

ЗАМЪРСЯВАНЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ С ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ (ФПЧ) – АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ КОМПЮТЪРНИ СИМУЛАЦИИ ЗА БЪЛГАРИЯ И СОФИЯ ГРАД

И. Георгиева¹, Н. Милошев¹

¹ Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География, Българска Академия на Науките, ул. Акад. Георги Бончев, блок 3, София, България, e-mail: iivanova@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.1

Абстракт. В последно време, при изучаване на атмосферното замърсяване, особен интерес, поради доказаната вреда за Човешкото Здраве (ЧЗ), предизвикват праховите аерозоли (ФПЧ). Темата е особено актуална за България и град София, където системно се регистрират неколнократни превишения на нормите за концентрации на ФПЧ. Целта на настоящата работа е провеждането на надеждни, изчерпателни и детайлни изследвания на полетата на приземни концентрации на ФПЧ, ролята им при формиране на Индекса на Замърсяване и връзката им с процесите, които ги обуславят. В статията са представени следните резултати: Изясняване на пространствената и времева изменчивост на полетата на концентрации на ФПЧ и установяване на връзките им с метеорологичните условия и източниците на замърсяване; Обогаляване на знанията за взаимодействията на процесите, формиращи замърсяването с ФПЧ; Открояване на случаи с най-неблагоприятно замърсяване с ФПЧ – „горещи точки“ и най-неблагоприятни синоптични епизоди и изясняване ролята на синоптичните условия и локалните метеорологични процеси.

Ключови думи: замърсяване на атмосферния въздух, фини прахови частици (ФПЧ), индекс на замърсяване, климат на замърсяване.

Въведение

В настоящата работа са проведени надеждни, изчерпателни и детайлни изследвания на полетата на приземни концентрации на ФПЧ, изяснена е ролята им при формиране на ИЗ и връзката им с процесите (атмосферна динамика и химически трансформации), които ги обуславят. Надеждни и изчерпателни изследвания озна-

чава използването на статистически значими ансамбли от компютърно симулирани данни, отразяващи многообразието на метеорологични условия с тяхната типична повтаряемост, които съчетани с компютърно симулираните данни за концентрации на ФПЧ, да позволяват да се правят надеждни изводи относно техните характерни особености и поведение, влиянието им върху ИЗ и влиянието на характеристиките на атмосферната динамика върху тях. Открити са най-неблагоприятните случаи на загърсяване с ФПЧ - „горещи точки“ и е анализирана ролята на синоптичните условия и локалните метеорологични процеси за формирането им. Детайлни изследвания означават достатъчно висока пространствено/временна разрешаваща способност на полетата, която да даде възможност да бъде отразен мултимасщабния характер на процесите, да се уловят взаимодействията на явленията с различни мащаби и да се проследят основните източници, механизми и пътища за формиране на загърсяването с ФПЧ. Извършени са изследвания за територията на цялата страна, но със специален акцент върху градска среда (град София), които отразяват нейната специфичната климатология и екология. Ансамблите, обхващащи симулации за период от 7 години (от 2008 до 2014 година) се смятат за статистически представителни и отразяват основните черти на локалния/регионален климат, както на атмосферната динамика, така и на качеството на въздуха. Основният изследователски подход е съвместен анализ и статистическо третиране на полетата на загърсяване с ФПЧ и регионалните/локалните метеорологични полета. В статията са представени резултати разделени по следния начин: Климат на загърсяването с ФПЧ; Особено неблагоприятно приземно загърсяване с ФПЧ и връзката му с метеорологичните условия; Изследване на произхода на загърсяване с ФПЧ в град София и Изследване приноса на отделните динамични, химични и аерозолни процеси за формиране на загърсяване с ФПЧ.

Методология

Анализ на тримерните полета на концентрации на ФПЧ, получени със средствата на компютърно симулиране. Използвана е световно призната система от модели US EPA Models 3 System, състояща се от 3 модела – WRF <http://www.wrf-model.org/>, Skamarock et al. (2007), Dudhia, J. (1993), CMAQ Byun and Ching (1999), Byun et al. (1998) и SMOKE <http://www.smoke-model.org/>, CEP (2003). Европейската и Национална нормативна база няма стриктни и определени изисквания и дефиниции за моделите, с които да се правят симулации за състава на атмосферата, това е и причината да има и да се използват изключително голям набор от такива модели. Тези модели са различни по сложност и разполагат с различна физическа основа, и са приспособени към многообразието на мащабите на пренос - от глобален до локален мащаб в много различни разработени за състава на атмосферата в България (Gadzhev et al. 2013, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2020, 2021a, 2021b), (Gadzhev G. and K. Ganeyev., 2018, 2019a, 2019b), (Gadzhev G. and V. Ivanov 2020, 2021).

Обект на изследването е територията на цялата страна, но с акцент върху изследванията в градска среда (град София), които да отразяват нейната специфична климатология и екология. Обработката и анализа на генерираните ансамбли от ме-

теорологични полета и такива на концентрации на ФПЧ с разрешаваща способност от 1 км. за района на град София са извършени.

На база получените концентрации от компютърното моделиране е изчислен индекс на замърсяване (ИЗ). Един от най-често използваните ИЗ е Британският дневен индекс за качество на въздуха (Leeuw, F. de, Mol, W., 2005), използван и в България (Syarakov et al. 2012, 2013, 2014a, 2014b, 2015), (Gadzhev, G., 2018, 2020, 2021), (Georgieva, I., 2014), (Georgieva et al. 2015), (Georgieva, I. and Ivanov, V., 2017, 2018) and (Ivanov, V. and Georgieva, I., 2017).

Инвентаризацията на Холандската организация за приложни научни изследвания (TNO) за 2010 г. (Denier van der Gon et al., 2010) се използва частично за територията на България, като за София град се използва Националната инвентаризация за 2010 г., предоставена от Българската изпълнителна агенция по околна среда. В инвентаризацията на TNO, антропогенните източници са разпределени в 10 SNAP категории (Избрана номенклатура за замърсяване на въздуха), класифицирайки ги според процесите, водещи до изпускане на вредни материали в атмосферата (ЕМЕР/CORINAIR, 2002). Инвентаризацията на TNO от 2010 г. има разделителна способност $0,125^{\circ} \times 0,0625^{\circ}$ (около 7×8 km). На база на разделението на емисиите по категории източници е определен принос на всяка от категориите към концентрациите на ФПЧ.

