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

Средиземноморски циклони и опасни метеорологични явления - фьонът в София

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ

на

КРАСИМИР СТАЙКОВ СТОЕВ

София, 2021

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

Средиземноморски циклони и опасни метеорологични явления - фьонът в София

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ

на

КРАСИМИР СТАЙКОВ СТОЕВ

За присъждане на образователна и научна степен „доктор“ по специалност 4.1 Физически науки – Физика на океана, атмосферата и околоземното пространство.

Научен ръководител:

/доц. д-р Г. Герова/

Ръководител катедра:

/доц. д-р Е. Пенева/

Дисертантът е задочен докторант към Катедра "Метеорология и геофизика" на Физически факултет при Софийски университет “Св. Климент Охридски” в периода 2016-2021 г. Дисертацията е с обем 123 страници. Състои се от 8 глави, заключение и списък на цитираната литература. Брой фигури – 47. Брой таблици - 12. Брой цитирани литературни източници – 91, от тях 6 интернет сайта.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен катедрен съвет на катедра "Метеорология и геофизика" при Физическия факултет на 9 юли 2021 г.

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на .....2021 г. от .... часа в аудитория ..... на Физическия факултет на Софийския университет “Св. Климент Охридски”, бул. “Джеймс Баучер” 5. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Физическия факултет на Софийския университет “Св. Климент Охридски”, бул. “Джеймс Баучер” 5.

Благодаря на:

научния ми ръководител доц. д-р Гергана Герова за съвместната работа, за насоките и помощта за реализиране на дисертацията,

колегите от SUADA, DAMOCLES за ползотворната съвместна работа,

колегите синоптици от НИМХ за подкрепата и разбирането през годините,

на г-жа Piia Post от Института по физика, Тарту, Естония за ползотворната съвместна работа,

на г-жа Ангелина Стойчева и на г-н Величко Калиев, които отделиха време и ми помогнаха при редактирането на текста,

цялото ми семейство за търпението и подкрепата.

Съдържание

1 Актуалност и цел на дисертационния труд **4**
1.1 Актуалност на проблема 4
1.2 Цел и задачи на дисертацията 4

2 Съвременно състояние на проблема **5**
2.1 Изследване на фьона в световен мащаб 5
2.2 Средиземноморските циклони и фьонът в София 6
2.3 Класификация на атмосферната циркулация 7
2.4 Индекси за оперативна прогноза на времето 8
2.5 ГНСС метеорология в България 8

3 Метод на работа **8**
3.1 Количествени критерии за фьон 8
3.2 Типизация на фьонови синоптични обстановки 9
3.2.1 Субективна типизация на фьонови обстановки 9
3.2.2 Обективна типизация на фьонови обстановки 9
3.3 Индекс на устойчивост Черни връх-София 11
3.4 Числени модели за прогноза на времето 12
3.5 ГНСС метеорология 12

4 Типизация и климатология на фьона в София 1975-2014 г. **12**
4.1 Субективна типизация на фьонови синоптични обстановки 12
4.1.1 Фьонова синоптична обстановка тип I 13
4.1.2 Фьонови синоптични обстановки тип II, III и IV 13
4.2 Климатология на фьона: 1975-2014 г. 14
4.3 Фьонът - опасно метеорологично явление 16

5 Обективна типизация на атмосферната циркулация **16**
5.1 Обективна типизация 1975-2001 г. 16
5.1.1 Сравнение между субективна и обективна типизация: 1975-2001 г. 17
5.1.2 Фьонова синоптична обстановка 28-29 декември 1999 г. 18
5.2 Обективна типизация 1979-2014 г. 18
5.2.1 Обективна типизация на фьона с 10 типа 18
5.2.2 Обективна типизация на фьона с 26 типа 20
5.3 Субективната и обективната типизация - март 1979-2014 г. 21
5.4 Атмосферна циркулация при фьон: 1995-2004 и 2005-2014 г. 21
5.5 Обща атмосферната циркулация 22

6 Фьонът в София - опасно метеорологично явление **23**
6.1 Фьонът - опасно метеорологично явление 23
6.2 Индекс на устойчивост за фьон в София 24
6.3 Вятър на Черни връх при фьон в София 25
6.4 Числен индекс Черни връх-София 2010 г. 26
6.5 Интегрирана водна пара при фьон в София 2004, 2008 и 2010 г. 28

7 Приложение в оперативната дейност **29**
7.1 Сравнителен анализ на субективна и обективна типизация за 2019-2020 г. 30
7.2 Индекс на устойчивост и вятър на Черни връх 31
7.3 Фьонова синоптична обстановка 20-22 декември 2020 г. 31
7.4 Числен модел Аладин-бг при обстановки с фьон 31
7.5 Дискусия 32

8 Заключения **33**

9 Научни приноси, публикации и представяне на резултатите по дисертацията **35**
9.1 Научни приноси 35
9.2 Публикации по дисертацията 36
9.3 Представяне на резултатите от дисертацията 36

1 Актуалност и цел на дисертационния труд

1.1 Актуалност на проблема

Фьонът е топъл и сух вятър, който духа по подветрената страна на планината и се наблюдава в много планински райони по целия свят. Фьонът в България се наблюдава по северните склонове на планините и честотата му е най-голяма на север от Витоша в Софийското поле и на север от Стара планина – във Враца, Ботевград, Вършец, Горна Оряховица, Велико Търново, Севлиево, Габрово и др. Най-често скоростта на фьона в България е 15-20 m/s, но има случаи на проявява като бурен поривист вятър със скорост 25-30 m/s. Поради висока скорост и пулсиращия му характер фьонът представлява опасност за авиацията, мореплаването, риболова, както и за строителните дейности, разпространението на пожари и земеделието. Фьонът е опасно метеорологично явление и представлява екстремна проява на времето и климата. Прогнозирането на опасните явления е изключително важна задача пред краткосрочната прогноза на времето. Появата на фьон е свързана с развитието на циклонални вихри и наличието на силен поток. Класическият фьон се появява при средиземноморски циклони и преместването им по траектория на северозапад от нашата страна. Средиземноморските циклони са водещ фактор, определящи времето в България. Те причиняват над 70% от щетите, свързани с опасните метеорологични явления в България. В дисертационният труд са разглеждани синоптичните обстановки, водещи до фьон в гр. София за 40-годишен период. Разработката е и принос към Европейска научна мрежа КОСТ CA19109 “European network for Mediterranean cyclones in weather and climate” (2020-2024). Докторантът участва в работна група 1 "Process-based understanding of Mediterranean cyclones at weather time scales".

1.2 Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертацията е изследване на фьона в София и свързаните с него типове атмосферна циркулация и проявлението му като опасно метеорологично явление. Задачите, свързани с тази цел са:

1) Климатология на дните с фьон за периода 1975-2014 г.;

2) Субективна типизация на фьоновите синоптични обстановки;

3) Обективна типизация на синоптични обстановки, водещи до появата на фьон в София;

4) Индекс на устойчивост при обстановки с фьон в София и изготвяне на методика за подобряване на оперативната работа при прогнозиране на фьона;

5) Съвместното използване на ГНСС тропосферни продукти за обстановки с фьон и числена прогноза. Оценка на потенциала интегрираната водна пара от ГНСС да бъде използвана в оперативната прогноза на фьон в София;

6) Приложение на резултатите за прогноза на фьона в оперативната дейност на Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ).

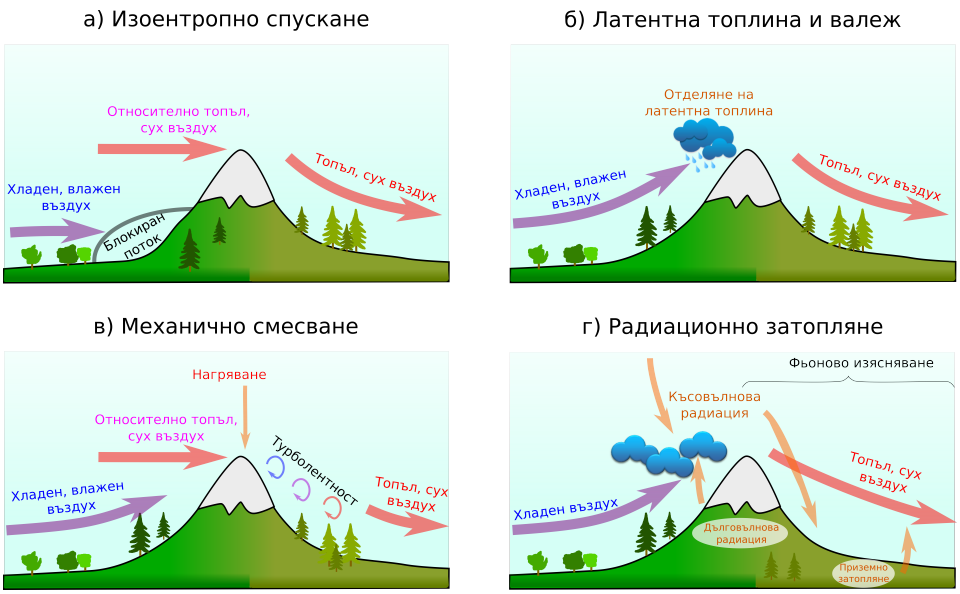
2 Съвременно състояние на проблема

2.1 Изследване на фьона в световен мащаб

В исторически аспект най-добре изучена е появата на фьон в Алпите и Скалистите планини в Северна Америка, където той се нарича "чинуук" (*Beran*, 1967). В Алпийския и Средиземноморския район топлият и сух вятър, спускащ се по северните планинските склонове, е познат от римско време.

Elvidge and Renfrew (2016) представя четири основни механизма на образуване на фьона, които са обобщени на фигура 1. Добре познатите механизми са на: 1) динамично затопляне "изоентропно спускане" (тип I, фигура 1а), и 2) термодинамично затопляне (тип II, фигура 1б). Механизмът тип I включва блокиране на студена въздушна маса на наветрената страна и преминаване на по-топла въздушна маса близо до върха на планината и последващо адиабатно затопляне при спускане по подветрената страна на планината. Механизмът тип II (*Richner and Hächler*, 2013) е най-често срещан пример за поява на фьон. При него при изидигането на въздушната маса по наветрения склон на планината се формира облак, има латентното затопляне на въздушната маса и валеж преди върха на планината. Така изсушеният въздух се спуска и нагрява адиабатно по подветрения склон на планината. *Beran* (1967) представя два механизма на механично смесване (тип III на фигура 1в) и радиационно затопляне (тип IV на фигура 1г).

Фьонът е много добре познат в Северна Америка по източните склонове на Скалистите планини (*Oard*, 1993) и Апалачите (*Gaffin*, 2007). *Norte* (2015) изследва фьона в Аржентина и заключава, че "както в европейските Алпи (*Richner and Hächler*, 2013), уменията на опитни синоптици, запознати с особеностите на местната циркулация, все още са важна предпоставка за успешна прогноза на фьона". *Kusaka et al.* (2021) изследва ефекта от внезапно покачване на температурата при южен фьон в Япония и връзката му с увеличаване на случаите на топлинен удар сред населението както и увреждане на оризовите култури в района на Тояама. Друг резултат от повявата на затопляне в следствие на фьон е изолиран в полярните райони. *Marshall et al.* (2006) пръв предполага, че фьонът има принос за затоплянето на Антарктическия континент. Изследване на затоплянето на въздуха при проява на фьон в района на шелфовия ледник Ларсен Б (*Cape et al.*, 2015) установява, че появата на фьон е един от факторите допринесли за разрушаването и стопяването му през 2002 г.



Фигура 1: Механизми на образуване на фьон. Репродукция от *Elvidge and Renfrew* (2016).

2.2 Средиземноморските циклони и фьонът в София

Появата на фьон е свързана с развитието на циклонални вихри, наличието на силен поток с топли и влажни въздушни маси от юг и югозапад. Средиземно море е добре позната област, където се образуват циклони особено през студеното полугодие, когато депресиите са по-силно изразени и по-дълбоки, с налягане в центровете им често под 1005 hPa (*Stefanov et al.*, 1960). Резултатите за месечно и годишно разпределение на циклоните, генерирани над Средиземно море през периода 1980–2001 г., показват, че най-високата честота на циклони се среща през зимата, от декември до март (*Bocheva et al.*, 2007). След 1990 г. е установено, че честотата на циклогенезиса над Средиземноморието е два месеца по-къса от средната, настъпваща главно в централната част на морето (*Marinova et al.*, 2005). Първите изследвания на траекториите на средиземноморския циклон са направени преди повече от 100 години и са установени 3 основни траектории: път I (северозапад), през Хърватия и Унгария; път II (изток), през Адриатическо море и Балканския полуостров към Черно море; път III (югоизток, а след това изток), през южните части на Балканския полуостров към Мала Азия. В България класическият фьон се появява, когато траекторията на средиземноморския циклон е на северозапад от България *Pisarski* (1955a,b). Циклоните по път I имат различна честота през различните години. Изследване на *Marinova et al.* (2005) установява, че път I през Хърватия и Унгария вече не е типичен. Образуването на фьона е свързано с модифицирането на въздушния поток, което се влияе от орографията. Фьонът в България се наблюдава по северните склонове на планините като последица от топъл въздух, идващ от юг и югозапад и най-често поривите на вятъра достигат 15–20 m/s, но

има случаи, когато те достигат и 25–30 m/s. Изследванията на *Hristov and Tanev* (1970) за периода 1955–1964 показват, че в София има средногодишно 7–8 дни с фьон, като максимален брой дни има през февруари и март, а минимален - от юни до октомври.

