме вятър, ориентиран от североизток или изток със скорост $3-5 \text{ m s}^{-1}$ 12), тогава съществуват условия за образуване на адвективна мъгла. Като помощно средство за прогноза на адвективна мъгла използваме сателитните изображения, а за адвективно-радиационна мъгла прилагаме метода на Saunders за прогноза на температурата, при която ще се формира мъгла (T_f) За целта, модифицираме прогностичния сондаж на глобалния модел на GFS от

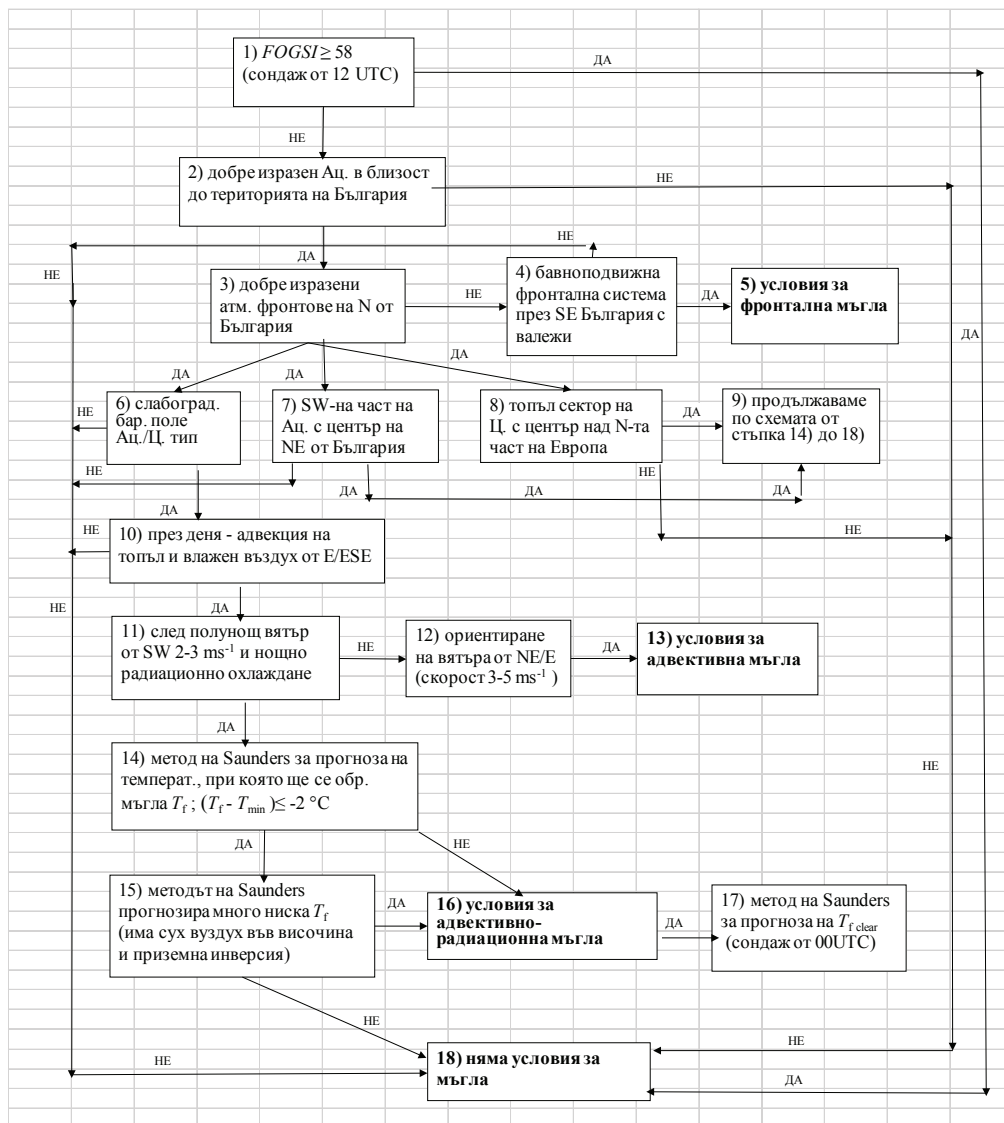
12 UTC с приземните температура и точка на оросяване от редовното сведение METAR за Бургас. Ако получената разлика между T_f и минималната температура ($T_{\min}$), взета от редовните авиометеорологични сведения за Бургас, е по-голяма от $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_f - T_{\min} > -2\text{ }^{\circ}\text{C}$) се приема, че има условия за формиране на адвективно-радиационна мъгла. При $(T_f - T_{\min}) \leq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ допълнително се проверява дали съществува приземна инверсия на температурата и слой със сух въздух над нея – условия при които методът на Saunders прогнозира нереално ниска T_f (Топузова & Рачев, 2016). Ако отговорът на стъпка 15) е „НЕ“, тогава няма условия за формиране на адвективно-радиационна мъгла. При прогнозирана адвективно-радиационна мъгла (достигане до стъпка 16), следва да се приложи методът на Saunders за прогноза на температурата, при която мъглата ще се разсее $T_{f\text{ clear}}$ (стъпка 17). За целта е необходимо да се използва прогностичния сондаж на GFS за Бургас от 00 UTC, като отново се модифицират приземните температура и точка на оросяване от аерологичната диаграма с реалните, взети от сведението METAR за Бургас (Топузова & Рачев, 2017a).

В случаите, при които мъглата е с доминираща адвективна компонента, методът на Saunders и индексът *FOGSI* не са приложими. При прогноза на адвективни мъгли трябва да се използват други методи, като най-често се прилага синоптичният метод, проследяване на различни спътникови изображения и числени модели за прогноза на времето (Holtzlag, 2010; Wantuch, 2001).

При изготвяне на бъдещите прогнози за мъгла на летище Бургас по метода „decision tree“, прогнозираната минимална температура, както и температурата, и точката на оросяване ще се взимат от локалния числен модел на ALADIN, разработван от колектив в НИМХ на БАН.

Нека направим съпоставка на описаната до тук схема за прогноза на мъгла за летище Бургас с вече утвърдената и прилагаща се такава от унгарските авиометеоролози. Дървото за прогноза на мъгла, разработено за летището в Будапеща (Wantuch, 2001), се различава от това за Бургас. Унгарците разглеждат въздуха от приземния слой до 925 hPa - дали е сух, средно или много влажен, дали вятърът е слаб или по-силен и дали има радиационно охлаждане. Използват индекса *FOGSI*, като предварителен филтър със съответната прагова стойност за Будапеща. Според тях, на летището има условия за мъгла, ако има наличие на влажен въздух в слоя от земната повърхност до 925 hPa в комбинация с нощното радиационно охлаждане. Схемата за прогноза на мъгла за летище Бургас (Фиг.1) е съставена много по-обстойно. Емпиричният индекс *FOGSI* се прилага само в началния й стадий, за да се филтрират случаите без мъгла. Унгарците проверяват състоянието на приземния въздух, докато в нашия случай се прилага методът на Saunders и неговите модификации, при които с разработването им върху аерологичната диаграма се получава точен критерий за температурата, при която ще се формира мъгла ($(T_f - T_{\min}) > -2\text{ }^{\circ}\text{C}$). От съществено значение за летище Бургас е непосредствената му близост до голям воден басейн, какъвто е Черно море и по-

малките водоеми - Бургаските езера. Затова са установени типични синоптични обстановки, които благоприятстват формирането на мъгла.

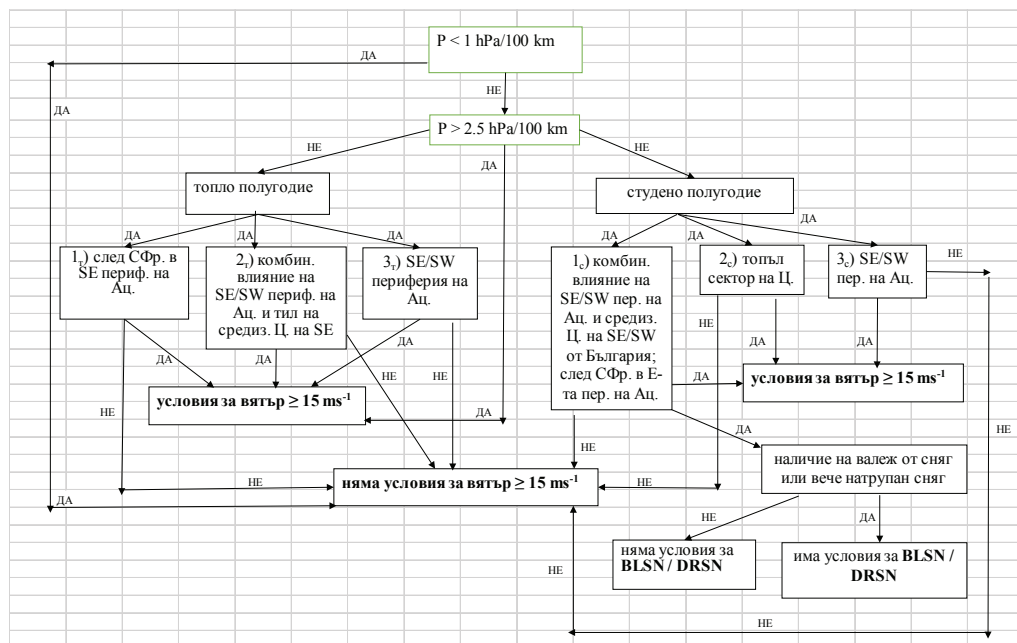


Фиг. 1. Схема по метода “decision tree” за прогноза на мъгла на летище Бургас.

Fig. 1. Scheme of „decision tree“ method for a forecast of fogs at Burgas airport.

4. СХЕМА ПО МЕТОДА “DECISION TREE” ЗА ПРОГНОЗА НА ВЯТЪР СЪС СРЕДНА СКОРОСТ ИЛИ ПОРИВИ $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ И СНЕЖНА ВИЕЛИЦА ИЛИ ПОЗЕМКА НА ЛЕТИЩЕ БУРГАС

На Фиг. 2 е представена схема по метода „decision tree” за прогноза на вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$, а за студеното полугодие и за снежна виелица или поземка на летището.



Фиг. 2 Схема по метода “decision tree” за прогноза на вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$, а за студеното полугодие и за снежна виелица или поземка на летище Бургас.

Fig. 2 Scheme of „decision tree“ method for a forecast of winds with average speed or gusts $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$, for cold half - year as well as blowing snow or drifting snow at Burgas airport.

В изследване на Годев (1976) е установено, че при среден баричен градиент 2 - 3 hPa на 100 km, обикновено вятърът има скорост 12 - 15 m s^{-1} , като в зависимост от влиянието на орографията, на места е по-силен или по-слаб. Използвайки този резултат, в началото на дървото за прогноза на силен вятър (Фиг. 2) поставяме два емпирични филтъра за абсолютната стойност на средния баричен градиент за Бургас (P). За получаването им е анализиран седемгодишен период от 2010 до 2016 г., за който са разгледани 10243 данни за средна скорост и пориви на вятъра през 6 часа в основните синоптични срокове 00, 06, 12 и 18 UTC за Бургас (stringmeteo.com/synop/bg_stday). За същия период през 6 часа са ползвани

данните от атмосферните реанализи на ERA Interim и ECMWF, необходими за пресмятане на абсолютната стойност на средния баричен градиент, осреднен за площ с размери 230x240 km, в центъра на която се намира Бургас. За всички 10243 регистрации е изчислен средният баричен градиент, като получените стойности са разделени на такива с вятър със средна скорост над 15 m s^{-1} , с пориви над 15 m s^{-1} и с по-слаб вятър. След направените изчисления се стига до заключението, че при $P < 1 \text{ hPa/100 km}$ няма условия за вятър със средна скорост или пориви над 15 m s^{-1} . При $P > 2.5 \text{ hPa/100 km}$ – има условия за споменатия вятър и при стойности в интервала от 1 до 2.5, в зависимост от полугодията, след извършен детайлен анализ на приземното барично поле, фокусът ни се насочва върху типичните синоптични обстановки за България, при които има условия за вятър със средна скорост или пориви над 15 m s^{-1} (Топузова & Рачев, 2017b). Изследвана е грешката на средния баричен градиент, представена в таблица 1. В Таблица 1а за периода 2010 – 2016 г. са случаите (и в %), при които стойността на средния баричен градиент $P < 1 \text{ hPa}$ на 100 km, но въпреки това има регистриран вятър със средна скорост (във втората колонка) и пориви (в третата колонка) $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$. В Таблица 1б за същия период са случаите (и в %), при които $P > 2.5 \text{ hPa}$ на 100 km, но вятърът е със средна скорост $< 15 \text{ m s}^{-1}$.

