



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

Прогноза на мъгла за района на летище София

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

За присъждане на образователна и научна степен
„доктор“ по специалност „Метеорология“, шифър
01.04.11 („Науки за земята, шифър 4.4“)

на

ИЛИАН ЙОРДАНОВ МАНАФОВ

Научен ръководител:

/доц. д-р Гергана Герова/

София 2017

Дисертантът е задочен докторант към Катедра метеорология и геофизика, Физически факултет, Софийски университет “Св. Климент Охридски” в периода 2012-2017 г.

Брой страници – 137

Брой фигури – 51

Брой цитирани литературни източници – 53.

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на 31.10.2017 г. от 15 часа в заседателна зала А415 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 доц. д-р Гергана Герова за предоставената възможност тази работа да се осъществи. Благодаря на Георги Пеев, генерален директор на ДП РВД за съдействието, без което щеше да е много трудно. Без разбирането и подкрепата на моите колеги и преки ръководители в ДП РВД тази работа нямаше да бъде възможна. Благодаря на Иван Иванов, зам.директор на ЛЦ за ОВД Горна Оряховица за административната подкрепа и съпричастността. Моят колега от ДП РВД Иван Бенков направи възможно експериментално използване на оперативният модел, като го поддържаше административно абсолютно безкористно. Благодаря на доц. Ренета Димитрова за ценните съвети. Благодаря на Ангел Димитров за помощта при инсталация на модела. Искрено благодаря на д-р Стоян Писов (СУ) за цялостната подкрепа по техническата реализация на числените експерименти на компютърен клъстер Физон. Благодаря на Оана Ливиу от ЗУ Тимишоара, вече аспирант в Университета в Залцбург. Благодаря на Анастасия Стойчева (НИМХ) и Керанка Василева (НИГГГ) за ползотворната съвместната работа. Моята съпруга Ралица и дъщеря Милена бяха безкраен източник на спокойствие.

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
3	Метод на работа	9
3.1	Числен модел за прогноза на времето (WRF)	9
3.2	Вариационен асимилационен метод (WRFDA)	10
3.3	Приземни наблюдения и аерологичен сондаж	10
3.4	Индекс на устойчивост за София	11
3.5	ГНСС метеорология	11
4	Числени експерименти на мъгла в София	12
4.1	Контролен числен експеримент	12
4.2	Числени експерименти на синоптични обстановки с мъгла на летище София в периода 2011-2014 г.	14
4.2.1	Синоптични обстановки с мъгла на летище София 2011-2014 г.	14
4.2.2	Числени експерименти на синоптични обстановки с мъгла	14
5	Асимилационни експерименти с модел WRF на обстановки с мъгла на летище София	18
5.1	Асимилационни числени експерименти (АЧЕ)	18
5.2	АЧЕ на синоптични обстановки тип I	18
5.3	АЧЕ на синоптични обстановки тип II	18
5.4	АЧЕ на синоптични обстановки тип III	19
5.5	АЧЕ на синоптични обстановки тип IV	19
6	Изследване на мъгли с тропосферни продукти от ГНСС	20
6.1	Мъгла 5 февруари 2010 г.	20
6.2	Мъгла 16 февруари 2010 г.	21
6.3	Дневен ход на ИВП от ГНСС и WRF	22

7	Комплексно изследване на продължителна мъгла януари 2014 г.	24
7.1	Анализ на видимостта в София 1-11 януари 2014 г.	26
7.2	Изследване на ИВП за 1-11 януари 2014 г.	26
7.3	Изследване на SSI за 1-11 януари 2014 г.	27
7.3.1	SSI от наблюдения за 1-11 януари 2014 г.	27
7.3.2	SSI от мезомащабен числен модел за 1-11 януари 2014 г. 28	
8	Оперативна информация от WRF за нуждите на ДП РВД	31
8.1	Верификация на WRF за периода октомври 2014 - декември 2015 г.	31
8.2	Успеваемост на числената прогноза на намалена видимост за периода 2015-2016 г.	32
8.3	Оценка на числената прогноза в 6, 12, 18 и 24 час	32
8.4	Продукти за нуждите на метеорологичното обслужване на авиацията	34
9	Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията	35
9.1	Научни приноси	35
9.2	Публикации по дисертацията	37
9.2.1	Публикации в списания	37
9.2.2	Публикации в разширен текст на научни форуми . . .	37
9.3	Представяне на резултатите по дисертацията	37
10	Заклучение	38

1 Актуалност и цел на дисертационния труд

1.1 Актуалност на проблема

Мъглата е едно от метеорологичните явления, които най-силно се отразяват на работата на авиацията. Освен пряката опасност за сигурността на полетите, това явление често е причина за закъснение на полетите и обръкване на разписанията на летищата. Годишните загуби за авиационния бизнес се оценяват на стотици милиони евро и точната и навременна прогноза на появата, развитието и разсейването на мъгла в района на летищата е от първостепенно значение за авиометеорологичното обслужване на авиацията. Районът на летище София се характеризира с климатични и орографски особености, допринасящи за честа поява на мъгли. Летището се намира в оградено с планини Софийското поле (Стара планина, Витоша, Люлин, Лозенска планина). Годишно мъгли с различна продължителност се наблюдават в средно 50 дни. Преобладават случаите с радиационни мъгли, най-често наблюдавани при ясно небе и силно нощно охлаждане на приземния въздух. Наблюдават се и мъгли, следствие на изпарение от паднал валеж, както и фронтални мъгли. Използваните в момента методи за прогноза на формирането, минималната видимост и разсейването на мъглата са статистически и емпирични. До голяма степен се разчита и на субективната преценка на синоптика. Изискванията на съвременния авиационен бизнес налагат обективизиране на методите за прогноза на мъгла. Въвеждането на процедури за работа при намалена видимост на летището предполага много по-точна прогноза на видимостта по часове. Статистическите и емпирични методи самостоятелно не могат да покриват тези изисквания. Използването на мезомаштабен числен модел (МЧМ) е ключов елемент от комплексната система за оперативна прогноза на мъгла и се разработва активно от авиационните служби в Европа.

1.2 Цел и задачи на дисертацията

Целта на дисертацията е изследване на числената прогноза на мъгла от мезомаштабен числен модел WRF за района на летище София. Задачите, свързани с тази цел са:

- Въвеждане в експлоатация и числени експерименти на мъгла с мезомасщабен числен модел WRF с висока хоризонтална разрешаваща способност за територията на България.
- Подбор на оптимални параметризационни схеми за целите на прогноза на условия за образуване и разсейване на мъгла на летище София.
- Анализ на грешките в моделната прогноза и изследване на възможности за редуцирането им чрез асимилация на наземни наблюдения и аерологични сондажи.
- Изследване на съвместното използване на ГНСС тропосферни продукти и числена прогноза. Оценка на потенциала на ГНСС ИВП да бъде използвана за верификация на числената прогноза.
- Верификация на модела в оперативна работа периода 2014-2016 г. с цел оценка на: 1) успеваемостта на числената прогноза на мъгла и 2) прогнозата в 6, 12, 18 и 24 час за летище София.

2 Съвременно състояние на проблема

Прогнозата на намалена видимост водеща до образуване на мъгла е важна за транспорта, особено за авиацията, където годишните загуби за авиационния бизнес се оценяват на стотици милиони евро. Точната и навременна прогноза на появата, развитието и разсейването на мъгла в района на летищата е от първостепенно значение за авиометеорологичното обслужване на авиацията. В практиката не се е наложил един метод за прогноза на мъгла, за който да е прието че осигурява най-добри резултати.

Един от възможните подходи за използване на числени модели при прогноза на мъгла е 1D модел, захранван с резултатите от мезомасщабен числен модел. Този подход е демонстриран в *Roquelaure and Bergot* (2008). Едномерни (1D) числени модели са изследвани в Англия, Франция, Швеция, Португалия и Белгия (*Stessel and Ottoy*, 1999). Изследванията показват че тези модели дават обещаващи резултати. Във Франция използват 1D Cobel (Code de Brouillard à l'Echelle Locale) модел, като за захранващ е мезомасщабният модел Аладин. Моделът работи с много висока резолюция

по вертикалата в атмосферният граничен слой, като в долните 200 m има 20 моделни нива. Особено внимание е отделено на параметризацията на приземния слой, както и на взаимодействието на приземния атмосферен слой с подложната повърхност. Седем са нивата в почвата, разположени в слой с дебелина 2 m. Направена е асимилация на наблюдения на температурата и влагата в долните 30 m, радиационния баланс на повърхността и на височина 45 m, температурата и влажността на почвата до 50 cm. Тригодишната работа на 1D модела на летище Шарл де Гол в Париж показва, че системата прогнозира часа на падане на мъгла с точност под половин час в 55 % и с точност един час в 63 % от случаите. Авторите са установили, че най-голяма грешка системата дава при скорост на вятъра в интервала 3-6 m/s. Използването на 1D модел е най-удачно при вятър под 3 m/s. Полезният срок на прогнозата е оценен на 6 ч. Установено е че 1D модела има значителни слабости при прогноза на слоеста облачност, като това се обяснява с големите пространствени размери за ниска облачност, извън възможностите на едномерен модел. Изследване на мъгла с 1D модел са направили и *Terradellas and Cano (2007)*. Те използват 1D Hirlam модел, като създадената система за прогноза на мъгла се прилага оперативно за девет летища в Испания. Авторите смятат, че 1D модела не е окончателно и самостоятелно решение на проблема с прогноза на мъгла, но посочват че методът дава допълнително средство на синоптика. Като предимство е отчетено, че асимилацията на наблюдения в 1D модела води до значително подобрение на резултатите, което не може да бъде постигнато с асимилация на наблюдения в мезомащабен числен модел. Друг подход са избрали *Capon et al. (2008)*. Те използват тримерен числен модел с много висока хоризонтална разрешаваща способност, като предполагат, че детайлното описание на подложната повърхност ще подобри прогнозата на мъгла. Те работят с локален тримерен числен модел на Английската метеорологична служба с хоризонтална разрешаваща способност 1 km и 76 нива по вертикалата. Моделът работи върху върху област с размери 50 на 50 km и за начални и гранични условия е използван мезомащабен числен модел и асимилация на аерологичен сондаж. За оптимизиране на моделната прогноза са направени две подобрения на параметризационните схеми. Първо в радиационната схема е променен температурния профил

близо до земната повърхност, тъй като първото моделно ниво не е точно на повърхността. Другата промяна е на функцията на устойчивост в параметризацията на приземният слой. Избрана е функцията на устойчивост на Шарп, като по-подходяща за високата резолюция. Отчетено е че тази промяна води до прогноза на по-ниска температура, по-висока относителна влажност и по-слаб вятър, което подобрява и прогнозата на условията за мъгла. Проведените от авторите експерименти дават обещаващи резултати.

