

НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И
ХИДРОЛОГИЯ

Иван Василев Цоневски

**ИЗПОЛЗВАНЕ НА ЕКСТРЕМНИЯ
ПРОГНОСТИЧЕН ИНДЕКС ЗА ПРОГНОЗА
НА ОПАСНИ КОНВЕКТИВНИ БУРИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

За присъждане на образователна и научна степен

“Доктор”

в област на висше образование 4. Природни науки,
математика и информатика, професионално направление

4.4. Науки за Земята (Метеорология)

Научен ръководител

проф. д-р Валери Спиридонов

София, 2025

Дисертацията е с обем 135 страници. Състои се от увод, 5 глави, заключение, приноси и списък с цитираната литература, включваща 72 заглавия.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен научен семинар на департамент “Прогнози и информационно обслужване” в НИМХ, проведен на 14 април 2025 г.

Състав на научното жури:

проф. дн Нейко Нейков, НИМХ

доц. д-р Боряна Ценова, НИМХ

доц. д-р Гергана Герова, ФзФ на СУ

доц. д-р Елисавета Пенева, ФзФ на СУ

доц. д-р Ренета Димитрова, , ФзФ на СУ и НИГГ

СЪДЪРЖАНИЕ

I. Обща характеристика на дисертацията	5
Цел и задачи на дисертацията	5
Предмет и структура на дисертацията.....	7
II. Кратко изложение на дисертационния труд	10
Глава 1. Атмосферна конвекция.....	10
Глава 2. Екстремен прогностичен индекс	15
Глава 3. EFI и SOT за прогноза на опасна конвекция.....	21
Глава 4. Оценка на прогнозите на EFI за двата конвективни параметъра.....	26
Глава 5. Три обстановки на опасна конвекция над България	34
Заклучение	36
Приноси	40
Публикации на автора, свързани с дисертационния труд	44
Литература цитирана в автореферата	46

I. **Обща характеристика на дисертацията**

Цел и задачи на дисертацията

Конвекцията е един от основните процеси, които преразпределят влагата и топлината във вертикално направление, като едновременно с това възстановява равновесното състояние на атмосферата. При определени условия конвекцията води до развитието на мощни гръмотевични бури с определена степен на организация. Тези конвективни бури са свързани с редица **опасни метеорологични явления** (ОМЯ) като едра градушка, силни пориви на вятъра, торнада, опасни мълнии и интензивни валежи.

Всяка година мощните конвективни бури нанасят значителни щети в световен мащаб, включително и в Европа, а понякога водят и до човешки жертви (Chagnon et al., 2009; Púčik et al., 2019, Antonescu et al., 2017). Поради това, прогнозирането на конвекцията и свързаните с нея ОМЯ е от изключителна важност за националните хидро-метеорологични служби.

Специално за прогнозата на опасни и екстремни метеорологични явления ECMWF разработва т.нар. **Екстремен прогностичен индекс** (Extreme Forecast Index,

EFI), който сравнява кумулативната функция на разпределение на дадена ансамблова прогноза с тази на т.нар. моделен климат (Lalaurette, 2003).

Основната цел на настоящата дисертация е разработването на прогностичен продукт, който да приложи EFI концепцията в случай на опасна конвекция и по този начин да разшири прогностичния хоризонт на този тип явления, които в повечето случаи са обект на свръхкраткосрочните и краткосрочните прогнози до 24 часа.

Първата важна задача е намирането на подходящи метеорологични параметри, които да изпълняват следните два критерия: 1) да са подходящи за прогноза на опасна конвекция и 2) да могат да се използват като параметри за EFI.

Ефикасен и широкоизползван метод за прогноза на опасната конвекция е т.нар. метод на ingredientите (Doswell et al., 1996). При него съществуват необходими и достатъчни условия, при изпълнението на които даденото явление настъпва.

В настоящата дисертация са представени и валидирани продукти за прогнозата на опасните конвективни бури.

От направената статистическа оценка на предложените продукти става ясно, че те имат висока степен на дискриминация на опасните конвективни

обстановки, която се запазва и в средните срокове (след 3-тия ден) на прогнозата.

В дисертацията са представени практически указания за това как тези продукти могат да се използват. Посочени са основните предимства както и ограничения при оперативното прилагане на продуктите. Всичко това е постигнато с включването на много примери с реални обстановки на опасна конвекция.

Предмет и структура на дисертацията

Основен **обект** на представеното изследване са опасните конвективни бури и тяхното прогнозиране.

Предмет на дисертацията е разработването и практическото прилагане на прогностични продукти, които използват глобалния модел на Европейския център за средносрочни прогнози на времето (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF), и които могат да се използват за прогноза на опасни конвективни бури дори в средните срокове на прогнозата.

Дисертационният труд е с обем от 135 страници. Състои се от увод, 5 глави, заключение, приноси и списък на използваната литература.

В **Глава 1** е разгледана атмосферната конвекция като физично явление, основните форми на организация

на конвекцията и методи за нейното прогнозиране. Направен е и обзор на разпределението на опасните конвективни явления в Европа и България.

В **Глава 2** е дадена дефиницията на Екстремния прогностичен индекс (EFI) и е представен полуаналитичен метод за неговото изчисляване. Дефиниран е и индексът Отместване на опашките (англ. Shift Of Tails, SOT), който допълва EFI, като сравнява опашките на разпределение на прогнозата с тези на т. нар. моделен климат. Представена е и статистическата оценка на EFI, която се използва за оценяване на оперативните прогнози в ECMWF включително промените, направените в близките няколко години.

Глава 3 въвежда предложените в тази дисертация два нови EFI/SOT параметъра за прогноза на опасните явления, свързани с мощната конвекция – енергия на неустойчивост CAPE и параметърът CAPE-shear. В тази глава са разгледани също и някои особености, които трябва да се вземат предвид при интерпретацията на предложените продукти. Използвани са и примери, с които да се онагледят практическото използване на новите продукти. От оперативното въвеждане на тези два параметъра през 2016 г. са направени промени, с цел подобряване на продуктите; те също са описани в тази глава. Разгледани са и

техническите аспекти, свързани с оперативното внедряване на двата параметъра.

В **Глава 4** е представена статистическа оценка на двата оперативни продукта, от които става ясно високата им дискриминативна способност да различават обстановките с опасни конвективни бури от останалите случаи. Разгледана е и субективна оценка на продуктите, извършена като част от тяхното тестване в реални условия в рамките на кампаниите организирани от Европейската лаборатория за опасни бури (European Severe Storms Laboratory, ESSL).