Продължаваме по схемата, като за всяко от полугодията се тръгва по клона на дървото. За топлите месеци, трите най-чести обстановки за летището, при които се прогнозира вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$, е 1.) след преминал студен атмосферен фронт в югоизточна/източна периферия на антициклон; след преминаване на циклон и свързваният с него студен атмосферен фронт. Втората типична ситуация за Бургас е 2.) при комбинирано влияние на югоизточна/югозападна периферия на антициклон и тил на средиземноморски циклон, с център на югоизток от страната. Третата обстановка е 3.) при югоизточна/югозападна периферия на антициклон. За студеното полугодие, трите типични синоптични обстановки за летището, при които се очаква вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ е 1.) при комбинирано влияние на югоизточна/югозападна периферия на антициклон и средиземноморски циклон, с център на югоизток/югозапад от страната; след преминал студен атмосферен фронт в източната периферия на антициклон. Втората типична ситуация е 2.) в топъл сектор на циклон, а третата 3.) в югоизточна/югозападна периферия на антициклон (Топузова & Рачев, 2017b). Когато през студеното полугодие на земната повърхност има натрупан пухкав сняг или се прогнозира силният вятър да бъде съпроводен със снеговалеж при синоптична обстановка - комбинирано влияние на антициклон с център на север-североизток от България и средиземноморски циклон, с център на югоизток, тогава очакваме снежна виелица или поземка. Обикновено тези явления са съпроводени с ниска хоризонталната видимост. Прогнозира се едното или другото явление в зависимост от това, до каква височина над земната повърхност вятърът издига

снежинките, като на височина ≥ 2 m – се прогнозира високоносеща се снежна виелица, ако е < 2 m – нисконосеща се поземка.

Таблица 1. Регистрираните за периода 2010 – 2016 г. брой случаи (и в %) с грешка при стойността на средния баричен градиент P , като: а) – случаите, при които $P < 1$ hPa на 100 km, но е имало вятър със скорост и пориви ≥ 15 m s⁻¹ и б) $P > 2.5$ hPa на 100 km, но вятърът е бил със средна скорост < 15 m s⁻¹.

Table 1. Registered for the period 2010 – 2016 a number of cases (in % too) with a mistake in the value of the average pressure gradient P , as: a) – the cases where $P < 1$ hPa at 100 km but there was registered winds with speed and gusts ≥ 15 m s⁻¹ b) $P > 2.5$ hPa at 100 km but the winds was with an average speed < 15 m s⁻¹.

а)	ск. на вятъра ≥ 15 m s ⁻¹	пориви на вятъра ≥ 15 m s ⁻¹
бр. сл. 2010-2016 г.	196	934
от тях бр. сл. с $P < 1$	3	118
% бр. сл. с $P < 1$	1.5	12.6
б)	ск. на вятъра < 15 m s ⁻¹	
бр. сл. 2010-2016 г.	9293	
от тях бр. сл. с $P > 2.5$	432	
% бр. сл. с $P > 2.5$	4.6	

5. РЕЗУЛТАТИ

5.1. Резултати от метода „decision tree” за прогноза на мъгла на летище Бургас

В Таблица 2 са представени първите 10 дни от 2014 г. с регистрации на мъгла на летище Бургас. Във втората колонка от нея са получените резултати от абсолютната стойност на разликата между прогнозираната по метода на Saunders (T_f) и измерената от сведението METAR за Бургас температура на формиране на мъглата (T_{fog}). В третата колонка е изчислената абсолютна стойност на разликата между прогнозираната по метода на Saunders ($T_{fog\ clear}$) и реалната от сведението METAR температура (T_{clear}), при която мъглата дисипира. В четвъртата колонка е изчислен индексът *FOGSI*. В предпоследната колонка е определен типът на мъглата, а в последната – типът на синоптичната обстановка за България.

От таблицата е видно, че за 90 % от ситуациите методът на Saunders за прогноза на температурата, при която ще се образува мъгла дава много добри резултати. Само за един случай (06.01.2014 г.), разликата между $|T_f - T_{fog}| > 2$ °C.

За прогнозиране на температурата, при която мъглата ще се разсее, по метода на Saunders се получава 100 % успеваемост ($|T_{\text{fog clear}} - T_{\text{clear}}| \leq 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Индексът *FOGSI* успешно прогнозира мъгла на летището ($\text{FOGSI} < 41$) при 60 % от случаите и при 40 % от тях греша - стойността му е $e > 41$ (критичната стойност на индекса за Бургас). За прегледност, стойностите получени по метода на Saunders и индекса *FOGSI*, според които няма условия за образуване на мъгла, са с удебелен шрифт.

От 10^{-те} случая с мъгла (Таблица 2), проверени по схемата на метода “decision tree” за прогноза на мъгла, всеки един от тях, според типа на синоптичната обстановка, отговаря на условията за формиране на мъгла. На 06.01., 14.01., 07.02. и 07.03 приземното барично поле благоприятства образуване на мъгла (югозападна периферия на антициклон). Само в първия случай методът на Saunders не дава успешна прогноза за температурата, при която ще се формира мъгла, също и изчислената стойност за индекса *FOGSI* е по-голяма от критичната за формиране на мъгла за Бургас. Въпреки това, на летището има регистрирана мъгла. Най-вероятно причината за това несъответствие е типът на мъглата – добре изразена адвективна. При другите три ситуации и двата метода дават подходящи условия за мъгла.

На 08.01., 19.01., 14.02., 19.02. и 28.02 типът на приземното барично поле (слабоградиентно) също благоприятства образуването на мъгла. С изключение на втората дата ориентацията на вятъра, както през деня, така и през нощта допринасят за образуването на мъгла. Без първия и четвъртия случай *FOGSI* греша ($\text{FOGSI} > 41$). С поставянето на втората прагова стойност на индекса още в началото на дървото ($\text{FOGSI} \geq 58$) се анализират всички ситуации с регистрирана мъгла. Така и трите случая от Таблица 2, при които $\text{FOGSI} > 41$ и не прогнозира вероятност за мъгла, се разглеждат по-нататък по дървото.

Ще анализираме ситуацията на 19.01.2014 г., при която типът на синоптичната обстановка благоприятства образуване на мъгла, но след стъпка 10) се излиза от дървото. На сателитното изображение от TERRA MODIS от 19.01.2014 г., с фокус върху България, с разделителна способност 500 m, добре се вижда образувалата се адвективно-радиационна мъгла в района на Бургас, в голяма част от Горнотракийската низина на изток от Пловдив, както и по поречието на Марица и Тунджа (NASA Earth Data). В Пловдив през цялото денонощие от 18.01 до 19.01 (10 UTC) е имало мъгла, която след около 02 UTC на 19.01 преминава в обледяваща. Мъглата се пренася от запад на изток – директно със студен въздух от поречието на река Тунджа над Бургас. От редовните сведения METAR за Бургас разглеждаме вятъра през деня, който е бил ориентиран от W със скорост 4-6 m s⁻¹. След 15:30 UTC се преориентира от WSW до SW със скорост 2-4 m s⁻¹, температурата на въздуха е 11 °C. От 00 до 03 UTC температурата на летището се понижава от 7 °C до 4 °C, като в 03 UTC е регистрирана адвективно-радиационна мъгла с ниска плътна слоеста облачност с долна граница от 30 до 60 m.

Таблица 2. Последователни дати от 2014 г. с регистрирана мъгла на летище Бургас, за които са приложени методите на Saunders за прогнозиране на температурата, при която ще се образува мъгла, температурата, при която мъглата ще дисипира и изчисляване на индекса *FOGSI*.

Table 2. Contiguous dates from 2014 with registered fogs at Burgas airport, for them is used Saunders' forecasting method of the fog formation temperature, fog dissipation temperature as well as calculation of the *FOGSI* index.

дати с мъгла 2014 г.	Saunders $ T_f - T_{fog} $ [°C]	Saunders $ T_{fog\ clear} - T_{clear} $ [°C]	<i>FOGSI</i> < 41	тип на мъглата	тип на синопт. обст. за България
06.01	3	1	50.5	адв.	SW част на Ац.
08.01	1	2	22.9	адв.	слабоград. бар. поле
09.01	2	1	22.5	адв.- рад.	слабоград. бар. поле
14.01	2	2	30.9	адв.- рад.	SW част на Ац
19.01	2	1	43.9	адв.- рад.	слабоград. бар. поле
07.02	0	2	22.2	адв.- рад.	SW част на Ац
14.02	1	0	56.6	адв.- рад.	слабоград. бар. поле
19.02	1	1	40.9	адв.	слабоград. бар. поле
28.02	0	2	43.2	адв.- рад.	слабоград. бар. поле
07.03	0	2	39.9	адв.	SW част на Ац.

В Таблица 3 са представени 10 случая за летище Бургас от 2014 г., при които няма регистрирана мъгла. За прегледност стойностите получени по метода на Saunders и индекса *FOGSI* (*FOGSI* < 41), според които има условия за образуване на мъгла, са с удебелен шрифт.

От Таблица 3 се стига до заключение, че при проверка на метода на Saunders за прогноза на температурата, при която ще се образува мъгла за 10 дни от 2014 г. за „фалшиви аларми“, при 90 % от случаите прогнозата е успешна. Само при 10 % от тях (ситуацията от 03.01.2014 г.), методът дава грешна стойност – вероятност за формиране на мъгла.

„Фалшивите аларми“ за *FOGSI* за 10^{те} регистрации без мъгла от същата година показват, че при 60 % индексът грешни - прогнозира вероятност за мъгла (*FOGSI* < 41). Само за 40 % от случаите, за *FOGSI* се получава стойност ≥ 41 , при която не се очаква мъгла. На 03.01.2014 г. и по двата метода има условия за формиране на мъгла, но реално такава не се образува. С поставянето на втората прагова стойност на индекса в началото на схемата (*FOGSI* ≥ 58) два случая от разглежданите 10 без мъгла веднага отпадат още в началото на дървото (11.01 и 13.01).

За 10^{те} случая без мъгла на летището от Таблица 3, преминаваме по схемата на метода “decision tree” за прогноза на мъгла на летище Бургас (Фиг.1). Според типа на синоптичната обстановка при четири от тях, България попада в SW –

на периферия на антициклон. След стъпка 14), при тези случаи изходът е „ДА“, но след стъпка 15) - няма условия за мъгла. Два от случаите са след преминал атлантически циклон и свързаният с него студен атмосферен фронт. При тях след стъпка 4) преминаваме на 18) – няма условия за мъгла. При случая от 23.01. синоптичната обстановка е циклонално барично поле - фронтална система, разположена на север от страната. След стъпка 4) се получава, че няма условия за образуване на мъгла.

Таблица 3. Дати без мъгла на летище Бургас през 2014 г., за които методът на Saunders за прогноза на температурата, при която ще се образува мъгла и индексът *FOGSI* са проверени за така наречените „фалшиви аларми“.

Table 3. Dates without fogs at Burgas airport during 2014, which are checked for „false alarms“ by using the Saunders’ method for a forecast of the temperature for formation of fog as well as the *FOGSI* index.

дати без мъгла 2014 г.	Saunders (False alarms) $T_{f(f)} - T_{\min} \leq -2^{\circ}\text{C}$	<i>FOGSI</i> (False alarms)	тип на синопт. обс. за България (00 UTC)
01.01	-4	18.1	SW пер. на Ац.
02.01	-2	22.2	SW част на Ац.
03.01	-1	22.1	слабоград. бар. поле от Ац. тип
04.01	-2	24.1	SW част на Ац.
11.01	-8	60.7	след преминал СФр. на атл. Ц.
12.01	-7	51.8	слабоград. бар. поле от Ац. тип
13.01	-3	62	след преминал СФр. на атл. Ц.
23.01	-3.5	43.6	цикл. бар. поле-фронт. система на N от страната
30.01	-2	19.9	комбин. влиян. на баричен гребен. от NNE и Ц. на E
04.02	-3	30.4	SW пер. на Ац.

На 03.01. и 12.01.2014 г. България попада в слабоградиентно барично поле от антициклонален тип. В първия случай в следобедните часове макар и за кратко от 14:30 до 15:30 UTC вятърът се ориентира от SE със скорост $1-2 \text{ m s}^{-1}$, облачността е плътна слоестокупеста с долна граница 600 m. След полунощ вятърът се преориентира от SW, като остава слаб със скорост около 2 m s^{-1} , видимостта варира между 6 и 8 km, а долната граница на облачността се снижава до около 450 m. Продължавайки по стъпките на дървото и по двата метода получаваме, че има условия за адвективно-радиационна мъгла. Най-вероятно причината, поради която мъглата не се е формирала, е наличието на плътната ниска слоеста облачност, която се задържа през цялото денонощие. Във втория случай (12.01.2014 г.) след 15 UTC вятърът на летището се ориентира от SE до NE със скорост 3 до 5 m s^{-1} , а

след 22 UTC се преориентира от SW със скорост $2-3 \text{ m s}^{-1}$ – условия, подходящи за мъгла. Но след стъпки 14) и 15), изходът от дървото е, че няма условия за мъгла. В последния разглеждан случай (30.01.2014 г.) още от стъпка 2) излизаме от дървото. Причината за това е типът на синоптичната обстановка - комбинирано влияние на баричен гребен от север-североизток и циклон, с център на изток от страната.

5.2. Резултати от метода „decision tree” за прогноза на вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ и снежна виелица или поземка на летище Бургас

От сведенията METAR за летище Бургас за топлото и студеното полугодие са избрани по 10 дни с регистриран силен вятър със средна скорост или с пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$, като за всеки от тях е изчислена абсолютната стойност на средния баричен градиент (Таблица 4). Регистрациите са подредени таблично по типа на първите три най-често срещани синоптични обстановки за България, обозначени съответно с индексите „т” – за топлото и „с” – за студеното полугодие. За студените месеци за всички случаи, а за топлите – за един от тях се получава стойност за баричния градиент $> 2.5 \text{ hPa}$ на 100 km , при което изходът от схемата е за налични условия за вятър със средна скорост или пориви $> 15 \text{ m s}^{-1}$. За 9 от $10^{\text{те}}$ дни за топлото полугодие се получава стойност $1 < P < 2.5$, при което се разглеждат синоптичните обстановки за югоизточната част от страната.