Вероятностните прогнози са друг подход за намаляване на неопределеността на прогнозата на мъгла. *Müller et al.* (2007) реализират този подход за летище Цюрих на базата на ансамблова прогноза с два 1D модела. Използвани са входни данни от мезомащабен числен модел, но особено внимание е отделено на асимилацията на вертикални профили на метеорологичните елементи. Профилът може да е от сондаж или от дистанционни измервания. Пертурбациите в началните условия са постигнати с едновременно използване на четири мезомащабни числени модела, като от всеки се използват прогнози, инициализирани в различни срокове. Така се постига увеличение на набора от начални условия за 1D моделите. След получаване на ансамбловите прогнози се прилага постпроцесинг, чиято цел е изчисляване на вероятностна прогноза. Направената верификация показва добри резултати, особено за прогноза на ниска вероятност за мъгла.

Счита се че използването на мезомащабен числен модел (МЧМ) е ключов елемент от комплексната система за оперативна прогноза на мъгла (*Shaw et al.*, 2008; *Jacobs et al.*, 2007). Самостоятелното използване на МЧМ за прогноза на мъгла е многократно изследвано (*Van Der Velde et al.*, 2009). Изводите са че самостоятелно използване не може напълно да удовлетвори изискванията за прогнозиране на мъгла. Основните причини за това са самите характеристики на явлението мъгла. Мъглата е приземно явление и силно зависи от синоптичната обстановка, релефа и местните циркулационни особености. Процесите които влияят на образуването на мъгла са комплексни и трудни за числено описание. На практика представянето на МЧМ силно зависи от параметризиациите на физичните процеси в приземния слой. Това ограничава представянето на числените модели

при прогнозиране на мъгла. От друга страна МЧМ е средството, което отчита процесите от различен мащаб и дава добро първо предположение за процесите свързани с динамиката на мъглите (*Shaw et al.*, 2008; *Jacobs et al.*, 2007; *Zhou et al.*, 2007).

В оперативната работа на Датската метеорологична служба за прогноза на мъгла се използва регионален числен модел с висока резолюция (*Sass et al.*, 2002). На базата на изчислени от модела параметри се изчислява видимостта. Използваните параметри са температурата на 2 m, влажност, интензитет на валеж и скорост на вятъра. Алтернативно видимостта се изчислява от водното съдържание на модела. Практиката е показала че екстраполацията на първото моделно ниво до повърхността води до значителни грешки. Изчисляването на видимостта на база на моделните приземни данни дава обещаващи резултати, като се предвижда да бъдат включени и атмосферни аерозоли.

Сравнение между локални 3D модели е направено от *Masbou et al.* (2007). Авторите представят експерименти с различни модели за една и съща територия и сравняват представянето им. Използваните модели са Aladin, HirLAM, NMM и LM, както и постпроцесинг от глобален модел (MOS-Arpege). Използван е тримерен вариационен метод за асимилация на наблюдения (3DVar). Според резултатите не може да се открие кой от числените модели дава най-добри резултати, заради сходните статистически оценки на грешката. Моделите имат значителни трудности в прогнозата на видимостта. Установени са проблеми в параметризацията на приземният слой на атмосферата, в атмосферният граничен слой, и на радиационния баланс. Показано е че само увеличаване на хоризонталната резолюцията не е достатъчно за по-точно прогнозиране на нощното понижение на температурата и увеличение на влажността. Необходимо е и подобряване на параметризиациите, особено на процесите в приземният слой. Така например моделите с висока резолюция по вертикалата успяват да подобрят прогнозата на елементите в приземния слой, но описанието на радиационния баланс и турбулентния пренос остава незадоволително.

Смесен подход, статистически и числен, е използван от *Román Cascón* (2016). Използван е шестгодишен архив от данни от проекти за изследване на два района (CESAR and CIBA) с различни климатични характерис-

тики. Характерни за района CESAR са радиационни мъгли през цялата година, като 75 % от тях се формират до 6 часа след залеза, продължават няколко часа и се разсейват около изгрева. Характерни за района СІВА са мъглите през студеното полугодие, късно през нощта, след силно нощно охлаждане. Продължителността на мъглите в този район е по-голяма. Анализирани са способностите на два метода за прогноза на радиационна мъгла. Първият е статистически, базиран на работа на *Menut et al.* (2014). Той се състои в използване на прагови стойности за няколко ключови за мъглата параметри като относителната влажност на 2 m, изменението на температурата на 2 m за 3 часа, скоростта на вятъра на 10 m и инфрачервената радиация. Методът дава добри резултати и за двата района, след като са изчислени специфичните за районите прагови стойности. Авторът е изследвал и възможността да се използват прогнозираните от числен модел WRF параметри, като предиктори. Получените резултатите показват че часът на прогнозираната от модела мъгла е с голяма грешка. Изследвана е и способността на модела да прогнозира видимостта и по-специално намалената до мъгла видимост. Това се прави с допълнителна обработка на прогнозираното водно съдържание. Като цяло моделът показва добри способности да прогнозира повечето случаи на радиационна мъгла, главно заради високата хоризонтална разрешаваща способност от 2.5 km. Установена е необходимостта от продължителен период за адаптация на модела. Другото важно условие за точна числена прогноза е качеството на началните условия.

В България изследване на мъгли с мезомащабни числени модели не е реализирано към момента. В тази работа се поставя началото на такова изследване за летище София.

3 Метод на работа

3.1 Числен модел за прогноза на времето (WRF)

Използваният в тази работа числен модел за прогноза на времето WRF е разработен от Националният център за изследване на атмосферата (NCAR) съвместно с Националният център за изучаване на атмосферата и оке-

ана (NOAA в състава на NCEP), Лаборатория за системи за прогнозиране (FSL Forecast Systems Laboratory), Агенция за времето на Военновъздушните сили (AFWA Air Force Weather Agency), Военноморската изследователска лаборатория (Naval Research Laboratory), Университета в Оклахома (Oklahoma University) и Федерална авиационна администрация (FAA -Federal Aviation Administration) на САЩ. За това изследване е използван Advanced Research WRF (WRF-ARW) версия 3.4.1 с хоризонтална резолюция 3 km и 44 нива по вертикалата.

3.2 Вариационен асимилационен метод (WRFDA)

За асимилация на наблюденията в численият модел WRF е използван модулът WRF Data Assimilation System (WRFDA, wrf (2016)). WRFDA дава възможност за тримерен и четиримерен вариационен анализ на наблюдения. В настоящето изследване е използван тримерен вариационен метод за асимилация на наблюдения. Тримерният вариационен метод (3DVar, *Huang and Vedel* (2003); *Bergot and Guedalia* (1994)) търси решение, което минимизира теглова функция дефинирана като разстоянието между полето и първото приближение x_b и разликата с наблюденията y_0 както е показано на:

$$2J(x) = (x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + [y_0 - H(x)]^T R^{-1}[y_0 - H(x)].$$

Асимилирани са наземни наблюдения (SYNOP и METAR) и вертикални профили от аерологични сондажи (TEMP).

3.3 Приземни наблюдения и аерологичен сондаж

В това проучване са използвани синоптични наблюдения на: 1) температура на 2 m (T) в София и Черни връх, 2) относителна влажност (RH) на 2 m в София и Черни връх, 3) хоризонтална видимост (VV) в София, 4) фаза и тип на мъглата в София, и 5) атмосферно налягането в София в основни и междинни синоптични срокове. За по-добро разбиране на вертикалната структура на ниските слоеве на атмосферата са анализирани данните от аерологичен сондаж на София, който е с висока разделителна способност по вертикала, но по-ниска времева резолюция (в 12 UTC). Резултатите от работата на модела са сравнени с метеорологичните наблюдения от Метео-

рологичната Служба за Следене (МСС) на летище София към Държавно Предприятие “Ръководство на Въздушното Движение”. В работата са използвани едночасови измервания на температура, относителна влажност и скорост на вятъра.

3.4 Индекс на устойчивост за София

В тази работа е използван предложението от *Stoycheva and Evtimov* (2014), Черни връх-София индекс на устойчивост (Sofia Stability Index - SSI). SSI се изчислява, като се използва температура в София и Черни връх:

$$SSI = \sqrt{(1 + \Delta t/17)/(1 + t_{Chernivrah}/273.15)};$$

където Δt е температурната разлика Черни връх София, а $t_{Chernivrah}$ е приземната температура в станцията Черни връх. *Godev and Takev* (1968) посочват температурната разлика между София и Черни връх, като един от факторите за нощното понижение на температурата през ранна пролет в София в антициклонално време. Пресметнат е и индекс на устойчивост изчислен с две реализации на мезомащабен числен модел WRF без асимилация на наблюдения (SSI-W) и с асимилация (SSI-Wa).

3.5 ГНСС метеорология

В тази работа са използвани тропосферни продукти от Глобалните Навигационни спътникови системи (ГНСС) от: 1) станция София-Средец (СРЕД) и 2) София-Плана (СОФИ). ГНСС данните са обработени с Бернският софтуер версия 5.0 (*Beutler et al.*, January 2007). Тропосферният продукт от обработката на ГНСС е Зенитното пълно закъснение (ZTD). За получаване на интегрираната водна пара (ИВП) са използвани приземно налягане (p_s) и температура (T_s) от модела WRF. ИВП се пресмята по *Davis et al.* (1985) и *Bevis et al.* (1992):

$$ZWD = ZTD - 0.0022768 \frac{p_s}{1 - 0.00266 \cos(2\theta) - 0.00028h} \quad (1)$$

$$\text{ИВП} = \frac{10^6}{(k_3/T_m + k_2)R_v} ZWD$$

където $T_m = 70.2 + 0.72T_S$ е средната температура в тропосферата, $k'_2 = (17 \pm 10)[KhPa^{-1}]$, $k_3 = (3.776 \pm 0.004)10^5[KhPa^{-1}]$, $R_V = 461.51[Jkg^{-1}K^{-1}]$ са константи, h [km] е височината и θ е изменението на земното ускорение с географската ширина.