Фьонът представлява екстремна проява на времето и климата, поради което се класифицира като опасно метеорологично явление (ОЯ). Прогнозирането на опасните явления е важна задача пред краткосрочната прогноза за времето. Фьонът в София е един от характерните силни ветрове. Такива ветрове поради високата скорост на пулсацията нанасят големи повреди на сгради, далекопроводи, селскостопански култури, бързо топене на сняг през пролетта, разпространение на горски пожари през лятото или нарушаване на въздушния трафик през цялата година. От 2001 г. НИМХ издава прогнози за ОЯ, а от 2009 г. тази дейност е част от европейската система Метеоаларм (*Popova et al.*, 2013). Прогнозите за ОЯ за следващите 48 часа в 28-те административни области на България се публикуват и обновяват непрекъснато, и са достъпни на страницата на НИМХ. При издаването на предупреждения за ОЯ, оперативните специалисти в НИМХ разполагат с информация от числени модели (глобални и регионални) за прогноза на времето, както и редица продукти, разработвани от Европейския център за средносрочни прогнози (ECMWF) (*Stoycheva et al.*, 2013). Въпреки усъвършенстването на съвременните методи за прогноза на времето, местните ветрове остават предизвикателство при изготвяне на оперативната прогноза, поради взаимодействието на въздушните маси със сложната орография, специфична за Софийската котловина.

2.3 Класификация на атмосферната циркулация

Класификацията на атмосферната циркулация по типове е обект на многогодишни разработки във водещите метеорологични центрове. Типизацията на синоптичните обстановки, водещи основно до появата на опасни метеорологични явления, е изключително важна част при прогнозирането на бъдещи обстановки с предупреждения за опасно метеорологично време, използвайки например - "метода на подобието". Субективната (ръчна) класификация на атмосферната циркулация се прави от синоптик, но има две основни ограничения: 1) тя е трудоемка, и 2) резултатите често не могат да бъдат възпроизводими *Yarnal* (1993). Европейската научна мрежа COST733 „Хармонизиране и прилагане на класификациите на метеорологичните типове за европейските региони“ (2005-2010, cost733) има за цел да разработи метод за класификация на атмосферната циркулация, като резултат е създаден каталог на класификациите на типа атмосферна циркулация. За класифициране на типовете циркулация на дневна база са използвани набор от 33 метода или алгоритми (*Philipp et al.*, 2016; *Tveito et al.*, 2016). В специално разработен софтуерен продукт са включени голям брой каталози за класификация на атмосферната циркулация за 12 европейски области (*Tveito et al.*, 2016).

2.4 Индекси за оперативна прогноза на времето

Един от начините за улесняване на оперативното прогнозиране на времето е разработване на индекси, които да дават количествена оценка и насоки за прогноза на определени метеорологични явления. Голям брой такива индекси са разработени и се използват прогнозата на конвективните валежи, а през последното десетилетие такива индекси се разработват и за други явление, като например мъгла (*Dejmal and Novotny*, 2011). В оперативното прогнозиране в България първият индекс за мъгла е разработен от *Stoycheva and Evtimov* (2014). В оперативната прогноза на фьона Швейцарската Метеорлогична служба използва индекс на Видмер (Widmer index, *Widmer* (1966)), който дава надеждна прогноза до 36 часа.

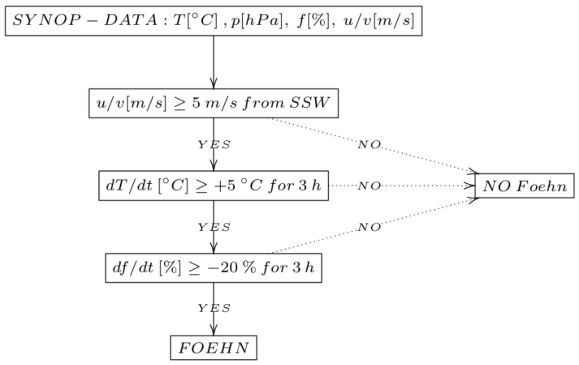
2.5 ГНСС метеорология в България

Използването на тропосферни продукти от Глобалните Навигационни Спътникови Системи (ГНСС - GNSS) е добре развит метод за мониторинг на атмосферата - "ГНСС метеорология". От 2005 г. в Европа тропсферни продукти от ГНСС се предоставят на националните метеорологични служби в рамките на оперативен сервиз E-GVAP. В използването на ГНСС метеорологията в Европа има големи регионални разлики (*Guerova et al.*, 2016), докато в Западна и Централна Европа тя е добре развита, то в Югоизточна Европа, нейното развитие започва през 2011 г. Изследването на ОЯ с ГНСС метеорология за България включва горещи вълни, гръмотевични бури, мъгла и фьон. Представеното в глава 6 изследване на фьона по метода ГНСС метеорология е първото в световен мащаб. Алпийският фьон е изследван с ГНСС метеорология от *Aichinger-Rosenberger et al.* (2021), като е направена оценка на силните и слабите страни на метода за диагноза на фьона.

3 Метод на работа

3.1 Количествени критерии за фьон

В работата са използвани данни от синоптичните наблюдения в основни и междинни срокове в Централната метеорологична станция (ЦМС) в София (590 m н.в.) и високопланинска синоптична станция Черни връх (2290 m н.в.), част от наблюдателната мрежа на НИМХ за периода 1975-2014 година. Класифицирането на вятъра като фьон е направено по количествени критерии на *Hristov and Tanev* (1970), показани в блок схема на фигура 2.



Фигура 2: Блок схема за количествена оценка на фьона в София (*Hristov and Tanev*, 1970), репродукция К. Стоев, 2019.

3.2 Типизация на фьонови синоптични обстановки

3.2.1 Субективна типизация на фьонови обстановки

Субективна типизация на синоптичните обстановки с фьон в София - Bulgaria Foehn Type (BFT) (*Stoev and Guerova*, 2020) е направена за периода 1975-2014. BFT класификацията е изготвена, чрез анализ на продукти от атмосферният реанализ на Националния център за изучаване на атмосферата и океана (nce). Въз основа на синоптичния анализ - преместването на основните барични центрове и свързаните с тях фронтални системи е направена субективна типизация на синоптичните обстановки, довели до появата на фьон.

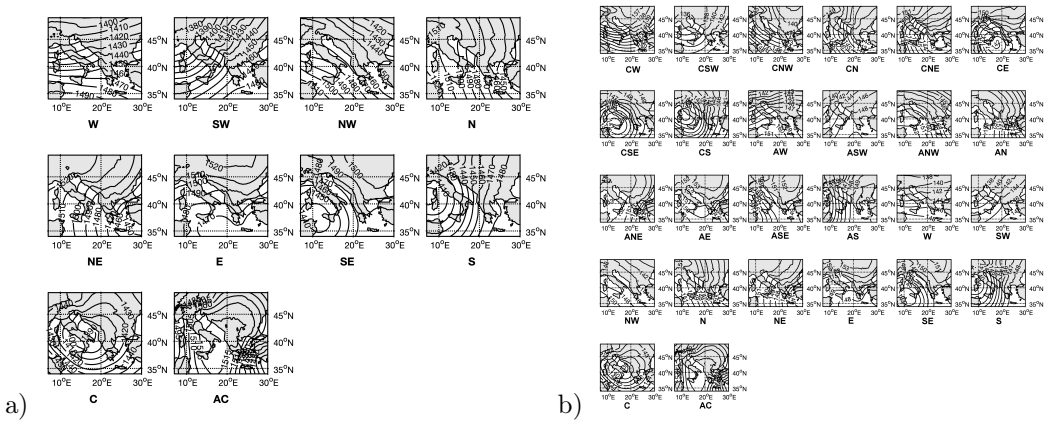
3.2.2 Обективна типизация на фьонови обстановки

Обективната типизация на синоптичните обстановки с фьон е направена със софтуер разработен по време на COST733. Cost733class (*Philipp et al.*, 2016) е софтуерен пакет за създаване, сравняване, визуализиране и оценка на атмосферната циркулация. За изследването в периода 1979-2014 година са избрани две циркулационни схеми: Gross-Wetter-Types (GWT) и Jenkinson-Collison-Types (JCT), като за входен параметър в софтуера е използван геопотенциалът на височина 850 hPa от атмосферен реанализ ERA5 (*Hersbach et al.*, 2020). ERA5 е петото поколение реанализ на Европейския център за средносрочни прогнози и обхващат периода от 1979 г. до днес. Хоризонтална разделителна способност на ERA5 и ERA-Interim са 31 km и 80 km съответно. ERA5 има на 139 вертикални нива, от повърхността до около 80 km (0.01 hPa). ERA-Interim е с вертикална разделителна способност от 60 нива (*Berrisford et al.*, 2011). GWT и JCT са методи за типизация на атмосферната циркулация, дефинирани чрез използване на числов праг за индекси на циркулацията. Основното предимство на метода за класификациите на базата на прагове е, че се разграничават синоптично значимите типове (*Philipp et al.*, 2016). Класифицирането на случаи към типове циркулации се извършва обективно и се автоматизира чрез използване на прагови стойности за предварително

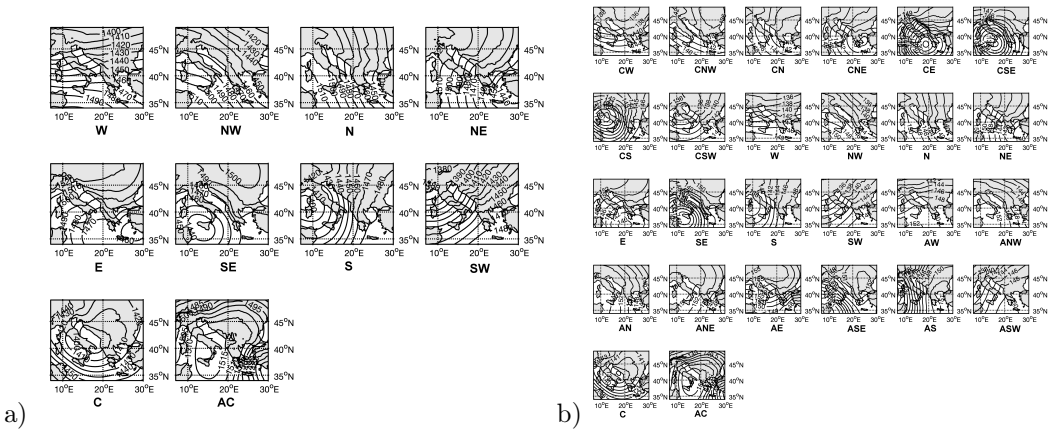
дефинирани индекси, различаващи типовете атмосферна циркулация. Използването на три индекса води до три състояния (циклонално, антициклонално и междинно) и 26 вида циркулация. Типовете циркулация на JCT (*Jenkinson and Collison*, 1977) са получени с помощта на автоматизирана схема за типове атмосферна циркулация на Ламб (*Lamb*, 1972). Дневни стойности на геопотенциална височина 850 hPa от реанализ ERA5 (*Hersbach et al.*, 2020) са класифицирани в типове циркулация за периода 1979–2014. Процесите на обективизиране включват изчисляване на няколко атмосферни индекса от първоначалните точки на мрежата, а именно: силата на потока (F), посоката на потока (D) и завихреност (Z) като положителната завихреност съответства на ниско налягане (циклонална), а отрицателна завихреност съответства на високо налягане (антициклонална).

Атмосферната класификация на циркулацията с GWT класификационна схема е първата, която класифицира полето на приземното атмосферно налягане по отношение на зоналност, меридионалност и завихряне (*Beck*, 2000). Тя се основава на сходството с три идеални модела на потока: зонален, меридионален и циклонален. Степента на сходство между всяко поле и тези прототипи се измерва чрез изчисляване на коефициентите на корелация на Пиърсон на зоналност (Z), меридионалност (M) и завихряне (V) за всеки ден като и основните типове циркулация се дефинират чрез определени комбинации от тези три коефициента.

На фигури 3 и 4 са показани карти на циркулационните схеми GWT и JCT с 10 и 26 типа циркулация.



Фигура 3: GWT циркулационна схема: a) с 10 циркулационни типа и b) 26 циркулационни типа.



Фигура 4: JCT циркулационна схема: a) с 10 циркулационни типа и b) 26 циркулационни типа.

3.3 Индекс на устойчивост Черни връх-София

В разработка е използван разработеният от *Stoycheva and Evtimov* (2014) индекс на устойчивост Черни връх-София (Cherni vrah - Sofia Stability Index - CSSI), за кратко наричан SSI. Индексът представлява една интегрална характеристика на степента на устойчивост на слоя между 600 m и 2300 m надморска височина.