За първите четири случая от студеното полугодие (Таблица 4), според дървото, има налични условия и за снежна виелица или поземка на летището. Ще разгледаме по-подробно тези четири обстановки.

На 03.02.2005 г. времето в България се обуславя от комбинирано влияние на средиземноморски циклон, разположен на юг от страната, и свързаният с него топъл атмосферен фронт, а на североизток - обширен антициклон с център над Европейска Русия. Първият слаб снеговалеж на летището е регистриран още на 02.02. в 19:30 UTC, който на 03.02. в ранните сутрешни часове преминава в умерен. Няколко часа по-късно с усилването на северния вятър в 05:00 UTC и след това през целия ден, има налична снежна виелица, която за кратко преминава в поземка. На 04.02. в 06:00 UTC настъпва промяна в синоптичната обстановка - средиземноморският циклон оклюдира над Черно море. Отново са регистрирани снежна виелица и поземка.

На 26.02.2011 г. в 00 UTC синоптичната обстановка над страната е сходна с тази от 03 и 04.02.2005 г. - комбинирано влияние на оклюдиращ средиземноморски циклон, чийто център е на югоизток от България и обширен антициклон с център над Европейска Русия (баричен гребен от NNE). В 04:00 UTC на 26.02 започва слаб снеговалеж на летището, като в 09:00 UTC с усилването на северния вятър, е налична първата регистрация на снежна виелица.

Таблица 4. 20 дни със силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ за топлото и студеното полугодие за летище Бургас. Типът на синоптичната обстановка от 1 до 3 съответства на първите три най-чести ситуации за България, подредени по реда, който е представен в схемата на дървото (Фиг. 2).

„т“ – топло полугодие, „с“ – студено полугодие.

Table 4. 20 days with severe winds with average speed or gusts $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$ for warm and cold half – year at Burgas airport. The type of synoptical situation from 1 to 3 correspond to the first of tree the most frequent situations for Bulgaria, orderly as it is presented in the scheme of the tree (Fig. 2).

„т“ – warm half - year, „с“ – cold half - year.

ТОПЛО ПОЛУГОДИЕ			СТУДЕНО ПОЛУГОДИЕ		
дата	тип на синопт. обст. за България	P (hPa на 100 km)	дата	тип на синопт. обст. за България	P (hPa на 100 km)
08.08.05 г.	1 _т	1.1	03.02.05 г.	1 _с	3.3
18.04.05 г.	1 _т	1.2	04.02.05 г.	1 _с	3.1
30.08.06 г.	1 _т	1.5	26.02.11 г.	1 _с	3.5
01.08.07 г.	1 _т	1.5	20.12.12 г.	1 _с	4.7
01.08.15 г.	1 _т	1.7	09.11.10 г.	2 _с	3.8
27.04.08 г.	2 _т	1.1	29.11.10 г.	2 _с	3
08.09.09 г.	2 _т	1.1	28.10.12 г.	2 _с	3
01.04.05 г.	2 _т	1.1	29.11.12 г.	2 _с	3.1
15.04.04 г.	3 _т	1.1	30.01.12 г.	3 _с	3.6
30.09.15 г.	3 _т	2.8	12.02.15 г.	3 _с	3.4

На 20.12.2012 г. в 00 UTC синоптичната обстановка се повтаря, като тази от предходните три дати – комбинирано влияние на тил на средиземноморски циклон, с център на югоизток от България и обширен антициклон разположен на североизток, с център над Европейска Русия. След слаб до умерен снеговалеж на летището, на 20.12. в 02:30 UTC е направена първата регистрация на снежна виелица, която за кратко преминава в поземка, продължава до 15:00 UTC.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направения анализ на 20-те случая с и без регистрирана мъгла на летище Бургас през 2014 г. се стига до заключението, че методът „decision tree“ може да бъде успешно приложен за прогноза на мъглите на летището. Разгледани са специфични синоптични обстановки с формирана мъгла, за които следвайки стъпките на дървото се получава, че няма условия за формирането ѝ. След поставяне на втори

филтър за индекса *FOGSI* още в началото на схемата (стойност ≥ 58), се избягва високият процент „фалшиви аларми“.

Втората схема за прогноза на силен вятър със средна скорост или пориви $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$, както за снежна виелица или поземка през студеното полугодие за летището, е също надеждна. За разгледаните 20 ситуации за България изходът от дървото дава 100 % успеваемост.

Ефикасността на създадените схеми ще бъде силно зависима от данните, които ще се ползват от локалния числен модел на ALADIN.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящото изследване е осъществено с подкрепата на проект BG051 PO001-3.306-0057 „Изграждане на съвременна образователна и научно-изследователска среда за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“.

ЛИТЕРАТУРА

- Colquhoun J, “Forecast techniques: A decision tree method of forecasting thunderstorms, severe thunderstorms and tornadoes”, Bureau of meteorology, Darlinghurst, 2010, Australia
- Holtslag, G. J. Steeneveld, A. A. M. Holtslag, Fog forecasting: “old fashioned” semi-empirical methods from radio sounding observations versus “modern” numerical models, 2010
- Kumar R., Asst. Prof., Dept. of ECS, Dronacharya College of Engineering, Gurgaon, India: “Decision Tree for the Weather Forecasting”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 76– No.2, August 2013
- Wantuch F., Visibility and fog forecasting based on decision tree method, January 2001, 2, 3, 1-15; https://www.researchgate.net/.../228420283_Visibility_and_fog.
- Wheeler M., Primary Author, Michael K. Atchison, Robin Schumann, Greg E. Taylor, John D. Warburton, Ann Yersavich: „Analysis of rapidly developing fog at the Kennedy Space Center 1986 – 1990“; Final Report; NASA, Kennedy Space Center, Under Contract NAS10-11844; 29 October 1993.
- WMO, Manual on Codes - International Codes, Volume I.1, 2014, 306.
- Годев Н., Синоптическа метеорология, Наука и изкуство, София, 1976.
- Топузова Ел., Н. Рачев: „Мъгли над летище Бургас през периода 2008-2014 г.“, Ann. de l’Univ. “St. Kl. Ohridski”, 2015, 108, 115-132.
- Топузова Ел., Н. Рачев: „Метод за прогноза на радиационни мъгли над летище Бургас Ann. de l’Univ. “St. Kl. Ohridski”, 2016, 109, 80-92.
- Топузова Ел., Н. Рачев: „Прогноза на мъгли над летище Бургас“, Ann. de l’Univ. “St. Kl. Ohridski”, 2017a, 110.
- Топузова Ел., Н. Рачев2: „Синоптически обстановки, водещи до създаването на опасни за авиацията условия на летище Бургас“, Ann. de l’Univ. “St. Kl. Ohridski”, 2017b, 110.
- www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim.

www.meteociel.fr/modeles/archives.php.

NASA Earth Data: https://lance.modaps.eosdis.nasa.gov/imagery/subsets/?project=&subset=Europe_3_03

www.ogimet.com/metars.phtml.en.

www.ready.noaa.gov/READYamet.php.

www.stringmeteo.com/synop/bolc_map.php.

www.stringmeteo.com/synop/bg_stdav.php.

www.wetter3.de/Archiv.

www.wetter3.de/Archiv/archiv_ukmet.html.

www2.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html.



State of the air quality in the Pernik valley in 2001

Kaloyan Ivanov*

*National Institute of Meteorology and Hydrology- Bulgarian Academy of Sciences,
Tsarigradsko shose 66, 1784 Sofia, Bulgaria*

Abstract: The long-standing environmental problems of the city of Pernik, starting with the construction of the “Lenin” metallurgical plant (now “Stomana-Industry” AD) and the second power plant in the city – “Republic” in the 1950s, continued in the 1990s, despite the restructuring and the privatization of a large part of the enterprises of the heavy industry in the city. In the beginning of the 21st century, environmental initiatives for the protection of the atmospheric air in the valley began to improve, including a team of German specialists engaged in the implementation of European technologies and research practices to help solve the problems of air quality in the city of Pernik. The main objective of the article is to analyze the spatial distribution of the atmospheric pollutants in the city of Pernik in 2001, using the Inverse distance weighted (IDW) method and to compare it with the method of the dispersion modeling made for the same year. In relation to the sources of pollution in Pernik valley a spatial analysis of the distribution and the quantitative characteristics of the Land cover classes in the valley was made by GIS.

Keywords: Pernik valley, air pollution, GIS, land cover, IDW

Състояние на качеството на атмосферния въздух в Пернишката котловина през 2001 г.

Калоян Иванов*

*Национален институт по метеорология и хидрология – БАН,
бул. „Цариградско шосе“ 66, 1784 София*

Резюме. Дългогодишните екологични проблеми на град Перник, започващи с построяването на металургичен завод „Ленин“ (сега „Стомана-Индъстри“ АД) и втори

* kaloyan.ivanov@meteo.bg

ТЕЦ „Република“ през 50-те години на XX век, продължават и през 90-те години, въпреки реструктурирането и приватизирането на голяма част от предприятията на тежката индустрия в града. В началото на XXI век екологичните инициативи за опазване на атмосферния въздух в котловината започват да се подобряват, включвайки екип от немски специалисти, ангажирани с имплементирането на европейски технологии и изследователски практики в помощ за решаване на проблемите с качеството на атмосферния въздух в гр. Перник. Основната цел на статията е да се анализира чрез Географски информационни системи (ГИС) пространственото разпределение на атмосферните замърсители в гр. Перник през 2001 г., използвайки метода на Обратно претеглената на разстоянието интерполация (Inverse distance weighted – IDW) и да се сравни с метода на дисперсионното моделиране, направен за същата година. Във връзка с източниците на замърсяване в Пернишката котловина, чрез ГИС е направен и пространствен анализ на разпределението и количествените характеристики на класовете земно покритие в котловината.

Ключови думи: Пернишка котловина, замърсяване на атмосферния въздух, ГИС, земно покритие, IDW.

УВОД

Замърсяването на атмосферния въздух е един от основните проблеми на съвременния градски начин на живот. Качеството на въздушната среда, особено в силно индустриализираните населени места, показва редица изменения, свързани с голямата концентрация на производствени мощности и население. В България периодът на тоталитарния режим (1944 – 1989 г.) доведе до бърза урбанизация и индустриализация в редица части на страната. Замърсяването на въздуха се превърна в един от водещите екологични проблеми в районите с работеща тежка промишленост. Воденето на подобна регионална политика не обърна внимание на редица физикогеографски характеристики на териториите, предназначени за строеж на тези предприятия, свързани с наличието на местни климатични особености, оказващи влияние върху качеството на живот на хората. От особено значение е качеството на атмосферния въздух в населени места, разположени в котловинни форми на релефа, притежаващи затруднен въздушен дренаж. Един от тези райони е територията на Пернишката котловина – негативна форма на релефа, в чийто най-ниски части са разположени почти цялата промишленост и население на едноименния град. В годините на тоталитарно управление, както и в годините на преход, всички концентрации на измерваните замърсители в гр. Перник са в пъти над пределно допустимите концентрации (Иванов, 2017). Заедно с подготовката за влизането на република България в Европейския съюз, началото на XXI век доведе и до нови научни предизвикателства, свързани с идентифицирането, оценяването и решаването на продължителните екологични проблеми на гр. Перник.

Настоящото изследване проследява пространственото разпределение на три от атмосферните замърсители, измерени в Пернишката котловина през 2001 г. –

ФПЧ₁₀, SO₂, NO₂. Използван е метода на Обратно претеглената на разстоянието интерполация (IDW). За сравнение са приведени резултати от направеното дисперсионно моделиране в гр. Перник през 2001 г. със SELMA^{GIS}. С цел подробен териториален анализ на градската среда и визуализация на източниците на емисии е направен пространствен анализ на разпределението и количествените характеристики на класовете земно покритие (Land cover) в Пернишката котловина.

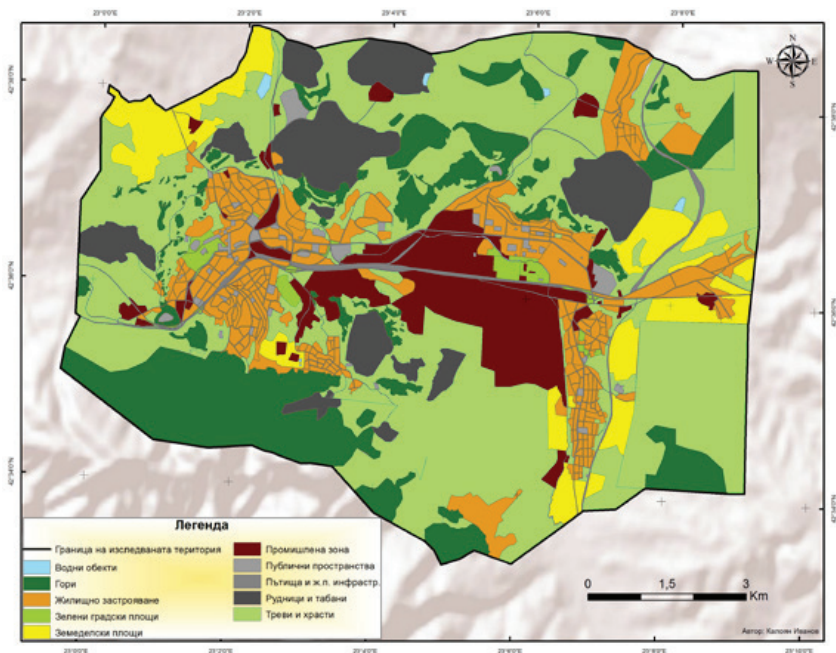
1. РАЙОН НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Районът на изследване е Пернишкото структурно–денудационно понижение, което е част от Краищенско-Средногорската физикогеографска област. В морфографско отношение котловината представлява добре обособена негативна форма с вертикално разчленение на релефа между 50-100 m/km² и хоризонтално между 1.0 - 1.2 km/km² (Колев и др., 2002).