4 Числени експерименти на мъгла в София

4.1 Контролен числен експеримент

За числените експериментите с модел WRF са подбрани 18 синоптични обстановки с мъгли на летище София за периода 2011-2012. За контролна обстановка е избран 12 януари 2012 г. Числените експериментите са проведени по следният начин: 1) числен експеримент с подбрана конфигурация от параметризационни схеми и 2) поетапно променяне на различните параметризации на физични процеси. Като критерии за избор на параметризация на съответния физичен процес е оценка на средната грешка на прогнозата за приземната температура и относителната влажност. Числените експерименти са проведени в следната последователност: етап I – избор на параметризация на планетарния граничен слой (E1-PBL), етап II – избор на параметризация на подложната повърхност (E2-LS), етап III – избор на параметризация на микрофизиката (E3-MP), и етап IV – избор на параметризация на дълговълновата и късовълнова радиация (E4-LWR-SWR). На всеки етап числените експериментите се реализират за 12 януари 2012 г. В случай на близки резултати се реализират числени експерименти върху допълнителни обстановки от 4 и 23 януари 2012 г. Етап I на експериментите включва моделиране на контролната ситуация с различни параметризации на планетарен граничен слой (PBL). Използвани са 5 схеми QNSE, MYJ, YSU, GFS, MYNN2. Различните параметризации са оценени чрез сравнение на наблюдаваните (METAR) и моделни приземни температура (T), точка на оросяване (Td) и видимост (VV) в 21 и 00 UTC. Резултатите са представени в таблица 1. Вижда се, че за контролната обстановка параметризацията PBL - QNSE моделира най-добре приземната температура и точка на оросяване. Конфигурацията с тази параметризация моделира намаление на видимостта за 21 и 00 UTC съответно до 1000

и 1500 m. Най-добро е представянето на тази схема и при пресмятане на средноквадратичната грешка в прогнозите на температурата (T) и относителната влажност (RH) за контролната обстановка на 12 януари 2012 г. Резултатите от етап I се потвърждават и от *Roman-Cascon et al.* (2012).

Метео елемент	METAR	MYJ	YSU	GFS	QNSE	MYNN2
T [° C] 21UTC	-2	-4	-4	-4	-2	-4
Td [° C] 21UTC	-2	-4	-4	-2	-2.5	-4
VV [m] 21UTC	300	800	600	10 000	1000	2000
T [° C] 00UTC	-3	-5	-6	-6	-3	-4
Td [° C] 00UTC	-3	-5	-6	-3	-4	-4
VV [m] 00UTC	0	1000	600	10000	1500	5000

Таблица 1: Оценка на параметризационни схеми за планетарен граничен слой (PBL) за 12 януари 2012 г.. Сравнение на прогнозиран и наблюдавани стойности на температура (T), точката на оросяване (Td) и видимостта (VV) в 21 и 00 UTC.

Етап II е избор на параметризационна схема на подложната повърхност (E2-LS). Резултатите от числените експерименти с три схеми показват близки резултати за контролната обстановка на 12 януари 2012 г. и бяха реализирани числени експерименти и за обстановките на 4 и 23 януари 2012 г. Резултатите от средноквадратичната грешка на прогнозата на температурата и относителната влажност са близки и схемата Noah LSM е избрана поради малко по-добрите и количествени характеристики. На етап III е изследвано представянето на параметризиациите на микрофизиката. Реализирани са числени експерименти с 6 схеми. За контролната обстановка на 12 януари 2012 г. не може да се направи категоричен избор и бяха реализирани числени експерименти и за 23 януари 2012 г. От сравнението на средноквадратичните грешки на прогнозата на температурата и относителната влажност се вижда, че схемата Thompson описва най-добре относителната влажност (таблица 2). Етап IV са числени експериментите за избор на параметризационни схеми за късовълнова/дълговълнова радиация. Между изследваните схеми не се наблюдавани съществени различия и беше избрана контролната схема.

12 януари 2012 г.		
MP	RMSE T [° C]	RMSE RH [%]
E3 - Lin	1.4	9.6
E3 - Ferrier	1.9	10.1
E3 - Goddard	1.6	9.3
E3 - WSM6	1.4	10.3
E3 - Thompson	1	9.1
E3 - Morrison	1.2	9.3
23 януари 2012 г.		
MP	RMSE T [° C]	RMSE RH [%]
E3 - Lin	2.4	7.3
E3 - Goddard	2.5	7.3
E3 - Thompson	2.6	6.8
E3 - Morrison	2.5	7.4

Таблица 2: Средна квадратична грешка на прогнозите на температурата и относителната влажност с параметризационни схеми MP за 12 и 23 януари 2012 г.

4.2 Числени експерименти на синоптични обстановки с мъгла на летище София в периода 2011-2014 г.

4.2.1 Синоптични обстановки с мъгла на летище София 2011-2014 г.

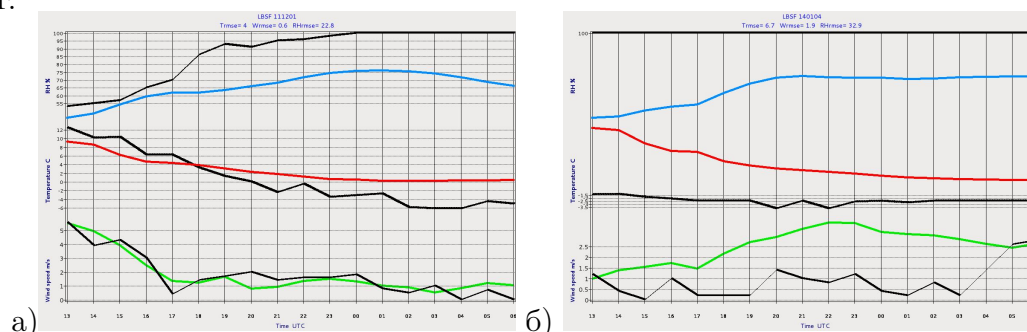
Подбрани са 18 синоптични обстановки (CO) с мъгла на летище София в периода 2011-2014 г.

4.2.2 Числени експерименти на синоптични обстановки с мъгла

Проведените числени експерименти са класифицирани в 4 групи като критерий е оценката на грешката на модела при прогнозата на условията за образуване на мъгла, както и предположението за основната причина за тази грешка. Причините за грешките са комплексни но се открива добра корелация с типа синоптичната обстановка. Това ни позволява да направим разделянето по групи според типа синоптична обстановка. Синоптична обстановка тип I се характеризира със сутрешна инверсия, която бързо се разрушава след изгрева. Най-често мъглата е тънка и се образува само в ниските теренни форми. Характерно е че тази мъгла е локална за

района на летище София. Обяснението е в локалното понижение на температурата, достатъчно за кондензация само в района на летището. Осем обстановки (45 %) са от тип I. Ходът на температурата, относителната влажност и скоростта на вятъра са добре симулирани от модела, както се вижда на фигура 1а. Моделът прогнозира скоростта на вятъра със средно квадратична грешка от 0.6 m/s. При това в периода на реалното повишаване на влажността, прогнозираният вятър е по-слаб от измереният. Въпреки че началното понижение на температурата е сравнително добре прогнозирано (средно с грешка под 2° C), след 19 UTC на 1 декември 2011 г. прогнозата на температурата силно се влошава, като общата средноквадратична грешка достига 4° C. Това води до влошаване на прогнозата на относителната влажност и прогнозираното и повишение не е достатъчно за образуване на мъгла. Прогнозираният ход на температурата е по-близък до измерванията в станцията на НИМХ което е индикация че допълнителното понижение на температурата е следствие на локални процеси свързани вероятно с подмрежови процеси. Преобладаващата причина за грешка в прогнозата на видимостта в този тип обстановки е хоризонталната резолюция на модела, която не отчита допълнителното охлаждане поради орографски особености.

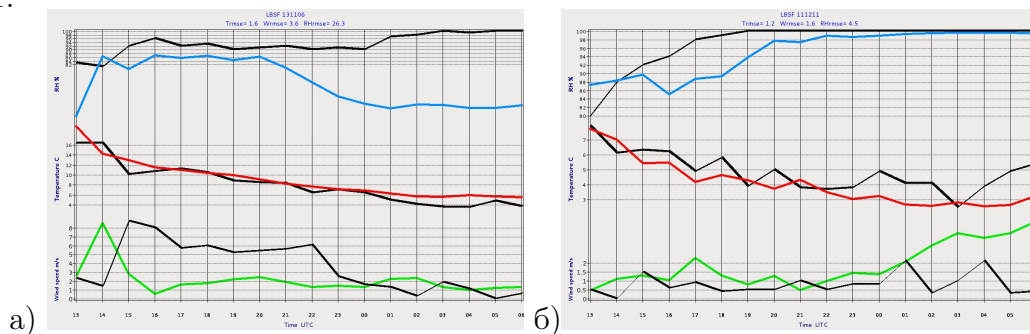
Фигура 1: Относителна влажност (%) измерена (черна линия горе) и прогностична (синя линия); температура (°C) измерена (черна линия среда) и прогностична (червена линия); и скорост на вятъра (m/s) измерена (черна линия долу) и прогностична (зелена линия). а) от 13 UTC на 1.12.2011 до 06 UTC на 2.12.2011 г. и б) от 13 UTC на 3.1.2014 до 06 UTC на 4.01.2014 г.



Две синоптични обстановки (11 %) са от тип II. На фигура 1б се вижда че измерената приземна температура (черна линия) не се променя

значимо и остава в диапазона $-3.5/-1.5^{\circ}\text{C}$. Измерената скорост на вятъра също не се изменя значимо и остава около 1.5 m/s . Прогнозираната температура е средно с 6.7°C по-висока. Особено висока е тя в началото на периода. Въпреки че модела прогнозира пад на температурата, грешката остава. Проблемът е в началните условия от глобалният модел GFS модел, които не отразяват трайната дълбока инверсия. Тип II грешки са поради неточни начални условия на числените симулации. Този тип обстановки са относително редки (две от 18), но пък при тях мъглите предизвикват най-сериозни проблеми на авиацията и тази обстановка е изучена детайлно в глава 7. Към тип III се отнасят 3 синоптични обстановки (16 %). Групиранни са всички случаи, в които грешките в числените експерименти се дължат на несъвършенствата на динамиките или физичните параметризации на модела. Най-често тези проблеми на модела са определящи за грешката на прогнозата при динамични обстановки, обикновено свързани с преминаването на фронт. Грешка във времето на развитие на синоптичния процес, води до голяма грешка във видимостта. На фигура 2а се вижда, че моделът много добре прогнозира хода на температурата със средно квадратична грешка от 1.6°C . Въпреки това прогнозната относителна влажност намалява след 20 UTC на 5 ноември 2013 г. за разлика от измерената. Причината за този тип грешка е в численото моделиране на динамичните процеси, вертикалните движения и вятъра във височина.