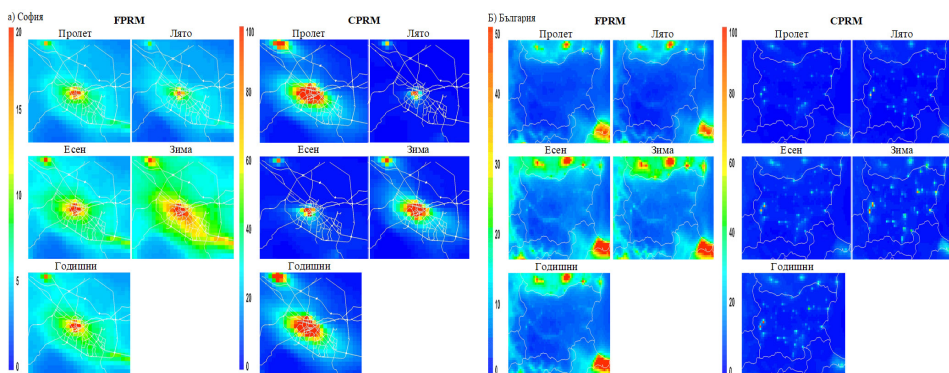
Моделът CMAQ, има опция “Integrated Process Rate Analysis”, която дава възможност да се оцени ролята и на всеки от динамичните и химични процесите формиращи атмосферното замърсяване. По този начин изменението на концентрацията за даден интервал от време може да се представя като сума от приноса на различните процеси. Включването на опцията за изследването на приносите на отделните процеси, дава възможност да се определят не само приносите на отделните процеси за определен замърсител, но също така и за група от замърсители каквато е групата на Праховите частици. Чрез обработката на компютърно симулираните полета на приносите на различните процеси към почасовото изменение на приземните концентрации на ФПЧ могат да се обогатят знанията за сложното взаимодействие на динамичните, химични и аерозолни процеси, формиращи замърсяването с ФПЧ. Разглеждането на взаимодействието и приноса на тези процеси дава възможност за обяснение на общата картина на замърсяване с ФПЧ както за територията на България, така и за София.

Резултати

Прахта е един от основните замърсители на въздуха, като основните ѝ източници са промишлеността, транспорта и енергетиката. Естествено тя има вредно влияние върху човешкото здраве, което зависи главно от размера и химичния състав на праховите частици. По-едриите прахови частици (от $2.5 \mu\text{m}$ до $10 \mu\text{m}$ - PM₁₀) при попадане в организма чрез дихателната система, се задържат в горните дихателни пътища, а по-фините (под $2.5 \mu\text{m}$ - PM_{2.5}) достигат до по-ниските отдели на дихателната система и водят до увреждане на тъканите в белия дроб. В настоящата ста-

тия праховите частици с размер под $2.5 \mu\text{m}$ са наречени фини (FPRM), а тези с размер от $2.5 \mu\text{m}$ до $10 \mu\text{m}$ - едри прахови частици (CPRM). С наредба № 12 от 15 юли 2010 г. за норми за серен диоксид, азотен диоксид, фини прахови частици, олово, бензен, въглероден оксид и озон в атмосферния въздух в сила от 30.07.2010 г., (Обн. ДВ. бр. 58 от 30 Юли 2010 г., изм. и доп. ДВ. бр. 48 от 16 Юни 2017 г., изм. и доп. ДВ. бр. 79 от 8 Октомври 2019 г.) са приети норми за пределно допустими концентрации (ПДК) за ФПЧ. Въведените ПДК целят предпазване от техния вреден ефект върху здравето на хората и околната среда. FPRM - $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Средно годишна Норма (СГН); CPRM - $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Средно Дневна Норма (СДН) и $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Средно годишна Норма (СГН).

Климат на замърсяването с ФПЧ: Основната цел е да се изясни пространствената и времева (денонощна, сезонна) изменчивост на основните характеристики на полетата на приземни концентрации на ФПЧ и анализ на връзките им с метеорологичните условия. За това е извършен статистически анализ на получените ансамбли от двумерни полета на изчислените концентрации на ФПЧ. Фигура 1. Изчислена е плътността на вероятността за концентрациите на ФПЧ, пресметнати са статистическите моменти (средни и дисперсии по ансамбъл), максимуми, персентили с тяхната пространствена и времева (сезонна, денонощна) изменчивост Фигура 2.

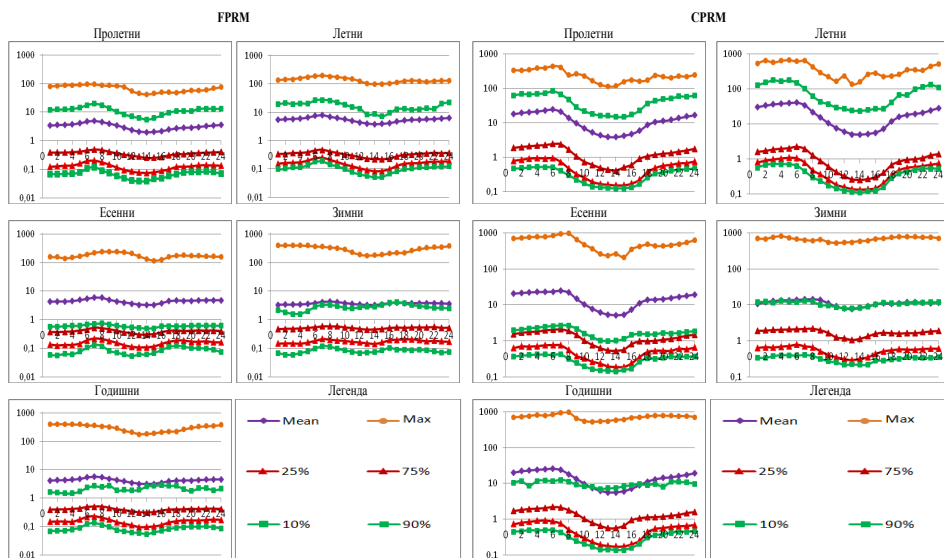


Фиг. 1. Двумерни полета на изчислените концентрации (годишно и сезонно осреднени) на ФПЧ Фигура 1А) FPRM/CPRM София и Фигура 1Б) FPRM /CPRM България за един избран час 07:00 UTC.

От фигурите добре се открояват районите с високи концентрации на ФПЧ, както за района на София така и за България. Вижда се, че и при двата случая се превишават ПДК, като причините за тези високи концентрации са различни и зависят от фактори като подложна повърхност, метеорологични условия, автомобилен трафик и сезонна обусловеност. От полетата за България се вижда, че като отделно открояващо се място с високи концентрации е главно района на град София. Друг район е ТЕЦ Марица Изток, както и по-големите градове в страната, особено

през зимните месеци. За София полетата на концентрациите на праховите частици (FPRM/CPRM), както на фините така и на едрите са високи в Централните части и Южните квартали. Като отделно място с висока концентрация се откроява и района на Костинброд в западните покрайнини. На места в споменатите райони на високи концентрации се достигат определените ПДК за FPRM, докато CPRM превишават ПДК в Центъра на града и района на Костинброд.