За количествена оценка на устойчивостта на атмосферата при обстановки с фьон в София индексът е модифициран и се изчислява по формула 1. Във формула 1 е направена промяна на коефициента в числителя на подкоренната величина, отчитащ промяната на температурата с височина за слоя въздух между нивата, на които са разположени София и Черни връх, по сухоадиабатния температурен градиент $0.65 \leq \gamma, \gamma_a \leq 1$ *Panchev* (1988). В оригиналната формула този коефициент е 17 и отразява разликата в надморската височина между София и Черни връх, възлизаща на 1700 m и промяната на температурата с 1° C на всеки 100 m. При обстановки с фьон индексът на устойчивост SSI* отчита факта, че температурния градиент е по-голям от 1° C за 100 m, т.е. реализира се свръхадиабатен температурен градиент със стойност 1.29° C на 100 m, което се равнява на разстояние по вертикалата между двете станции от 2200 m, а не 1700 m, затова коефициентът се променя на 22.

$$SSI^* = \sqrt{\frac{1 + \Delta t \ / \ 22}{1 \ + \ t_{ch.vrah}/273.15}} \tag{1}$$

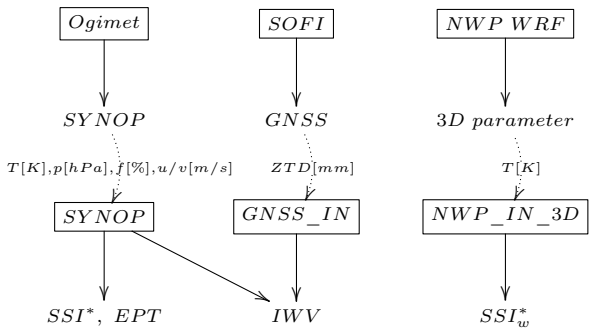
В това изследване е използвана и псевдопотенциалната температура Θ_e, изчислена по *Holton* (1973).

3.4 Числени модели за прогноза на времето

В дисертацията са използвани данни от два мезомащабни числени модела за прогноза на времето Weather Research and Forecasting (WRF) и Аладин-бг. Числените експерименти с WRF (*Skamarock et al.*, 2008) са направени за целите на дисертацията, а моделът Ападин-бг е оперативният модел в НИМХ. Численият модел за прогноза на времето WRF е разработен в САЩ. В тази дисертация е използвана версия 3.7.1 на модела, като началните и гранични условия са от глобален числен модел GFS (Global Forecast System).Моделът е пресметнат за три области, като най-вътрешната област, покриваща България, е с резолюция 2 km и 45 вертикални нива. Регионалният числен модел Аладин-бг (ala) е спектрален модел разработен от консорциум с водещ партньор Метео Франс. Параметрите на оперативното приложение в НИМХ са следните: хоризонтална стъпка 5 km, 105 нива във височина и стъпка по времето 300 s. Температурата в точки от моделите (WRF и Аладин-бг) близки до София и Черни връх е използвана за пресмятане на индексите на устойчивост от двата модела (SSI$^*{}_w$) и SSI_a^*.

3.5 ГНСС метеорология

От 2012 г. тропосферни продукти от ГНСС се архивират в база данни на Софийския университет (СУАДА, *Guerova et al.* (2014)). На фигура 5 е представена блок схема на обработката на информация използвана в глава 6.



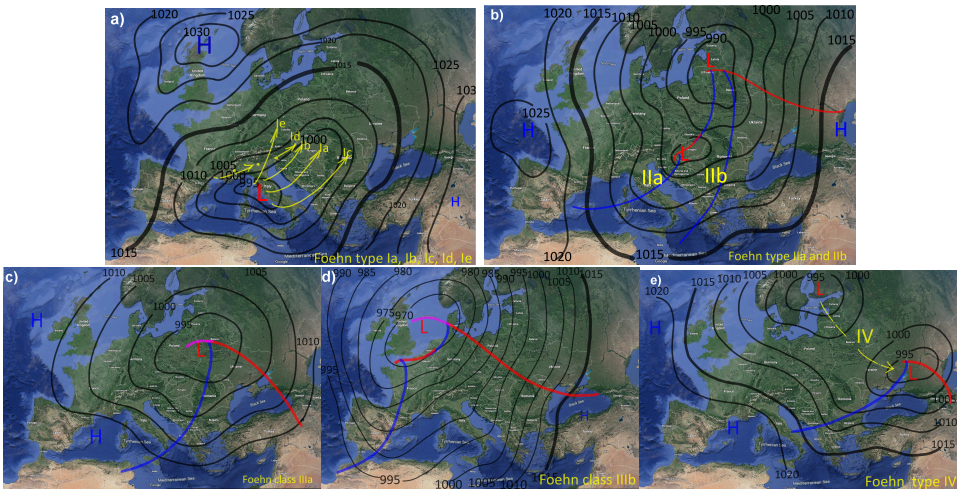
Фигура 5: Поток на информацията в база данни СУАДА.

4 Типизация и климатология на фьона в София 1975-2014 г.

4.1 Субективна типизация на фьонови синоптични обстановки

В изследването е направена субективна типизация на синоптичните обстановки с фьон в София за 40-годишния период от 1975 до 2014 г. Синоптичните обстановки са обеди-

нени в четири основни типа: I, II, III и IV и са показани на фигура 6.



Фигура 6: Схематично представена типизацията на синоптичните обстановки с фьон: a) тип I, b) тип II, c) тип IIIa, d) тип IIIb и e) тип IV.

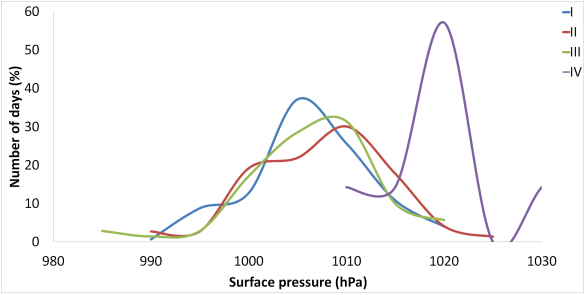
4.1.1 Фьонова синоптична обстановка тип I

На фигура 6a е показана фьонова синоптична обстановка от тип I, с 5 подтипа - Ia, Ib, Ic, Id и Ie, спрямо траекториите на средиземноморските циклони. За разглеждания период 1975-2014 г. в тип Ia попадат 54 от обстановките, при които в София се появява фьон. Тип Ib се наблюдава в 13 обстановки. Фьонова синоптична обстановка тип Ic се наблюдава в 15 случая. Обстановка Id се наблюдава в 26 случая. Синоптична обстановка подтип Ie се наблюдава в 6 случая.

4.1.2 Фьонови синоптични обстановки тип II, III и IV

Фьонова синоптична обстановка от II тип се наблюдава в 54 случая. На фигура 6b схематично е представена фьонова синоптична обстановка от тип IIa и IIb. Обстановка тип IIa се наблюдава в 35 случая. Обстановка тип IIb се наблюдава в 19 случая. За разглеждания период 1975-2014 година фьонова синоптична обстановка от тип III се наблюдава в 45 случая. Тя е представена на фигури 6c и 6d. Фьонова синоптична обстановка от тип IIIb се наблюдава в 4 случая. Фьонова синоптична обстановка от тип IV се наблюдава в 7 случая и е показана на фигура 6e.

За разглеждания период се реализират 220 синоптични обстановки, при които в София се регистрира фьон. Обстановка тип I се наблюдава в 114 дни (52%). Фьонова синоптична обстановка тип II се реализира в 25% от обстановките, а обстановка тип III се наблюдава в 20% от обстановките с фьон. Обстановка тип IV се реализира в 3% от всички обстановки с фьон а периода 1975-2014 г.

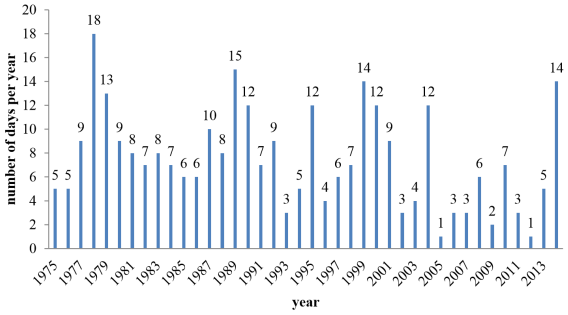


Фигура 7: Разпределение на атмосферно налягане приведено към морско ниво по типове фьонови обстановки в периода 1975-2014 г.

На фигура 7 е представено разпределение на приведеното към морско равнище атмосферно налягане (msl), регистрирано в 12 UTC в София за 4-те типа синоптични обстановки с фьон за периода 1975-2014 г. При фьонова синоптична обстановка от тип IV (лилава линия на фигура 7) максимумът на налягането е при 1020 hPa, което е свързано с разположението на циклоналния вихър над южните райони от Източноевропейската равнина. Фьонова синоптична обстановка от тип I има максимум на налягането при 1005 hPa (синя линия на фигура 7). Това е очакван резултат и е свързан със средиземноморските циклони, оказващи влияние върху циркулацията над Балканския полуостров, които са плитки барични образувания. За типове II и III максимумът на налягането е при 1010 hPa с циклон, разположен на север-северозапад от България.

4.2 Климатология на фьона: 1975-2014 г.

На фигура 8 е представена климатология на фьона в София по години за периода 1975–2014 г. Максимален брой дни с фьон има през 1978 г. – 18 дни, а минимален – 1 ден през 2005 г. и 2012 година.



Фигура 8: Климатология на фьона по години за периода 1975-2014 г.

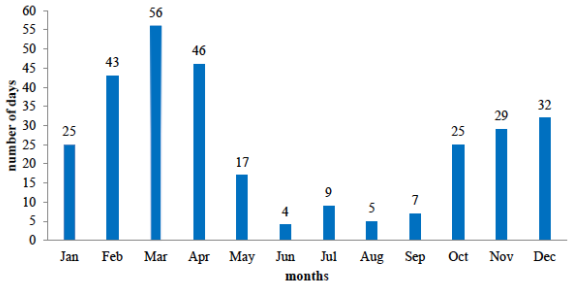
В таблица 4.2 са представени броя на дните с фьон, средногодишният брой и максималните пориви на вятъра за периодите: 1975–1984, 1985–1994, 1995–2004 и 2005–2014 г. За последното десетилетие се наблюдава тенденция към намаляване на

Период	Брой дни	Среден брой дни	Максимални пориви на вятъра (m/s)
1975-1984	89	8.9	32
1985-1994	81	8.1	30
1995-2004	83	8.3	30
2005-2014	45	4.5	22

Таблица 1: Брой дни с фьон за десетилетия и максимална скорост на пулсациите на вятъра.

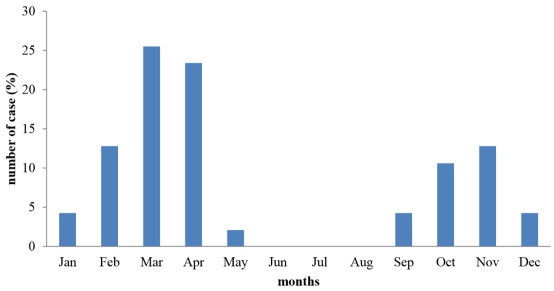
средногодишния брой на дните с фьон в София.

На фигура 9 е показан броят на дните с фьон по месеци. Месецът с най-голям брой дни с фьон е март - 56 дни. Най-рядко фьонът се наблюдава през юни - само 4 дни.



Фигура 9: Климатология на фьона по месеци за периода 1975-2014 г.

През разглеждания период най-продължителна е фьоновата синоптична обстановка от 24 февруари до 2 март 1989 г. – общо 7 денонощия. По 4 денонощия се открояват 3 обстановки. Обстановките с продължителност 72 часа са 10. За целия период най-продължителна в часове (44 часа) е синоптичната обстановка 9-12.04.1978 г., която е от тип IIIa. Общо за периода 1975 – 2014 година най-често по продължителност са фьоновите синоптични обстановки по 2 денонощия (48 часа) - 47 обстановки. На фигура 10 е представено месечното разпределение на фьоновите обстановки с продължителност 2 дни.



Фигура 10: Месечно разпределение на случаите с фьон с продължителност 2 дни за периода 1975-2014 г.

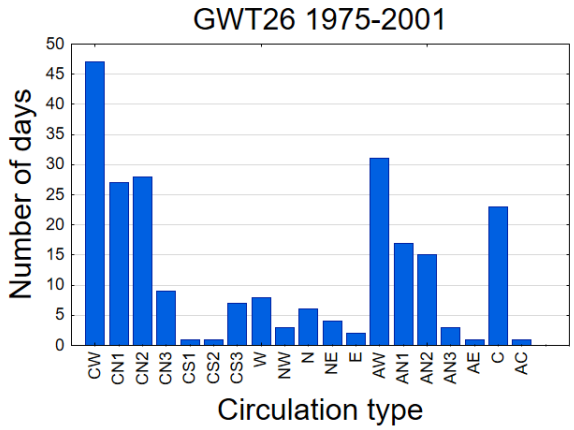
4.3 Фьонът - опасно метеорологично явление

От направената климатологията на фьона като опасно метеорологично явление за периода 1975-2014 г. е установено че за 26% от дните с фьон поривите на вятъра са по-малки от 14 m/s, което не изисква издаване на предупреждение за ОЯ. В 52% от дните поривите на вятъра са от 14 до 19 m/s и това съответства на жълт код по критериите за ОЯ на Метеоаларм. В 21% от дните поривът на вятъра са 20–29 m/s, което съответства на оранжев код, а в 1% от дните поривите на вятъра са над 30 m/s, т.е. кодът по системата Метеоаларм е червен. За 40-годишния период броят на случаите с пулсации на вятър над 30 m/s е само 4, т.е. средно веднъж на десетилетие фьонът в София е бурен.

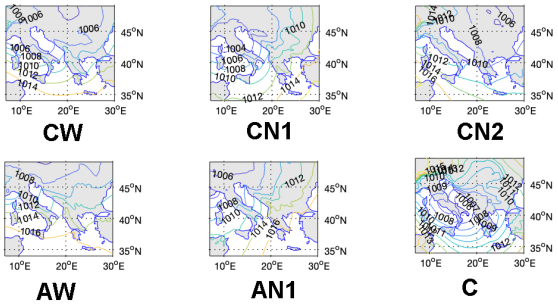
5 Обективна типизация на атмосферната циркулация

5.1 Обективна типизация 1975-2001 г.