Фигура 2: Относителна влажност (%) измерена (черна линия горе) и прогностична (синя линия). Температура ($^{\circ}\text{C}$) измерена (черна линия среда), прогностична (червена линия). Скорост на вятъра (m/s) измерена (черна линия долу), прогностична (зелена линия). а) от 13 UTC на 5.11.2013 до 06 UTC на 6.11.2013 г. и б) от 13 UTC на 10.12.2011 до 06 UTC на 11.12.2011 г.



Синоптична обстановка тип IV са тези, в които числената прогноза се приема за добра. Те се характеризират отново с антициклонално поле. Условието са типични и подходящи за образуване на мъгли, обхващащи сравнително големи територии (сравнено с локалните мъгли от тип I). За разлика от тип II тук не се наблюдава предхождаща дълбока инверсия, която да окаже влияние на началните условия на численият експеримент. В тези обстановки прогнозирания ход на температурата и на относителната влажност са близки до наблюдаваните (фигура 2б). Въпреки това, относителната влажност като правило остава по-ниска от измерената. Това си остава слабост на избраната микрофизична параметризация. Можем да обобщим, че получените резултати от числените експерименти на 18 синоптични обстановки с мъгла са групирани в четири групи, съобразно представянето на числената прогноза. В първите три групи са групирани обстановките с незадоволително представяне на модела. Най-често срещаните грешки са причинени основно от относително грубата резолюция, когато моделът не „различава“ ниската теренна форма, в която се намира летицето. В 8 случая (45 %) ниската пространствена резолюция е основната причина за значителната грешка в прогнозата на условията за образуване на мъгла. Следващата група са грешките от неточни начални условия. Те са относително редки (11 %) но грешката от инициализиращите полета, често е толкова значителна, че прогнозата е безполезна. Третата група грешки (16 %) са свързани с несъвършенства на динамиката и физиката на модела. Този проблем е трудно преодолим. Грешката в отместването във времето на преминаване на фронт не би могла да се коригира в модела, но подход с използване на постпроцесинг би помогнал. Случаите, когато представянето на модела е прието за добро са 5 (28 %) и обикновено са на обширни мъгли. Наблюдава се тенденция моделът да занижава относителната влажност.

5 Асимилационни експерименти с модел WRF на обстановки с мъгла на летище София

Цел на това изследване е да провери дали чрез асимилация на наблюдения е възможно да се подобри прогнозираната от модела приземна температура и относителна влажност за избраните синоптични обстановки с мъгла в района на летището. За целта е използван асимилационният модул WRFDA.

5.1 Асимилационни числени експерименти (АЧЕ)

В глава 4 бяха представени числени експерименти на 18 синоптични обстановки (СО) с мъгла на летище София. Тези числени експерименти ще наричаме референтни числени експерименти (РЧЕ). Числени експерименти с асимилация на наблюдения ще наричаме асимилационни числени експерименти (АЧЕ). В таблица 3 са представени подобренията на температурата и относителната влажност за всички СО в резултат на АЧЕ. За всички СО се наблюдава подобрение на температурата между 0.3 и 4° С (колона 3 на таблица 3) както и подобрение на относителната влажност между 1 и 9 % (колона 4 на таблица 3).

5.2 АЧЕ на синоптични обстановки тип I

При обстановки от тип I с локални инверсии и недостатъчно добра резолюция подобрението в прогнозата на приземната температура е средно 0.6° С.

5.3 АЧЕ на синоптични обстановки тип II

При обстановки от тип II с грешни начални условия подобрението от асимилацията на наблюдения е най-голямо. Прогнозата на температурата в момента на падане на мъглата се подобрява с 1.4° С. Прогнозата на относителната влажност съответно е по-точна с 4 %. Това значително подобрение се явява недостатъчно, защото използваните наблюдения са с ниска хоризонтална резолюция (40-60 km) и асимилирането им не успява да поправи

ДАТА	Тип СО	Температура Т (°С)	Относителна влажност RH (%)
01.12.2011	I	1.7	6.6
03.12.2011	I	2	1.2
11.12.2011	IV	0.6	9
12.12.2011	II	1.6	2
12.01.2012	III	4	1.2
23.01.2012	III	0.3	2.1
31.01.2012	III	0.7	4.1
19.02.2012	IV	2.4	5
20.02.2012	IV	1.4	3.1
06.11.2013	III	0.5	5.2
16.11.2013	I	1.4	3.8
21.11.2013	I	0.8	3.3
14.12.2013	I	0.7	4.7
19.12.2013	III	1.2	3.9
21.12.2013	I	1.4	4.2
01.01.2014	I	0.3	3.7
04.01.2014	II	1.1	3.6
16.01.2014	I	1.5	6.2

Таблица 3: Синоптична обстановка дата (колона 1), тип (колона 2), температура (разлика АЧЕ-РЧЕ), относителна влажност (разлика АЧЕ-РЧЕ).

голямата грешка в началните условия.

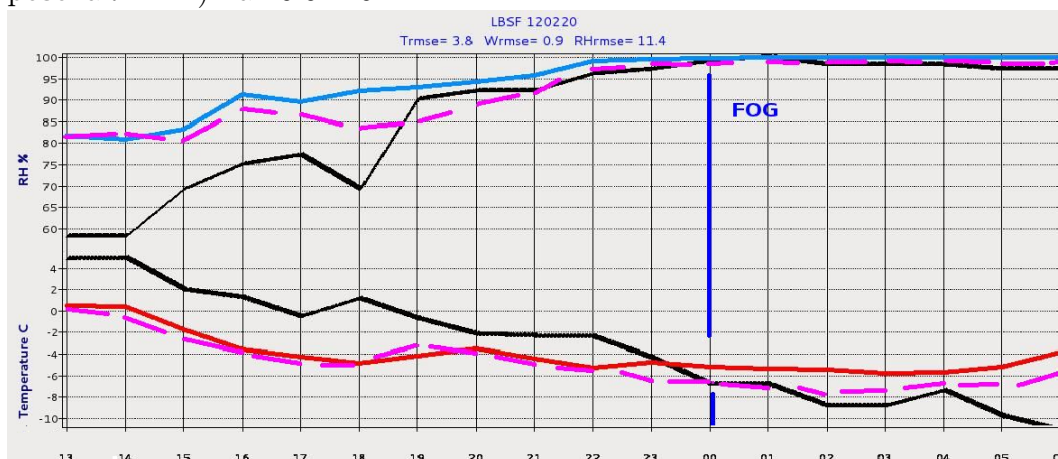
5.4 АЧЕ на синоптични обстановки тип III

При обстановките от тип III също се наблюдава подобрене в резултат на асимилацията. Температурата на образуване на мъгла се прогнозира средно с 1.3°C по-точно, след асимилацията на наблюдения. За една обстановка (12 януари 2012 г.) подобрието е с 4°C .

5.5 АЧЕ на синоптични обстановки тип IV

За обстановките в които моделът се е справя добре и без асимилация, добавянето и води до подобрене на прогнозата на приземната температура с 0.4°C . Обстановката от 20 февруари 2012 г. (фигура 3) демонстрира подобрието на прогнозата за този тип. Вижда се че в АЧЕ прогнозата на

Фигура 3: Наблюдавана приземна температура и относителна влажност (черна линия), РЧЕ (непрекъснатата червена линия) и АЧЕ (прекъснатата розова линия) на 20.02.2012 г.



нощното понижаване на температурата на 21 февруари 2012 г. е по-точна с около 1°C .

Можем да обобщим че асимилацията на наблюдения подобрява прогнозата на приземните температурата и относителната влажност във всички случаи, независимо от обстановката. Подобренито на температурата е от 0.3 до 4°C . Отчита се и подобрене в прогнозата на относителната влажност между 1.2 и 9% .

6 Изследване на мъгли с тропосферни продукти от ГНСС

В тази глава е анализирана способността на модела за прогноза на мъгла за летище София като за оценка на моделната прогноза са използвани ГНСС тропосферни продукти. С помощта на наблюдаваната ИВП от ГНСС е изследван и процеса на разсейване на мъглата.

6.1 Мъгла 5 февруари 2010 г.

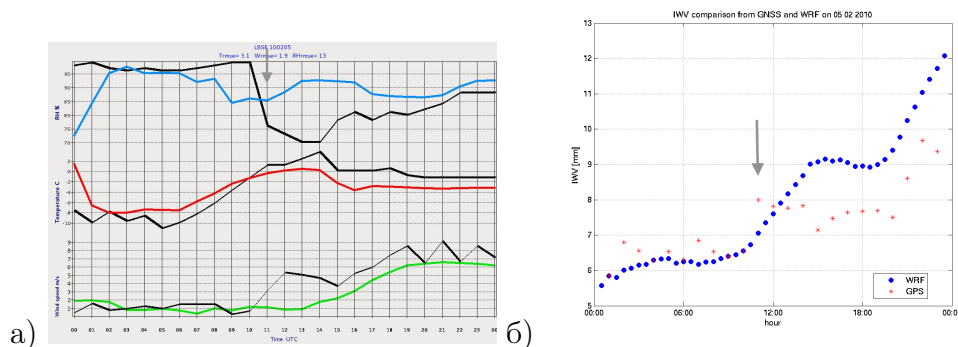
На 5 февруари 2010 г. мъгла на летище София е регистрирана през нощта и рано сутринта. Мъглата се формира след паднал на предния ден (4 фев-

руари) дъжд и при ясно време през нощта, способствващо за бързо нощно охлаждане, както се вижда на средния панел на фигура 4а. Понижението на температурата предизвиква увеличение на относителната влажност над 95 % в периода 00-10 UTC (черна линия на горния панел на фигура 4а). Относителната влажност спада до 75 % в 11 UTC и предизвиква разсейване на мъглата (сива стрелка на фигура 4а). Моделната относителна влажност (синя линия в горния панел) показва различна тенденция в същия период. Ходът на температурата е добре прогнозиран (червена линия), но скоростта на вятъра е занижена между 11 и 19 UTC. На фигура 4б е показан хода на ИВП. Моделът (сини точки) и наблюденията (червени звезди) са близки със разлика под 0.5 mm до 13 UTC и под 1 mm след 13 UTC. Интересно е да се проследи хода на ИВП и на относителната влажност. Разсейването на мъглата в 11 UTC се отразява в значително нарастване на ИВП от 6.5 до 8 mm. Това увеличение на ИВП от близо 20 % е резултат на изпарението на водните капчици и увеличението на водната пара. В следващите 4 часа (11-14 UTC) относителната влажност остава 70-75 %, а ИВП е със стойности около 8 mm. Относителната влажност нараства до 80 % в 15 UTC, като ИВП се понижава до 7 mm. Наблюдава се много добро съгласуване между относителната влажност и ИВП. След 20 UTC ИВП нараства едновременно и в модела и наблюденията, което съответства на нахлуването на нова въздушна маса, свързана със Средиземноморски циклон.