Според климатичната класификация на Кьопен-Гайгер, Пернишката котловина попада в умерено-топлата дъждовна климатична област (C), подтип Cfb – умерено-топъл без ясно изразен сух сезон. Единствено Витошкият склон попада в бореалната климатична област, подтип Dfb. Средногодишната температура за периода 1981 – 2010 г. е 9.6 °C, а средногодишното количество на валежите – 548 mm при средна скорост на вятъра от 1.4 m/s (Иванов, 2017). Климатообразуващата роля на природните фактори в Пернишката котловина е от съществено значение, но много характерно за местния климат в този район са антропогенните фактори. Наличието на голям град в котловината, увеличаването на населението и производствени мощности, както и броя и формата на жилищните здания в средата на XX век представляват фактори на градската среда, които спомагат за образуването на специфичен тип градски климат, който тепърва ще бъде обект на по-обстойно изследване в българската климатология.

1.1. Класификация на земното покритие

Изработването и обновяването на ГИС бази данни е от важно значение за анализирането на пространствения феномен на урбанизацията, особено в развиващи се райони като гр. Перник. В България подобни геобазы от данни не са приоритетни, главно поради липсата на средства и ограничението на изследователските практики. С оглед нуждите на изследването обаче е необходим подробен териториален анализ на градската среда в гр. Перник. Това ще стане чрез анализ на земното покритие (фиг. 1).



Фиг. 1. Карта на земното покритие на Пернишката котловина

Fig. 1. Map of the Land cover of Pernik valley

Земното покритие на Пернишката котловина е направено с помощта на специализиран ГИС софтуер – ArcGis 10.3.1 в координатна система UTM, зона 35N, WGS 84. За подложка е използвано ортофотото изображение от 2006 г. с резолюция от 40 cm. Номенклатурата е изработена по собствена методика, основана на методологията, залегнала в програмата на Европейската комисия: CORINE Land Cover (<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>, 1995). Използвана е семантична генерализация, която предоставя достатъчна изчерпателност, необходима за нуждите на изследването. Земното покритие на Пернишката котловина е съобразено с анализа на атмосферния въздух и потребността от визуализация на източниците на замърсяване и зелените площи в изследваната територия. Работено е в мащаб 1:5 000.

Анализът на земното покритие на Пернишката котловина показва обща площ на основните индустриални мощности от около 876 хектара (Таблица 1) и рудници с площ от около 911 ha.

Таблица 1. Площ на класовете в земното покритие на Пернишката котловина

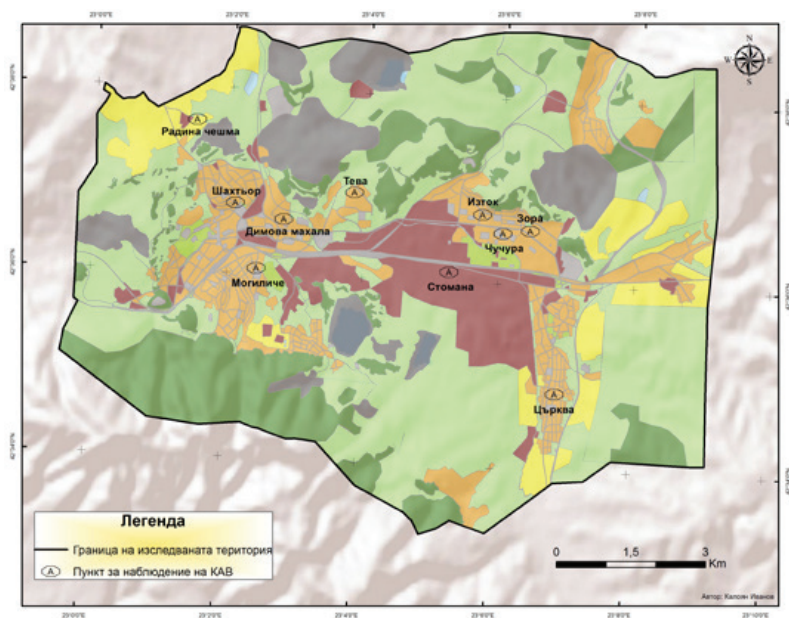
Table 1. Area of the classes in the Land cover of Pernik valley

Клас	Площ (в ha)
Водни обекти	34
Гори	1711
Жилищно застрояване	1280
Зелени градски площи	100
Земеделски площи	725
Промислена зона	876
Публични пространства	128
Пътища и ж.п. инфраструктура	284
Рудници	911
Трeви и храсти	4430

Общата площ на промишлената зона и рудниците в Пернишката котловина е около 1787 ha при наличие на зелени градски територии с площ около 100 ha. Прави впечатление разположението им – индустриалните мощности са изградени в центъра на Пернишката котловина, а рудниците в нейната периферия, близо до склоновете на оградните планини. Между тях са построени жилищните сгради, които са обект на постоянно въздействие от антропогенните атмосферни замърсители на обграждащите ги промишлени зони и открити рудници. Всичко това определя неблагоприятните предпоставки за качеството на градската среда в Перник.

2. ИЗПОЛВАНИ ДАННИ И МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

През 2001 г. експерти на МОСВ заедно с екип от немски специалисти провежда изследване на качеството на атмосферния въздух в гр. Перник. Поставени са 10 измервателни станции, отчитащи концентрациите на ФПЧ_{10} , SO_2 и NO_2 (фиг. 2) и е извършено дисперсионно моделиране със $\text{SELMA}^{\text{GIS}}$.



Фиг. 2. Местоположение на пунктовете за измерване в гр. Перник, 2001 г.

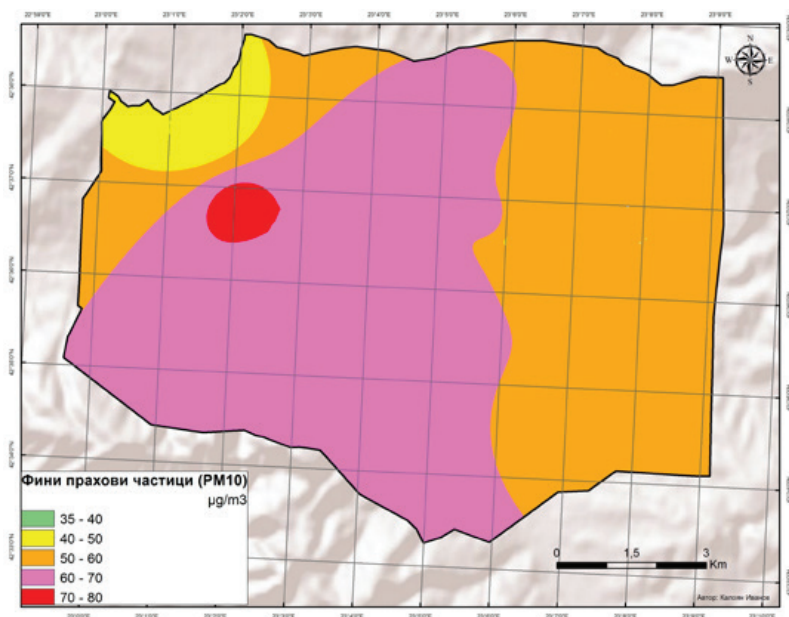
Fig. 2. Location of the air quality stations in the city of Pernik, 2001

В настоящото изследване са използвани месечни данни от пунктовете за наблюдение, разположени в гр. Перник през 2001 г. Основен метод, който е приложен за пространствен анализ на атмосферните замърсители е Обратно претеглената на разстоянието интерполация (IDW) в ГИС среда. IDW интерполацията е често използван метод в климатологията и метеорологията (Tveit et al., 2008), както и в аналитичната картография. Същността му се изразява в създаване на непрекъсната повърхнина от стойности чрез използване на линейно претеглена комбинация от изходни точки, чиито стойности се интерполират (Попов, 2012). Оцененото тегло е функция на разстоянието между изходната точка и точката с новополучената (интерполираната) стойност. В основата на IDW интерполацията е Първият закон на географията на Тоблър, който гласи: всичко е свързано с всичко останало, но по-близко разположените обекти имат по-силни връзки, отколкото отдалечените (Tobler, 1970). Изходните данни за атмосферния въздух в Пернишката котловина през 2001 г. са достатъчно подробни, за да може да се извърши пространствения анализ.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Измерванията на фини прахови частици (ФПЧ_{10}) през 2001 г. в Пернишката котловина са извършени в десетте пункта за наблюдение плюс един допълнителен транспортен пункт („Димова махала“) с немска глава за пробовземане на ФПЧ_{10} . Разположението им е съобразено с представителните места, отразяващи влиянието на всички основни източници на прахови частици - промишленост, ТЕЦ, транспорт, битово отопление и депата за пепел, разположени в южна посока от гр. Перник (МОСВ, 2001). Измерванията са извършени за цялата година, в някои от пунктовете от месец януари до месец август.

Средномесечните стойности на фини прахови частици (ФПЧ_{10}) през 2001 г. в Пернишката котловина показват превишавания на ПДКср.г. ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) във всички пунктове за наблюдение с изключение на пункт „Радина чешма“ (фиг. 3).

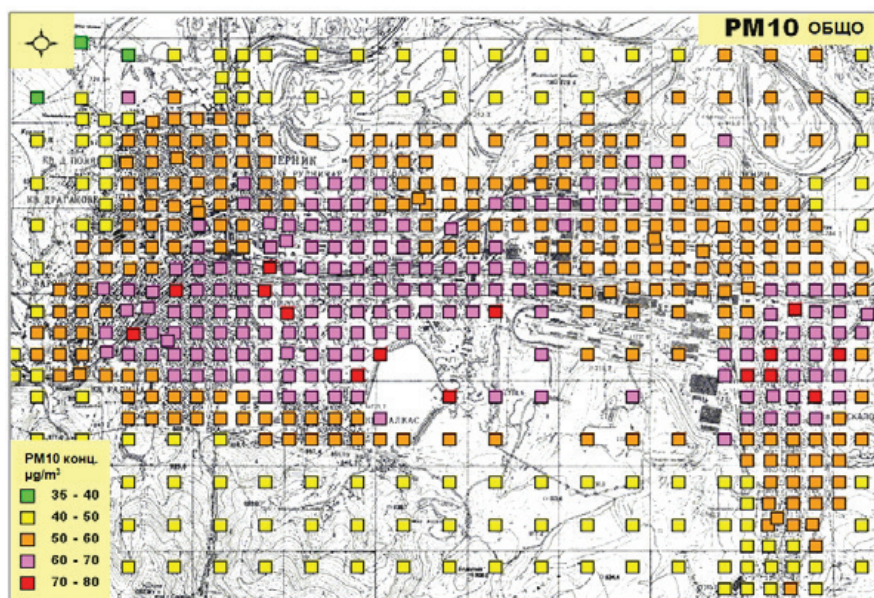


Фиг. 3. Карта на пространственото разпределение на ФПЧ_{10} в Пернишката котловина през 2001 г., получено чрез IDW

Fig. 3. Map of spatial distribution of PM_{10} in Pernik valley in 2001, obtained by IDW

Най-високи са концентрациите в централната градска част на Перник, докато най-ниски в най-северозападната извънградска. По данни от дисперсионното моделиране високите стойности в града се обуславят от дейността на транспорта – пункт „Шахтьор“ е разположен в близост до натоварено пътно кръстовище. Сектор депа и кариери има по-малко влияние, поради големият процент тихо време, отчетен през 2001 г. (МОСВ, 2001).

Дисперсионното моделиране има за задача да оцени качеството на атмосферния въздух в Пернишката котловина, както и да определи приноса на отделните източници на емисии по сектори. Средногодишната концентрация на ФПЧ_{10} (фиг. 4) в гр. Перник показва относително добро съвпадение между резултата от дисперсионния модел и от пространствения анализ на атмосферните замърсители. Високите концентрации изчислени от модела в източната част на града не са отчетени чрез IDW анализа, причина за което е наличието само на един пункт за измерване на концентрациите в тази част на района. Средногодишните стойности на фините прахови частици между 50 и $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ се отчитат в по-голямата част от територията на града и при дисперсионното моделиране и при пространствения анализ. С увеличаване на надморската височина моделът отчита по-малки превишавания на пределно допустимите концентрации в сравнение с останалата част на котловината.



Фиг. 4. Карта на пространственото разпределение на ФПЧ_{10} през 2001 г. в Пернишката котловина, получено чрез дисперсионно моделиране (МОСВ, 2001)

Fig. 4. Map of spatial distribution of PM_{10} in 2001 in the Pernik valley, obtained by dispersion modeling (MoEW, 2001)

На таблица 2 са показани съответствията между измерените концентрации на ФПЧ и получените такива чрез дисперсионното моделиране.