На фигура 11a е представено разпределението на дните с фьон в София като е използвана класификация на атмосферната циркулация с GWT с 26 класа. Класификацията е направена за приведеното към морско ниво карти на атмосферното налягане и на фигура 11b е представено разпределението на приземното атмосферното налягане за шестте най-често реализирани типове атмосферна циркулация GWT26 при фьон в София.



a)



b)

Фигура 11: Обективна типизация на фьонови синоптични обстановки. a) Разпределение на фьоновите синоптични обстановки по типове. b) Карти на приземното атмосферно налягане съответстващи на GWT типове.

5.1.1 Сравнение между субективна и обективна типизация: 1975-2001 г.

От направеното сравнение между субективна и обективна типизация на синоптичните обстановки, довели до появата на фьон в София за периода 1975-2001 г., се установява, че при субективната типизация максимален брой на дни с фьон в София се наблюдава при синоптични обстановки, свързани със средиземноморски циклони, докато при обективната типизация максимален е броят на дните с фьон в обстановки пред приближаващ студен атмосферен фронт. Тип C и тип CN1 от класификация GWT26 съответстват на BFT тип I от субективната типизация. Тип CW и тип CN2 съответстват на фьонови синоптични обстановки от BFT тип IIa и IIb. Обстановка тип CN1 от обективната типизация съответства на BFT тип IIIb от субективната типизация. На субективен тип I съответства обективен тип C и CN1, като броят на дните с фьон е съответно 83 и 50 (49% на 22%). На субективен тип II съответстват типове CW и CN2 от обективната класификация с брой дни съответно 49 и 75 (29% и 32%). На субективен тип III съответстват типове AW и AN1 от обективната класификация със съответно 33 и 48 дни. Тук отново обективната класификация завишава броя дни с около 30%. На субективен тип IV съответства тип CN2 от обективната класификация със съответно

15 дни.

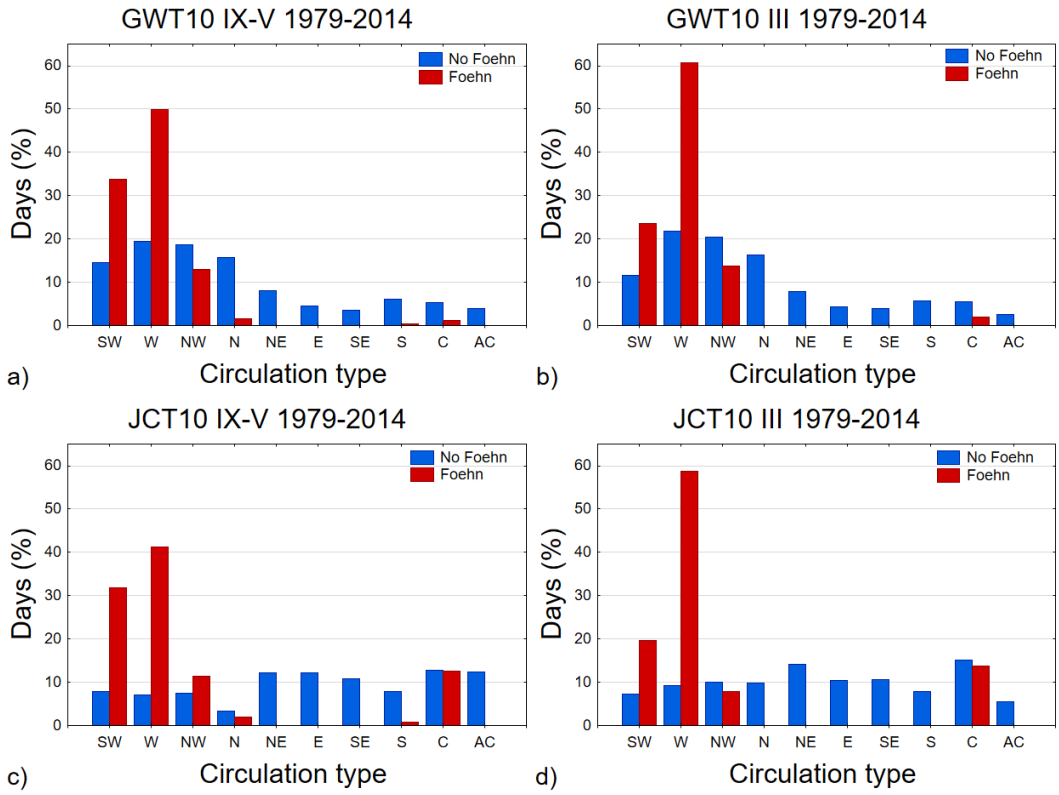
5.1.2 Фьонова синоптична обстановка 28-29 декември 1999 г.

В тази секция е разгледана представителна фьонова обстановка 28-29.12.1999 г.

5.2 Обективна типизация 1979-2014 г.

5.2.1 Обективна типизация на фьона с 10 типа

В периода 1979-2014 г., използвайки атмосферна класификация GWT с 10 типа се открояват четири основни циркулации: 1) тип NW (2747 дни), 2) тип N (2565 дни), 3) тип W (2365 дни) и 4) тип SW (1590 дни). За периода септември-май 1979-2014 г. (сините стълбчета на фигура 12a) има четири основни типа циркулация: 1) W с 20% (1918 дни), 2) NW с 19% (1836 дни), 3) N с 16% (1555 дни) и 4) SW с 14% (1431 дни). За месец март (фигура 12b) основните типове атмосферна циркулация GWT10 са: 1) W (21%, 244 дни), 2) NW (20%, 228 дни), 3) N (17%, 128 дни) и 4) SW (11%, 129 дни). За дните с фьон класификационна схема GWT10 дава само три основни типа циркулация: 1) W с 51% (132 дни), 2) SW с 32% (83 дни) и 3) NW с 14% (36 дни). За периода септември-май 1979-2014 г. (червените стълбчета на фигура 12a) три основни типа циркулация водят до появата на фьон в София, а именно: 1) W с 50% (122 дни), 2) SW с 34% (83 дни) и 3) NW с 12% (32 дни). За месец март основният тип циркулация с фьон е W с 60% (31 дни). Сравнението между фигури 12a и 12b води до заключението, че дните с фьон в София са свързани с три основни GWT10 типа: W, SW и NW.



Фигура 12: Относителни честоти на типовете циркулация за всички дни (сини стълбчета) и дни с фьон (червени стълбчета). GWT10 a) септември-май 1979-2014 и b) март 1979-2014. JCT10 c) септември-май 1979-2014 и d) март 1979-2014.

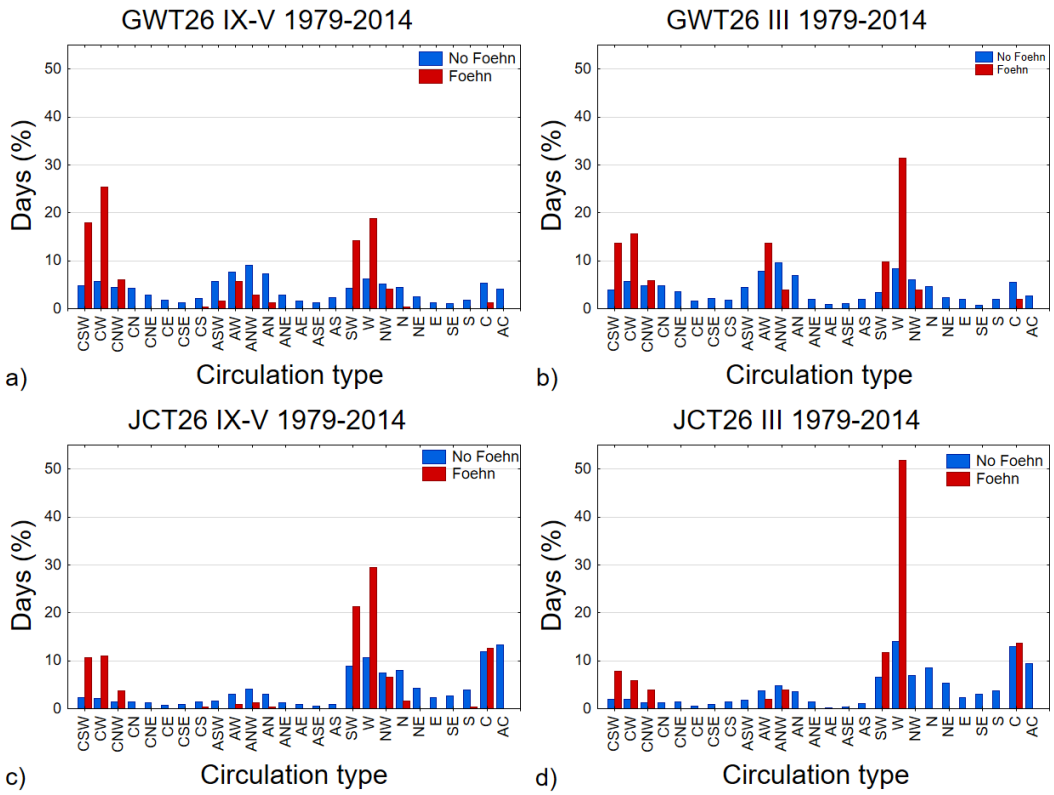
За субективна класификация JCT с 10 типа (JCT10) има четири доминиращи атмосферни циркулации : 1) тип W е с 2053 дни, 2) тип N с 2020 дни, 3) тип AC с 1906 дни и 4) тип NW с 1889 дни. Както се вижда от фигура 12c (сини стълбчета), основните типове циркулация на JCT10 за периода септември-май 1979-2014 г. са: 1) N с 11% (1264 дни), 2) AC с 11% (1215 дни), 3) E с 11% (1197 дни), 4) NE с 11% (1191 дни) и 5) тип SE с 10% (1066 дни). За месец март 1979-2014 г. (сини стълбчета на фигура 12d), двата основни типа JCT10 с около 15% от случаите са C (168 дни) и NE (159 дни). Типът SE е с 11% (119 дни), докато типовете N, NW и E са съответно с 10% и 109, 112 и 116 дни. За периода 1979-2014 г. циркулацията на JCT10, водеща до фьон в София, е W с 42% (109 дни) и SW с 31% (80 дни). За септември-май 1979-2014 г. (фигура 12c), основните типове циркулация, водещи до фьон в София, са тип W с 40% поява (101 дни) и тип SW с 30% (78 дни). Основните JCT10 типове, водещи до фьон за март 1979-2014 г. (червени стълбчета на фигура 12d), са тип W с 60%, тип SW с 20% и тип C с 10%.

От фигури 12a и 12c може да се направи интересно сравнение между GWT10 и JCT10 за случаите на фьон. И двете класификации имат най-голям брой дни с фьон

за тип W, но с 10% разлика. За SW и NW типове GWT10 и JCT10 съответствието е в рамките на 5%. За JCT10 четвъртият значим тип е C с около 10%.

5.2.2 Обективна типизация на фьона с 26 типа

За периода 1979-2014 г. използвайки типизацията на атмосферната циркулацията с класификационна схема GWT с 26 типа се открояват три основни типа циркулации: 1) ANW с 1348 дни, 2) AN с 1220 дни и 3) AW с 970 дни. Сините стълбчета на фигура 13а, за периода септември-май 1979-2014 г. показват три основни типа циркулация: ANW с 9% (882 дни), AW с 8% (756 дни) и AN със 7% (710 дни). GWT26 за март дава три основни типа циркулация: ANW с 10% (107 дни), W с 8% (94 дни) и AW с 8% (87 дни).



Фигура 13: Относителни честоти на типовете циркулация за всички дни (сини стълбчета) и дни с фьон (червени стълбчета). GWT26 a) септември-май 1979-2014 г. и b) март 1979-2014 г. JCT26 c) септември-май 1979-2014 и d) март 1979-2014.

От друга страна, синоптичните условия, водещи до появата на фьон в София, дават четири основни типа GWT26 циркулации: 1) NW с 68 дни (26%), 2) W с 47 дни (18%), 3) CSW с 44 дни (17%) и 4) SW с 35 дни (14%). През периода септември-май се регистрира най-голям брой дни с фьон при четири основни GWT26 типа: NW, W, CSW и SW с 25%, 19%, 18% и 14%, съответно. Както се вижда от червените стълбчета

BFT	GWT10	JCT10	GWT26	JCT26
I	C	SW+C	CSW+SW+C	CSW+C
II	SW	-	CW+CNW	CW+CNW+SW
III	W	W	W	W
IV	NW	NW	AW+ANW+NW	ANW

Таблица 2: Типове циркулация BFT и съответните GWT10 (колона 2), JCT10 (колона 3), GWT26 (колона 4) и JCT26 (колона 5).

и на фигура 13b, само за март, максималната честота на фьона от 31% е за тип W, 16% е за NW и 14% е за CSW и AW. Типизацията на атмосферната циркулацията с класификационна схема JCT с 26 типа за периода 1979-2014 г. дава следните водещи типове циркулации: 1) 1906 дни (15%) за тип AC, 2) 1402 дни (11%) за тип C, 3) 1380 дни (10%) за тип W и 4) 1330 дни (10%) за тип N. За периода септември-май (сини стълбчета на фигура 13c) тип AC има 1316 дни (13%), тип C - 1172 дни (12%) и тип W - 1051 дни (11%). Както се вижда от фигура 13d, само за март тип W има 156 дни (14%), тип C - 144 дни (13%) и тип AC - 106 дни (9%).
Класификация на циркулация JCT26 за дни с фьон е: 30% (77 дни) за тип W, последвана от 20% (53 дни) за тип SW, 12% (31 дни) за тип C и 11% (29 дни) за тип CW. Както се вижда от червените стълбчета на фигура 13c, за периода септември-май тип W е с честота 29% (72 дни), тип SW - 21% (52 дни), тип C - 13% (31 дни), тип CW - 11% (27 дни) и тип CSW - 11% (26 дни). За март (фигура 13d) тип W е с 51% (26 дни), тип C с 14% (7 дни) и тип SW с 12% (6 дни).