В последната **Глава 5** са разгледани три случая на опасна конвекция над България и как двата нови продукта биха могли да се използват за тяхното прогнозиране.

Резултатите от въвеждането на новите продукти и тяхната оценка са представено в **ЗаклЮчението** и **Приносите**.

II. Кратко изложение на дисертационния труд

В **Увода** е изложена актуалността на проблема за прогнозата на конвекцията и свързаните с нея опасни метеорологични явления – торнада, едра градушка, силни пориви на вятъра, опасни мълнии и интензивни валежи. Представена е концепцията за използване на ансамбловия Екстремен прогностичен индекс (EFI) за прогноза на екстремни метеорологични явления. Дефинирана е целта на дисертацията да приложи EFI за прогноза на обстановки с мощни конвективни бури за разширяване на прогностичния хоризонт.

Глава 1. Атмосферна конвекция

В тази глава е разгледана **конвекцията** като физичен процес. Въведени са основните понятия свързани с дълбоката влажна (мощна) конвекция. Едни от най-важните величини са **енергия на неустойчивост** (CAPE) и **конвективното потискане** (CIN). От практиката е добре известно, че колкото по-организирана е конвекцията, толкова по-продължителни могат да бъдат опасните явления и толкова по-големи площи могат да бъдат засегнати. В тази връзка са разгледани основните форми на **организация на конвекцията**:

- **линейната организация** е най-често срещаната форма на организация, асоциирана с т. нар. шквалови линии – конвекцията се развива по гранични повърхности, свързани с механизма на вертикално издигане, а опасните явления рядко достигат такива екстремни форми като например формирането на торнада;

- **мезомащабните конвективни системи** се характеризират с големи пространствени мащаби (от порядъка на стотици km), които са дългоживущи (от порядъка на 6 часа и повече), понякога водят до формирането на устойчива мезомащабна циркулация – с мезомащабните конвективни системи са свързани такива мащабни опасни явления като деречото;

- **суперклетките** са пример за високоорганизирана конвекция, при които се образува мезоциклон със своята собствена динамика; този тип организация е по-рядка, но с нея са свързани едни от най-екстремните опасни конвективни явления като силни торнада и гигантска градушка (с размер на градовите зърна на 10 cm в диаметър).

В тази глава са разгледани и основните **опасни метеорологични явления**, свързани с конвекцията, а в

Таблица 1 са дадени и критериите, които се използват в Европа и САЩ за тяхното определяне.

	Критерии	
	Европа	САЩ
Торнадо	всяко	всяко
Градушка	диаметър на градовите зърна поне 2 см или по дребни градови зърна, но образуващи слой дебел поне 2 см	диаметър на градовите зърна поне 2.54 см (1 инч)
Силни пориви на вятър	над 25 м/сек или вятър, който причиняват щети еквивалентни на щетите от пориви със скорост 25 м/сек	над 25.9 м/сек (58 mph)
Силен дъжд	количество на дъжда $P[mm]$, което зависи от неговата продължителност $t[min]$ в съответствие с формулата: $P[mm] \geq 2\sqrt{5t[min]}$ или дъжд, който причинява значителни щети	не се включва като критерий за опасна конвекция
Мълнии	Мълнии, които причиняват значителни повреди по самолети, превозни средства, кораби и други наземни обекти или които причиняват наранявания или смърт на хора	не се включва като критерий за опасна конвекция

Таблица 1. Критерии за определяне на различните опасни явления, свързани с конвекцията, използвани в САЩ (източник Storm Prediction Center, SPC) и в Европа (източник European Severe Storms Laboratory, ESSL).

В тази глава е разгледан **ингредиентният метод** за прогноза, според който за развитието на мощна конвекция са необходими и достатъчни следните 3 условия (Doswell et al., 1996):

- атмосферата трябва да се намира в условие на статична неустойчивост – оценявана чрез вертикалния температурен градиент;
- наличие на висока влажност в приземния слой - оценявана често чрез специфичната влажност или точката на оросяване;
- процес, който да издигне въздушната частица до нейното ниво на свободна конвекция LFC – оценявана чрез наличието на орографски препятствия, конвергентни линии и други циркулационни особености като развитието на бризова циркулация, наличието на разделителни повърхности и т. н.

Ако някое от тези три условия липсва, мощна конвекция не е възможна и не се развива.

Промяната на скоростта и посоката на вятъра във вертикално направление или т. нар. срез на вятъра е много важен фактор, който определя степента на организация на конвекцията (Newton, 1963; Brooks et al., 1994a), а оттам и на нейната екстремност. От една страна големият срез на вятъра потиска развитието на конвекцията тъй като редуцира възходящите движения

(Brooks and Wilhelmson, 1993), а от друга подпомага развитието на нови конвективни клетки чрез взаимодействието между съществуващите възходящи потоци и промяната на вятъра с височината (Rotunno and Klemp, 1982), както и чрез преразпределението на хидрометеорите в конвективните облаци (Brooks et al., 1994b). В оперативната практика като мярка за среза на вятъра се използва векторната разлика на вятъра на две вертикални нива в атмосферата.

Комбинацията на CAPE и среза на вятъра в слоя 0-6 km се оказва доста добър индикатор за определянето на обстановките свързани с интензивни гръмотевични бури. Направените изследвания (напр. Brooks et al., 2003; Růčik et al., 2015) показват, че честотата на опасните конвективни явления нараства с повишаването на CAPE и на среза на вятъра в слоя 0-6 km.

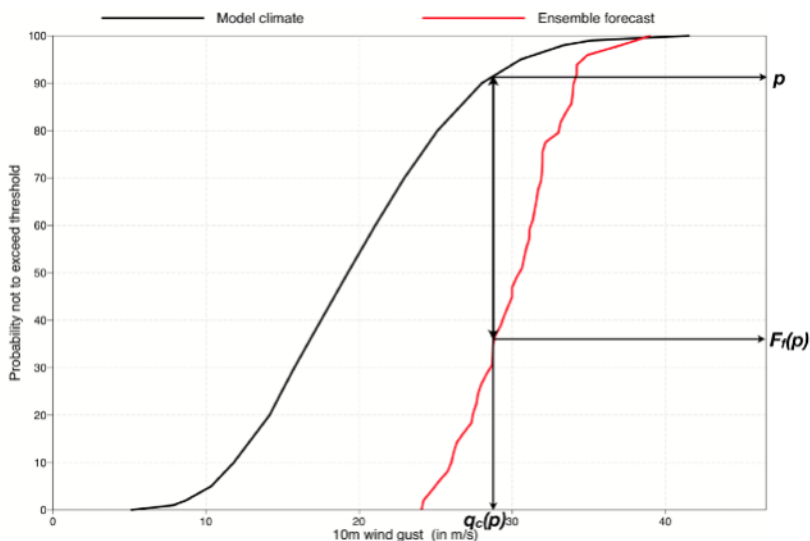
В тази глава накратко е разгледано и разпределението на опасните конвективни явления в Европа и България, от което става ясно, че опасните конвективни явления са често срещани в Европа, причиняват значителни щети ежегодно и представляват истинско предизвикателство за прогнозите на времето.