6.2 Мъгла 16 февруари 2010 г.

Мъглата от 16 февруари 2010 г. също е регистрирана локално само на летище София. Мъглата се формира след преминаването на студен фронт и снеговалеж през предходния ден (15 февруари). Както се вижда на средния панел на фигура 5а температурата се понижава до -10° C в 01 UTC и наблюдаваната относителна влажност (черна линия в горния панел) е над 95 % от 00 до 08 UTC, предполагайки мъгла. Между 09 и 11 UTC относителната влажност намалява до 75 %. Моделът (черна линия в горния панел) занижава относителната влажност през периода на мъглата и я завишава след разсейването на мъглата. Ходът на температурата е добре

Фигура 4: а) Наблюдавана (черна линия) и прогнозирана (цветни линии) относителна влажност (горен панел), температура (среден панел) и скорост на вятъра (долен панел) на земната повърхност на 5 февруари 2010. б) Денонощен ход на ИВП от ГНСС (червени звезди) и WRF (сини точки) на 5 февруари 2010 г.

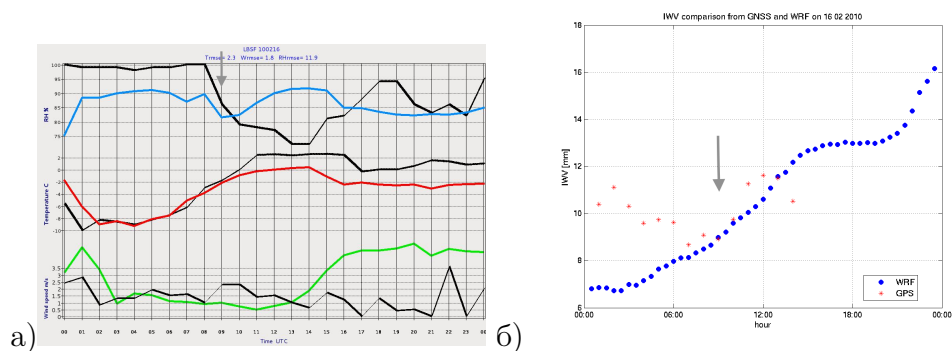


прогнозиран от модела, но значителна грешка от 2° C се наблюдава след 11 UTC. Завишена е скоростта на вятъра след 14 UTC. От 00 до 08 UTC наблюдаваната ИВП (червени звезди на фигура 5б) намалява от 11 до 8.5 mm. С разсейването на мъглата ИВП нараства постоянно между 09 and 11 UTC и достига 11.8 mm в 12 UTC.

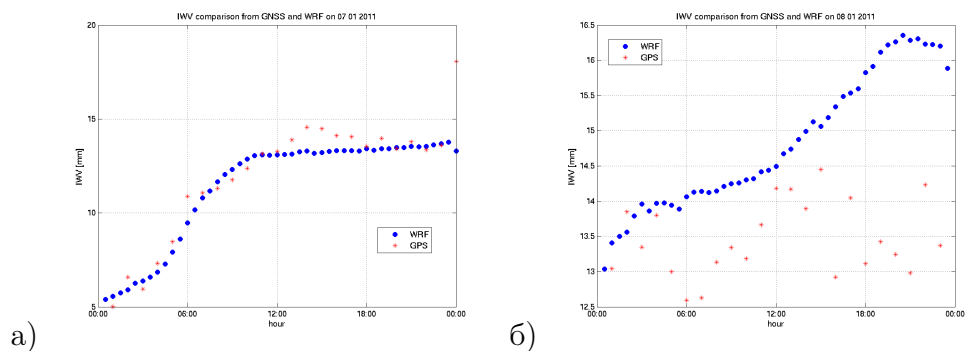
6.3 Дневен ход на ИВП от ГНСС и WRF

В този секция е сравнена ИВП от ГНСС и WRF през два последователни дни с мъгла на 7 и 8 януари 2011 г. Докато на 7 януари наблюдаваната (червени звезди) и прогнозираната (сини точки) ИВП показват близък дневен ход (figure 6а), то на 8 януари значителната разлика се вижда на фигура 6б. Трябва да се отбележи голямата вариация на ИВП на 8 януари, дължаща се най-вероятно на промени на водната пара във високите слоеве на атмосферата. Можем да заключим че тези първи изследвания от приложението на метода ГНСС метеорология за анализ на мъгла на летище София дават обещаващи резултати. Данните за ГНСС ИВП предоставят нов поглед над процеса на разсейване на мъглата и имат прогностичен потенциал. В някои случаи моделът описва добре денонощният ход на ИВП, докато в други разликата с наблюденията е голяма. ИВП от ГНСС може

Фигура 5: а) Наблюдавана (черна линия) и прогнозирана (цветни линии) относителна влажност (горен панел), температура (среден панел) и скорост на вятъра (долен панел) на земната повърхност на 16 февруари 2010. б) ГНСС (червени звезди) и WRF (сини точки) ИВП на 16 февруари 2010 г. Разсейването на мъглата е маркирано със сиви стрелки.



Фигура 6: Дневен ход на ИВП от ГНСС (червени звезди) и WRF (сини точки) на: а) 7 януари 2011 и б) 8 януари 2011 г.



да бъде използвана за оценка точността на моделната прогноза по време на периоди с мъгла. Асимилацията на данни от ГНСС има потенциал да допринесе за подобрения в прогнозата на мъгла.

7 Комплексно изследване на продължителна мъгла януари 2014 г.

Краткотрайната мъгла (<24 часа) е основно радиационна и е като цяло се прогнозира значително по-лесно, използвайки информация за месните особености. По време на краткотрайна мъгла температурната инверсия е слаба и слънчевата радиация е достатъчна за да я разруши до обяд. Въпреки това, тези процеси са зависими от сезона и когато като допълнителен фактор има адвекция на топъл въздух се във височина, мъглата през декември и януари се превръща в продължителна (> 24 часа). Слабата инверсия, в резултат на радиационното охлаждане при тихи и ясни нощи, се превръща в мощна мъгла, която се засилва от ден на ден. Продължителни епизоди с мъгла са резултат на сложно взаимодействие между земната повърхност, граничния слой и промените във височина, което прави прогнозата на видимостта предизвикателство. Различни подходи за изучаване на мъглите са разгледани от *Gultepe et al.* (2007). Редица изследвания предлагат използване на индекси, които отразяват в различна степен устойчивостта на атмосферата. *Holtslag et al.* (2010) проучват дали емпиричните методи, разработени през 60-те и 70-те години, са алтернатива като инструменти за прогнозиране. Те стигат до заключение, че индексът на устойчивост при мъгли (Fog Stability Index - FSI), получен по данни от аерологичен сондаж, дава добри резултати. FSI е оптимизиран за 12 станции в Холандия, след което се отчита подобрене на прогнозите. *Dejmal and Novotny* (2011) тестват приложимостта на FSI за прогнозата на обстановки с ниска видимост в 5 станции в Чехия. Те стигат до заключението, че FSI не е напълно приложим в Чехия, особено в случаите на нерadiационна мъгла. С литературата има само няколко проучвания който изследват продължителна мъгла. *Price et al.* (2015) представят проучване на лошо прогнозирана продължителна мъгла с използване на наблюдения

и ансамблов числен модел. Те стигат до заключение, че този тип трайна мъгла е предизвикателство за мезомащабните числени модели. *RenHe et al.* (2014) изследват метеорологичните условия за мъгла с висока интензивност, голяма продължителност, и широко покритие в източната част на Китай, чрез диагноза на приземните условия и дневно им изменение през януари 2013 г. Те установяват, че водна пара е транспортирана до източен Китай от аномални южните ветрове в средната и ниска тропосфера. *Stoycheva and Evtimov* (2014) анализират метеорологичните условия и тяхната динамика по време на продължителна мъгла в София 3-10 януари 2014 г. Те използват статистически анализ на еквивалентен потенциалната температура, за да идентифицират промените във въздушните маси и да се установят слоеве с различна устойчивост във височина. Този метод е приложим само за реанализ за мъгла и има ограничена приложимост в оперативната прогноза на мъгла. *Stoycheva and Evtimov* (2014) анализират също връзката между Черни връх и София чрез измерване на устойчивостта на атмосферата над София. Те предполагат Черни-връх-София индекс (SSI), като използват стандартни наблюдения за периода януари 1992 г. до декември 2014 г. Установена е статистическа връзка между SSI и хоризонталната видимост в София. Статистически значимо е установено, че формирането на мъгли в София съответстват на по-високи стойности на SSI, докато липсата на мъгла съответства на по-ниските стойности на индекса.

През последните две десетилетия се развиват методи за дистанционно наблюдение на атмосферата с помощта на ГНСС. Те са обобщени в *Guerova et al.* (2016). Използването на тропосферен продукти на ГНСС за изследване на мъгли е предложено от *Lee et al.* (2010). Те анализират връзката между ИВП, получена от ГНСС и видимостта по време на обстановки с гъста мъгла на крайбрежието на южна Корея. За случай на радиационна мъгла те установяват: 1) намаляване на отношението на сместа и ИВП при падане на мъглата и 2) увеличаване на ИВП по време на разсейване на мъглата. *Lee et al.* (2010) показват, че ИВП може да се разглежда като допълнително средство при диагноза на процеса на образуване на мъгла и подобряване на прогнозата на мъглата. Образуването, развитието, и разсейването на мъгла в България са проучени, като се използва ком-

бинацията между приземни наблюдения и ИВП (*Stoycheva and Guerova, 2015*). Потвърдена е високата чувствителност на ИВП при преобразуване на водна пара във вода по време на образуването и развитието на мъгла, особено в случаите на радиационна мъгла. Демонстрирана е високата чувствителност на ИВП към смяна на въздушната маса и по-специално към адвекция на височина. Поведението на ИВП и отношението на сместа може да бъде ценен допълнителен инструмент в процеса на вземане на решения за свръхкраткосрочна прогноза на мъгла в оперативната практика. Връзката между ИВП и образуване на мъгла е докладвано от *Liljegren (2000)* по време на програма за изследване на арктичните райони. Големите промени на ИВП, които се случват когато температурата на земната повърхност достига 0° C са от интерес особено по време на образуването на мъгла.