5.3 Субективната и обективната типизация - март 1979-2014 г.

Сравнение на обективните типизации на атмосферната циркулация GWT и JCT с разработената от *Stoev and Guerova* (2020) субективна типизация (BFT) при обстановки с фьон за месец март 1979-2014 г. Както се вижда от таблица 3, обективните типизации GWT10 и JCT10 са склонни да подценяват или надценяват типовете BFT. Много по-добро съответствие се получава между BFT и GWT26 и JCT26. JCT26 има най-доброто съответствие с BFT за тип BFT-II и BFT-IV и има тенденция да подценява BFT-I и да надценява типа BFT-III. GWT26 има тенденция да подценява BFT тип I, II и III и да надценява тип IV, който е със само 2 дни.

5.4 Атмосферна циркулация при фьон: 1995-2004 и 2005-2014 г.

В тази част изследваме намаляването на броя на дните с фьон за периода 2005-2014 г. с типове GWT10 и JCT10. За периода 2005-2014 г. както класификация GWT10, така и JCT10 показват, че дните с фьон намаляват поради намалена циркулация тип W съответно с -65% и -80% и тип NW съответно с -25 и -27%. За класификация GWT10

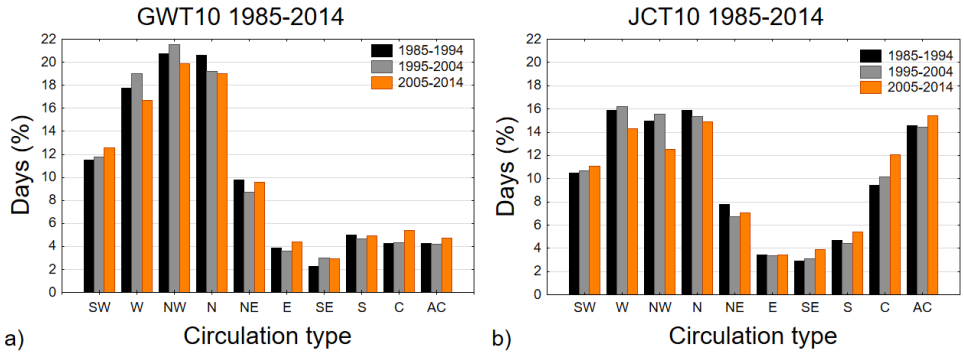
Type	BFT	GWT10	JCT10	GWT26	JCT26
BFT-I	16 (31%)	1	17	13 (25%)	11 (22%)
BFT-II	12 (23%)	12	-	11 (22%)	11 (22%)
BFT-III	21 (42%)	31	30	16 (31%)	26 (51%)
BFT-IV	2 (4%)	7	4	11 (22%)	3 (6%)
Total	51	51	51	51	51

Таблица 3: Сравнение на броя на дните с фьон от ръчна класификация (BFT колона 2) и съответните GWT10 (колона 3), JCT10 (колона 4), GWT26 (колона 5) и JCT26 (колона 6) за март 1979-2014.

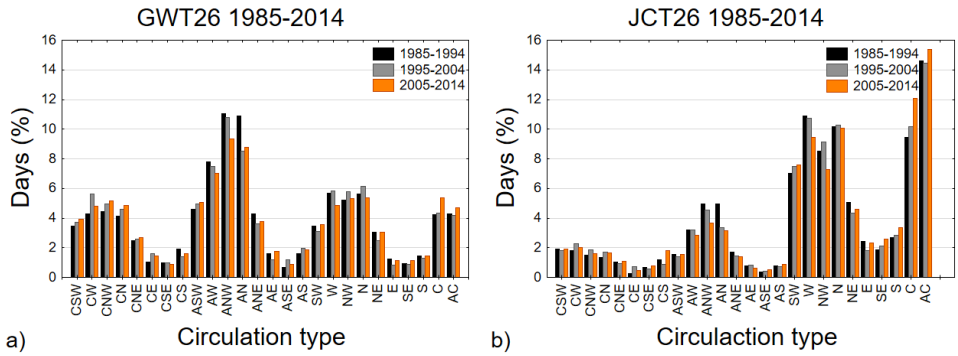
тип SW е намалял с -25% за периода 2005-2014 г. Сравнението на типовете циркулация GWT26 и JCT26 за периодите 1995-2004 г. и 2005-2014 г. потвърждават намаляването на дните с фьон за периода 2005-2014 г. поради спад на циркулацията тип W с -76% и -82%, съответно и NW с -100% и -71%, съответно.

5.5 Обща атмосферната циркулация

Изследвани са типовете на общата атмосферна циркулация над Югоизточна Европа за три десетилетия: 1985-1995 г, 1995-2004 г. и 2005-2014 г. Фигури 14 (a,b) показват GWT10 и JCT10 за всяко десетилетие поотделно. Вижда се, че за GWT10 има четири основни типа с повече от 10% от дните: NW, N, W и SW. Интересното е, че за периода 2005-2014 г. има спад на типовете NW и W в диапазона 1 - 2.5%. Трябва да се отбележи, че двата типа показват и намаление за дни с фьон, както е установено в раздел 5.3. За периода 2005-2014 г. нарастването на типове C, E и SW има компенсиращ ефект за GWT10. Намаление на типовете W и NW между 2 и 4% се наблюдава и при класификацията JCT10 за периода 2004-2015 г. Това се компенсира от 2% увеличение на C и 1% увеличение на AC тип. За периода 2005-2014 г. класификацията GWT26 също показва намаляване на тип W, а вторият тип с намаляване е ANW. На фигури 15 (a,b) се наблюдава увеличение на процента дни с C и AC тип и за GWT26, и за JCT26 класификации. За JCT26 има около 2% спад в броя на дните с W, NW и ANW.



Фигура 14: Относителни честоти на типовете циркулация за периодите 1985-1994 г. (черни стълбчета), 1995-2004 г. (сиви стълбчета) и 2005-2014 г. (оранжеви стълбчета). a) GWT10 и b) JCT10.

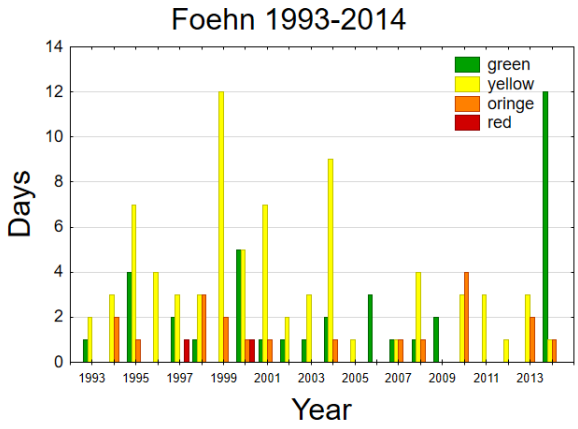


Фигура 15: Относителни честоти на типовете циркулация за периодите 1985-1994 г. (черни стълбчета), 1995-2004 г. (сиви стълбчета) и 2005-2014 г. (оранжеви стълбчета). a) GWT26 и b) JCT26.

6 Фьонът в София - опасно метеорологично явление

6.1 Фьонът - опасно метеорологично явление

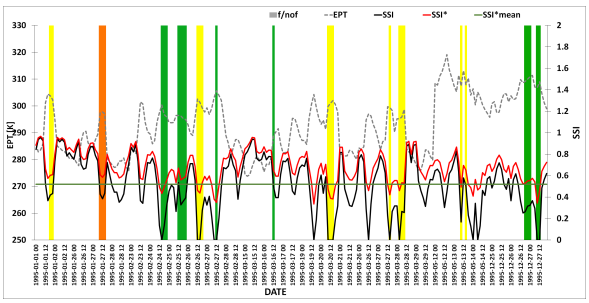
На фигура 16 е показано разпределението на броя на дните с фьон за периода 1993-2014 г. в зависимост от пулсациите на вятъра.



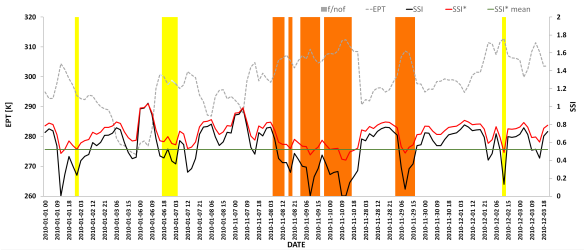
Фигура 16: Брой на дните с фьон по години и кодове за опасно явление (зелен, жълт, оранжев и червен) за периода 1993-2014 г.

6.2 Индекс на устойчивост за фьон в София

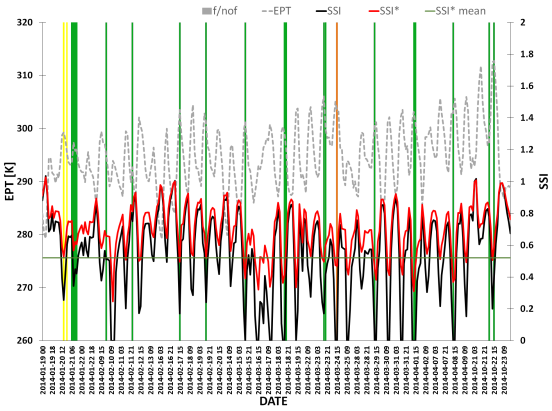
Индексът на устойчивост Черни връх-София (CSSI) и модифицираният индекс SSI* за обстановки с фьон са пресметнати за периода 1993-2014 г. Както се вижда на фигурите 17, 18 и 19, SSI е в интервала от 0 до 1, но за 11 случая с фьон той не може да бъде пресметнат. Това е причината да се предложи модифицираният индекс SSI* От фигурите ясно се вижда тенденция за намаляване и достигане на минимални стойности на SSI* по време на фьон и след това, с увеличаването на индекса, фьонът спира. Статистиката за 22-годишния период на SSI* по време на обстановки с фьон дава: 1) най-ниска стойност от 0.11, 2) най-висока стойност от 0.83, 3) средна стойност от 0.52 и 4) 25 и 75 процентил от 0.46 и 0.6. От фигури 17, 18 и 19, ясно се вижда, че стойностите на SSI* под 0.52 (зелена хоризонтална линия) се получават за дни без фьон. Това е индикация, че SSI* самостоятелно не може да се използва за разграничаване на условията с и без фьон. В повечето от обстановките с фьон EPT достига максималната си стойност по време на фьона.



Фигура 17: Индекс на устойчивост София - Черни връх SSI (черна линия), SSI* (червена линия), псевдопотенциална температура (сива прекъсната линия) и пулсации на вятъра (цветни стълбчета) за 1995 г.



Фигура 18: Индекс на устойчивост София - Черни връх (SSI (черна линия), SSI* (червена линия), псевдопотенциална температура (сива прекъсната линия) и пулсации на вятъра (цветни стълбчета) за 2010 г.



Фигура 19: Индекс на устойчивост Черни връх-София SSI (черна линия), SSI* (червена линия), псевдопотенциална температура (сива прекъсната линия) и пулсации на вятъра (цветни стълбчета) за 2014 г.

6.3 Вятър на Черни връх при фьон в София

В раздела е изследвана връзката между посоката на вятъра на Черни връх и появата на фьон в София за периода 1993-2014 г. Както е показано в таблица 4, при фьон в София основните посоки на вятъра на Черни връх са юг и югозапад (202° и 225°), съответно в 42 и 40% от дните. При посоката на вятъра на Черни връх от 157 до 180° попадат 11% от дните, а в 7% от дните посоката на вятъра е 247-270°. Посоката на вятъра на Черни връх е анализирана и на базата на критериите на Метеоаларм за издаване на предупреждение - жълт, оранжев и червен код (таблица 4). При жълт код за фьон в София преобладаващата посока на вятъра на Черни връх е 202° или 47% от дните с фьон, последвани от 225° или 37%. В 55% от дните с оранжев код в София посока на вятъра на Черни връх е 225° и за всички дни с фьон, с предупреждение червен код посока на вятъра е 180°. Класификация на типовете атмосферна циркулация BFT (*Stoev and Guerova*, 2020) при код жълт, оранжев и червен е представена в таблица 5.

При следващата стъпка от изследването периодът 1993-2014 е разделен на два

Черни връх посока:		под 180°	180°	202°	225°	над 225°
Общо	дни	1	10	41	39	7
	%	1	10	42	40	7
Жълт	дни	1	4	36	28	7
код	%	1	5	47	37	9
Оранжев	дни	-	4	5	11	-
код	%	-	20	25	55	-
Червен	дни	-	2	-	-	-
код	%	-	100	-	-	-

Таблица 4: Посока на вятъра на Черни връх при фьон в София, брой дни и процент за предупреждение жълт код (ред 2 и 3), оранжев код (ред 4 и 5) и червен код (ред 6 и 7) за периода 1993-2014 г.