Глава 2. Екстремен прогностичен индекс

В тази глава е дадена дефиницията на Екстремния прогностичен индекс (англ. Extreme Forecast Index, EFI), който представлява мярка за екстремността на една ансамблова прогноза спрямо даден моделен климат (F. Lalaurette, 2003). Математическата формулировка на EFI е претърпяла няколко промени и към настоящия момент се използва следната формула:

$$EFI = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{p - F_f(p)}{\sqrt{p(1-p)}} dp \quad ,$$

където с p са означени вероятностите от кумулативната функция на разпределение на моделния климат, а $F_f(p)$ са съответстващите им вероятности от кумулативната функция на разпределение на ансамбловата прогноза (Фиг. 1). В тази формулировка на EFI разликата $p - F_f(p)$ дава в каква степен дадената ансамблова прогноза е по-различна от моделния климат. Тази разлика е 0, само ако $p = F_f(p)$, т. е. прогнозната вероятност за стойността на разглеждания метеорологичен параметър да бъде по-малка от климатичния процентил $q_c(p)$ е същата, каквато е климатичната вероятност. Тегловният член в знаменателя



Фиг. 1. Кумулативните функции на разпределение на моделния климат (черната крива) и на ансамбловата прогноза (червената крива) за поривите на вятъра на 10 m.

на подинтегралната функция $\sqrt{(p(1-p))}$ е квадратична функция на p и следователно има максимум около медианата ($p = 0.5$) на климатичното разпределение и минимум в двата му края ($p = 0$ или $p = 1$). Това означава, че този тегловен член прави EFI почувствителен в разлики в опашките между прогнозното и

климатичното разпределение. Мащабиращият член $2/\pi$ ограничава възможните стойности на EFI в интервала $[-1,1]$. Колкото по-екстремна е една ансамблова прогноза, толкова стойностите на EFI клонят към -1 или 1, като знакът (+ или -) се определя от коя страна на климатичното разпределение е това отклонение. Например за температурата, стойности на EFI близки до -1 са индикация за екстремно студено време, а ако тези стойности са близки до +1 прогнозата е съответно за екстремно топло време.

Както се вижда от формулата за EFI, подинтегралната функция има 2 сингулярни точки в двете граници на интеграла (0 и 1). Поради това първоначално е приложен числен метод за решаване на интеграла, но впоследствие е заменен с полуаналитичен метод, който е по-точен и той също е представен в тази глава.

При изчисляването на EFI всяка прогноза, която надвишава максималната или минималната стойност на моделния климат, се взима с максимално тегло и информацията, колко далеч е тя от тези екстремуми се губи. За да се адресира това ограничение на EFI, се въвежда един допълнителен индекс наречен Отместване на опашките (Shift Of Tails, SOT; E. Zsoter, 2006). Този индекс показва колко екстремна би могла да бъде една ансамблова прогноза чрез сравняване на опашките на кумулативните функции на разпределение на прогнозата

и на моделния климат. В общия случай съществуват два индекса, по един за всяко едно от опашките на разпределенията и се изчисляват съответно по формулите:

$$SOT(90) = \frac{Q_f(90) - Q_c(99)}{Q_c(99) - Q_c(90)}$$

за горната опашка на разпределенията и

$$SOT(10) = \frac{Q_f(10) - Q_c(1)}{Q_c(1) - Q_c(10)}$$

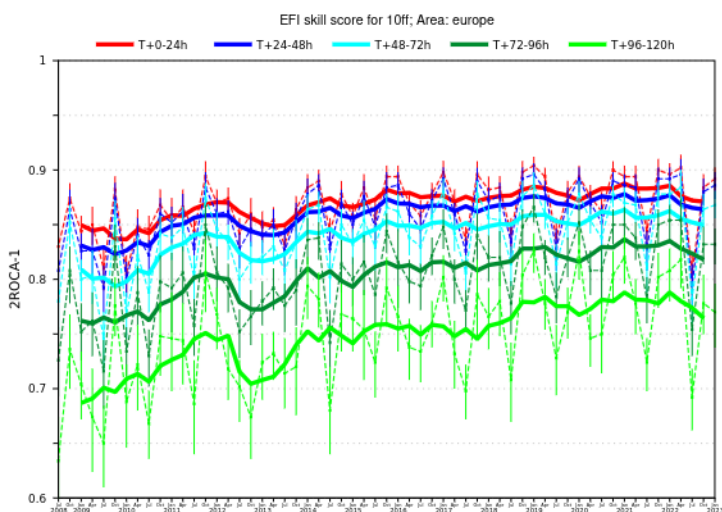
съответно за долната опашка. В тези формули с $Q_c(1)$, $Q_c(10)$, $Q_c(90)$ и $Q_c(99)$ са означени съответно първият, десетият, деветдесетият и деветдесетият и девети процентил на кумулативната функция на разпределение на моделния климат, а с $Q_f(10)$ и $Q_f(90)$ – десетият и деветдесетият процентил на кумулативната функция на разпределение на ансамбловата прогноза. На практика единствените метеорологични параметри, за които се изчислява SOT, и имат двата индекса са температурните параметри. Всички останали имат само $SOT(90)$. От тези формули е ясно, че когато $SOT > 0$ поне 10% от всички членове на ансамбловата прогноза са извън климатичното разпределение, т. е. прогнозират екстремни стойности на съответния метеорологичен елемент. Колкото по-големи са положителните стойности

на SOT, толкова по-екстремни са тези 10% от ансамбъла. Индексът $SOT(90)$ не е дефиниран при $Q_c(90) = Q_c(99)$, за да се избегне деление на 0. И за двата индекса EFI и SOT, моделният климат е от изключителна важност. В оперативната практика за дефиниране на моделния климат се използва ансамблова прогностична система от 11 члена, която използва оперативната версия на модела за изчисляване на прогнози през последните 20 години. В тази глава е описаната настоящата конфигурация на моделния климат както и промените през изминалите години.