Целта на настоящата работа е комплексно изследване на продължителната мъгла в периода 3-10 януари 2014 г. като се използва комбинация на индекс на устойчивост (SSI) пресметнат с наблюдения и две реализации на мезомащабен числен модел WRF и интегрираната водна пара от глобалните навигационни спътникови системи.

7.1 Анализ на видимостта в София 1-11 януари 2014 г.

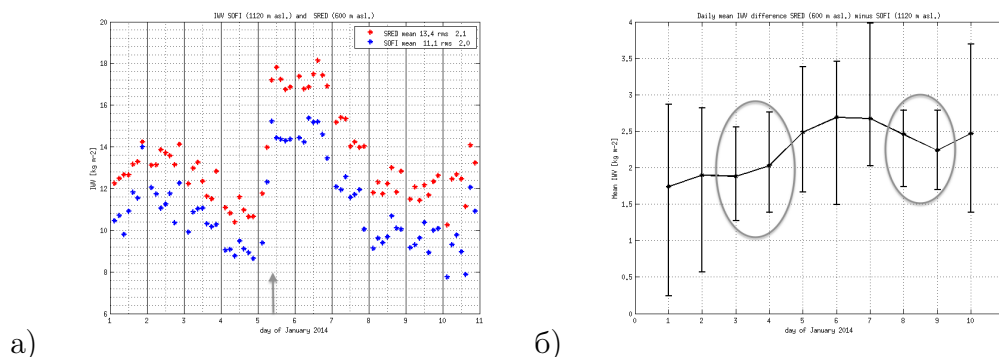
Мъглата е разделена на две части: част I от 06 UTC на 3 януари до 09 UTC на 5 януари (51 часа) и част II от 03 UTC на 7 януари до 12 UTC на 10 януари (84 часа). Двете части са разделени от 39-часов интервал с подобрена видимост от 12 UTC на 5 януари до 00 UTC на 7 януари 2014 г.

7.2 Изследване на ИВП за 1-11 януари 2014 г.

В тази работа анализираме ГНСС ИВП от станция СРЕД с надморска височина 600 m и СОФИ с надморска височина 1120 m. На фигура 7а се вижда добра корелация между измерената в двете станции ИВП. По време на част I ИВП в СРЕД е под 14 kg/m^2 , а след 06 UTC на 5 януари се

увеличава до 17 kg/m^2 . Подобна еволюция на ИВП се наблюдава и при станция СОФИ. Увеличението ИВП на 5 и 6 януари се дължи на адвекция на влажна въздушна маса над София и е свързана с предната част на приближаващ от юг Средиземноморски циклон. Общата тенденция е, че ИВП намалява при формиране на мъглата и се увеличава с разсейването и. Ползата от използване на две станции за ГНСС ИВП на различна надморска височина е че от разликата на ИВП на тези две нива може да бъде елиминиран приносът от слоевете над 1120 m. С използването на разликата в стойностите на ИВП става възможно да се изследва падането и разсейването на мъглата. Както се вижда от фигура 7б средните дневни разлики са по-малки в дни с мъгла (3, 4, 8, и 9 януари) и те имат по-голямо разпръсване в дните без мъгла.

Фигура 7: а) ИВП в станция СРЕД (червени точки) и СОФИ (сини точки). Със стрелка е показана адвекцията на топъл въздух във височина. б) Средно дневна ИВП разлика (СРЕД минус СОФИ). В сиво са оградени 3-4 и 8-9 януари 2014 г.



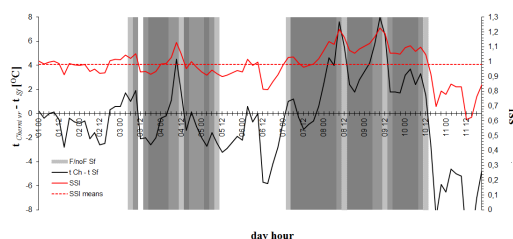
7.3 Изследване на SSI за 1-11 януари 2014 г.

7.3.1 SSI от наблюдения за 1-11 януари 2014 г.

На фигура 8 са показани стойностите SSI и температурните разлики между Черни връх и София за периода 1-11 януари 2014 г. Както се очаква, много висока корелация (0.99) се отчита между температурните разлики и SSI. Червена пунктирна линия дава средният 22-годишен индекс за мъгла в София. SSI има по-високи стойности в сравнение с 22-годишните средни в част II на мъглата (7 и 11 януари) и е близо до средната за част I (3 и

5 януари). За част II увеличението на SSI корелира добре с подобрението на видимост (сиви стълбчета на фигура 8), по-специално около обяд (8 и 9 януари) и могат да бъдат използвани в оперативната работа. Трябва да се отбележи, че на 11 януари SSI се понижава под 0.8 и е индикация за увеличаване на динамиката на атмосферата и разсейване на мъглата.

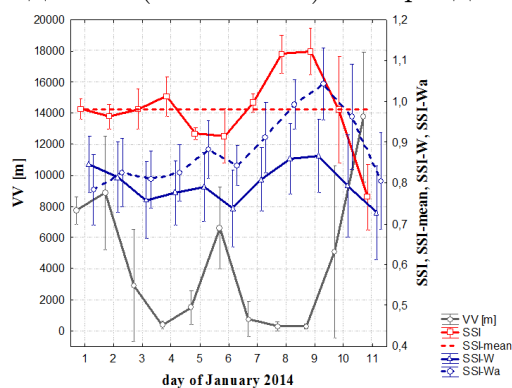
Фигура 8: SSI (червена линия), 22-годишен среден SSI (прекъсната червена линия), температурна разлика Черни връх минус София (черна линия) и видимост (сиви стълбчета) за периода 1-11 януари 2014 г.



7.3.2 SSI от мезомащабен числен модел за 1-11 януари 2014 г.

Една от целите на изследването е да се сравни пресметнатият SSI от наблюдения с този от мезомащабен числен модел WRF (SSI-W). Сравнението на SSI, SSI-W и хоризонталната видимост в София е представено на фигура 9. Ясно се вижда, че SSI-W занижава с около 0.2-0.3 наблюдения индекс. Корелацията между SSI и SSI-W е висока 0.81. Сравнението на температурния профил от модела и аерологичният сондаж в София в 12 UTC на 8 януари е показано на фигура 10а. Ясно се вижда голямата разлика. Доколкото температурата е един от основните фактори за образуването на мъгла, то голямата разлика в 12 UTC на 8 януари (до 8° C в долните 1000 m) е съществена. Асимилацията на наблюдения успява частично да намали разликата между наблюдаваният и прогностичен температурен профил както се вижда на фигура 10б. Ясно се вижда как асимилацията (пунктирна синя линия) води до подобрение на температурата от около 3.5° C в долните 1000 m, където е регистрирана дълбока инверсия в аерологичният сондаж (черна линия). Трябва да се отбележи, че това подобрение се постига 12 часа след асимилацията. Аерологичният сондаж в София е само в 12 UTC т.е. няма асимилирани профили

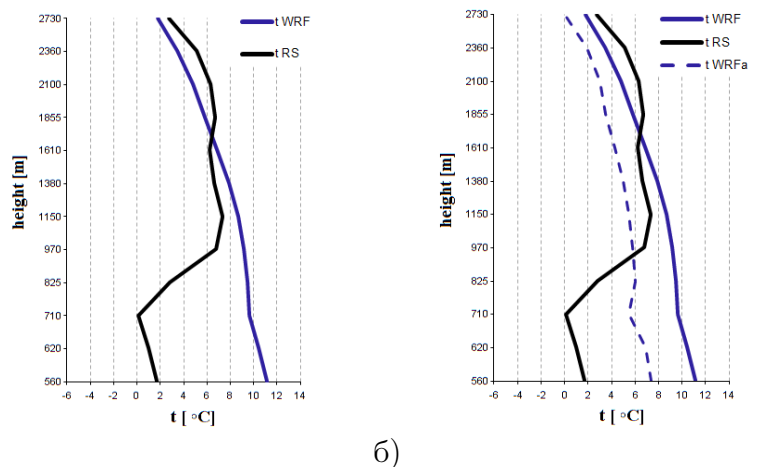
Фигура 9: Средна дневна стойност на SSI (червено), 22-годишен среден SSI (прекъснатата червена линия), SSI-W (синя линия), SSI-Wa (синя прекъснатата линия) и видимост (сива линия) за периода 1-11 януари 2014 г.



от България. На фигура 9 са показани индексите SSI изчислени с модел WRF (SSI-W) и с асимилация на наблюдения (SSI-Wa). Ясно се вижда, че SSI-Wa е с около 0.1 по-висок и е пряко следствие от подобрението на вертикалния температурен профил (фигура 10б).

Можем да обобщим че е проведено комплексно изследване на продължителна мъгла в периода 1-11 януари в София с помощта на: 1) индекса на устойчивост от наблюдения (SSI) и две реализации на мезомащабен числен модел WRF (SSI-W и SSI-Wa) и 2) интегрираната водна пара (ИВП) от две ГНСС станции (СРЕД с височина 600 m и СОФИ на 1120 m asl.). Мъгла се наблюдава от 3 до 10 януари и тя е разделена на две части: 1) част I радиационна мъгла (3-5 януари) и 2) част II - адвективна мъгла (7-10 януари). Промяната на въздушната маса между част I и II е ясно отчетена в измененето на ИВП в двете станции СРЕД и СОФИ. Използването на ИВП разликата (СРЕД минус СОФИ) дава възможност да се проследи изменението на водната пара в слоя от 600 до 1100 m asl. Установено е че средните дневни разлики в ИВП и тяхното разпръскване са по-малки по време на дните с мъгла (3, 4, 8 и 9 януари) сравнено с дните без мъгла. За SSI е установено, че имат по-високи стойности от 22-годишната средна за част II мъгла (7-11 януари) и близки до средната за част I (3-5 януари). За част II увеличението на SSI корелира добре с видимостта и може да се използва като ръководство в оперативната работа.

Фигура 10: Вертикални профили на температурата за София на 8 януари 2014 г. в 12 UTC от: а) аерологичен сондаж (черна линия) и WRF модел (синя линия) и б) с добавен към а) профил на температурата след асимилация на наблюдения в модела (синя прекъсната линия).