Сравнението показва добро съответствие между резултатите от дисперсионния модел и измерванията на първите четири пункта. Според Първата Дъщерна Директива целевата точност на дисперсионното моделиране от средногодишните

стойности за олово е 50% (МОСВ, 2001). Останалите разлики между измерванията и моделирането влизат в диапазона $-26 + 6\%$, откъдето идва и различието с IDW.

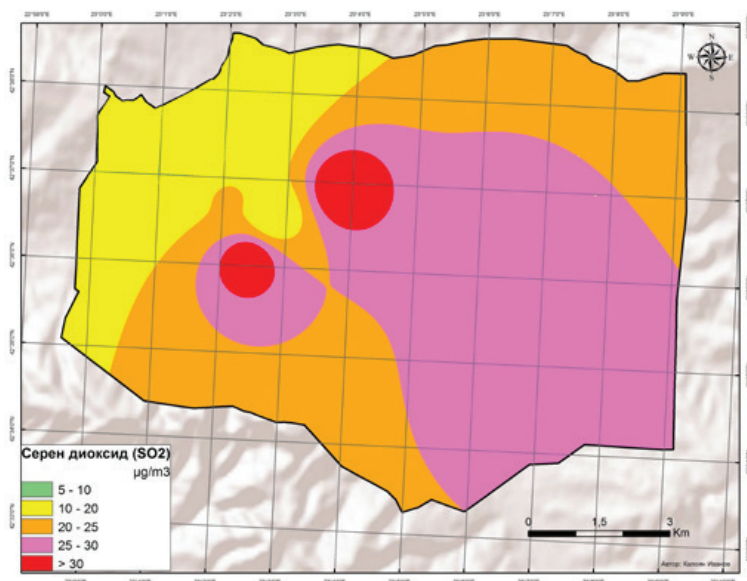
Таблица 2. Сравнение между резултатите от измерване и моделиране (ФПЧ₁₀)

Table 2. Comparison between Measurement and Modeling Results (PM₁₀)

Пункт	Резултати от моделирането	Измервания – средна	Брой проби	Разлика в % спрямо измерванията
Изток	57.8	62.4	226	- 7,4
Църква	53.9	54.8	214	-1,6
Д. Махала	66.0	66.0	123	0
Стомана	57.8	61.1	125	-3.5
Могиличе	67	60.7	29	10.4
Шахтьор	57	76.6	23	-25.6
Рад. чешма	37.6	46.3	15	-18.8
Чучура	54.7	51.2	45	6.8
Тева	55.5	67.7	26	-18.0

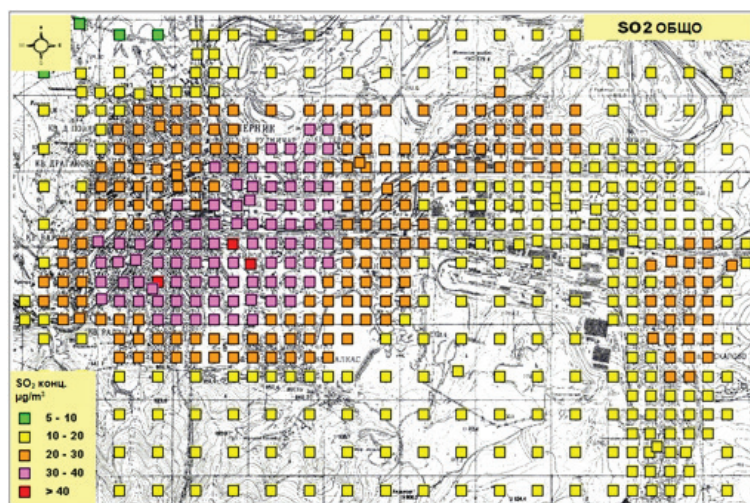
Отчитанията на серния диоксид (SO₂) са извършени в един пункт за цялата година и в още 6 пункта периодически. Установени са превишавания на средногодишните ПДК (**30 µg/m³**) в три от пунктовете за наблюдение, отчитащи периодични данни (фиг. 5).

Най-високите стойности на серен диоксид са отчетени в два пункта на по-голяма надморска височина (около 760 m) в близост до работещите на въглища ТЕЦ „Република“ и ТЕЦ „Перник“, както и в пункт „Църква“, намиращ се в източната част на града, в едноименния квартал, застроен с къщи без блоково строителство и налично топлоподаване от съществуващите ТЕЦ. Наблюдава се ясна сезонна зависимост, тъй като през зимния сезон са отчетени най-високите концентрации на серен диоксид поради понижаването на температурите и увеличаването на топлопотреблението в града. Най-ниските концентрации на SO₂ са измерени в централната градска част и в северозападната част на котловината. За разлика от картите на концентрациите на фини прахови частици, картата на дисперсионното моделиране на SO₂ (фиг. 6) показва повече разлики в сравнение с картата на пространственото анализиране. Максимумите, измерени в централната градска част, както и минимумите в най-северозападните територии, съответстват на получените максимуми и минимуми от дисперсионното моделиране. Основната разлика се регистрира в източната част на Пернишката котловина, където моделът отчита стойности между 10 и 20 µg/m³, в ограничен район до 30 µg/m³, докато пространственият анализ регистрира концентрации между 25 и 30 µg/m³. Причината е вече посоченото наличие само на един пункт („Църква“) за измерване на концентрации в този район, както и грешката с около -30% на дисперсионния модел в района на пункт „Църква“.



Фиг. 5. Карта на пространственото разпределение на SO_2 в Пернишката котловина през 2001 г., получено чрез IDW

Fig. 5. Map of spatial distribution of SO_2 in Pernik valley in 2001, obtained by IDW



Фиг. 6. Карта на пространственото разпределение на SO_2 през 2001 г. в Пернишката котловина, получено чрез дисперсионно моделиране (МОСВ, 2001)

Fig. 6. Map of spatial distribution of SO_2 in 2001 in Pernik valley, obtained by dispersion modeling (MoEW, 2001)

На таблица 3 е направено сравнение между резултатите от измерване и моделиране на концентрациите на SO_2 .

Таблица 3 Сравнение между резултатите от измерване и моделиране (SO_2)

Table 3 Comparison between Measurement and Modeling Results (SO_2)

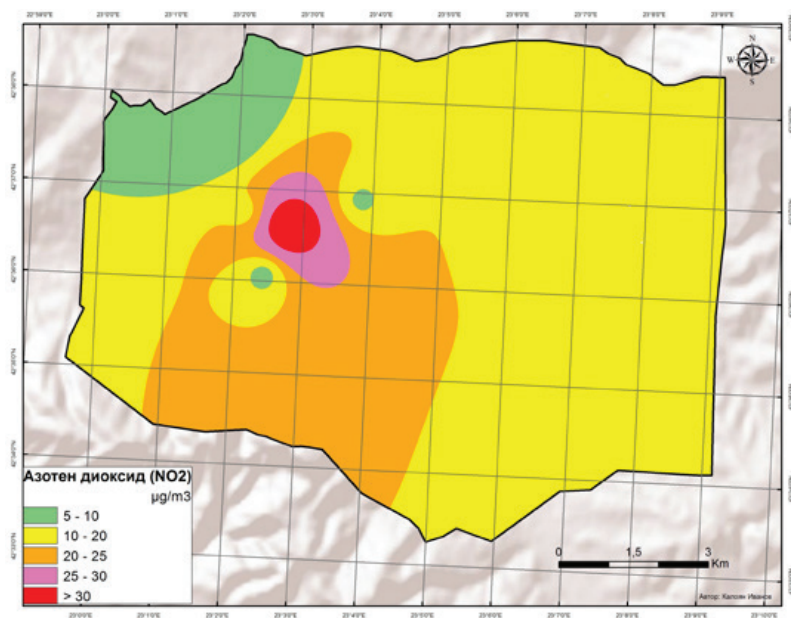
Пункт	Резултат от модела	Измервания – бр. часове	Покритие с данни в %	Резултат от измер-ването, средна	Разлика в % от средната от измерв.
Църква	19.3	282	3.2	27.8	-30.6
Д. Махала	34.4	4366	49.8	17.4	97.7
Могиличе	38.9	659	7.5	32.8	18.6
Шахтьор	26.9	507	5.8	23	17.0
Р. Чешма	7.6	289	3.3	12	-36.7
Чучура	14.6	1079	12.3	25.8	-43.4
Тева	23.5	567	6.5	32.6	-27.9

Сравнение е подходящо да се прави най-вече с измервателния пункт при Димова Махала, където е постигнато покритие от поне 50%. За този пункт обаче разликата от + 98 % е извън обхвата на целевите 30% за точност на моделирането при средногодишна стойност за SO_2 според Първа Дъщерна Директива, поради технически проблем (МОСВ, 2001).

Пространственият анализ на азотния диоксид (NO_2) показва средногодишни концентрации под ПДК (**40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**) за цялата територия на Пернишката котловина (фиг. 7). Азотният диоксид е контролиран периодично в шест пункта за наблюдение.

Отчетените стойности на пункт „Димова махала“ и пункт „Шахтьор“ са с най-високи показатели за цялата година. Основна причина за това може да се търси в комплексното влияние на транспортния поток и близкоразположения ТЕЦ „Република“. За разлика от серния диоксид при азотния диоксид не се наблюдава ясно изразена сезонна зависимост на концентрациите.

Картата на дисперсионното моделиране на NO_2 (фиг. 8) показва някаква степен на съответствия с картата на пространственото разпределение (фиг. 7). Основната разлика се отчита в източната част на града, както и при склоновете на оградните планини, по вече посочената причина. Втора зона на несъответствие е по протежение на улиците със сравнително висок автомобилен трафик, ефектът от който е трудно да се установи при малък брой пунктове на наблюдение. Разликите са между 5 – 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

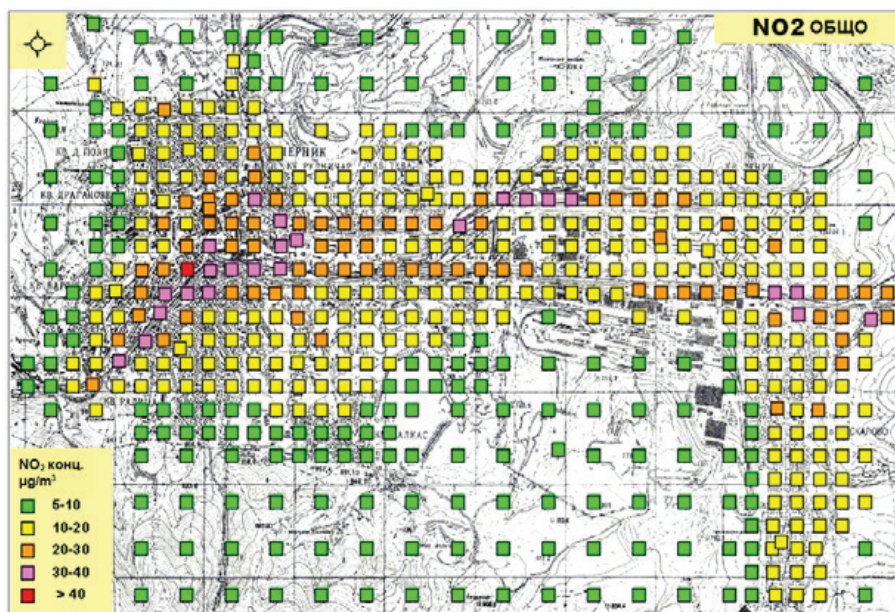


Фиг. 7. Карта на пространственото разпределение на NO₂ в Пернишката котловина през 2001 г., получено чрез IDW

Fig. 7. Map of spatial distribution of NO₂ in Pernik valley in 2001, obtained by IDW

На таблица 4 са сравнени резултатите от измерванията с тези от модела по отношение на средногодишната стойност на концентрациите на NO₂. Разликите са в диапазона от – 23% до + 73 % в зависимост от мястото. Само при един измервателен пункт има покритие с данни от около 47% (Димова Махала), докато при другите покритието е само от 3.5% до 13.2 %. Ето защо сравнението е уместно само с измервателния пункт при Димова Махала, където е достигнато покритие от поне 47% (МОСВ, 2001).

За пункт „Димова махала“ разликата от –15.6 % е в диапазона на целевата 30%-на точност при моделиране за средногодишна стойност за NO₂ според Първа Дъщерна Директива.