Компютърно симулирания ансамбъл е 7 годишен (от 2008 до 2014) и е достатъчно голям и изчерпателен за да позволява разнообразни статистически обработки. Представените осреднени концентрации не изчерпват информацията, която може да бъде извлечена от ансамбъла, затова са изчислени различни статистически характеристики, за цялата област София. По този начин са определени корелационни връзки и е направен качествен анализ на зависимостта на характеристиките на замърсяването с ФПЧ от метеорологичните полета и параметри. На Фигура 2 са представени графики показващи основни ансамблови характеристики на замърсяването, а именно сезонни и годишни характеристики за FPRM/CPRM, осреднени за област София град. На всички графики са изобразени средните концентрации, максимални по ансамбъл концентрации и кривите обозначени с 10%, 25%, 75% и 90%. Тези криви представляват имажинерни концентрации, за които съответно в 10%, 25%, 75%, 90% от случаите са били симулирани по-ниски концентрации. При така представените криви в интервала между 25% - 75% попадат 50% от случаите, а в интервала 10% - 90% попадат 80% от случаите. Изобразените по този начин криви дават достатъчно добра представа за статистическите характеристики на ансамбъла – дисперсия, асиметрия, ексцес, без да бъдат показани явно.

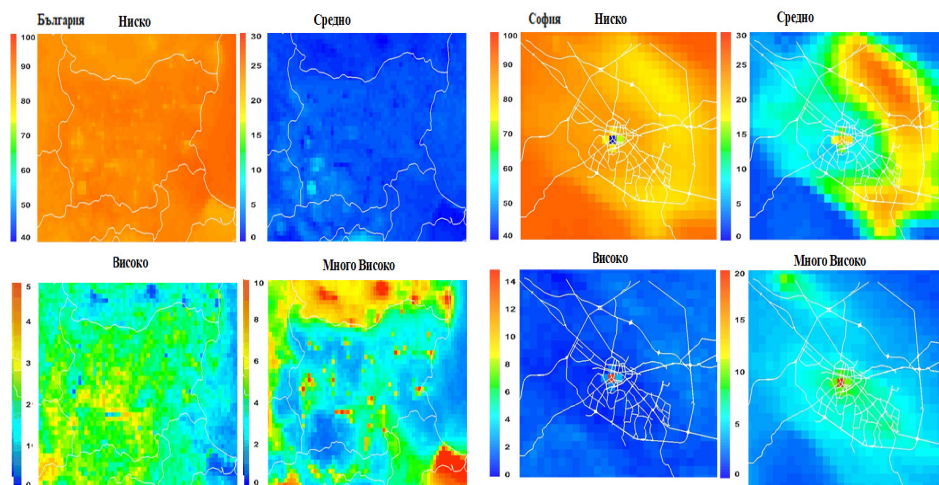


Фиг. 2. Статистически характеристики на осреднени приземни концентрации на FPRM/CPRM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] за София.

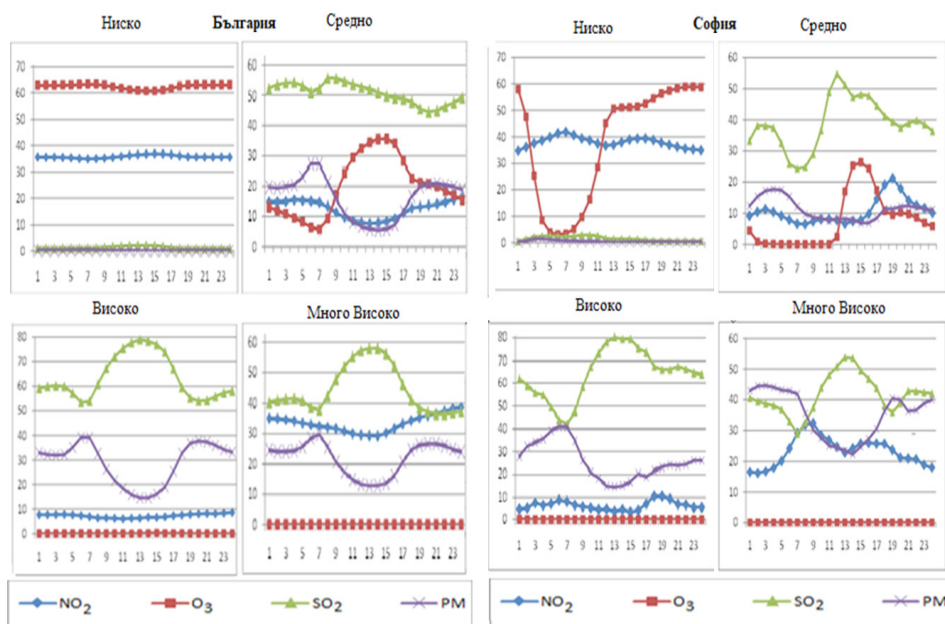
Графиките са представени в логаритмична скала. Вижда се, че средните концентрации са с добре изразени денонощен и сезонен ход и са асиметрично разположени в различните отрязъци от броя случаи през денонощието и през различните сезони. Средните концентрации попадат в интервала съдържащ 80% случаи през топлите месеци и над него през есента и през зимата съвпадат или са по-големи от 90% кривата. Абсолютните максимални и средни концентрации са най-високи през есента и зимата (устойчивата стратификация). В сутрешните часове има добре изразен максимум и минимум около обяд. Вероятна причина за този максимум са стабилната атмосфера и интензивния автомобилен транспорт сутрин. Източници на едри прахови частици са енергетиката и локалното отопление, които са най-интензивни през по-студените месеци. Фактът, че в много случаи линията на средните концентрации попада дори над линията 90% показва, че в останалите 10% от случаите концентрациите са изключително високи. Средните и абсолютните максимални концентрации на FPRM и CPRM са най-високи през есента и зимата поради устойчивата атмосфера и слабо изразения турбулентен транспорт във височина.