Както за всеки оперативен прогностичен продукт, така и за EFI се прави оценка на неговото качество с помощта на подходящи статистически оценъчни мерки. За EFI като оценъчна мярка се използва площта под ROC-кривата (ROCA), която показва в каква степен EFI успешно идентифицира екстремните явления. ROCA се изменя от 0 до 1, а за прогнозите, които имат някаква стойност $ROCA > 0.5$. За верификацията (статистическата оценка) на EFI се използва формулата:

$$\begin{aligned}
 EFI_skill_score &= \frac{score_{forecast} - score_{reference}}{score_{perfect_forecast} - score_{reference}} = \\
 &= \frac{ROCA_{forecast} - 0.5}{1 - 0.5} = 2ROCA_{forecast} - 1
 \end{aligned}$$

Верификация на EFI се прави оперативно за 3 параметъра: средноденонощната температура, 24-часовия валеж и 24-часовия осреднен вятър. Верификацията за вятъра е една от допълнителните верификационни мерки, по които се прави оценка на прогностичната система на ECMWF (Фиг. 2).



Фиг. 2. Оценъчната мярка 2ROCA-1 на EFI за средния вятър за различни срокове на прогнозата. Плътните линии представляват плъзгащото средно на оценката с период на осредняване 4 сезона.

Системата за оценка на EFI беше изцяло обновена, което отвори нови възможности за по-цялостен мониторинг на прогнозите. На първо място кодът беше пренаписан от Fortran на Python, което значително облекчава неговата поддръжка и промяна при необходимост. Оценката беше разширена за още два параметъра – минималната и максималната температура. Климатичният период беше удължен от 15 на 20 години. Понастоящем оценка за EFI се прави не само за Европа, а и за други части на света както и глобално. Верификацията беше разширена и за месечните оперативни прогнози на ECMWF.

Глава 3. EFI и SOT за прогноза на опасна конвекция

Дълбоката влажна конвекция се развива при наличието на трите необходими и достатъчни условия (НДУ) както беше описано в Глава 1. Енергията на неустойчивост CAPE отчита две от трите НДУ – влагата и неустойчивостта. В тази глава са разгледани различните видове CAPE от гледна точка на избора на въздушната

частица, както и промените за изчисляването на CAPE в модела на ECMWF. След последните промени и оптимизации CAPE се изчислява от виртуалната потенциална температура, което е в съответствие с теорията на частицата, използвана широко за анализ и прогноза на атмосферната конвекция. За целите на EFI се използва CAPE на най-неустойчивата частица – MUCAPE – като след това за изчисляването на EFI се взема максималната ѝ стойност за 24-часов период получена от едночасовите моментни стойности на MUCAPE.

В глава 1 беше споменато, че изменението на вятъра във вертикално направление (срезът на вятъра) е необходимо условие за организация на конвекцията, което е свързано с едни от най-опасните и мащабни конвективни обстановки. В научната литература има описани няколко индекса, които включват среза на вятъра, като например bulk Richardson number (Weisman and Klemp, 1982) или Supercell Composite Parameter (Thompson et al., 2003), които представляват комбинация на CAPE и срезът на вятъра. Не всички тези параметри са подходящи за изчисляване на EFI, а само тези, които представляват продукт на CAPE и среза на вятъра. За нуждите на прогнозите на обстановките за опасни конвективни бури, в ECMWF след тестване беше въведен следният CAPE–shear индекс, подходящ за изчисляване на EFI:

$$CAPE - shear = W_{925}^{500} \sqrt{CAPE},$$

където W_{925}^{500} е векторната разлика на вятъра на нива 925 и 500 hPa, т.е. разновидност на т. нар. deep-layer shear, а CAPE е енергията на неустойчивост.

Така в оперативната практика бяха въведени два EFI параметъра – CAPE и CAPE-shear – за прогноза на обстановки с опасни конвективни бури.

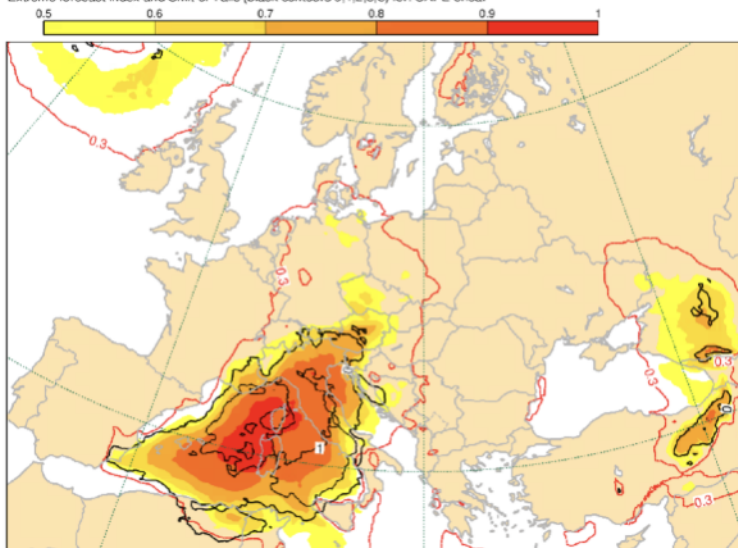
При интерпретацията на тези продукти трябва да се има предвид, че EFI е индекс, свързан с моделния климат. Идеята е, че ако една прогноза е екстремна спрямо моделния климат, то и времето на даденото място би било екстремно. В тази връзка обаче трябва да се подчертае, че екстремното разпределение на CAPE и CAPE-shear не винаги се материализира като развитие на опасни конвективни бури, например при ниски екстремни стойности на CAPE в моделния климат, които не са достатъчни за развитие на дълбока влажна конвекция, като например арктичните райони през зимата. От друга страна в други райони на света екстремните стойности на CAPE може да са много високи и там не са нужни чак толкова високи стойности на EFI, за да се наблюдават опасни конвективни бури като например големите равнини в САЩ.

Друг важен фактор при интерпретацията на EFI е фактът, че третото НДУ за развитието на конвекцията, а

именно механизмът на издигане до нивото на свободна конвекция, не се отчита в предложените параметри. В резултат съществува сценарий, при който атмосферата е силно неустойчива, но при наличието на CIN и липса на достатъчно мощен издигащ механизъм за неговото преодоляване, конвективни бури не се развиват. По тази причина EFI е добре да се използва в комбинация с други подходящи прогностични продукти като например вероятността за валеж или вероятността за мълнии, които са налични от модела на ECMWF.