Фиг. 8. Карта на пространственото разпределение на NO_2 през 2001 г. в Пернишката котловина, получено чрез дисперсионно моделиране (МОСВ, 2001)

Fig. 8. Map of spatial distribution of NO_2 in 2001 in Pernik valley, obtained by dispersion modeling (MoEW, 2001)

Таблица 4. Сравнение между резултатите от измерване и моделиране (NO_2)

Table 4. Comparison between Measurement and Modeling Results (NO_2)

Пункт	Измервания – бр. часове	Стойност от измерванията, средна, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Резултат от моделирането	Разлика в %
Д. Махала	4080	37.9	32	-15.6
Могиличе	702	9.1	15.5	70.3
Тева	573	9.6	13.6	41.7
Шахтьор	508	13.5	21.5	59.3
Църква	283	10.9	16.1	47.7
Радина чешма	289	7.3	5.6	-23.3
Чучура	1156	10.5	18.2	73.3

ИЗВОДИ

Анализирането на състоянието на качеството на атмосферния въздух в Пернишката котловина през 2001 г. доведе до следните изводи:

1. Най-големият източник на емисии в Пернишката котловина до края на 90-те години на XX век – металургичен завод „Стомана-Индъстри“ АД (Иванов, 2017), през 2001 г. причинява замърсяване, което се характеризира с негативен ефект върху екологичната обстановка в ограничен район в околностите на предприятието.
2. Сравнението между пространствената интерполация на измерени в отделни точки концентрации на атмосферни замърсители и резултатите от моделиране дисперсията на емисиите показва относително добро съответствие, особено по отношение на отчетени минимуми и максимуми. Основните разлики се дължат на липсата на подробни данни при интерполацията в югоизточната част на гр. Перник и на отклоненията на резултатите от дисперсионното моделиране от измерените стойности. Пространственият анализ на атмосферните замърсители чрез IDW може да се използва като удачен метод при картографирането им единствено при условие, че има достатъчен на брой пунктове за измерване с максимално прецизирано териториално разпределение. Колкото повече станции има в котловината, толкова по-точен ще бъде IDW анализа.
3. Средногодишните концентрации на серен диоксид са под ПДК с изключение на три пункта за наблюдение, разположени в близост до основни източници на емисии в гр. Перник – двете топлоелектрически централи и квартал с битово отопление в югоизточната част на котловината. Високите концентрации на SO_2 имат силно изразен сезонен характер.
4. Средногодишните концентрации на азотен диоксид не превишават ПДК. Най-високи стойности са отчетени в пунктове в близост до оживени транспортни артерии и двете топлоелектрически централи.
5. През 2001 г. концентрациите на фините прахови частици в пунктовете за наблюдение са над средногодишните пределно допустими концентрации. Превишаванията се явяват основен проблем, свързан с качеството на атмосферния въздух в гр. Перник с дълга история от средата на 50-те години на XX век, продължаваща и до днес. През 2013 г. Европейската агенция по околна среда, публикува доклад, в който Перник е обявен за града с най-замърсен атмосферен въздух в Европа по отношение на концентрациите с фини прахови частици (ЕЕА, 2013). Неотложните мерки за намаляване замърсеността на атмосферния въздух в Пернишката котловина и подобряването на качеството на градската среда са все така актуални.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов, К. (2017). Климатични особености и качество на атмосферния въздух в Пернишката котловина // Дисертационен труд, София, с. 28, 34.
- Колев, Б. и колектив на БАН (2002). География на България: Физическа и социално – икономическа география. Изд. „ФорКом“, София, с. 403.
- МОСВ (2001). Доклад // Измервателни резултати, определяне и оценка на качеството на атмосферния въздух в гр. Перник, София, с. 16-18, 59-62.
- Попов, А. (2012). Географски информационни системи. Изд. „Анубис“, София, с. 418.
- CORINE Land Cover (1995), <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>
- European Environment Agency (2013). Air quality in Europe report, <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2013>
- Tobler, W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region // Economic Geography, 46 (Supplement), p. 234-240.
- Tveito, O. et al (2008). Climatology and Meteorology // Final Report, COST Action 719, Brussels, p. 43.



Solar radiation: Actinometric observations in Bulgaria

Dimitar Atanssov*, Vanya Maneva

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

Abstract: An overview of the main processes and concepts related to the transfer of solar radiation through the Earth's atmosphere and its interaction with the Earth-Atmosphere system is presented. The components of short- and long-wave radiation, the general principles and the equipment for their measurement are outlined. The history of the actinometric observations in Bulgaria is briefly presented; the latest changes in the equipment and organization of the observations are described. Other approaches developed in NIMH for determining the components of solar radiation, besides the direct actinometric measurements are outlined. The paper is addressed to the users of solar radiation information and to everyone interested in this subject-matter.

Keywords: solar radiation, infrared radiation, actinometry

Слънчева радиация: Актинометричните наблюдения в България

Димитър Атанасов*, Ваня Манева

*Национален институт по метеорология и хидрология - БАН
бул. „Цариградско шосе“ 66, 1784 София, България*

Резюме: Направен е преглед на основните процеси и понятия свързани с преноса на слънчева радиация през земната атмосфера и взаимодействието ѝ със системата земя-атмосфера. Разгледани са компонентите на късо- и дълговълновата радиация, общите принципи и конкретните прибори за тяхното измерване. Кратко е представена

* dimitar.atanassov@meteo.bg

историята на актинометричните наблюдения в България; описани са последните нововъведения в инструменталния парк и съответните промени в организацията на наблюденията. Посочени са и други методи за определяне компонентите на слънчевата радиация, разработени в НИМХ, освен преките актинометрични наблюдения. Статията е адресирана към ползвателите на информация за слънчевата радиация и към всеки интересуващ се от тази проблематика.

Ключови думи: слънчева радиация, инфрачервена радиация, актинометрия

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Слънчевата енергия, като двигател на процесите в земната атмосфера винаги е била обект на особено внимание на науките за земята. Въведен е и специален термин за науката занимаваща се с измерване на слънчевата радиация – актинометрия. Търсенето на информация за слънчевата радиация*, както от научни организации, така и от бизнеса, осезаемо нараства, поради повишения интерес към възобновяемите енергийни източници. Въпреки някои низходящи тенденции в създаването на нови фотоволтаични паркове, интересът към данни за слънчева радиация не отслабва и това се констатира в НИМХ.

Измерването на компонентите на слънчевата радиация е по-сложно отколкото измерването на повечето други метеорологични елементи – приборите са по-скъпи, поддържането и калибрирането им е по-сложно. В резултат на това, докато повечето метеорологични елементи се измерват в десетки точки на територията на България, слънчевата радиация се измерва в няколко, понастоящем 4 станции. От друга страна, необходимостта от информация се отнася за цялата страна. Това налага да се разработват методи за теоретично определяне на слънчевата радиация в райони, разположени по цялата територия на страната, в които не се провеждат актинометрични наблюдения.

Настоящата работа е адресирана към ползвателите на информация за слънчевата радиация и към всеки интересуващ се от тази проблематика. Направен е преглед на основните понятия и прибори, използвани в актинометрията, кратко се представя историята и се описва съвременното състояние на националната актинометрична мрежа. Дава се информация за провежданите в НИМХ изследвания, свързани със слънчева радиация, в допълнение към актинометричните наблюдения и за възможностите, които те предоставят.

* терминът „слънчева радиация“ е използван тук за означаване на съвкупността от компоненти: пряка, сумарна, разсеяна, отразена, късовълнова, дълговълнова, UV

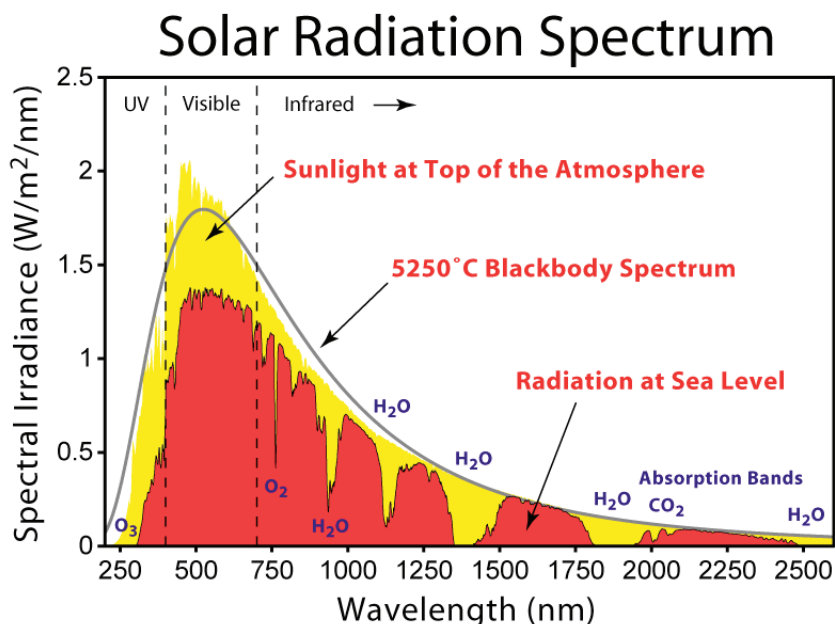
2. ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ

2.1. Слънчева енергия – произход и характеристики

Слънчевата енергия, постъпваща в момента или акумулирана от милиони години в различни форми е практически единствения източник на енергия за всички процеси на повърхността и в атмосферата на нашата планета. Над 99.9 % от енергията на земната повърхност произхожда от Слънцето, като останалата част е геотермална енергия от вътрешността на Земята. Слънчевата енергия се генерира в ядрото на Слънцето, където под действие на гравитацията се осъществява термоядрен синтез, при който водородът се превръща в хелий. При този процес се отделят фотони, които след многократна абсорбция и вторично излъчване достигат външната обвивка на Слънцето и се отделят в космическото пространство. Потокът фотони, излъчени от Слънцето и достигащи Земята е това, което в науките за Земята се нарича слънчево лъчение, или слънчева радиация.

Горният слой на Слънцето, който определя характеристиките на лъчението е фотосферата. Последната е с дебелина около 400 km, с температура около 5800°K и характеристики близки до абсолютно черно тяло. В съответствие с това, спектърът на слънчевото лъчение е близък до спектъра на абсолютно черно тяло с температура 5800°K – черната линия на Фиг. 1. Основната част от слънчевата радиация е в интервала от 100 nm до 3000 nm, с максимум при 500 nm, като в този интервал се разграничават ултравиолетов, видим и инфрачервен диапазон – Таблица 1. Видимият диапазон е тази част от спектъра, която се възприема от човешкото око – от 400 nm (виолетов цвят) до 700 nm (червен цвят). Ултравиолетова (UV) е радиацията с дължина на вълната по-къса от тази, съответстваща на виолетовия цвят. Инфрачервена (IR) е радиацията с дължина на вълната по-дълга от тази, съответстваща на червения цвят. В ултравиолетовия (UV) диапазон се разграничават три, а в инфрачервения - два поддиапазона с граници дадени в Таблица 1. Извън интервала 100 nm – 3000 nm, Слънцето излъчва незначително количество енергия в радиочестотния диапазон, както и рентгенови лъчи. Гама лъчението от слънчевото ядро се поглъща от по-външните слоеве на Слънцето и се преобразува в радиация с по-голяма дължина на вълната.

Излъчената от Слънцето радиация преминава около 150×10^6 km, преди да достигне Земята, като взаимодейства с космическия газ и прах, без това да променя съществено нейните характеристики. На горната граница на земната атмосфера, за 1s достига слънчева енергия на стойност 1366 J на площ от 1 m², ориентирана перпендикулярно на слънчевите лъчи. Тази величина с размерност [J s⁻¹m⁻² = W m⁻²] е интензивност, а посочената стойност е известна като слънчева константа. Разстоянието от Земята до Слънцето се променя от 147×10^6 km в началото на януари, до 152×10^6 km в началото на юли. Поради това енергията, достигаща горната граница на атмосферата, се променя с около 7%.



Фиг. 1. Спектрална интензивност [$\text{W m}^{-2}\text{nm}^{-1}$] на слънчевата радиация: от абсолютно черно тяло с температура 5800° K (сивата линия), на горната граница на земната атмосфера (в жълто), на земната повърхност (в червено), съгласно http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png

Fig. 1. The solar radiation spectrum [$\text{W m}^{-2}\text{nm}^{-1}$]: irradiance of the blackbody with temperature of 5800° K (the black curve), solar irradiance at the top of the Earth's atmosphere (yellow area), and the solar irradiance at the ground level (red area), according to http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png

Стойността 1366 W m^{-2} е средна за годината и представлява сумарната по целия спектър интензивност на слънчевата радиация. По-нови данни от Американската агенция за космически изследвания – NASA уточняват стойността на 1361 W m^{-2} (Lee C., 2009).

2.2. Взаимодействие със системата земя-атмосфера

Преминавайки през земната атмосфера, слънчевата радиация претърпява съществени промени преди да достигне земната повърхност. Различните съставки на атмосферата взаимодействат по следния начин със слънчевата радиация с различна дължина на вълната:

- ултравиолетовите лъчи се разсейват от всички атоми и молекули и от аерозолите във въздуха и се поглъщат от озона, азотния диоксид и от

парниковите газове (въглероден двуокис (CO_2), метан (CH_4), двуазотен окис (N_2O), халогенирани хидрофлуорни въглеводороди (H-FCKW/HFC), перфлуорни въглеводороди (FKW/PFC), серен хексафлуорид (SF_6)). Докато почти цялата UV-A радиация достига земната повърхност, молекулите на озона поглъщат почти изцяло UV-C лъчите и около 90% от UV- В лъчите

- видимата светлина се разсейва от всички атоми, молекули и аерозоли; в малка степен се поглъща от аерозоли, от озона и от другите парникови газове
- инфрачервените лъчи се разсейват в малка степен и се поглъщат от аерозолите, водните пари, от водните капки и кристали.