	Тип	Ia	Ib	Ic	Id	IIa	IIb	IIIa	IIIb	I	II	III
Жълт	дни	18	5	6	10	8	6	19	4			
код	%	24	6.5	8	13	10.5	8	25	5	51.5	17.5	30
Оранжев	дни	10	2	-	1	2	1	3	1			
код	%	50	10	-	5	10	5	15	5	65	15	20
Червен	дни	2	-	-	-	-	-	-	-			
код	%	100	-	-	-	-	-	-	-	100		

Таблица 5: Брой дни с фьон и процент от типове фьонови класификации: тип I, II и III оранжев код (редове 4 и 5) и червен код (редове 6 и 7) за предупреждения в системата Метеоаларм за периода 1993-2014 г.

подпериода: 1993-2003 г. и 2004-2014 г. Годините с фьон от 1 до 5 дни са: 1993-1994, 1996-1997, 2002-2003, 2005-2007, 2009 и 2011-2013. Има промяна в посоката на вятъра на Черни връх от 230° преди фьона на 200° по време на фьона за 3 дни през периода 1993-2003 г. и за 4 дни през периода 2004-2014 г. Типовете атмосферната циркулация за случаите с фьон в София и промяна на посоката на вятъра на Черни връх са: 1) Ia - три обстановки и 2) Ib, Ic, IIb и IIIa - по една обстановка. За 4 дни с фьон скоростта на пулсациите на вятъра е 14-20 m/s, а за 2 дни е 20-30 m/s. Годините с 6 до 10 дни с фьон са: 1998, 2008 и 2010 г. За тези години промяната на посоката на вятъра се наблюдава само за два дни. Преобладаващата посока на вятъра на Черни връх е 200°, а за периода 9-11 ноември 2010 г. е 180°; типовете циркулации са Ia, Ic и IIIa. Годините с повече от 10 дни с фьон са: 1995, 1999-2001, 2004 и 2014 г. Преобладаващата посока на вятъра на Черни връх по време на фьон в София е 200° и 230°.

6.4 Числен индекс Черни връх-София 2010 г.

В този раздел са представени резултатите от числени експерименти с числен модел WRF за 5 обстановки с фьона през 2010 г. За пресмятане на числения индекс на устойчивост $SSI^*{}_w$ са използвани температурни профили от най-близката до София моделна точка. Сравнението между среднодневните стойности на SSI^* и $SSI^*{}_w$ е представено в таблица 6 като са дадени и стойностите един ден преди и след фьона. За дните с фьон

на 6 и 7 януари 2010 г. (жълт код на Метеоаларм) SSI* намалява с 9 и 27%, съответно. За сравнение SSI*$_w$ намалява с 20% на 6 януари, но на 7 януари е без промяна. На 8 януари фьонът спира и SSI* се увеличава с 29%, докато SSI*$_w$ нараства само с 5%. Средната дневна стойност на SSI* има високи стойности в дните преди и след фьона и минимални по време на фьона. За фьонова обстановка 28-30 ноември 2010 г, за първия ден с фьон най-голям е спадът на SSI* от 24% на 29 ноември (таблица 6). При фьонова обстановка 7-11 ноември спадът на SSI* е 21 % на 8 ноември а за обстановка 1-3 декември най-голямо е намалението на SSI* 19% на 2 декември 2010 г. За втория ден с фьон спадът на SSI* е 27 и 21% съответно на 7 януари и 9 ноември 2010 г. За третия ден на фьона 10 ноември SSI* намалява с 16%. Денят след фьона е отбелязан с увеличение SSI* от 11 на 29%. Сравнение между SSI*, SSI*$_w$ показва сходни стойности в деня преди и след фьона, но намаляването му в деня на явлението значително по-малко в сравнение с индекса от наблюдения. През първата фьонова обстановка 5-8 януари SSI*$_w$ намалява между 10 и 20%. При втората обстановка 7-11 ноември SSI*$_w$ намалява само с 8% на 9 ноември (таблица 6), и се увеличава с 15% на 10 ноември 2010 г. За фьонови обстановки 28-30 ноември и 1-3 декември се вижда че знакът на SSI*$_w$ отговаря на SSI* но стойностите са занижени. Въз основа на направеното сравнение между SSI* и SSI*$_w$ за 2010 г. настоящата конфигурация на модела има ограничена чувствителност към фьона.

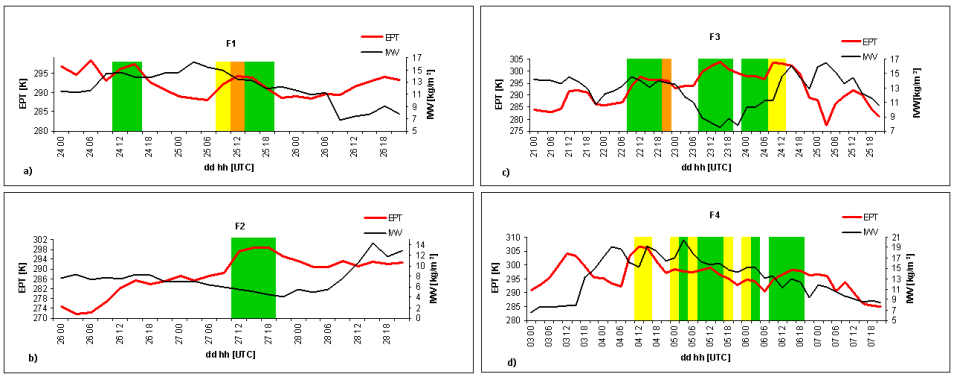
Дата	SSI*	SSI*$_w$	Метеоаларм код
2010-01-01	0.61	0.75	
2010-01-02	0.61 (0%)	na	жълт
2010-01-03	0.69 (+13 %)	0.71	
2010-01-05	0.89	0.90	
2010-01-06	0.80 (-9%)	0.72 (-20%)	жълт
2010-01-07	0.58 (-27%)	0.72 (0%)	жълт
2010-01-08	0.75 (+29%)	0.76 (+5%)	
2010-11-07	0.79	0.73	
2010-11-08	0.62 (-21%)	0.65 (-11%)	оранжев
2010-11-09	0.49 (-21%)	0.60 (-8%)	оранжев
2010-11-10	0.41 (-16%)	0.69 (+15%)	оранжев
2010-11-11	na	0.74 (+7%)	
2010-11-28	0.76	0.83	
2010-11-29	0.58 (-24%)	0.73 (-12%)	оранжев
2010-11-30	0.71 (+22%)	0.77 (+5%)	
2010-12-01	0.78	0.80	
2010-12-02	0.63 (-19%)	0.72 (-10%)	жълт
2010-12-03	0.70 (+11%)	0.76 (+5%)	

Таблица 6: Среднодневна стойност на SSI* (колона 2) и SSI*$_w$ (колона 3) и код на предупреждение Метеоаларм (колона 4) за 5 обстановки с фьон през 2010 г. В колони 2 и 3 е дадена промяната на индекса на устойчивост. С "na" е посочено, че няма налични данни.

6.5 Интегрирана водна пара при фьон в София 2004, 2008 и 2010 г.

В този раздел е изследвана връзката между фьона в София и изменението на интегрираната водна пара (IWV) в ГНСС станция София-Плана. За 2004 и 2008 са анализирани общо 4 фьонови синоптични обстановки.

Първата фьонова синоптична обстановка е от 24 до 26 март 2004 г. (F1, фигура 20a) с регистриран фьон на 24 март между 12 и 18 UTC и на 25 март между 9 и 21 UTC. И двете събития започват с увеличение на EPT и намаляване на IWV по време на фьона. При фьонова синоптична обстановка 26-28 декември 2004 г. за период от 12 до 21 UTC на 27 декември се наблюдава увеличаване на EPT а IWV намалява линейно между 3 и 21 UTC.



Фигура 20: EPT (червена линия) и IWV (черна линия), а с цветни стълбчета е маркиран момента на фьона по критерии за скоростта на пулсациите на вятъра спрямо предупрежденията по Метеоаларм системата за: a) F1, 24-26 март 2004 г., b) F2, 26-28 декември 2004, c) F3, 22-24 март 2008 г. и d) F4, 3-7 декември 2008 г.

Фьон с различна продължителност е регистриран на 22, 23 и 24 март 2008 г. На 23 март IWV намалява от 13.5 kg/m^2 в 0 UTC до 8.8 kg/m^2 в 9 UTC (фигура 20c). Фьон с различна продължителност е регистриран на 4, 5 и 6 декември 2008 г. (фигура 20d). На 5 декември IWV непрекъснато намалява от 20.4 kg/m^2 в 3 UTC до 14.3 kg/m^2 в 21 UTC. Анализът на среднодневните стойности на IWV за шест обстановки с фьон през 2008 и 2010 (таблица 7) не показва добре изразени тенденции. Появата на фьон е свързано с намаляването на относителната влажност на въздуха при земята и може да се очаква това да доведе и до намаляване на IWV. За разглежданите обстановки през 2004, 2008 и 2010 г. в изменението във времето на IWV преди, по време и след фьона не се открива ясна тенденция. Вероятните причини за липсата на добре изразена IWV тенденция са: 1) местоположението на ГНСС станция София-Плана е на изток от Витоша и вероятно регистрира въздушната маса, която обтича странично Витоша и не се трансформира значително, 2) фьонът е местен вятър и неговата поява само в отделни обстановки се реализира в цялото Софийско поле, 3) IWV е интегрална характеристика

и отразява измененията както близо до земната повърхност така и във височина което би могло да доведе до взаимно компенсиращи се изменения и 4) различните механизми за формиране на фьон вероятно също са фактор.

Дата	IWV kg/m^2	ΔIWV $kg/m^2/day$	Метеоаларм код
2008-03-21	13.24		
2008-03-22	13.61	+0.37	оранжев
2008-03-23	9.25	-4.36	зелен
2008-03-24	13.32	+4.07	жълт
2008-03-25	12.68	-0.64	
2008-12-03	10.48		
2008-12-04	17.48	+7.0	жълт
2008-12-05	16.30	-1.18	жълт
2008-12-06	12.49	-3.81	жълт
2008-12-07	9.31	-3.18	
2010-01-01	11.92		
2010-01-02	11.52	-0.4	жълт
2010-01-03	7.25	-4.27	
2010-01-06	14.10		
2010-01-07	12.32	-1.78	жълт
2010-01-08	10.54	-1.78	
2010-11-07	11.60		
2010-11-08	17.07	+5.47	оранжев
2010-11-09	18.26	+1.19	оранжев
2010-11-10	17.88	-0.38	оранжев
2010-11-11	na	na	
2010-11-28	16.41		
2010-11-29	15.73	-0.68	оранжев
2010-11-30	19.46	+3.73	
2010-12-01	19.02	-0.44	
2010-12-02	20.04	+1.02	жълт
2010-12-03	18.32	-1.72	

Таблица 7: Среднодневна стойност на IWV (колона 2) и тенденция на IWV (колона 3) от ГНСС станция София-Плана за 2008 г. и 2010 г. За дните с фьон е отбелязан и Метеоаларм кода за опасно време (колона 4). С "na"е обозначена липсата на данни.

7 Приложение в оперативната дейност

Оперативната диагноза и прогноза на времето включва комплексен анализ на атмосферните процеси с детайлен анализ на основните барични образувания при земята и във височина. Дългогодишният синоптичен опит показва, че наблюденията в София и Черни връх са важен фактор за прогнозата на ОЯ. Предложеният от *Stoycheva and Evtimov* (2014) индекс на устойчивост се прави за първи път количествена оценка на тази връзка за обстановки с мъгла. Логично продължение е този индекс да се приложи и за други опасни явления. Тъй като индексът има за цел количествено да "оцени"

степента на устойчивост на частиците във въздушната маса, логично е да се направи предположението, че би могъл да се използва в диаметрално противоположни условия по отношение на устойчивостта, такива, при които се проявява фьон, с много динамика и на практика при неустойчиви състояния на атмосферата. Във връзка с това в глава 6 е направено и изследвано предположението за очаквани ниски стойности на SSI при фьон и е разработен модифициран индекс за фьон SSI* чрез анализ на фьонови обстановки за 22-годишен период (1993-2014 г). От януари 2019 г. в оперативната работа на дежурните синоптици в сектор "Метеорологични прогнози"в НИМХ ежедневно, тестово се пресмятат и визуализират SSI* както и индекс от числен модел за прогноза на времето Аладин-бг ($SSI^*{}_a$). Направено е предложение за подобрение на оперативна процедура по оценката на фьонови обстановки, представено в публикацията *Stoev et al.* (2020).

7.1 Сравнителен анализ на субективна и обективна типизация за 2019-2020 г.

За синоптичните обстановки с фьон в София през периода януари 2019 - декември 2020 г. е направено сравнение между типовете атмосферна циркулация, с използване на представените в глава 5 субективната класификация на фьонови синоптични обстановки (BFT) и обективни класификационни схеми GWT (*James*, 2007) и JCT (*Jones et al.*, 1993). Както се вижда от таблица 8, първата фьонова синоптична обстановка от 4 ноември 2019 г., според субективната класификацията BFT, е от тип IIa. Втората фьонова обстановка от 21 декември 2019 г. се класифицира като тип I. От направената автоматична класификация на синоптичните обстановки с фьон в София през ноември и декември 2019 г. се вижда, че и двете класификационни схеми GWT и JCT, с 10 и 26 класа дават еднакви резултати, като класифицират обстановките от тип югозапад (SW). В таблица 8 са показани още и стойностите на индекса на устойчивост при обстановки с фьон SSI* и кода на предупреждение, според Метеоаларм.