Изчисляване на ИЗ. Изясняване на ролята на замяряването с ФПЧ за формиране на ИЗ. Очертаване на региони/епизоди при които ФПЧ са определящи за ИЗ: Качеството на въздуха се определя, като се конструира Индекс за качеството на въздуха (ИКВ), или още наречен индекс на замяряване (ИЗ), показва до каква степен е чиста или замърсена средата, която дишаме и какви биха били последиците за здравето на хората. ИЗ е съставен и се измерва, за да се определи състоянието и качеството на въздуха, спрямо широкия кръг от замърсители, от който е съставен. Основна функция на ИЗ е оповестяването на реалното състояние на въздуха и обобщаването му в една цифра (например, изразена като цветна пиктограма или като код), като се дава възможност да се опише по един прост и разбираем за хората начин. ИЗ на атмосферния въздух дава интегрална оценка на влиянието на цялата съвкупност от замърсители върху човешкото здраве и се изчислява на базата на концентрацията на различните замърсители получена от измерване или числено моделиране. Предоставянето на информация за реалното качество на въздуха се осъществява, чрез преобразуване на концентрацията на замърсителите в индекс, който се определя за всеки замърсител поотделно и по различен начин. След преобразуването на концентрацията в индекс, се образува безразмерна скала, в която попада индексът и е свързана с интуитивен цветен код (напр. от зелено до червено) и лингвистично описание (например от много добро до много лошо). ИЗ се определя в няколко интервала за всеки, от който е линейна функция на концентрацията на съответните примеси (ЕРА, 2009). ИЗ в България се базира на концентрациите на 5 замърсителя: Озон (O_3), Азотен диоксид (NO_2), Серен диоксид (SO_2) и Прахови частици (PM_{10}). По този начин е определен и изчислен и индекса на замяряване, като резултатите са представени на Фигури 3 и 4. Пространственото и времево поведение на ИЗ е определен като всички симулации са представени като сума на всеки индекс във всяка една от категориите - Ниско, Средно, Високо и Много високо. В категорията Ниско въздуха е най чист, което означава, че високи стойности при полетата с повтаряемостта на дните с даден ИЗ, показват повече случаи с чист въздух, а ниските стойности означават

по-малко случаи с чист въздух, респективно – повече случаи със замърсен въздух. При останалите категории Средно, Високо и Много Високо, високите стойности показват повече случаи със замърсен въздух, а ниските – повече случаи с чист въздух.



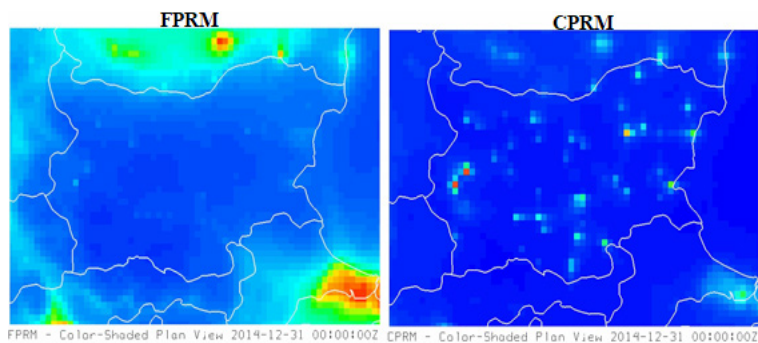
Фиг. 3. Повтаряемост на ИЗ в 4-те категории – годишно осреднени за България и София.



Фиг. 4. Годишно осреднени дневни вариации [%] на доминантните замърсители.

Фигура 3 полетата на повторемостта на ИЗ за двете области, много добре описва териториите и районите със занижено качество на въздуха. За България те са предимно големите градове и административни центрове в страната, както и районите на ТЕЦ-те (Бобов дол и Марица Изток); за София се открояват предимно централните части на града, района на Костинброд, по-големите пътни артерии на Столицата и ТЕЦ-те Изток и София. На Фигура 4 са представени графики показващи дневните вариации на всеки един от замърсителите участващи в изграждането на ИЗ във всяка една от категориите. Вижда се ясно, че и при двете области София и България, открояваща доминантна роля имат фините прахови частици. В категориите Високо и Много високо, се открояват като втори доминантен замърсител, след серния диоксид, като е редно да се отбележи, че през различните сезони и в зависимост от метеорологичните условия, ФПЧ са доминантен замърсител, особено сутрин и следобед, и определят качеството на въздуха.

Особено неблагоприятно приземно замърсяване с ФПЧ и връзката му с метеорологичните условия: Изясняване на ролята на крупномасштабните и локални метеорологични условия и процеси за формиране на особено неблагоприятно (екстремно) приземно замърсяване с ФПЧ. Направен е анализ на полетата на приземно замърсяване с ФПЧ и са разгледани случаи на най-неблагоприятно (екстремно) замърсяване – открояване на „горещи точки“. Анализирани са полетата на замърсяване с ФПЧ над двете области България и София град, и са определени открояващите се „горещи точки“ и за тези точки са представени полета на концентрации и графики със статистически характеристики. За територията на страната са определени „горещите точки“ Фигура 5, но представените графики са от района на град София, понеже това е областта с най-фина хоризонтална разрешаваща способност, а по територията на България те ще бъдат само изброени: Една от тези „горещи точки“ в страната е именно град София! Както се вижда и от полетата на концентрациите на двете фракции на праховите частици, ПДК се превишават, открояващите се райони са предимно големите градове (най-много над София), открояват се също ТЕЦ-те Марица Изток и Бобов дол.



Фиг. 5. „Горещи точки“ по територията на България и годишно осреднени концентрации на FPRM/CPRM за територията с разрешаваща способност от 9 км.

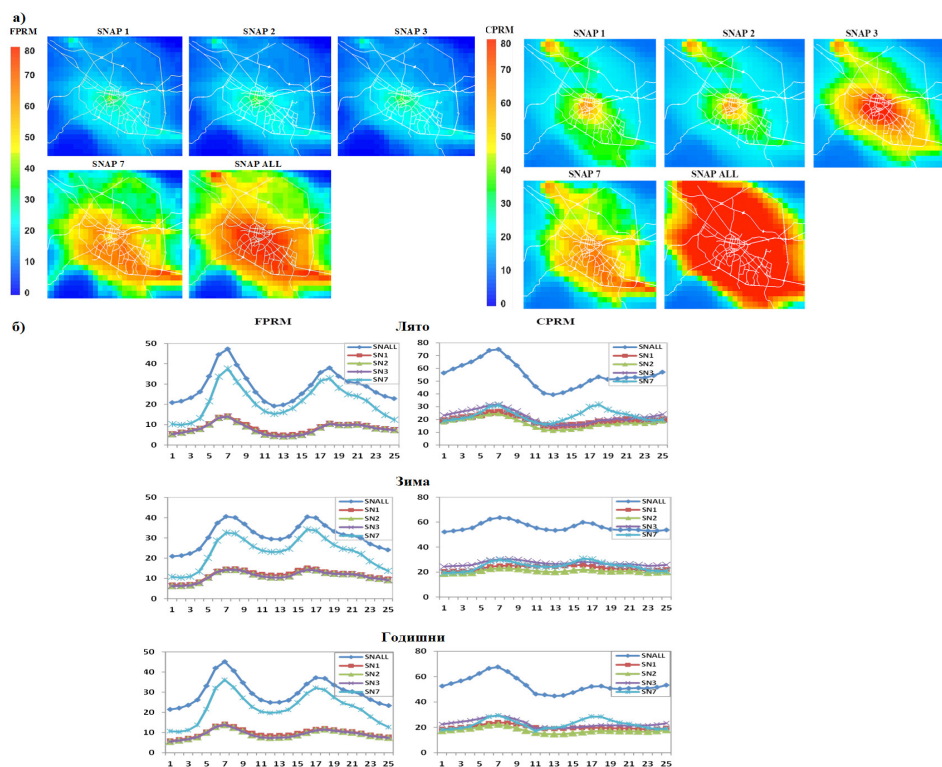
Представените полета на концентрациите на FPRM/CPRM осреднени за района на София (Фигура 6) показват, че „горещите точки“ от областта с високи стойности на концентрациите са Централните части на града (там се намира ТЕЦ София), ТЕЦ Изток в кв. Дружба и южната дъга на околновръстния път. Представителните точки за избраните райони са ТЕЦ „София“ и ТЕЦ „Изток“ (кв. Дружба – юго-източна част). Тези райони се открояват и на симулациите при определяне ИЗ със занижено качеството на въздуха. Всички графики са представени в логаритмична скала. Графиките показват, че средните концентрации са с добре изразени денонощен и сезонен ход и са асиметрично разположени в различните отрязъци от броя случаи през денонощието и през различните сезони. Средните концентрации