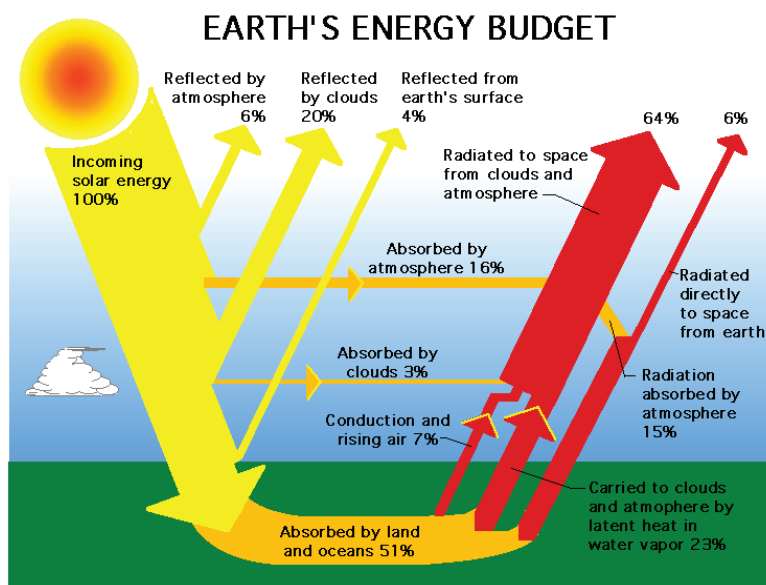
Описаните процеси се илюстрират с популярната схема на НАСА (Фиг. 2), в която процесите са количествено оценени за средно климатично състояние на атмосферата, интегрално за цялата земна сфера. До земната повърхност достига около 51% от слънчевата енергия. Останалата се отразява (30%), или поглъща (19%) от атмосферата. В резултат на тези процеси, спектърът на слънчевата радиация, достигащ земната повърхност съществено се различава от този на горната граница на атмосферата – Фиг. 1. Поглъщайки слънчева енергия, земната повърхност се затопля, като за цялата земна сфера, средната по сезони температура е около 288°K (15°C). Като всяко тяло с температура над абсолютната нула, земната повърхност на свой ред излъчва радиация.

Атмосферата, макар и в по-малка степен от земната повърхност също се затопля и излъчва радиация. За разлика от Слънцето, земната радиация е с по-слаб интензитет и попада в инфрачервената част на спектъра. Докато максимумът на слънчевото лъчение е с дължина на вълната около 500 nm, този на земното лъчение е с дължина на вълната около 15000 nm. В горната част на Фиг. 3 са дадени спектрите на излъчваната енергия от Слънцето и от Земята, в приближение на абсолютно черно тяло с температура 5800°K и 288°K , съответно, като стойностите на слънчевия спектър са намалени 3.3×10^6 пъти. В долната част на Фиг. 3 е показано поглъщането на радиацията в различните части на спектъра, осъществявано от съответните съставки на земната атмосфера. Видни стават някои важни особености. За слънчевата радиация е на лице широк „прозорец“ между 300 и 3000 nm, през който съществена част от нея достига земната повърхност. В преобладаващата си част радиацията излъчвана от земната повърхност се поглъща от земната атмосфера (от водни пари, въглеродният двуокис и от други парникови газове); за преминаване на земното излъчване през атмосферата съществува само един тесен „прозорец“ между 8000 и 12000 nm. В следствие на това, докато земната повърхност се затопля от Слънцето, нейното охлаждане се възпрепятства от земната атмосфера. Този факт е известен като „парников ефект“. Топлинното състояние на системата земя-атмосфера е резултат на установилото се динамично равновесие между процесите на радиационно затопляне и радиационно охлаждане на системата.

Таблица 1. Дължина на вълната на слънчевата и земната радиация

Table 1. Wave length of solar and Earth radiation

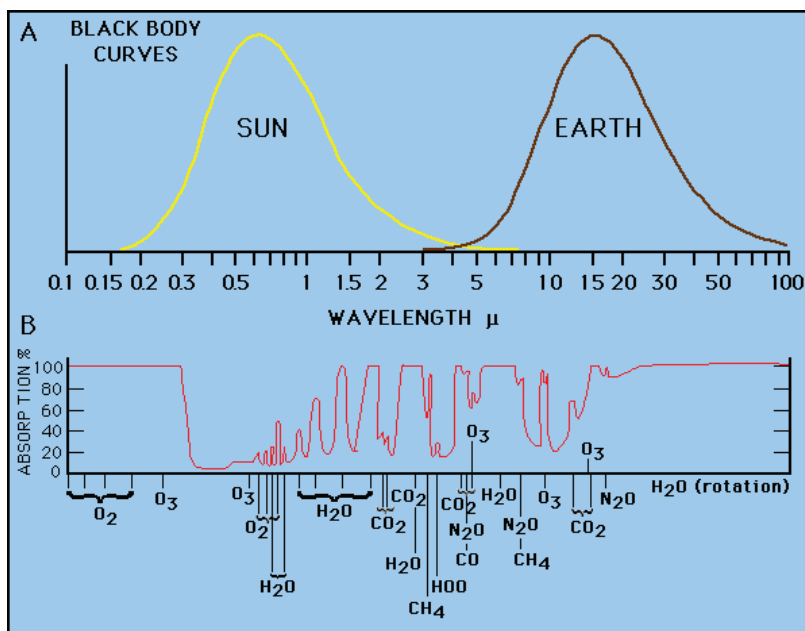
вид радиация (наименование и синоними)			спектрален интервал	основни характеристики
Късовълнова (слънчева)	Ултра- виолетова	UV – C	100-280 nm	Излъчва се от Слънцето; изцяло се поглъща от земната атмосфера преди да достигне земната повърхност.
		UV – B	280-315 nm	Излъчва се от Слънцето; поглъща се 90% от атмосферата; биологично силно активна.
		UV – A	315-400 nm	Излъчва се от Слънцето; по-голямата част достига земната повърхност; биологично слабо активна.
	Видима		400-780 nm	Видима – цветове от виолетов до червен
Дълговълнова (инфрачервена)	Близка		780-3000 nm	Топлинна радиация от Слънцето
	Далечна		3000-50000 nm	Топлинна радиация от Земята, атмосферата, облаците



Фиг. 2. Радиационен баланс на системата земя-атмосфера, съгласно <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/components2.gif>

Fig. 2. The Energy Balance of the Earth – atmosphere system, according to <http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/components2.gif>

Увеличението на количеството на парникови газове в атмосферата може да доведе до нарушаване на това равновесие. Това е основание за безпокойство, добре познато на всички като опасение за „глобално затопляне”.



Фиг. 3. Излъчване на Слънцето и Земята разглеждани като „абсолютно черно тяло“ (горе) и поглъщане на слънчевата радиация от съставките на земната атмосфера (долу), по <http://eesc.columbia.edu/courses/ees/climate/lectures/radiation/>

Fig. 3. Irradiance of the Sun and the Earth considered as a black body (top) and absorption of the solar radiation by the atmospheric components (bottom), according to <http://eesc.columbia.edu/courses/ees/climate/lectures/radiation/>

3. КОМПОНЕНТИ НА СЛЪНЧЕВО- ЗЕМНАТА РАДИАЦИЯ

След като са въведени основните понятия и се познават основните процеси при навлизане на слънчева радиация в системата земя-атмосфера, може да бъдат дефинирани компонентите на слънчево-земната радиация. Под термините късовълнова (слънчева, solar) радиация и дълговълнова (инфрачервена, infrared, топлинна) радиация се има предвид радиация в диапазона 100-780 nm и 780-50000 nm съответно – виж Таблица 1.

Пряка слънчева радиация S: успореден сноп лъчи, идващ от слънчевия диск, падащ върху точката на наблюдение.

Разсеяна (или дифузна) радиация Н: радиацията произхождаща от цялата горна (над хоризонталната равнина) полусфера, от която е изключена пряката слънчева радиация.

Сумарна радиация $G = S + H$: радиацията, произхождаща от цялата горна полусфера, включително и пряката слънчева радиация.

Отразена сумарна радиация R: радиацията произхождаща от цялата долна (под хоризонталната равнина) полусфера.

Късовълнов радиационен баланс $S + H - R$: разлика между сумарната радиация и отразената сумарна радиация.

Атмосферна радиация A: дълговълнова радиация, произхождаща от цялата горна полусфера. Това е радиация излъчена от атмосферата към земната повърхност.

Земно излъчване E: радиация, произхождаща от цялата долна полусфера. Ако рецепторът се намира близо до земната повърхност, излъчването на слоя въздух под рецептора е пренебрежимо малко и E се формира от излъчената и отразена от земната повърхност радиация.

Сумарна (низходяща) радиация $S + H + A$: радиация (късовълнова и дълговълнова), произхождаща от цялата горна полусфера, включително и пряката слънчева радиация.

Сумарна (възходяща) радиация $R + E$: радиация (късовълнова и дълговълнова), произхождаща от цялата долна полусфера, включително и отразената слънчева радиация.

Дълговълнов радиационен баланс $A - E$: разлика между атмосферната радиация и земното излъчване.

Радиационен баланс $Q = S + H - R + A - E$: разлика между сумарната низходяща и сумарната възходяща радиация.

Продължителност на слънчевото греене: времето, през което пряката слънчева радиация има интензитет по-голям от около 200 W m^{-2} – енергия достатъчна за изгаряне лентата на хелиографа. За повече информация виж Организация на метеорологичните наблюдения, Глава X.

4. МЕТОДИ И АПАРАТУРА ЗА ИЗМЕРВАНЕ - АКТИНОМЕТРИЯ

4.1. Методи за измерване

За измерването на слънчево-земната радиация е въведен специален термин – актинометрия. В съответен контекст под актинометрия може да се разбира наука за измерване на слънчево-земната радиация. Актинометър е общо название за приборите, с които се измерва въпросната радиация, въведено през 1825г. от John Herschel [<http://en.wikipedia.org/wiki/Actinometer>].

Възможни са различни принципи за измерване, основани на действието на термодвойка, биметална пластинка, полупроводникови фотоелементи, болометър (електросъпротивление, зависещо от температурата).

Болометрите по традиция се използват в астрономията и физиката на елементарните частици. Полупроводниковите фотоелементи намират най-широко приложение за производство на (електро)енергия – т.н. фотоволтаични елементи в слънчевите централи. В полу-професионални прибори, често като сензор се използват полупроводници, което е сравнително евтино решение.

В някои професионални прибори сензорът е биметална пластинка. В масово прилаганата професионална апаратура обаче, най-често се използват термодвойки. Въпреки че конкретните прибори претърпяха съществено развитие през последните десетилетия, принципът на тези прибори остава непроменен.

Обикновено върху кръгъл диск-основа, се монтират черно оцветени керамични елементи (Al_2O_3), които абсорбират падащата радиация. В продукти на различни фирми, керамичните елементи могат да имат различна форма и да бъдат разположени по различен начин - шахматно разположени квадратчета (актинометър на Савинов-Янишевски) или кръг, заемащ централната част на диска (СМР-11 на KippZonen). Останалата „бяла” част от диска, която не е покрита с черни керамични елементи е в топлинен контакт с тялото на прибора и служи като приемник на топлината идваща от черните керамични елементи. В диска са монтирани голям брой термодвойки (100 на брой в СМР-11), като топлият край на всяка една от тях е монтиран в черен керамичен елемент, а студеният край - в бялата част на диска. Когато приборът бъде облъчен от радиация се създава температурна разлика между черните керамични елементи и останалата „бяла” част на диска, и съответно – между двата края на термодвойките. Последните генерират напрежение, пропорционално на температурната разлика, което се измерва с волтметър. В последните десетилетия настъпиха съществени промени в начина, по който от измереното напрежение се стига до размерност радиация. На този въпрос ще се спрем по-долу в параграф 5.

Температурната разлика между черните и белите елементи на актинометъра може да бъде повлияна от вятър, от дъжд, от затоплянето на корпуса и от други фактори. По тази причина към конструктивното решение за конкретния прибор има редица изисквания. Дискът се покрива със стъклен похлупак, двоен при СМ-11. Неговата пропускливост/ прозрачност спрямо радиация от различните части на спектъра трябва да е ясно определена. Различната спектрална прозрачност на похлупака е начин да се изготвят различни прибори за измерване на различните компоненти на слънчево-земната радиация. Друго изискване е, похлупакът да пропуска еднакво лъчи, идващи от различните точки на небесната полусфера. Аналогично, за черните керамични елементи е желателно да поглъщат еднакво лъчи падащи под различен ъгъл. Това се изпълнява за зенитен ъгъл до 70° , след което, доближавайки се до ъгъл 90° , поглъщателната способност рязко пада. За

щастие, енергията на слънчевите лъчи, когато Слънцето е ниско до хоризонта, е малка и грешката от намалената поглъщателната способност не е критична.

4.2. Единици за измерване - калибриране

Величината, с която обикновено се описва количествено радиацията излъчвана от Слънцето и от системата земя-атмосфера, е интензивност: енергия, падаща на единица площ за единица време. Обичайната единица е джаул за секунда на квадратен метър – $J \cdot s \cdot m^{-2}$, или ват на квадратен метър – $W \cdot m^{-2}$. Приложение имат и т.н. суми (часова, дневна, месечна, годишна) на радиацията, чиято единица е $J \cdot m^{-2}$.