Понижението на SSI под 0.8 на 11 януари показва повишена динамика на атмосферата и съвпада с разсейването на мъглата. Установена е висока корелация (0.81) между SSI и $SSI-W$ но също и занижаване на индекса с около 0.2-0.3. Установено е че моделът лошо прогнозира температурата в граничния слой. Асимилирането на приземни и сондажни наблюдения подобряват моделната прогноза, особено по време на част II, което подсказва че лошото представяне на модела в случая се дължи на грешната инициализация. Липсата на адекватна симулация на температурния профил и инверсионния слой са основната причина за голямата разлика между SSI и $SSI-W$.

8 Оперативна информация от WRF за нуждите на ДП РВД

8.1 Верификация на WRF за периода октомври 2014 - декември 2015 г.

От август 2012 до март 2017 г. численият модел WRF работи в оперативен режим с пресмятани 36 часови прогнози инициализирани в 00, 06, 12, 18 UTC. От януари 2015 г. е въведен в оперативна работа и модул за асимилация на наблюдения (SYNOP METAR и TEMP). С цел проверка на ефективността на асимилационният модул за периода октомври 2014 - декември 2015 г. е направено сравнение на прогнозата инициализирана в 00 UTC с наземните наблюдения (METAR) за летище София. Изследвани са три елемента: 1) температура на височина 2 m, 2) скорост на вятъра на височина 10 m и 3) приведено към морско ниво налягане (QNH). Подобрието след въвеждане на асимилация при прогнозата на скоростта на вятъра на височина 10 m не е съществено от 1.6 на 1.3 m/s което за нуждите на авиацията е в рамките на допустимата за скорост на вятъра грешка до 2 m/s. Изцяло положителното средно отклонение показва, че моделът има тенденция да завишава скоростта на вятъра на 10 m. Средноквадратичната грешка е между 0.4 и 0.8 m/s. За приведеното към морско ниво налягане се отчита значително намаление на средноквадратичната грешка от 5 hPa на 2 hPa от януари 2015 г. Както и при скоростта на вятър и при налягането се наблюдава завишаване на стойностите. Не се открива изразена сезонност при средноквадратичната грешка. Обобщение на средна квадратична грешка за периода без и с асимилация за трите метеорологични елемента е показана в таблица 4. Вижда се съществено подобриение при приземната температура с 1.6° C и приведеното към морско ниво налягане с 3.0 hPa.

	T [° C]	V [m/s]	QNH [hPa]
без асимилация	3.8	1.6	4.8
с асимилация	2.2	1.3	1.8
разлика	1.6	0.3	3.0

Таблица 4: Средна квадратична грешка (RMSE) на прогнозите на температура, скорост на вятъра и приземното налягане без / с асимилация за летище София в периода октомври 2014 - декември 2015 г.

8.2 Успеваемост на числената прогноза на намалена видимост за периода 2015-2016 г.

В тази секция са анализирани дните с намалена видимост на летище София за двугодишен период (2015-2016 г.). Използваната времева резолюция от модела и наблюденията е 1 час. Оценявана е способността на модела да прогнозира условия за намалена видимост по критерии: 1) относителна влажност $> 94 \%$, и 2) скорост на вятъра $< 5 \text{ m/s}$. Критерий за намалена видимост от съобщенията METAR е регистрирана видимост под 2500 m, тъй като това е прагът, под който обслужването на летищния трафик преминава към специални процедури. Обработени са 730 дни, като е оценена прогнозата на модела инициализирана в 00 UTC. Получените резултати са показани в таблица 5. Както се вижда най-голям е броят на дните (616) без регистрация на намалена видимост. Дните със съвпадение на наблюдавана и прогнозирана намалена видимост са 52. "Фалшива" положителна аларма издава прогнозата за 25 дни а отрицателна за 37 дни. Моделът издава точни предупреждения (hit rate - HIR) в 58 % от дните и фалшиви предупреждения (false alarm ratio - FAR) за 32 % от дните. С намалена видимост и вероятност за фалшиво предупреждение (Probability of False Detection - POD) за 4 % от дните. Високото съотношение HIR/FAR показва полезността на прогнозата на модела.

8.3 Оценка на числената прогноза в 6, 12, 18 и 24 час

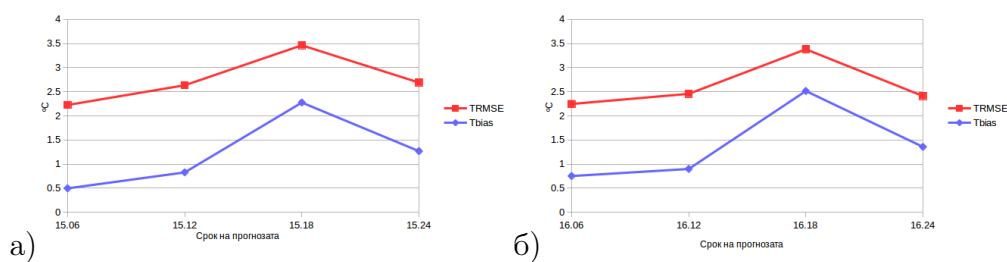
В тази секция е направена оценка на точността на прогнозата за различни срокове след инициализацията на модела в 00 UTC. Анализирани са прогнозираните от модела приземна температура, скорост на вятъра

Наблюдения	WRF		Сума
	Да	Не	
Да	52	37	89
Не	25	616	641
Сума	77	653	

Таблица 5: Верификация на числена прогнозата с модел WRF с наблюдения (METAR) за условия на намалена видимост в периода януари 2015 - декември 2016 г.

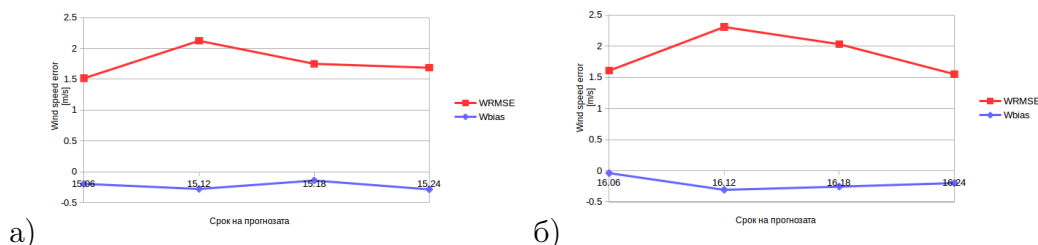
и приведено към морско ниво налягане (QNH) 6, 12, 18 и 24 часа след инициализацията за 2015 и 2016 г. На фигура 11 са представени средноквадратичните грешки и отклонения на прогнозите на температурата на височина 2 m по срокове. Вижда се че за средноквадратичната грешка и отклонение нарастват с отдалечаване от момента на инициализация и за двете години (фигура 11а и 11б). Забелязват се високите стойности на грешката и отклонението при прогнозата за 18ия час, когато моделът прогнозира температура значително по-ниска от наблюдаваната.

Фигура 11: Средноквадратична грешка (RMSE) и отклонение (Bias) на прогнозираната T2m 06, 12, 18 и 24 часа за: а) 2015 г. и б) 2016 г.



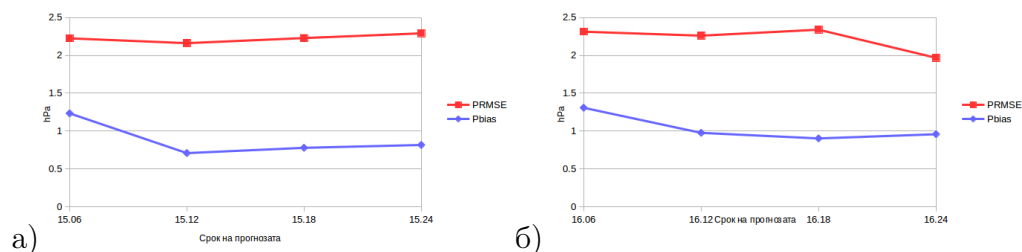
На фигура 12 са показани средноквадратичните грешки и отклонения на прогнозите на скоростта на вятъра на височина 10 m. Вижда се че прогнозата за 12-ия час е с най-голяма грешка и през двете години. Отклонението е отрицателно в диапазона -0.2 и -0.3 m/s и показва че моделът има склонност да прогнозира по-висока скорост на вятъра.

Фигура 12: Средноквадратична грешка (RMSE) и отклонение (Bias) на прогнозираната скоростта на вятъра 06, 12, 18 и 24 часа за: а) 2015 г. и б) 2016 г.



Фигура 13 показва средноквадратичните грешки и отклонения на прогнозите на приведеното към морско ниво налягане (QNH) в 6, 12, 18 и 24 час след инициализацията на модела. Като цяло точността на прогнозата на QNH не зависи от часа след инициализацията на модела. Положителното отклонение показва, че моделът има склонност да занижава наблюдаваните QNH.

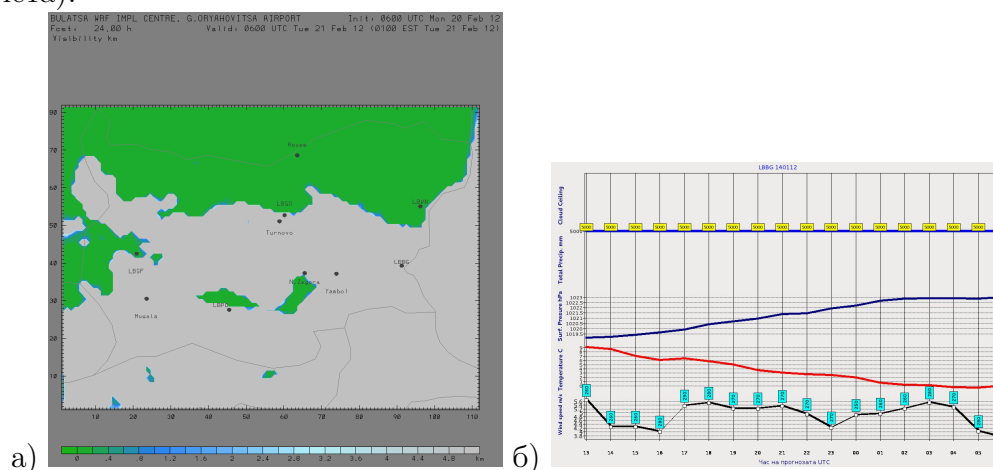
Фигура 13: Средноквадратична грешка (RMSE) и отклонение (Bias) на прогнозираната QNH 06, 12, 18 и 24 часа за: а) 2015 г. и б) 2016 г.