Фиг. 6. Статистически характеристики на годишно и сезонно осреднени приземни концентрации на FPRM/CPRM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] за избрани горещи точки: ТЕЦ София и ТЕЦ Изток.

попадат в интервала съдържащ 80% случаи през топлите месеци и над него през студентите, като през зимата съвпадат с 90% кривата. Абсолютните максимални и средни концентрации са най-високи през есента и зимата, като вероятна причина за това е често устойчивата стратификация на атмосферата. В сутрешните часове има добре изразен максимум и минимум около обяд (стабилната атмосфера и интензивния автомобилен транспорт сутрин). Има добре изразен минимум през деня и максимум вечер. Източници на едри прахови частици са предимно енергетиката и локалното отопление, които са най-интензивни през по-студените месеци, когато поради стратификацията е възпрепятстван турбулентния транспорт на замърсители във височина и те се задържат в приземния слой.

Изследване на произхода на замяряване с ФПЧ в град София: Чрез обработката на компютърно симулираните полета на приземни концентрации на ФПЧ за различни емисионни сценарии се оцени приноса на различните категории източници на атмосферно замяряване към цялостната картина на замяряването на град София с ФПЧ. Емисиите в използваната инвентаризация от 2010 година са за



Фиг. 7. а) Средно годишни приземни приноси на категориите SNAP1, SNAP2, SNAP3, SNAP7, SNAPALL [%] към изменението на приземните концентрации на FPRM/CPRM и **б)** Осреднени по ансамбъл годишни и сезонни приноси на отделните източници, водещи до изменението на FPRM и CPRM за София.

10 категории източници (SNAP) и това позволява да се оцени приноса на различните антропогенни дейности към общата картина на загърсяване с ФПЧ. В момента са налични ансамблови симулации за следните емисионни сценарии: SNAP1 - Енергетика; SNAP2 - Неиндустриални изгаряния; SNAP3 - Индустриални изгаряния; SNAP7 - Автомобилен транспорт и SNAPALL - включени емисии от всички категории източници. Направен е анализ за областта София град с разрешаваща способност от 1 км и инвентаризация на емисиите от 2010 година. Изчислен е относителния принос на всички категории източници към формиране на приземното загърсяване с ФПЧ. Представени са ансамбли от двумерни, зависещи от времето полета на относителните приносите на разглежданите SNAP категории към приземните концентрации на FPRM/CPRM, за София Фигура 7.

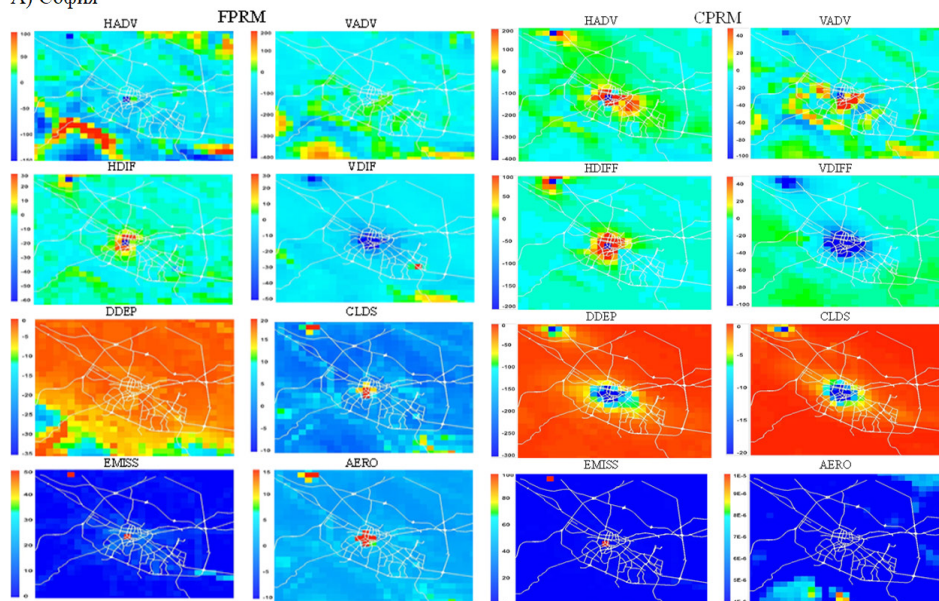
От полетата за средния годишния принос на емисиите от SNAP1, SNAP2 и SNAP3 за образуване на FPRM се вижда, че приносът през цялото денонощие навсякъде е положителен. Средният принос за града е около 30%. Само над високите части на планините Витоша и Стара Планина той е минимален и почти нулев. Приносът е най-висок над централните части на града, южните квартали и района на Костинброд около 40%. Полетата за средния годишен принос на емисиите от Автомобилния транспорт SNAP7 водещ до изменение на концентрацията на FPRM показват, че приносът през цялото денонощие навсякъде е положителен. Като в сутрешните и следобедните часове средният принос е максимален за града - около 50%, когато и транспорта е най-интензивен и пътните трасета са най-натоварени. Около обяд и през вечерта, приноса е по нисък в сравнение с другите часове, но въпреки това остава около 30% в централните части и началото на АМ Тракия както и основните пътни трасета в Столицата. От полетата за средния годишен принос на емисиите от всички категории източници SNAPALL водещ до изменение на приземните концентрации на FPRM, се вижда, че приносът през цялото денонощие навсякъде е положителен и максимален. Достига стойности над 60% за цялата област освен над планините, където той е нулев. Приносът е максимален сутрин и следобед със стойности около 70%, в централните части и южните квартали, като с голям принос се откроява и района на района на Костинброд. От полетата за средния годишен принос на емисиите от отделните категории водещи до изменение на концентрацията на CPRM се вижда, че приносът на всички е положителен, и най-големи се открояват от SNAP3 и SNAP7. Над планините Витоша и Стара Планина приноса е минимален и почти нулев. Открояват се Централните части на града, южните квартали и района на Костинброд с принос около 60-70%, а средния принос за останалата част на града е около 40%. Всички категории имат положителен принос към изменението на концентрациите на FPRM/CPRM, но най-големи са приносите от автомобилния транспорт за FPRM и Индустриалните изгаряния за CPRM. Също така приносите имат много добре изразен денонощен и сезонен ход, който може да се проследи и на графиките за Статистическия анализ на получените ансамбли от двумерни полета Фигура 7б. От фигурите за осреднените по ансамбъла годишни и сезонни приноси на отделните източници, водещи до изменението на приземните концентрации на FPRM и CPRM се вижда, че през отделните сезони приносът на различните типове източници е различен, но с почти еднакъв денонощен ход. Доминиращият принос