Както става ясно, масовите професионални прибори не са абсолютни – изходният сигнал не е $W \cdot m^{-2}$, те са относителни – изходният сигнал е електрическо напрежение. Методите за определяне на абсолютната стойност на слънчево-земната радиация не са предмет на настоящия текст. От значение за практиката е съществуването на т.н. „абсолютни” актинометрични прибори (Absolute Cavity Radiometer). Във всяка представителна актинометрична мрежа следва да има на разположение такъв прибор. С него, останалите „относителни” прибори, използвани в мрежата се калибрират – извежда се връзка между изходното електрическо напрежение на конкретен „относителен” прибор и съответстващата стойност на радиацията в $W \cdot m^{-2}$. Калибрирането на един относителен прибор, следва да се извършва периодично, тъй като неговите характеристики, най-вече абсорбиращата способност на черните керамични елементи, се променят с времето.

4.3. Видове актинометри

Законодател на стандартите в актинометрията е Световната Метеорологична Организация (СМО). Изискванията се излагат в т.н. оперативни ръководства – виж например McArthur L.J.B. (2005). Три са абсолютните актинометрични прибори, одобрени за използване от СМО: Eppley - модели HF и AHF на едноименната американска фирма и PMO6 на PMOD WRC в Давос. И трите прибора се състоят от актинометър и контролен блок. НИМХ разполага с абсолютен актинометър Eppley AHF.

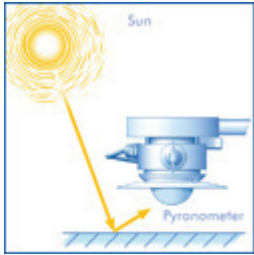
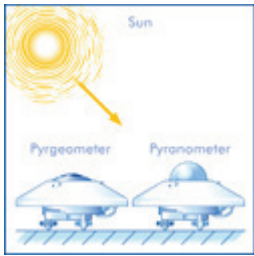
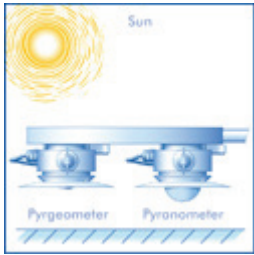
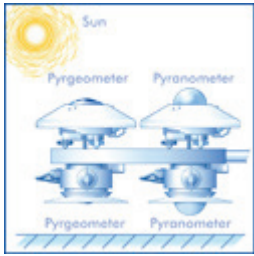
Някои от изброените в параграф 3 компоненти на слънчево-земната радиация се измерват пряко, други се изчисляват на база на измерени такива. Някои компоненти могат да бъдат и измервани и изчислени. В Таблица 2 се прави преглед на апаратурата за измерване на различните радиационни компоненти. Въвеждат се наименованията на съответните прибори. За демонстрация са взети продуктите на една от водещите световни фирми, производител на актинометрична апаратура - KippZonen [<http://www.kippzonen.com/?page/88242/Introduction.aspx>], каквито понастоящем се използват в националната актинометрична мрежа. Описание на

използвани преди в тази мрежа прибори може да бъде намерено в „Организация на метеорологичните наблюдения, Глава Х“, в Лингова (1972) и в Иванчева, Пеева (2005).

Таблица 2. Апаратура за измерване на различните радиационни компоненти

Table 2. Apparatus for measuring various radiation components

компонент на измерваната радиация	Наименование на прибора	(¹) Спектрален интервал (²) Ъгъл на приемано лъчение (³)Необходими аксесоари	Типичен външен вид на апаратурата
Пряка слънчева радиация Direct Solar Radiation S	Пирхелиометър Pyrheliometer	300 – 3 000 nm 5° слънчев „tracker“ за следене на сл. диск	
Сумарна слънчева радиация Global Solar Radiation G	Пиранометър Pyranometer	300 – 3 000 nm 180° 3 000 nm	
Разсеяна (или дифузна) слънчева радиация Diffuse Sky Radiation H	Пиранометър Pyranometer	300 – 3 000 nm 180° сенник – топка, обръч за засенчване от сл. диск	

Отразена слънчева радиация Reflected Global Radiation R	Пиранометър Pyranometer	300 – 3 000 nm 180° предпазител от неотразена радиация от малки ъгли	
Атмосферна радиация Atmospheric Radiation A	Пиранометър и пиргеометър Pyranometer and Pyrgometer	300 – 50000 nm 180°	
Земна радиация Emission of Ground Surface E	Пиранометър и пиргеометър Pyranometer and Pyrgometer	300 – 50000 nm 180° предпазител от неотразена радиация от малки ъгли	
Радационен баланс Radiation balance Q	Балансомер Net radiometer или 2 пиранометъра и 2 пиргеометъра 2 pyranometer and 2 pyrgometer	300 – 50000 nm 180° предпазител от неотразена радиация от малки ъгли	

В съвременната актинометрична апаратура, освен посочените в таблицата прибори, се използват и редица допълнителни устройства- аксесоари, които осигуряват покриването на съвременните изисквания за актинометрични наблюдения. По-важните от тях са:

- засенчващи уреди: топка, кръг, или диск, които предпазват сензора от пряка слънчева радиация
- тракери (tracker) – устройство което променя пространствената ориентация на сензора или на засенчващия уред, съгласно движението на слънчевия диск по небесната сфера
- вентилационни устройства, които намаляват радиационното нагряване на корпуса на актинометричните прибори.

Повече информация може да бъде намерена в McArthur (2005) и Lee (2009).

Поради голямата си биологическа активност, UV радиацията представлява специален интерес. Обикновените пиранометри не са в състояние да отчитат UV-C и част от UV-B радиацията. За целта се използват прибори със специален кварцов похлупак – UV метри. От друга страна, UV-C и по-голямата част от UV-B радиацията се поглъщат от атмосферата и не достигат до земната повърхност. За практически цели е въведен т.н. UV индекс – 12 степенна скала пропорционална на падащата на земната повърхност UV радиация [http:// en.wikipedia.org/wiki/ Ultraviolet_index](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet_index).

През последните десетилетия, най-съществено се промени начинът на отчитане и регистриране на радиационните компоненти и съответните отчитащи устройства. През 50-70-те години, обичайната практика бе изходното напрежение от сензора да се регистрира с галванометър и отчита от наблюдател в определени часове от денонощието, или да се прави непрекъснат запис на хартиена лента. В последствие, от отчетеното напрежение се изчисляват стойностите на съответната радиационна компонента. Изчисленията са правени на ръка, в по-късно време с компютърни програми, също стартирани „на ръка”. Записът на хартиената лента аналогично се обработва най-често ръчно, след като тя бъде снета от прибора. Повече информация по тези практики може да бъде намерена в „Организация на метеорологичните наблюдения, Глава X“, в Лингова (1972) и в Иванчева, Пеева (2005).

С развитие на компютърната техника, при съвременните наблюдения сигналът от сензора директно се въвежда в микрокомпютър – data logger. В последния е заложена калибровачна информация за съответния сензор и софтуер, който в реално време изчислява стойността на радиационната компонента. Измерванията са през зададени кратки интервали от време, на практика се получава непрекъсната регистрация. Резултатите може да се препращат в реално време на разстояние в приемащ център, или да се съхраняват в микрокомпютъра, докато бъдат извлечени от него.

Измерването на продължителността на слънчевото греене не се е променило съществено от описаното в „Организация на метеорологичните наблюдения, Глава X“. Новото е, че в пунктовете където има наблюдения на радиацията със съвременна апаратура, продължителността на слънчевото греене може лесно да бъде изчислено с голяма точност.

5. АКТИНОМЕТРИЧНИ НАБЛЮДЕНИЯ В БЪЛГАРИЯ

5.1. Хронология

Наблюденията на атмосферата се провеждат съгласно методологията на СМО и се изпълняват от националните метеорологични служби на съответната държава. За България това е НИМХ, който представлява България в СМО. НИМХ провежда наблюдения на атмосферата от 1890г. Наблюденията на слънчевата радиация започват от 1954г. в станция София и във високопланинска станция „Черни връх“. В течение на годините, наблюдателната мрежа търпи изменения - по причини от различен характер, през различни периоди от време, наблюденията са провеждани на различни места на територията на страната. Общо за страната, ако се изключат многобройните кампанийни наблюдения, регулярни наблюдения са водени в 12 пункта – Таблица 3. Към днешна дата, наблюдения се провеждат в 4 точки в страната – станциите „София“, „Плевен“, Сандански“ и „Ахтопол“. На фиг. 4 са показани уредите, в станция „София“.

Таблица 3. Пунктове и периоди на актинометрични наблюдения за територията на България

Станция	Период на наблюдения
София	1945- до сега
Черни връх	1954-1990
Плевен	1966-до сега
Варна	1960-1995
Пловдив	2005-2007
Асеновград	2008
Мусала	1957; 1960-1962; 1964-1966
Чирпан	1985-1993
Карнобат	1966; 1968-1968
Кърджали	1959; 1961-1964; 1966-1971; 1974-1977
Сандански	1986-1992; 2010- до сега
Ахтопол	2014- до сега

5.2. Организация на съвременните актинометрични наблюдения в НИМХ

Основните принципи в актинометрията остават непроменени, но конкретните прибори и отчитащи устройства съществено се усъвършенстват. В съответствие с това се променя организацията на наблюдения и обработване на получаваната информация. Състоянието преди 2010г. е описано в „Организация на метеорологичните наблюдения, Глава Х“, в Лингова (1972) и в Иванчева, Пеева

(2005). В края на 2009 и началото на 2010 година, повечето пиранометри в актинометричната мрежа бяха подменени. Преди използваните лентови записващи устройства бяха заменени с data lodger-и. Преустановени бяха ръчните наблюдения. В съответствие с това настъпиха съществени промени в дейностите свързани с актинометрията. В четирите станции - София, Плевен, Сандански и Ахтопол, без участие на наблюдатели се извършват непрекъснати наблюдения с пиранометри CMP-11 и CMP-3 на KippZonen, като информацията се съхранява в data lodger-и COMBILOG и SOLRAD. В станция „София“ се измерва сумарната и разсеяна слънчева радиация на хоризонтална повърхност (от които се определя и пряката слънчева радиация), както и отразена от земната повърхност слънчева радиация. В останалите пунктове се измерва сумарна слънчева радиация на хоризонтална повърхност

Специалисти от т.н. „мобилна група“ на департамент „Метеорология“ периодично снемат информацията от data lodger-ите. В последните се запамятват данни за кратки, различни при различните data lodger-и, времеви интервали. Това е първична информация, необходима за специализирани анализи, която не е необходима за обичайните практически нужди. Тази първична информация се подлага на качествен контрол от специалисти в департамент „Метеорология“ и се осреднява за час и за денонощие, след което се предава в базата данни на НИМХ.

Калибрирането на пиранометрите се извършва от специалисти от сектор „Измервания, метрология и информационни технологии“. За еталон се използват абсолютния актинометър Erppley-AHF и като вторичен еталон - биметален актинометър на Михелсон-Мартен. Резултатът от калибрирането е софтуер, който се въвежда в data lodger-a, обслужващ съответния пиранометър.



Фиг. 4.а. Пиранометър CMP 3 и уред CM 121 - Shadow Ring – уред за измерване на разсеяна слънчева радиация

Fig. 4.a. Pyramometer CMP 3 and CM 121 - Shadow Ring - a device for measuring scattered solar radiation



Фиг. 4.б. Пиранометър CMP11 уред за измерване на отразена слънчева радиация

Fig. 4.b. Pyramometer CMP11 instrument for measuring reflected solar radiation



Фиг. 4.с. Пиранометър CMP-3 – уред за измерване на сумарна слънчева радиация

Fig. 4.c. Pyramometer CMP-3 - a device for measuring total solar radiation

5.3. Съпътстваща активност

Освен актинометрични наблюдения, в НИМХ са разработени и се разработват и теоретични модели за определяне на компонентите на слънчевата радиация. Използват се статистически модели, оценяващи слънчевата радиация по астрономически, географски фактори и параметри на атмосферата, които влияят

на последната и за които НИМХ разполага с дългогодишни данни. По данни от спътникови наблюдения и разработена от НИМХ методика, слънчевата радиация се определя в реално време за цялата територия на България. Оперативно действащи числени модели за прогноза на времето също предоставят възможност за изчисляване и прогнозиране на слънчевата радиация. Различните модели се валидират с данните от актинометричната мрежа.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актинометрични наблюдения в България се провеждат в продължение на повече от 60 години. Актинометричната мрежа се актуализира, измервателната апаратура се заменя, осъвременява и калибрира с абсолютните актинометрични прибори, одобрени за използване от СМО. Разработени са подходи за определяне на компонентите на слънчевата радиация в точки от територията на страната, в които не се провеждат наблюдения. В резултат на тези активности, НИМХ разполага с многогодишни данни от актинометрични наблюдения и с богат инструментариум от теоретични подходи за изчисляване на компонентите на слънчевата радиация по цялата територия на България.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статията е реализирана с помощта на „Програма за подпомагане на младите учени в БАН“, договор ДФНП-28 / 20.04.2016г.

ЛИТЕРАТУРА

- Организация на метеорологичните наблюдения, Глава X, Издание на НИМХ.
Иванчева Ю, Д.Пеева (2005) Инструкция за актинометрични наблюдения
Лингова Ст. 1972 Ръководство за актинометрични наблюдения Печатница на Управление
Хидрология и метеорология, София, 1972г.
Lee C. 2009 Baseline surface radiation network. World Climate Research Programme. An overview of the requirements and operational issues derived from the BSRN operations manual version 2.1
McArthur L.J.B. 2005. World Climate Research Programme. Baseline Surface Radiation Network. Operational Manual, version 2.1, April 2005, WCRP-121, WMO/TD-N0.1274