8.4 Продукти за нуждите на метеорологичното обслужване на авиацията

До март 2017 г. визуализацията на числената прогноза се извършва чрез софтуера Rip4 и чрез програми, написани специално за целта в средата Lazaru. Съществено предимство е че от изходните полета на модела могат да се изберат и визуализират тези които са от интерес за подпомагане на оперативната работа в ДП РВД. Видимостта при земята е основен метеорологичен елемент в осигуряването на авиационните потребители. На

Фигура 14: а) Примерна карта на прогнозираната от модел WRF видимост за територията на България. Картата е създадена с програмата Rip4 и намалено видимост под 1 km е показана с зелен до тъмносин цвят. б) Примерна метеограма на количество и долна граница на облачността (жълти стълбчета), налягане (синя линия), температурата (червена линия), скоростта и посоката на вятъра (черна линия със светло сини стълбчета).



фигура 14а е показана примерна карта с прогноза на видимостта (в зелен цвят) а на фигура 14б е показана примерна метеограма. Горната граница на облачността е показна в жълт цвят най-горе, със синя линия е при- веденото към морско ниво налягане, температурата е с червена линия а скоростта и посоката на вятъра е с черна линия и светло сини стълбчета.

9 Научни приноси, публикации и представяне на резултати по дисертацията

9.1 Научни приноси

В тази дисертация е поставено началото на изследването на възможности- те за числена прогноза на мъгли за района на летище София с използване на мезомащабен числен модел WRF. Направените изследвания са уникални за България и са първа стъпка в посока разработване на оперативен продукт за прогноза на мъгла за нуждите на отдел "Метеорологично об- служване" на Държавно Предприятие "Ръководство въздушно движение".

По-конкретно, приносите са от научно-приложен характер и могат да се обобщят в:

- 1) Подбор и изследване на оптимална комбинация от параметризационни схеми за прогноза на приземна температура и относителна влажност за числени експерименти с мъгла на летище София.
- 2) Субективна класификация в 3 категории на синоптични обстановки с мъгла в зависимост от представянето на модел WRF.
- 3) Реализация на числени експерименти с асимилация на наземни наблюдения и профили от аерологични сондажи за 18 обстановки с мъгла и количествена оценка на приземната температура и относителна влажност за летище София. Установено е средно подобрение на температурата (1.6°C) и относителната влажност с (3.1 %) и трайна тенденция за занижаването на относителната влажност в модела за обстановки с мъгла на летище София. Реализацията на асимилационни числени експерименти е осъществена за пръв път в България и е резултат от сътрудничество с Западния Университет в Тимишоара, Румъния.
- 3) Установена е връзка между ИВП получена по метода ГНСС метеорология и динамиката на мъглата в София. Направено е комплексно изследване на продължителна мъгла в София чрез метода ГНСС метеорология и индекс на устойчивост изчислен с: 1) приземни синоптични наблюдения и 2) две реализации на мезомащабен числен модел WRF (SSI-W и SSI-Wa). За първи път е оценен индекса на устойчивост за София от мезомащабен числен модел WRF.
- 4) Реализирани оперативни 36-часови прогнози, инициализирани в 00, 06, 12 и 18 UTC за периода август 2012 март 2017 г. с въведен в оперативен режим модул за асимилация на наблюдения от януари 2015 г. Установено подобрение, следствие на асимилацията, на прогнозата на приземната температура (1.6°C), скоростта на вятъра (0.3 m/s) и на приведеното към морско ниво налягане (3.0 hPa).
- 5) Установено е че в периода 2015-2016 г. моделът прогнозира успешно мъглите на летище София в 58 % от дните. Двегодишното изследване на зависимостта на прогнозата от времето след инициализация показва най-голяма средноквадратична грешка на приземната температура в 18-ят час на прогнозата.

9.2 Публикации по дисертацията

9.2.1 Публикации в списания

- 1.) Stoycheva A., I. Manafov, K. Vassileva and G. Guerova, 2017. Study of persistent fog in Bulgaria with Sofia Stability Index, GNSS tropospheric products and WRF simulations. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 161, 160-169, doi:10.1016/j.jastp.2017.06.011.
- 2.) Manafov I. and G. Guerova, 2016. Assimilation experiments with WRF model of fog case at Sofia airport. Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski Faculte de Physique, 109, 1-8.
- 3.) Manafov I. and G. Guerova, 2015. Numerical simulations of 18 fog case studies at Sofia airport in the period 2011-2014. Annuaire de l'Universite de Sofia "St. Kliment Ohridski Faculte de Physique, 108, 48-61.

9.2.2 Публикации в разширен текст на научни форуми

- 1.) Guerova G., A. Stoycheva, and I. Manafov: Use of GNSS tropospheric products and numerical weather prediction model to study fog in Bulgaria, Proceedings of the 5th International Colloquium - Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Braunschweig, Germany, 27-29/10/2015.
- 2.) Manafov I. and G. Guerova: Fog forecast at Sofia airport, Proceedings of the 2nd National Physics Congress, 26-29.09.2013, Sofia, Bulgaria.

9.3 Представяне на резултатите по дисертацията

- 1.) Stoycheva A., I. Manafov, K. Vassileva, G. Guerova, "Monitoring Prolonged Fog in January 2014 at Sofia with Sofia Stability Index and GNSS Tropospheric Products 3rd National Physics Congress, 29/09-2/10/2016, Sofia, Bulgaria. (доклад)
- 2.) Manafov I. and G. Guerova, 2016. "Assimilation experiments with WRF model of fog case at Sofia airport 3rd National Physics Congress, 29/09-2/10/2016, Sofia, Bulgaria. (постер)
- 3.) Guerova G., A. Stoycheva, and I. Manafov: Use of GNSS tropospheric

products and numerical weather prediction model to study fog in Bulgaria, 5th International Colloquium - Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Braunschweig, Germany, 27-29/10/2015. (доклад)

4.) I. Manafov and G. Guerova, "Numerical simulations of fog cases at Sofia airport for 2011-2014 EMS and ECAM 2015, 7-11/09/2015, Sofia, Bulgaria. (постер)

5.) Guerova G., I. Manafov and K. Vassileva, "Fog forecast impact studies for Sofia Airport: Numerical Weather Prediction simulation and use of GNSS tropospheric products United Nations/ICTP Workshop on the Use of Global Navigation Satellite Systems for Scientific Applications, 1-5/12/2014, Trieste, Italy. (доклад)

6.) Manafov I. and G. Guerova, "Numerical simulations of fog case studies at Sofia airport in 2012 2nd National Physics Congress, 26-29/09/2013, Sofia, Bulgaria. (постер)

10 Заключение

В тази дисертация е изследвана възможността за използване на числен модел WRF за оперативна прогноза на мъгла на летище София. Извършена е настройка и оптимизация на модела, и е реализирана асимилация на наблюдения за коригиране на началните условия. Моделът е използван експериментално в оперативни условия в периода 2012-2017 г. Извършена е оценка на числената прогноза на обстановки с мъгла на летище София. Проведено е комплексно изследване на продължителна мъгла със съвместно използване на индекс на устойчивост, ГНСС тропосферни продукти и числен модел WRF. Проведени са числени експерименти за подбор на физични параметризации, които възпроизвеждат най-добре условията за образуване на мъгла. С избраните параметризации са реализирани числени експерименти за 18 синоптични обстановки с мъгла на летище София в периода 2011-2014 г. Получените резултати са групирани в четири групи, съобразно представянето на числената прогноза. В първите три групи са класифицирани случаите с незадоволително представяне на модела, като са посочени причините за грешката в прогнозата, най-характерна за съответната група. За избраните 18 синоптични обстановки е оценено и

влиянието на асимилацията на наблюдения върху числената прогноза на мъгла за района на летище София. За целта е въведен в експлоатация модул за тримерен вариационен анализ (WRFDA) и са реализирани числени експерименти с асимилация на наблюдения (SYNOP, METAR и TEMP). Резултатите от числените експерименти са сравнени с измерванията на температура, относителна влажност и скорост на вятъра от метеорологичната станция на летище София. Асимилацията на наблюдения подобрява прогнозата на приземните температурата и относителната влажност във всички случаи, независимо от обстановката. Подобриенето на температурата е от 0.3 до 4° C а на относителната влажност между 1.2 и 9 %. Детайлното изследване на поведението на интегрираната водна пара (ИВП) получена по метода ГНСС метеорология беше направено за 2 обстановки с мъгла на летище София. За една от обстановките се наблюдава много добро съгласуване между относителната влажност и ИВП. В някои обстановки моделът добре описва хода на ИВП, но в други разликата с наблюденията е голяма. ИВП може да бъде използвана за оценка точността на моделната прогноза по време на мъгла. Асимилацията на тропосферни продукти от ГНСС би могла да донесе подобрения в работата на модела. Проведено е комплексно изследване на продължителна мъгла в София с помощта на ИВП от две ГНСС станции (СРЕД и СОФИ) и индекс на устойчивост (SSI), изчислен с: 1) приземни синоптични наблюдения (София и Черни връх) и 2) две реализации на мезомащабен числен модел WRF (SSI-W и SSI-Wa). Промените на въздушната маса между част I и II е ясно отчетена в стойностите на ИВП в станции СРЕД и СОФИ. Установено е че средните дневни разлики в ИВП и тяхното разсейване са по-малки за дните с мъгла. За SSI е установено, че имат по-високи стойности от 22-годишната средна за втората част на мъглата (7-11 януари) и стойности, близки до средните по време на част I (3-5 януари). Изчислени са също и SSI от WRF модел (SSI-W). Установена е висока корелция (0.81) между SSI и SSI-W но моделът занижава индекса с 0.2-0.3. Асимилирането на наблюдения подобряват моделната прогноза, особено за част II. Липсата на адекватна симулация на температурния профил и инверсионния слой са основната причина за лошата прогноза на мъглата. От август 2012 до март 2017 г. численият модел WRF работи в оперативен режим на Лети-

щен център Горна Оряховица с ежедневни прогнози инициализирани в 00, 06, 12, 18 UTC. От януари 2015 г. е въведен в оперативна работа и модул за асимилация. Проверка на ефективността на асимилационният модул за периода октомври 2014 - декември 2015 г. показва подобрене на средната квадратична грешка на: 1) температурата с 1.6°C , 2) скоростта на вятъра с 0.3 m/s и 3) приведено към морско ниво налягане с 3.0 hPa .