гг-мм-дд-чч	SSI*	Метеоаларм код	BFT Stoev	GWT10	GWT26	JCT10	JCT26
2019-11-04-00	0.57	зелен	IIa	SW	SW	SW	SW
2019-12-21-21	0.48	оранжев	I	SW	SW	SW	SW
2020-01-28-15	0.50	зелен	IIIa	W*	W*	W*	W*

Таблица 8: Фьонови синоптични обстановки 2019-2020 г. Колона 2 - стойности на SSI*, колона 3 - кодиране по Метеоаларм, колона 4, 5, 6, 7 и 8 - вид типизация, с * е означено предполагаемият тип циркулация.

7.2 Индекс на устойчивост и вятър на Черни връх

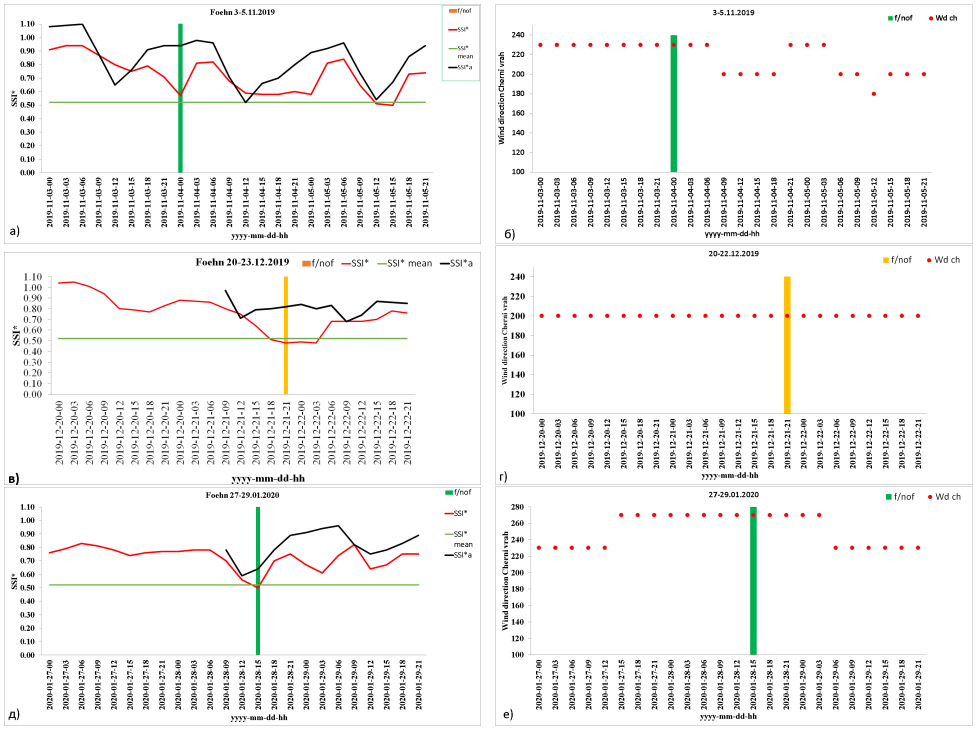
Индексът на устойчивост Черни връх - София е пресметнат от наблюдения и данни от числен модел. Резултатите са представени на фигури 21а, 21в и 21д. С червена линия е представен индексът на устойчивост Черни връх - София SSI* от наблюдения, а с черна линия - от числен модел Аладин-бг ${SSI^*}_a$. На фигурите с цветни стълбчета е фиксиран моментът на регистрация на фьон, като цветовете отговарят на кода за опасност на пулсациите на вятъра, според Метеоаларм. На фигури 21б, 21г и 21е са представени посоките на вятъра на Черни връх (червени точки) по време на разглежданите фьонови синоптични обстановки. Характерното за индекса на устойчивост, пресметнат с данни от наблюдения е, че има ниски стойности, а при обстановката от декември 2019 г. стойността му се понижава и под средното прагово ниво за реализиране на фьон в София, което е 0.52. При първата обстановка, след появата на фьона на 4 ноември 2019 г. в 00 часа индексът на устойчивост SSI* има още два минимума (виж фигура 21а), но в района на ЦМС вятърът не се проявява като фьон, въпреки това преобладаващата посока е от южната четвърт. Една от причините за липсата на фьон е, че на Черни връх вятърът има променлива посока, както се вижда от фигура 21б. При обстановката от декември 2019 г., при която в София пулсациите на фьона достигат 23 m/s и съответстват на оранжев код според Метеоаларм, посоката на вятъра на Черни връх се запазва постоянна: 202° (фигура 21г). Климатологията на вятъра на Черни връх при фьонови синоптични обстановки в периода 1993-2014 (таблица 4) показва, че в 80% от обстановките с код оранжев са при посока между 202° и 225°. За разглежданите фьонови синоптични обстановки индексът на устойчивост ${SSI^*}_a$, пресметнат с данни от числения модел Аладин-бг, е със завишени стойности. Като една възможна причина за това е описанието на орографията в модела.

7.3 Фьонова синоптична обстановка 20-22 декември 2020 г.

В тази секция е разгледана синоптичната обстановка от 20-22.12.2020 г.

7.4 Числен модел Аладин-бг при обстановки с фьон

От януари 2019 г. в оперативната работа на дежурните синоптици в НИМХ ежедневно автоматично се изчисляват и записват в табличен вид стойностите на SSI и SSI*. Те, както и температурите, отчетени в синоптичните станции в София и на Черни връх, относителната влажност на въздуха, посоката и скоростта на вятъра, точката на оросяване и хоризонталната видимост в ЦМС в София, също се записват в таблица. Изчисляват се и прогностичните стойности на два индекса на устойчивост от оперативния числен модел Аладин-бг SSI_a и ${SSI^*}_a$ от 06 UTC. Прогностичните стойности на SSI_a и ${SSI^*}_a$ както и прогнозата за посока и скорост на вятъра в София, температура в София и на ниво 2000 m, относителна влажност на въздуха в София от числения модел Аладин-бг автоматично се записват в разработената оперативна таблица. Направено е



Фигура 21: Схематично представени: SSI* (червена линия), SSI*$_a$ (черна линия), посоката на вятъра на Черни връх (червени точки) по време на фьон (цветен вертикален стълб) в София за синоптични обстановки: а) и б) 3-5.11.2019 г., в) и г) 20-22.12.2019 г. и д) и е) 27-29.01.2020 г.

и автоматично оцветяване на стойностите на индекса SSI* и SSI*$_a$ за фьон, при изпълнени количествените критерии. През периода ноември 2019 - април 2020 г. оперативният продукт се използва експериментално и за прогноза на фьон в София.

7.5 Дискусия

В заключение се предлага процедура по оценката на фьонови обстановки със следните елементи:

- поява на вятър в София от южната четвърт и усилване на скоростта му с поне 5 m/s,
- прогностични стойности на SSI*$_a$ по-ниски или равни на средната стойност (0.52) на индекса на устойчивост за фьон (тази стойност е получена от статистическите усреднявания, направени върху фьоновите синоптични обстановки в периода 1993-2014 г.,
- относителна влажност на въздуха в София по-ниска или равна на 50%,
- посока на вятъра на Черни връх постоянна и между 202° и 225°,

- автоматично определяне на типа атмосферна циркулация, използвайки оперативния числен модел за прогноза на времето, обхващащ Централно Средиземноморие и Балканския полуостров.

8 Заключения

За 40-годишния период на изследване (1975-2014 г.), използвайки количествени критерии за определяне на вятъра като фьон, бяха установени 298 дни с фьон в София, реализирани в 220 синоптични обстановки. За изследвания период е направена субективна типизация (BFT) на синоптичните обстановки и те са групирани в четири основни типа. Фьонова синоптична обстановка тип I се реализира 114 пъти или 52% от всички обстановки. В обстановка от тип II попадат 54 случая или (25%), в тип III - 45 случая или 20%, а в тип IV - 7 случая или само 3% от реализираните обстановки за разглеждания период. Средният годишен брой дни с фьон в София е съответно 8.9, 8.1, 8.3 и 4.5 за периодите 1975–1984, 1985–1994, 1995–2004 и 2005–2014 г. След 2004 г. се установява намаление на средногодишния брой дни с фьон и се регистрира намаление на максималния порив на вятъра. Месеците с най-голям брой дни с фьон са март 56 дни, април 46 дни и февруари 43 дни. За 40-годишния период (1975–2014 г.) преобладаващата продължителност на фьона е 2 дни (47 случая), а най-продължителната фьонова обстановка е от 7 дни от 24 февруари до 2 март 1989 г. За разглеждания период поривите на вятъра в София са: 1) по-малки от 14 m/s в 26% от дни, 2) 14–19 m/s в 52% от дните, което съответства на код „жълт“ на критериите за опасно метеорологично време използвани в НИМХ. В 21% от дните поривите на вятъра са 20–29 m/s (оранжев код в Метеоаларм), а само в 1% от дните (общо 4 случая) поривите на вятъра надвишават 30 m/s (червен код в Метеоаларм). Най-силният порив на вятъра е регистриран през април 1975 г. - 32 m/s, а най-слабият - 5 m/s на 23 март 2006 г. За последното десетилетие (2005–2014) се отчита намаляване на максималния порив на вятъра, който е 22 m/s. От направеното разпределение на приземното атмосферно налягане, приведено към морското равнище, регистрирано в 12 UTC в София за 4-те типизации на синоптичните обстановки се установи, че за тип IV пикът на налягането е при 1020 hPa, което е свързано с положението на системата за ниско налягане над Балтийския регион. Обстановките тип I има пик на налягане при 1005 hPa. Това е очакван резултат и е свързан със средиземноморските циклони, влияещи на циркулацията над Балканския полуостров. За периода 1975-2001 е направена обективна типизация на фьоновите синоптичните обстановки, използвайки класификационна схема GWT с 26 класа, с входен параметър приземното атмосферно налягане. Преобладаващите обективни типове на атмосферната циркулацията са CW, CN1, CN2, AW, AN1 и C съответно с 47 (20%), 27 (11%), 28 (12%), 31 (13%) и 23 (10%) от дните с фьон в София. От направеното сравнение между субективната и обективната типизация се установи, че има разлика в типовете атмосферна циркулация, като възможна причина за това е представянето на планинските препятствия в реанализа на ERA-Interim. При субективната типизация

максимален брой на дни с фьон в София се наблюдава при синоптични обстановки, свързани със средиземноморски циклони, докато при обективната типизация максимален е броят на дните с фьон в обстановки пред приближаващ студен атмосферен фронт. След анализа на двата вида типизации (субективна и обективна) изводът е, че нито ръчната, нито обективната типизация могат да работят добре самостоятелно, без ключовата роля на опитен синоптик за добрата прогноза на фьона, като опасно метеорологично явление. За периода 1979-2014 г. е направена обективна типизация на синоптичните обстановки с фьон в София с два класификационни схеми GWT и JCT, с 26 (GWT26, JCT26) и 10 класа (GWT10, JCT10). Сравнението между типовете GWT10 и JCT10 за дните с фьон през периода септември-май дава най-голям брой за типове югозапад (SW), запад (W) и северозапад (NW). Те обаче се различават с 10% за тип SW и 5% за тип W и NW. GWT26 потвърждава появата на фьон за типове циркулация W (25%), SW (19%), CW (18%) и CSW (14%). Типовете циркулация на JCT26 за дните с фьон са W (29%), SW (21%), C (13%), CSW (11%) и CW (11%). Трябва да се отбележи, че GWT26 има равномерно разпределение между типовете в класовете циклонален, антициклонален и зонален режим с доминиращи типове SW, W, NW и N във всяка група. От друга страна, за JCT26 преобладаващите типове циркулация са W, SW, NW, N и C и AC. Осемте циклонални и осемте антициклонални типа на JCT26 се срещат в по-малко от 5% от дните. За дните с фьон през март 1979-2014 г. сравнението между обективните и субективната класификации показва тенденция на GWT10 и JCT10 да подценяват или надценяват типовете BFT. Сравнението на BFT е много добро с GWT26, и най-добро с JCT26. Сравнение между периодите 1995-2004 и 2005-2014 дава намаляване на циркулацията тип W с -65% (GWT10) и -80% (JCT10) и NW с -25% (GWT10) и -27% (JCT10). Класификационните схеми GWT26 и JCT26 потвърждават, че намаляването на фьоновите дни се дължи на намаляването на циркулацията тип W с -76% (GWT26) и -82% (JCT26) и NW с -100% (GWT26) и -71% (JCT26). Общ анализ на циркулацията за периода 1985-2014 г. потвърждава намаляването на типовете W и NW за всички дни в периода 2005-2014. Обективните типизации за атмосферната циркулация могат да се използват за количествено определяне на появата на фьон в Софийското поле. Тази работа е първата стъпка към разработването на обективна система за предупреждение за оперативна прогноза на времето в Националния институт по метеорология и хидрология в България. От направеното изследване на модифицирания индексът на устойчивост Черни връх-София (SSI*) за обстановки с фьон се установи, че има тенденция той да намалява, достигайки минималната си стойност, по време на фьон и да се увеличава с края на фьона. За повечето случаи с фьон SSI* увеличението на индекса маркира края на фьон и може да се използва за предиктор при оперативното прогнозиране. Средната стойност SSI* по време на фьон е 0.52, но също така се получава и за дни без фьон, което е индикация, че SSI* сам по себе си не може да се използва за разграничаване на фьона. Детайлен анализ на фьонови синоптични обстановки през 2008, 2009 и 2010 показва, че SSI* има много висока чувствителност към условията за фьон. През 2010 г. SSI* има локален минимум