за FPRM е този на източниците от всички снопове (SNALL) около 40%, следван от този на автомобилния транспорт (SN7) - около 30%. Приносът на останалите източници е около 10% през всички сезони. Денонощното разпределение показва, че максимален принос имат сноповете в сутрешните и следобедните часове, а минимален около обяд и през нощта. За CPRM навсякъде доминиращият принос е на източниците от всички снопове около 50%. Вторият по големина принос е на автомобилния транспорт, като в сутрешните часове, той се изравнява с приноса на емисиите от промишлеността. Най-големи стойности на приносите са в сутрешните часове през всички сезони, както и в следобедните часове. Най-малък принос имат източниците на Неиндустриалните изгаряния около 10%. За територията на град София относителните приноси имат добре изразен денонощен и сезон ход. Сезонният ход може да бъде различен за различните замърсители и да се мени в зависимост от източника. Може да се направи обобщен извод, че за образуването на ФПЧ доминират Автомобилния транспорт (SNAP7) и Индустриалните изгаряния (SNAP3). Приносът на емисиите от всички категории (SNAPALL) за цялата област София град, е по-малък от 100%, което означава, че част от концентрациите се формират и от източници, които са външни за областта в резултат на пренос през границите и.

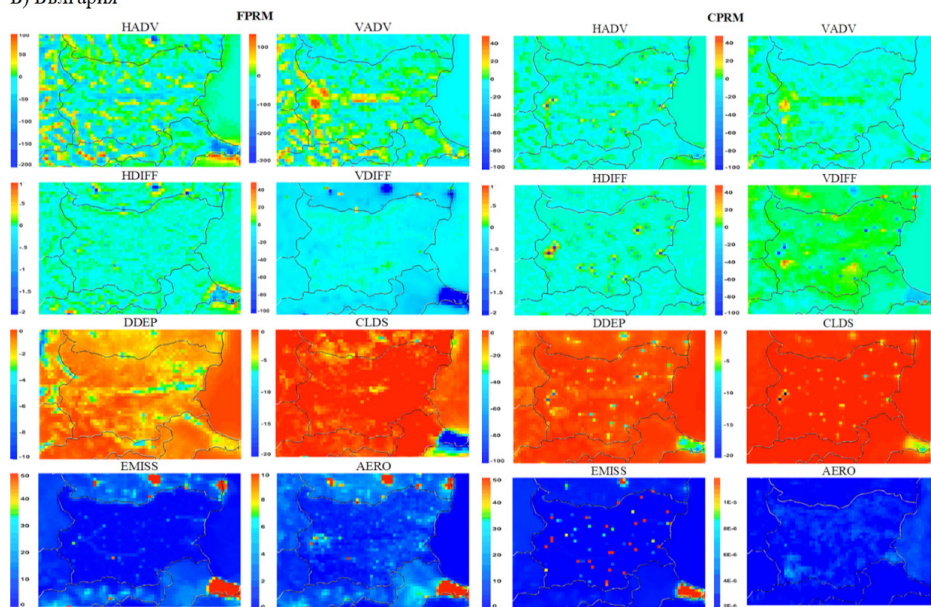
Изследване приноса на отделните динамични, химични и аерозолни процеси към формиране на замърсяването с ФПЧ. Атмосферното замърсяване се формира в резултат на взаимодействието на различни динамични и химични процеси. Чрез обработката на компютърно симулираните полета на приносите на различните процеси към почасовото изменение на приземните концентрации на ФПЧ се обогатяват знанията за сложното взаимодействие на динамичните, химични и аерозолни процеси, формиращи замърсяването с ФПЧ.

Разглеждането на взаимодействието и приноса на тези процеси дава възможност за обяснение на общата картина на замърсяване с ФПЧ както за територията на България, така и за София. Различните процеси, които влияят върху формиране на картината на замърсяване са: хоризонтална и вертикална дифузия, хоризонтална и вертикална адвекция, емисии, сухо отлагане, химически трансформации, аерозолни процеси, хетерогенна химия и облачни процеси, запазване/съхранение на масите. В тази част са представени резултати от компютърните симулации, оценяващи приноса на различните динамични процеси на пренос и трансформация на ФПЧ, които формират климата на замърсяването на въздуха за двете области. Извършен е статистически анализ на ансамблите от двумерни полета на относителни приноси на различните процеси към формиране на концентрациите на ФПЧ. Моделът CMAQ, който е използван при симулациите има опция "Integrated Process Rate Analysis", която дава възможност да се оцени ролята на всеки от процесите споменати по-горе, при формиране на атмосферното замърсяване. По този начин изменението на концентрацията за даден интервал от време може да се представи като сума от приноса на различните процеси. Включването на опцията за изследването на приносите на отделните процеси, дава възможност да се определят не само приносите на отделните процеси за определен замърсител, но също така и за група от замърсители:

А) София



Б) България

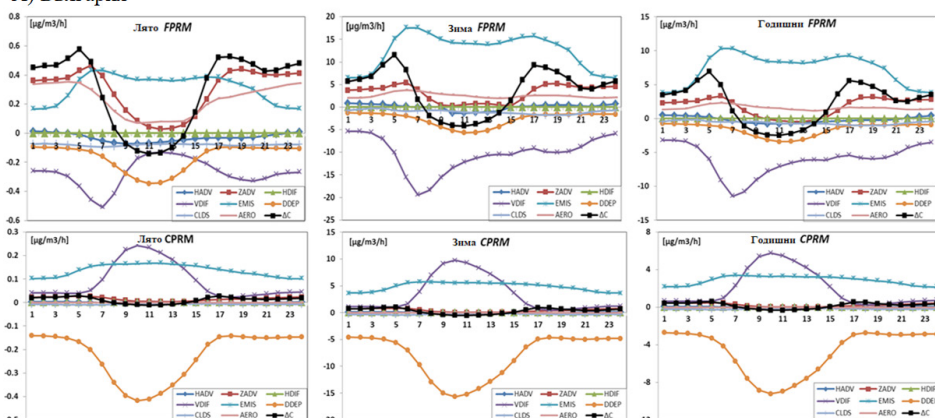


Фиг. 8. Осреднени годишни двумерни полета на приземните приноси на отделните процесите към изменението на концентрациите на FPRM/CPRM за териториите на А) София и Б) България.

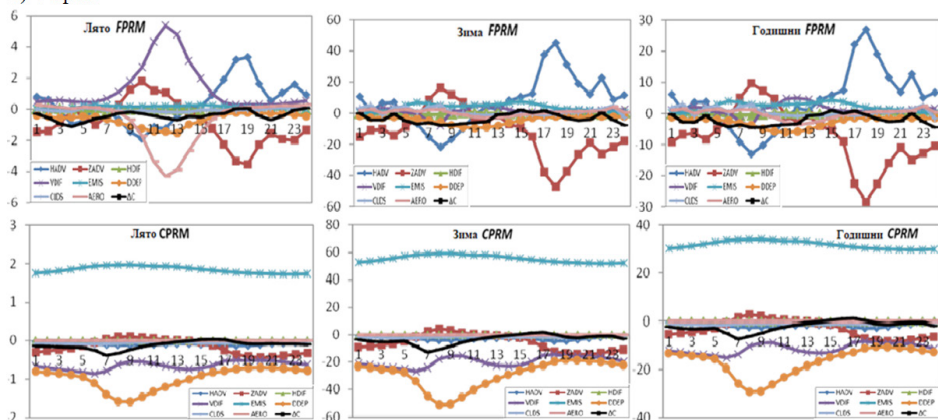
Една такава специфична група от замърсители са праховите частици, които модела може да раздели и разгледа като отделни фракции: CPRM = ACORS + ASEAS + ASOIL - Едри Прахови Частици (CPRM) и A2_5 = SO₄ + NH₄ + NO₃ + EC +(ORGA + ORGB) + PM_{2.5}- Фини Прахови Частици (FPRM). Представени са резултати за двете групи праховите замърсители CPRM и FPRM (едри и фини прахови частици). От двумерните карти за приземните приноси на процесите водещи до образуването на ФПЧ, както за България, така и за София, могат да се направят следните изводи: Приносите на двойката Хоризонтална-Вертикална адвекция (HADV, VADV) са винаги в противофаза, което е отражение на уравнението на непрекъснатостта. И двете адвекции добре описват планинските части и релефа на областта, като естествено в полетата за София (с по-детайлната резолюция) ефекта е по-видим. Приносът на HADV към FPRM е отрицателен над планините и в центъра на града и положителен принос в подножията (добре се описва и на картите за България). Вертикалната адвекция (VADV) е в противофаза на Хоризонталната и тя има положителен принос по планините и отрицателен в подножията. Приносът на Хоризонталната дифузия (HDIF) е отрицателен над самите източници - ТЕЦ „София“, ТЕЦ „Изток“, ТЕЦ „Марица Изток и Бобов дол, а около тях е положителен. Най-добре тези ефекти се откриват на картите за CPRM за България. Вертикалната дифузия (VDIF) има положителен принос само над високите източници (ТЕЦ-те) при картите за София и FPRM, докато за CPRM на картите за България приноса на VDIF е отрицателен. Приносът на VDIF е отрицателен за FPRM /CPRM в центъра на София и района на Костинброд – където са по-ниски източници. Приносът на сухото отлагане (DDEP), естествено, е отрицателен за и за двете фракции, като най-голям е над ТЕЦ „Изток“ и Витоша планина за FPRM, а в централните части е почти нулев. При картите на CPRM, приносът на DDEP е най-голям и отрицателен в центъра на града и района на Костинброд. Приносът на облачните процеси (CLDS) също е отрицателен и най-голям над централните части и Костинброд за CPRM, докато на полетата за FPRM, приноса е положителен и максимален в тези райони за София, а на картите за България отрицателен е приноса е отрицателен над София и ТЕЦ „Бобов дол“, докато на другите места е почти нулев. Приносът на емисиите (EMIS) е положителен! За София той е най-голям в Центъра на града, района на Костинброд и началото на АМ Тракия и за двете фракции, а при картите за България той е максимален и положителен над големите градове и източниците на емисии. Приносът на аерозолните процеси (AERO) е положителен, като за FPRM той е най-голям в централните части и района на Костинброд, а за CPRM приносът на аерозолните процеси е изключително малък и за двете области. Както стана ясно от описанието на полетата на средните приземни приноси, всички процеси имат различни по-големина приноси, със различни знаци в различни фази са и имат различни значения. Значението на „положителен“ принос, е че даденият процес допринася към повишение на концентрацията, докато „отрицателния“ принос, намаля концентрацията на дадения замърсител (в случая ФПЧ).

На графиките от Фигура 9, са представени осреднените приноси на различни процеси (HADV, ZADV, HDIF, VDIF, EMIS, DDEP, CLDS, CHEM, AERO), водещи до изменението на концентрацията на ФПЧ, осреднени за София и България.

А) България



Б) София



Фиг. 9. Годишно и сезонно осреднени приземни приноси на процесите водещи до изменението на концентрациите на ФПЧ (FPRM/CPRM) в $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{h}]$ за А) България и Б) София.

Сумарното изменение на процесите (ΔC) е изобразено с черен цвят на всички графики и се вижда, че то е както с положителен, така и с отрицателен знак и има добре изразен денонощен ход. Стойностите на (ΔC) са различни през различните сезони и се определя от броя на процесите, които също са с различен знак и големина. За образуването на различните замърсители доминират различни приноси с различни стойности и именно това е проследено със следващите графики - кой принос на даден процес е доминиращ, по кое време на денонощието и с какъв знак.