В тази глава са представени и два случая на обстановки с деречо (пътеки с изключително силни пориви на вятъра), с които е показано прилагането на EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear за средносрочна прогноза за такива мащабни опасни процеси. В обстановката от 18 август 2022 г., когато деречо се развива от о. Корсика до Чехия се наблюдават изключително високи стойности на EFI и SOT за CAPE-shear над Средиземноморието 5 дни преди събитието (Фиг. 3). Втората обстановка е на деречо над Полша от 11 август 2017 г., където отново се наблюдават високи стойности на EFI и SOT за CAPE-shear в засегнатите райони. С този случай са онагледени и други сценарии, като например обстановка с low CAPE – high shear над Австрия, при която също се развива опасна конвекция както и обстановка с високи стойности на CAPE, но и високи стойности на CIN над Централното

Sun 14 Aug 2022 00UTC @ECMWF expver = 1 VT: Thu 18 Aug 2022 00UTC - Fri 19 Aug 2022 00UTC 96-120h
 Extreme forecast index and Shift of Tails (black contours 0,1,2,5,8) for: CAPE-shear



Фиг. 3. EFI и SOT за CAPE-shear – прогноза от 00 UTC на 14 август валидна за 10 август 2022 г.

Средиземноморие при липса на издигащ механизъм, което възпрепятства развитието на конвекция.

В третата разгледана обстановка с опасна конвекция над Италия и Гърция на 10 юли 2019 г. е направена връзка между EFI и кумулативните функции на разпределение, с които всъщност се дефинират и двата индекса – EFI и SOT.

След оперативното внедряване на EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear са направени редица промени с цел подобрения на продуктите като например замяна на моментните стойности на параметрите през 6-часови интервали от време с максималните им стойности в тези периоди, получени от едночасовите моделни данни. Замяната на старата апроксимация на CAPE в модела с новия параметър MUCAPE също е част от оптимизацията на тези продукти.

Техническите аспекти по внедряването и поддръжката на тези оперативни продукти също са описани в тази глава, които на практика са в непрекъснат цикъл на промени и оптимизации, последната от които е замяната на изчислителните кодовете от Fortran на Python, с които се цели по-ефикасно използване на компютърните ресурси на ECMWF.

Глава 4. Оценка на прогнозите на EFI за двата конвективни параметъра

Подобно на оперативното верифициране на EFI и за двата нови параметъра се използва площта под ROC-кривата (ROCA) като оценъчна мярка на прогнозите с цел да се оцени способността на прогнозата да различава екстремните от неекстремните явления. За разлика от верификацията на другите EFI параметри обаче, за

конвекцията се използват директно данните за регистрираните опасни конвективни явления, представени върху мрежата на модела.

Верификацията на EFI за конвекцията е извършена досега за два географски района – Европа и САЩ – за които има необходимите наблюдателни данни. За Европа са използвани данните за регистрираните опасни конвективни явления взети от базата данни ESWD (European Severe Weather Database) на Европейската лаборатория за опасни бури (European Severe Storms Laboratory, ESSL), която съдържа информация за регистрираните торнада, едра градушка, силни пориви на вятъра, интензивни валежи и опасни мълнии при развитието на мощни гръмотевични бури (Dotzek et al., 2009a). За по-пълно покритие на целия континент са използвани и данните от британската мрежа за регистрация на мълниите Arrival Time Difference Network (ATDnet; Anderson and Klugmann, 2014). От данните на ATDnet е изчислена плътността на мълниите по метода, предложен от Anderson and Klugmann (2014). За територията на САЩ са използвани данните за регистрираните опасните конвективни явления (торнада, силен вятър и градушка) от Storm Prediction Center (SPC).

Статистическата оценка е направена за топлото полугодие (април-септември), когато се наблюдават обичайно опасните конвективни явления. Оценени са

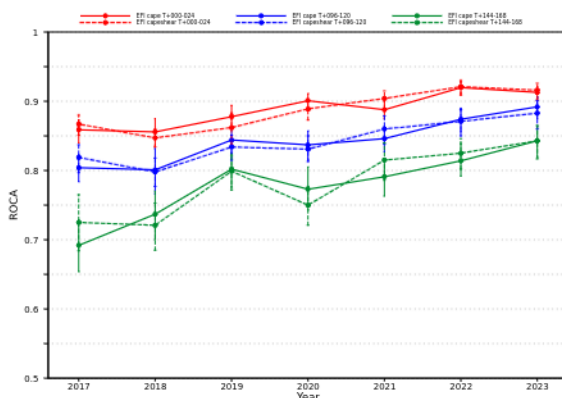
всички оперативни прогностични срокове от T+0-24h до T+156-180h. Данните от наблюденията – регистрираните опасни явления и мълнии – са интерполирани върху октаедърна редуцирана Гаусова мрежа O640 на модела по метода на най-близката мрежова точка. Включени са само мрежовите точки над сушата (за които числената маска “суша-море” > 0.5).

За изключване на районите с неустойчива атмосферна стратификация, но липса на всички условия за инициране на конвекцията, се използва прогнозата за вероятността за валеж над 1 mm/24h. В мрежовите точки, където тази вероятност е под 5%, EFI се нулира.

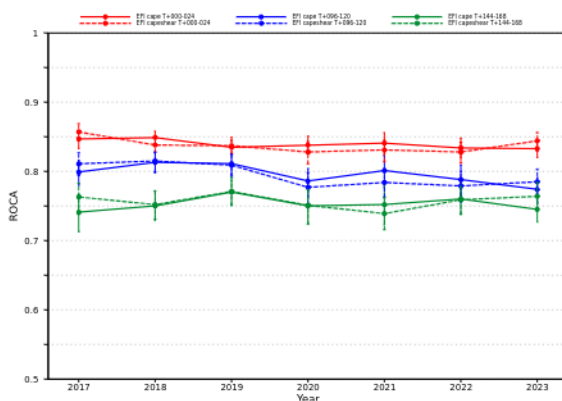
Фиг. 4 показва резултатите за ROCA получени за Европа и САЩ. Верификацията е извършена като са взети предвид само регистрираните торнада, едра градушка и силен вятър, които са налични и за двата района. EFI показва високи стойности на ROCA, т.е. много добра способност да разграничават случаите с опасна конвекция от останалите случаи дори в средносрочен прогностичен план. За Европа се наблюдава възходящ тренд на ROCA, докато за САЩ липсва такъв.