по време на фьон и добро разграничаване на часовете без фьон на 8 и 9 ноември 2010 г. Интегрираната водна пара не показва ясна тенденция преди, по време и след фьона и вероятната причина е, че тя регистрира въздушната маса която обтича странично Витоша. Сравнението на SSI* и пресметнатият с числен модел WRF индекс (SSI*$_w$) показва, че моделът има ограничена чувствителност. Намаляването на SSI*$_w$ по време на фьона е два пъти по малко от SSI*. За обстановки с фьон в София посоката на вятъра на Черни връх е юг-югозапад или 202° и 225° в 42 и 40% от дните. Съгласно критериите за ОЯ на европейската система Метеоаларм за пориви на вятъра с жълт код в София преобладаващата посока на вятъра на Черни връх е 202° в 47% от дните, последвани от 225° в 37%. В 55% от дните с оранжев код посока на вятъра на Черни връх е 225°, а за всички фьонови събития с червен код посоката на вятъра на Черни връх е 180°. От направената субективна типизация на обстановките с фьон се установи, че обстановки от тип I, при които средиземноморски циклон преминава над Унгария, водят до съответно 52, 65 и 100% от дните с жълт, оранжев и червен код. За периода ноември 2019 - януари 2020 г. е направено е сравнение между субективната типизация (BFT) и две обективни типизации на атмосферната циркулация (GWT и JCT). За обективното класифициране на синоптичните обстановки е характерно, че над северозападните райони от Балканския полуостров на височина 850 hPa баричното поле е циклонално, което съответства и на субективната класификация, при която над Унгарската низина е разположен циклонален вихър. Индексът на устойчивост Черни връх - София (SSI*), пресметнат от данните от наблюденията има ниски стойности, а при една обстановка се понижава и под средната прагова стойност за реализиране на фьон в София (0.52). Тази синоптична обстановка съответства на оранжев код с регистрирани пулсации на вятъра от 23 m/s. Посоката на вятъра на Черни връх се запазва постоянна (202°) и е в съгласие с климатологията на вятъра на Черни връх при фьонови синоптични обстановки за периода 1993-2014 г., която показва, че в 80% от обстановките с код оранжев, посоката на вятъра е между 202° - 225°. За фьонови обстановки в периода ноември 2019 - януари 2020 г. индексът на устойчивост от числения модел Аладин-бг (SSI*$_a$) е със завишени стойности спрямо този, пресметнат от измерванията, но е по-нисък от този, пресметнат в сроковете без фьон.

9 Научни приноси, публикации и представяне на резултатите по дисертацията

9.1 Научни приноси

- Субективна и обективна типизация на фьонови синоптични обстановки в София за периода 1975-2014 г.
- Предложена е модификация на индекс на устойчивост Черни връх-София за обстановки с фьон.

- Установена е връзка между посоката на вятъра на Черни връх и фьона в София.
- Установена е количествена зависимост, водеща до редуциране на дните с фьон в периода 2005-2014 г.

9.2 Публикации по дисертацията

1) Stoev K. and G. Guerova, 2020. Foehn classification and climatology in Sofia for 1975-2014, Idojaras, 124/4, 483-497.

2) Stoev K., A. Stoycheva, H. Hristov and G. Guerova, 2020. Use of a forecasting index of stability in situations with a foehn in Sofia, Bul. J. Meteo & Hydro, 24/1, 2-16.

3) Stoev K., G. Guerova and I. Gospodinov, 2019. Mediterranean cyclones and foehn synoptic situations for the period 1975-2001, Bul. J. Meteo & Hydro, 23/1, 2-16.

4) Stoev K., P. Post and G. Guerova, 2021. Synoptic circulation patterns associated with foehn days in Sofia: 1979-2014, Idojaras, in review.

5) Stoev K., G. Guerova and K. Vassileva, 2017. "Use of GNSS tropospheric products to study the foehn in Sofia", 6th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 25-27 October 2017, Valencia, Spain.

6) Stoev K. and G. Guerova, "Case studies of foehn in Sofia with GNSS tropospheric products", in COST Action ES1206: Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate, Jones J., G. Guerova, J. Dousa, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, R. van Malderen [editors], Springer [publisher], 2020, 217-221, doi:10.1007/978-3-030-13901-8_4.

9.3 Представяне на резултатите от дисертацията

1) Stoev K., and G. Guerova, "Typification of the foehn in Sofia for the period 1975-2014", 3nd National Physics Congress, 29 September - 2 October 2016, Sofia, Bulgaria. (oral)

2) Stoev K. "Use of GNSS tropospheric products to study the foehn in Sofia", Workshop on extreme weather and climate, 25/05/2017, Guletsitsa, Bulgaria. (oral)

3) Stoev K., "Study of foehn with Sofia Stability Index and GNSS troposshеric products", Training "Physics and chemistry of the Earth System", 31 May-2 June 2019, Varshets, Bulgaria.

4) Stoev K., "Mediterranean cyclones and weather in Bulgaria", 6th Annual meeting of the Bulgarian avio-meteorologic club, 19 October 2019, Panitchiste, Bulgaria.

5) Stoev K., M. Popova and G. Guerova, "Typfication and climatology of the foehn in Sofia 1975-2014", 2nd GNSS4SWEC summer school, 29-31 August 2016, Potsdam, Germany. (poster)

6) Stoev K., M. Slavchev and G. Guerova, "Use of GNSS tropospheric products to study the foehn in Sofia for the 2004, 2008 and 2010", GNSS4SWEC working group meeting, 1-2/09/2016, GFZ, Potsdam, Germany. (oral)

7) Stoev K., A. Stoycheva and G. Guerova, "Use of GNSS tropospheric products to study the foehn in Sofia", 2018 EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology, 3-7 September 2018, Budapest, Hungary. (oral)

8) Stoev K., D. Nikolov and G. Guerova, "Mediterranean cyclone and foehn in Sofia for the period 1975-2014", 2019 EMS Annual Meeting: European Conference for Applied Meteorology and Climatology, 9-13 September 2019, Copenhagen, Denmark. (poster)

9) Stoev K., "GNSS case study foehn in Sofia", 3rd BeRTISS meeting, Thessaloníki, Greece, 7-8 February 2019. (oral)

10) Stoev K., A. Stoycheva and G. Guerova, "Use of GNSS tropospheric products to study the foehn in Sofia", 1st colloquium GNSS applications in the BalkanMed region, 30-31 January 2020, Sofia, Bulgaria. (oral)

11) Stoev K., P. Post and G. Guerova, "Foehn in Sofia: climatology and circulation type classification 1979-2014", Workshop Compound Weather and Climate Events, 12 - 15 January 2021, online University of Bern, Switzerland. (short oral)

Литература

ALADIN high resolution numerical weather prediction project, http://www.cnrm.meteo.fr/aladin, accessed 30 June 2021.

COST 733 Harmonisation and applications of weather type classifications for european regions, http://cost733.met.no/index.htm, accessed 30 June 2021.

National Centres for Environmental Prediction GFS model, http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsres.2eur.html, accessed 30 June 2021.

Aichinger-Rosenberger, M., E. Brockmann, and G. Möller, Detection of Alpine foehn in GNSS-ZWD time series: An innovative application of GNSS Meteorology, EMS Annual Meeting 2021 EMS2021–453, doi:10.5194/ems2021-453, 2021.

Beck, C., Zirkulationsdynamische variabilität im bereich nordatlantik-europa seit 1780, 2000.

Beran, D. W., Large amplitude lee waves and chinook winds, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *6*(5), 865–877, 1967.

Berrisford, P., et al., The era-interim archive, version 2.0, 2011.

Bocheva, L., C. G. Georgiev, and P. Simeonov, A climatic study of severe storms over Bulgaria produced by Mediterranean cyclones in 1990-2001 period, *Atmospheric research*, *83*(2), 284–293, 2007.

Cape, M., M. Vernet, P. Skvarca, S. Marinsek, T. Scambos, and E. Domack, Foehn winds link climate-driven warming to ice shelf evolution in antarctica, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(21), 11–037, 2015.

Dejmal, K., and J. Novotny, Application of Fog Stability Index for significantly reduced visibility forecasting in the Czech Republic, *Recent Advances in Fluid Mechanics and Heat & Mass Transfer*, pp. 978–1, 2011.

Elvidge, A. D., and I. A. Renfrew, The causes of foehn warming in the lee of mountains, *Bulletin of the American Meteorological Society*, *97*(3), 455–466, 2016.

Gaffin, D. M., Foehn winds that produced large temperature differences near the southern appalachian mountains, *Weather and forecasting*, *22*(1), 145–159, 2007.

Guerova, G., T. Simeonov, and N. Yordanova, The Sofia University Atmospheric Data Archive (SUADA), *Atmos. Meas. Tech.*, *7*, 2683–2694, doi:10.5194/amt-7-2683-2014, 2014.

Guerova, G., et al., Review of the state of the art and future prospects of the ground-based gnss meteorology in europe, *Atmospheric Measurement Techniques*, *9*(11), 5385–5406, 2016.

Hersbach, H., et al., The era5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049, 2020.

Holton, J. R., *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 319 pp., Academic Press, New York, 1973.

Hristov, P., and A. Tanev, *The climate of Sofia*, Nauka i izkustvo, Sofia, 1970.

James, P., An objective classification method for hess and brezowsky grosswetterlagen over europe, *Theoretical and Applied Climatology*, *88*(1), 17–42, 2007.

Jenkinson, A., and F. Collison, An initial climatology of gales over the north sea, *Synoptic climatology branch memorandum*, *62*, 18, 1977.

Jones, P., M. Hulme, and K. Briffa, A comparison of lamb circulation types with an objective classification scheme, *International Journal of Climatology*, *13*(6), 655–663, 1993.

Kusaka, H., A. Nishi, A. Kakinuma, Q.-V. Doan, T. Onodera, and S. Endo, Japan's south foehn on the Toyama Plain: Dynamical or thermodynamical mechanisms?, *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.7133, 2021.

Lamb, H. H., British isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns 1861-1971, 1972.

Marinova, T., L. Bocheva, and V. Sharov, On some climatic changes in the circulation over the mediterranean area, *Idojaras*, *109*(1), 55–67, 2005.

Marshall, G. J., A. Orr, N. P. Van Lipzig, and J. C. King, The impact of a changing southern hemisphere annular mode on antarctic peninsula summer temperatures, *Journal of Climate*, *19*(20), 5388–5404, 2006.

Norte, F. A., Understanding and forecasting Zonda wind (Andean foehn) in Argentina: a review, *Atmospheric and Climate Sciences*, *5*(3), 163–193, 2015.

Oard, M. J., A method for predicting chinook winds east of the Montana Rockies, *Weather and forecasting*, *8*(2), 166–180, 1993.

Panchev, S., *Physics of the atmosphere*, Narodna prosveta, Sofia, 1988.

Philipp, A., C. Beck, R. Huth, and J. Jacobeit, Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software, *International Journal of climatology*, *36*(7), 2673–2691, 2016.

Pisarski, A., The mediterranean cyclones and their influence on the weather in Bulgaria. part i, *Hydrol. Meteorol.*, 1955a.

Pisarski, A., The mediterranean cyclones and their influence on the weather in Bulgaria. part ii, *Hydrol. Meteorol.*, 1955b.

Popova, M., A. Stoycheva, K. Stoev, H. Hristov, A. Kirilova, A. Diakova, and I. Etropolska, METEOALARM – warning system for expected dangerous meteorological phenomena in bulgaria, in *Proceedings of the Second National Congress of Physical Sciences, Sofia. Section: Physics of the Earth, Atmosphere and Space*, vol. ISBN 978-954-580-333-8, Heron Press Ltd., 2013.

Richner, H., and P. Hächler, *Understanding and forecasting Alpine foehn*, 219–260 pp., Springer, 2013.

Skamarock, W. C., J. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. Powers, A description of the Advanced Research WRF Version 3, accessed: 2016-12-06, 2008.

Stefanov, S., S. Mateev, H. Lalovski, A. Pisarski, Y. Kunchev, and K. D. K., *Weather types in Bulgaria*, Nauka i izkustvo, Sofia, 1960.

Stoev, K., and G. Guerova, Foehn classification and climatology in Sofia for 1975-2014, *Idojarash*, *124*(4), 483–497, 2020.

Stoev, K., A. Stoycheva, H. Hristov, and G. Guerova, Use of a forecasting index of stability in situations with a foehn in sofia, *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, *24*(1), 1–17, 2020.

Stoycheva, A., and S. Evtimov, Studying the fogs in sofia with cherni vrah-sofia stability index, *Bulgarian Academy of Sciences ISSN 1311-753X*, *40*, 23, 2014.

Stoycheva, A., M. Popova, A. Kirilova, K. Stoev, I. Etropolska, and H. Georgiev, Forecast of dangerous meteorological phenomena in NIMH-BAS, in *Proceedings of the Second National Congress of Physical Sciences, Sofia. Section: Physics of the Earth, Atmosphere and Space*, vol. ISBN 978-954-580-333-8, Heron Press Ltd., 2013.

Tveito, O. E., R. Huth, A. Philipp, P. Post, M. Pasqui, P. Esteban, C. Beck, M. Demuzere, and C. Prudhomme, Cost action 733: harmonization and application of weather type classifications for european regions; final scientific report, 2016.

Widmer, R., *Statistische Untersuchungen über den Föhn im Reusstal und Versuch einer objektiven Föhnprognose für die Station Altdorf*, 331-375 pp., Vierteljahresschr. Naturforsch. Ges. Zürich, 1966.

Yarnal, B., *Synoptic Climatology in Environmental Analysis*, Belhaven Press: London, 1993.