За Европа данните от ESWD могат да се съчетават с тези от ATDnet. От данните за плътността на мълниите една гръмотевична буря се счита за опасна, ако надвишава 95-ия процентил от разпределението на плътността на мълниите над Европа в периода април–

а)



б)



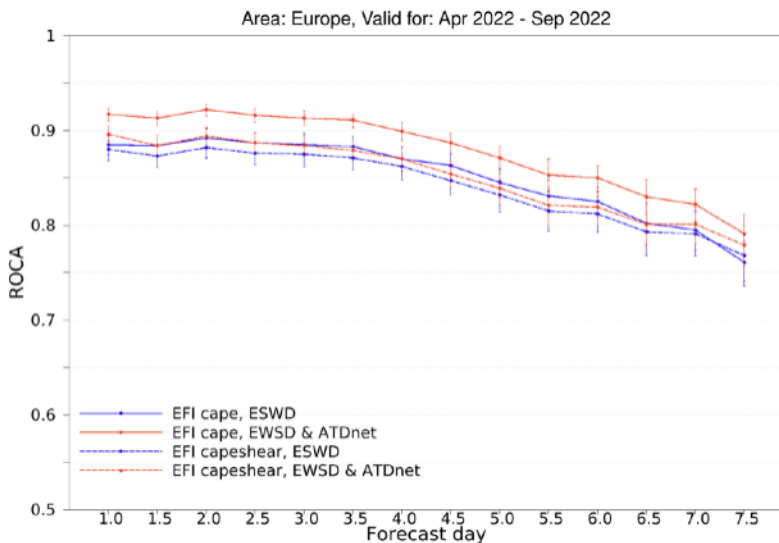
Фиг. 4. ROCA за CAPE и CAPE-shear EFI над а) Европа и б) САЦ за 3 прогностични стъпки $T+0-24h$, $T+96-120h$ и $T+144-168h$. Вертикалните линии показват 90% доверителен интервал, получен чрез *bootstrapping* с помощта на 1000 случайно избрани извадки.

септември 2015 г.

Фиг. 5. показва, че ROCA за EFI е по-висока при използване на комбинираните данни от ESWD и ATDnet, при което се постига и по-пълно покритие на засегнатите райони от опасна конвекция. Разликите в ROCA между CAPE и CAPE-shear EFI се дължи отчасти на различния тип конвективни процеси, които те отчитат от двата параметъра – CAPE-shear EFI се фокусира повече на добре организираната мощна конвекция, където срезът на вятъра играе съществена роля и която от своя страна води до по-интензивни явления, но от друга страна силният срез на вятъра има и потискащ ефект при иниципирането на конвективните бури.

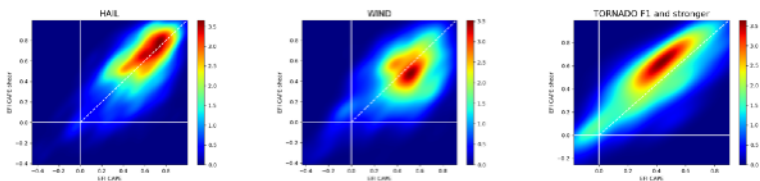
Фиг. 6 показва, че случаите с едра градушка се наблюдават при силна неустойчивост с високи стойности на CAPE и следователно мощни възходящи движения и при висока организация на конвекцията с големи стойности на среза на вятъра. Силните пориви на вятъра се наблюдават при по-високи стойности на CAPE EFI (Фиг. 6), но има в втори по-слабо изразен максимум при по-високо CAPE-shear EFI. За торнадата със сила F1 и по-голяма по скалата на Фуджита CAPE-shear EFI е по-добър индикатор от CAPE EFI (Фиг. 6).

Тестове на CAPE и CAPE-shear EFI и SOT бяха направени по време на лятната кампания на



Фиг. 5. Площта под ROC кривата за CAPE EFI (плътните линии) и CAPE-shear EFI (пунктираните линии) при 2 различни редици от данни – едната, съдържаща само опасните конвективни явления от ESWD (в синьо), а другата е комбинация от ESWD и данните за мълните от ATDnet (в червено). Вертикалните линии показват 90% доверителен интервал, получен чрез *bootstrapping* с помощта на 1000 случайно избрани извадки.

Европейската лаборатория за опасни бури (ESSL). По време на тестването беше установено, че:



Фиг. 6. Разпределение на случаите с едра градушка, силни пориви на вятъра и торнада със сила F1 и нагоре над Европа според стойностите на CAPE EFI (по абцисата) и CAPE-shear EFI (по ординатата) за стъпка T+12-36h.

- в прогностичната практика трябва да се използват EFI и SOT и за двата параметъра едновременно, за да има по-голям шанс да се обхванат обстановките с опасна конвекция, които могат да се развият при различни метеорологични условия (например опасни конвективни бури могат да се развият и при обстановки със слаб срез на вятъра, но достатъчно мощна неустойчивост);
- за правилната интерпретация на EFI и SOT трябва да се имат предвид и стойностите на самите параметри CAPE и CAPE-shear и как те се отнасят към климатичните им стойности (например мощна конвекция не може да се развие при много ниски стойности на $\text{CAPE} < 100 \text{ J/kg}$);

- едни и същи стойности на CAPE и CAPE-shear могат да водят до съвсем различна степен на екстремност показана чрез EFI и SOT, но това не означава по-голям или по-малък интензитет на опасните конвективни явления, тъй като EFI и SOT са функция и на моделния климат, който е различен за различните райони по Земяното кълбо;

- високи стойности на EFI и SOT не означава, че ще се развие мощна конвекция, което зависи и от механизма на издигане на въздушната частица и дали той ще е достатъчен за достигане на нивото на свободна конвекция.

Оказва се също така, че SOT е много по-слабо познат продукт в сравнение с EFI. Една от причините е, че SOT беше въведен като оперативен параметър много по-късно от EFI, но въпреки това този факт показва, че при обучението на експертите трябва да се наблегне върху тази диспропорция.

По време на тестването беше отбелязано, че EFI и SOT дават характеристика на въздушната маса над даден район по отношение на конвекцията и са подходящи при оценка на обстановката над сравнително големи територии. Ансамбловия характер на тези продукти ги прави също така подходящи за средносрочно прогнозиране на опасността от мощни конвективни бури.

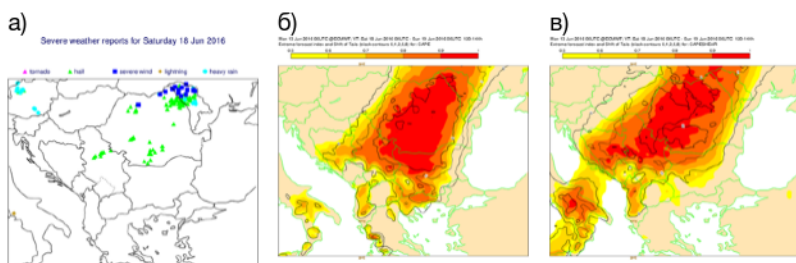
EFI и SOT могат понякога да предупредят за очаквани мощен конвективен процес 5-7 дена преди развитието му.

Глава 5. Три обстановки на опасна конвекция над България

Първата обстановка е свързана с мощен градов процес, засегнал столицата София, с големина на градовите зърна до 10 cm в диаметър и съпроводен със силни пориви на вятъра (L. Bocheva et al., 2018). Има една жертва вследствие на паднало дърво и огромни материални щети. Разгледаните в тази дисертация продукти не са били налични по време на тази обстановка, но ако те биха били на разположение на синоптиците, те биха дали индикации за опасна конвекция в средносрочен план особено за индекса CAPE-shear.

Вторият случай е на мощна конвекция над Балканския полуостров, развила се на 18 юни 2016 г. EFI и SOT достигат необичайно високи стойности още 6-7 дни преди този процес (Фиг. 7). Мощна конвекция се развива над Румъния, Молдова и част от Сърбия с много съобщения за едра градушка, поройни валежи, а в Северна Румъния и Северна Молдова и за силни пориви на вятъра (Фиг. 7). Интересното в този случай е, че над България, въпреки голямата неустойчивост, мощна

конвекция не се развива. Съчетанието на твърде голям срез на вятъра и липсата на достатъчно мощен издигащ механизъм поради отдалечеността от фронталната зона водят до невъзможността за развитие на конвективни бури, въпреки че конвекция се опитва да се развие над западната част на Стара планина.



Фиг. 7. а) Регистрираните опасни конвективни явления в ESWD – едра градушка (в зелено), силни пориви на вятъра (в синьо) и интензивни валежи (в цианово), б) EFI и SOT за CAPE, T+120-144h и в) EFI и SOT за CAPE-shear, T+120-144h.

Третата обстановка е на суперклетъчна конвекция, засегнала Северозападна България на 15 май 2018 г. Мощната буря оставя дълга около 230 km пътека от опасни явления, включващи едра градушка, силни пориви на вятъра, интензивни валежи и силна гръмотевична дейност. Максималният интензитет на явленията е в района на Плевен, където е обявено частично бедствено положение. При тази обстановка EFI и SOT достигат

значително по-високи стойности за CAPE-shear отколкото за CAPE, което показва, че вертикалният градиент на вятъра е от определяща роля за организацията на конвекцията, а оттам за интензитета на опасните явления и голямата площ, която те покриват.

Заключение

Екстремният прогностичен индекс (EFI) и индексът Shift Of Tails (SOT) са оперативни продукти на Европейския център за средносрочни прогнози на времето (ECMWF), които сравняват дадена ансамблова прогноза със съответния моделен климат и по този начин дават информация за екстремността на очакваните явления на времето. В настоящата дисертация са представени EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear и тяхното използване при прогнозиране на опасни конвективни бури.

В дисертацията е описано практическото прилагане на тези два нови продукта и добавянето им в оперативния каталог на ECMWF. В резултат на направения анализ е установено, че тези продукти се допълват и следва да се използват заедно при прогнозата на опасните конвективни явления. EFI и

SOT за CAPE и CAPE-shear са свързани с климатичните характеристики на тези два параметъра и това трябва да се вземе предвид при интерпретация на прогнозите.

Направена е статистическа оценка на тези прогностични продукти като прогнозите са сравнени с регистрираните опасни конвективни явления над Европа и САЩ. Площта под ROC кривата (ROCA) е използвана като оценъчна мярка за способността на прогнозата да разделя случаите на опасна конвекция от останалите случаи. Стойностите на ROCA остават високи (значително над праговата стойност от 0.5) за средносрочните прогнози (между третия и седмия ден на прогнозата). Този факт прави така представените продукти подходящи при прогнозата на мощни конвективни бури в средносрочен план, което си остава голямо предизвикателство в оперативната практика за прогнози на времето.

В дисертацията са разгледани конкретни случаи на опасни конвективни обстановки, с които са показани важни аспекти на практическото

прилагане на EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear. Така например е наблегнато, че тези продукти не включват важен ингредиент за формирането на гръмотевичните бури какъвто е механизмът за издигане на въздушните частици до нивото на свободна конвекция. Предложено е използването на други ансамблови продукти като например вероятността за валеж или вероятността за мълнии, за да се изключат районите с високи стойности на конвективните EFI и SOT при липса на условия за зараждане на гръмотевичните бури.

EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear следва да се използват заедно с останалите продукти за прогноза на мощна конвекция и особено с вертикалните профили на атмосферата, за да се отчетата особеностите във вертикалното разпределение на температурата, влагата и вятъра, които са от изключително значение за развитието на гръмотевичните бури. ECMWF разполага с оперативен продукт, който представя вертикалните профили от ансамбловата прогноза.

България е страна в Югоизточна Европа, където конвекцията е основен процес особено през топлото полугодие. Всяка година при развитието на мощни гръмотевични бури се регистрират опасни метеорологични явления като градушки, силни пориви на вятъра, интензивни валежи, мълнии и дори торнада, които представляват сериозна опасност за обществото и остават сериозно предизвикателство за прогнозите на времето. Представените в тази дисертация EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear допълват набора от продукти, които да подпомогнат прогнозата на опасните конвективни обстановки и да разширят прогностичния хоризонт.

С повишаване на вертикалната, хоризонталната и времевата разделителна способност на числения модел на ECMWF и с бързото навлизане на изкуствения интелект в метеорологичните прогнози се откриват нови възможности за по-нататъшно прилагане и подобряване на представените прогностични продукти.

Приноси

- Към съществуващите параметри за Екстремния прогностичен индекс (EFI) са добавени два нови параметъра – енергията на неустойчивост (CAPE) и комплексният индекс CAPE-shear, представляващ комбинация от CAPE и вертикалния срез на вятъра – за целите на прогнозата на обстановки с опасни конвективни бури особено в средносрочен план (след втория ден на прогнозата), приложими за цялото Земно кълбо.
- За нуждите на тези нови прогностични продукти, беше ревизирана и значително подобрена изчислителната процедура, по която се получават CAPE и CIN от глобалния модел на ECMWF, за да бъде в съответствие с използваните практики в оперативното прогнозиране на времето. Освен това индексът CAPE-shear беше кодиран в модела на ECMWF и включен в каталога на оперативните параметри, които се изчисляват и разпространяват в реално време за нуждите на прогнозата на времето. Срезът на вятъра в

различни атмосферни слоеве също беше добавен към оперативните графични продукти на ECMWF.

- Извършено е валидиране на Екстремния прогностичен индекс за CAPE и CAPE-shear над Европа и САЩ и е показано, че тези продукти имат висока прогностична стойност при предсказване на условията за обстановките с опасни конвективни бури в краткосрочен и средносрочен план.
- Двата прогностични продукта – EFI и SOT за CAPE и CAPE-shear – са внедрени като оперативни продукти на Европейския център за средносрочни прогнози за времето (ECMWF), което включва тяхното изчисляване, архивиране, разпространение в реално време и обучение на експертите и потребителите за тяхното използване.
- Осъществено е задълбочено тестване на тези два продукта върху конкретни обстановки с опасни конвективни бури, както в реално време, така и ретроспективно и на базата на направените анализи са предложени и реализирани промени в

продуктите с цел повишаване на тяхната прогностична стойност. Това включва изчисляването, архивирането и използването на два нови параметъра в числения модел на ECMWF, които носят по-пълна информация за максималните стойности на CAPE и CAPE-shear в рамките на прогностичния срок.

- В рамките на цялостния процес по създаването и разпространяването на нови прогностични продукти от ECMWF с фокус върху прогнозата на мощни конвективни бури, към вече оперативните продукти MUCAPE и MUCIN бяха добавени MLCAPE (mixed-layer CAPE) и MLCIN (mixed-layer CIN) за два слоя, започващи от земната повърхност с дебелина 50 и 100 hPa. С това оперативно вече се предлагат 3 двойки CAPE/CIN параметри от глобалния модел на ECMWF. Бяха създадени също така т. нар. ансамблови вертикални профили, които представят ансамбловата прогноза за вертикалното разпределение на температурата, влагата и вятъра на дадено географско място в синтезиран вид. За

първи път в оперативните продукти на ECMWF на тези ансамблови профили беше представен ансамбловият ходограф на вятъра като алтернативен метод за показване на вертикалния срез на вятъра от ансамбловите прогнози. В допълнение беше добавена към тези вертикални профили и CAPE/CIN диаграма, показваща ансамбловото разпределение на CAPE в зависимост от CIN.

Публикации на автора, свързани с дисертационния труд

Публикации в научни списания:

1. **Tsonevsky, I.**, 2015: New EFI parameters for forecasting severe convection. ECMWF Newsletter, No. 144, ECMWF, Reading United Kingdom, 27–32, <https://doi.org/10.21957/2t3a904u>.
2. **Tsonevsky, I.**, C. A. Doswell, and H. E. Brooks, 2018: Early Warnings of Severe Convection Using the ECMWF Extreme Forecast Index. Wea. Forecasting, 33, 857–871, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0030.1>.
3. Chipilski, H.G.; **Tsonevsky, I.**; Georgiev, S.; Dimitrova, T.; Bocheva, L.; Wang, X., 2019: Analysis of a Case of Supercellular Convection over Bulgaria: Observations and Numerical Simulations. Atmosphere, 10, 486. <https://doi.org/10.3390/atmos10090486>.

В списание с импакт фактор – публикации **2** и **3**.

Участие в научни форуми с доклади и постери:

Tsonevsky, I., The EFI for forecasting severe convection. 8th European Conference on Severe Storms, 14-18 September 2015, Wiener Neustadt, Austria. (доклад; <https://meetingorganizer.copernicus.org/ECSS2015/ECSS2015-25.pdf>).

Tsonevsky, I. Using new Extreme Forecast Index parameters to forecast severe convection. EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology, 3–7 September 2018, Budapest, Hungary. (доклад; <https://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2018/EMS2018-187.pdf>).

Tsonevsky, I., Doswell III, Charles A., Brooks, H., Pilloso, F., Hewson, T. Evaluation of ECMWF Products for forecasting severe convection. 9th European Conference on Severe Storms, 18-22 September 2017, Pula, Croatia. (доклад; <https://meetingorganizer.copernicus.org/ECSS2017/ECSS2017-23.pdf>).

Tsonevsky, I., ECMWF's Extreme Forecasting Index applied to severe convection. 3rd European Hail Workshop, 15-18 March 2021, Karlsruhe, Germany (постер; http://imk-tss-web.imk-tro.kit.edu/~gleanings/downloads/Posters/13_Session4_Tsonevsky_Ivan_Poster_EHW2021.pdf).

Цоневски, Ив. Използване на екстремния прогностичен индекс за прогноза на опасни конвективни бури. 3-ти Научен семинар „Физика и химия на земята, атмосферата и океана“ – Атмосфера, 3 октомври 2021, с. Баня, България (онлайн семинар).

Литература цитирана в автореферата

Anderson, G., and D. Klugmann, 2014: A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 815–829, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-815-2014>.

Brooks, H. E., C. A. Doswell III and R. B. Wilhelmson, 1994a: The role of midtropospheric winds in the evolution and maintenance of low-level mesocyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 126-136.

Brooks, H. E., C. A. Doswell III and J. Cooper, 1994b: On the environments of tornadic and non-tornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, 9, 606-618.

Brooks, H. E., J. W. Lee, and J. P. Craven, 2003: The spatial distribution of severe thunderstorms and tornado environments from global reanalysis data.

Brooks, H. E., and R. B. Wilhelmson, 1993: Hodograph curvature and updraft intensity in numerically modeled supercells. *J. Atmos. Sci.*, 50, 1824-1833.

Doswell, C. A. III, H. E. Brooks, and R. A. Maddox, 1996: Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea. Forecasting*, 11, 560-581.

Dotzek, N., P. Groenemeijer, B. Feuerstein, and A. M. Holzer, 2009a: Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmos. Res.*, 93, 575-586.

Lalaurette, F., 2003: Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic forecast index. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 3037-3057.

Newton, C. W., 1963: Dynamics of severe convective storms. *Meteor. Monogr.*, 5, No. 27, Amer. Meteor. Soc., 33-58.

Púčik, T., P. Groenemeijer, D. Rýva, and M. Kolár, 2015: Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 4805-4821.

Rotunno, R. and J.B. Klemp, 1982: The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 136-151.

Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243-1261.

Weisman, M. L., and J. B. Klemp, 1982: The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 504-520.

Zsótér, E., 2006: Recent developments in extreme weather forecasting. *ECMWF Newsletter*, 107, 8-17.