За България: за изменението на концентрацията на FPRM основен положителен принос имат EMIS през целия ден и VADV сутрин и следобед. HADV има почти нулев принос, а VDIF има изцяло отрицателен принос през всички сезони. DDEP е с отрицателен принос с максимум около обяд. AERO през всички сезони имат положителен принос. Вижда се че доминантния процес тук са EMIS особено през

зимните месеци. Сумарното изменение (ΔC) водещо до изменението на концентрацията на FPRM има изцяло положителен знак, като единствено през обедните часове той става много близък до нула, дори отрицателен. За образуването на CPRM основен положителен принос имат химичните процеси (CHEM), чиито стойности са най-големи от всички други, с максимум през зимните месеци и VDIF с максимум около обяд. DDEP има изцяло отрицателен принос. Сумарното изменение на процесите (ΔC) е както с положителен, така и с отрицателен знак за CPRM.

За София: за изменението на концентрацията на FPRM основен положителен принос имат VDIF през целия ден и VADV около обяд. Приносът на VADV в сутрешните и следобедните часове е отрицателен. HADV е в противофаза на VADV. DDEP е с отрицателен принос с максимум около обяд. AERO през всички сезони с изключение на зимата са с отрицателен принос. За образуването на CPRM основен положителен принос имат CHEM, чиито стойности са най-големи от всички други, с максимум през зимните месеци. VDIF и DDEP имат изцяло отрицателен принос. VADV в обедните часове има малък положителен принос, а в следобедните и сутрешните, той е отрицателен. През зимата процесите са по-активни в сравнение с другите сезони и също така се откроява този сезон с голям положителен принос на EMIS и намаляващ до отрицателен принос на VDIF. Останалите процеси имат почти нулев принос. Сумарното изменение на процесите (ΔC) е както с положителен, така и с отрицателен знак за CPRM и предимно с отрицателен знак за FPRM.

Заклучение

Конструиран е климата на замърсяването с ФПЧ в различни мащаби, като се определиха и точки с особено неблагоприятно приземно замърсяване с ФПЧ. Изследвана е връзката на това замърсяване с метеорологичните условия. От получените резултати с компютърното моделиране беше изследван произхода на замърсяване с ФПЧ в град София, като се определиха източниците на замърсяване, също така и се изясни ролята на отделните динамични, химични и аерозолни процеси за формиране на замърсяване с ФПЧ.

Числено получените полета за концентрация на ФПЧ показват няколкократно превишаване на граничните стойности за концентрации основно в най-големия град в страната София.

Поведението на приземните концентрации, осреднени за целия ансамбъл годишно или за четирите сезона е разумно и демонстрира ефекти, които за повечето от съединенията могат да се обяснят от гледна точка на общоприетите схеми на динамични влияния (турбулентен транспорт, атмосферна стабилност), локални атмосферни циркулации или химични трансформации; Приземните концентрации на ФПЧ вероятно се дължат на приземните източници - най-вече на автомобилния транспорт; Инвентаризацията на емисиите на TNO е за 10 категории SNAP, които позволяват оценка и определяне на приноса на различни антропогенни дейности към цялостната картина на замърсяването. За всички категории емисии моделът на полетата за принос е доста сложен, което отразява конфигурацията на източника на

емисии, хетерогенността на топографията, използването на земята и метеорологични условия. Относителният принос на отделните типове източници на емисии към концентрацията на ФПЧ може да бъде доста различен. Приносът на различните категории емисии към приземните концентрации на ФПЧ има различен дневен ход и значение. Замърсяването на въздуха се формира в резултат на взаимодействието на различни процеси, така че познаването на приноса на всеки за различните процеси, метеорологични условия за дадена пространствена конфигурация на емисиите и временно поведение, са много полезни за разбирането на климата на замърсяването на въздуха, в частност климата на замърсяването с ФПЧ.

Резултатите, получени от “Integrated Processes Rate Analysis” демонстрират много сложното поведение и взаимодействие между различни процеси за FPRM и CPRM. По-нататъшен анализ на тези процеси, тяхната пространствена, денонощна и сезонна променливост и взаимодействие може да бъде полезен за обяснение на цялостната картина и произход на замърсяването в разглеждания регион. Общата промяна на концентрацията (ΔC), водеща до промяна в концентрацията, се определя главно от малък на брой доминиращи процеси, които имат големи стойности и могат да бъдат с противоположен знак и фази. Знакът на приноса на някои от процесите е очевиден, но някои от тях може да имат различен знак в зависимост от вида на емисиите, както и от метеорологичните условия и топография.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-363/17.12.2020). Специални благодарности на US EPA and US NCEP за предоставянето на свободни данни и софтуер и на Холандска организация за приложни научни изследвания (TNO) за предоставяне на Европейска инвентаризация на емисиите с висока разрешаваща способност.

Литература

- Byun, D., Ching, J., 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. *EPA Report 600/R-99/030, Washington DC*. <http://www.epa.gov/asmdnerl/models3/doc/science/science.html>.
- Byun, D., J. Young, G. Gipson, J. Godowitch, F. S. Binkowski, S. Roselle, B. Benjey, J. Pleim, J. Ching, J. Novak, C. Coats, T. Odman, A. Hanna, K. Alapaty, R. Mathur, J. McHenry, U. Shankar, S. Fine, A. Xiu, and C. Jang, 1998. Description of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *10th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA*, 11-16 January 1998, Phoenix, Arizona, pp. 264-268.
- CEP (2003). Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE) Modeling System, *University of Carolina, Carolina Environmental Programs, Research Triangle Park, North Carolina*.

- Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van de Brugh, H., Droge, R., (2010). A high resolution European emission data base for the year 2005, *TNO-report TNO-034-UT-2010-01895 RPT-ML, Apeldoorn, The Netherlands*
- Dudhia, J., 1993. A non-hydrostatic version of the Penn State/NCAR Mesoscale Model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.* 121, pp. 1493-1513.
- EMEP/CORINAIR, 2002. Atmospheric emission inventory guidebook, third edition, European Environmental Agency. <http://reports.eea.europa.eu/EMEP/CORINAIR3/en/page002.html>
- EPA 2009. Technical assistance document for the reporting of daily air quality - the Air Quality Index (AQI). EPA- 454/B-09-001, *US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina 27711.*
- Gadzhev G., K. Ganev, D. Syrakov, M. Prodanova and N. Miloshev 2013. Some Statistical Evaluations of Numerically Obtained Atmospheric Composition Fields in Bulgaria, in the *Proceedings of 15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 6-9 May 2013, Madrid, Spain, 373-377.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2014a. Some basic facts about the atmospheric composition in Bulgaria - Grid computing simulations. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8353 LNCS, pp. 484-490.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2014b. Analysis of the processes which form the air pollution pattern over Bulgaria. *Lecture Notes in Computer Science (subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8353 LNCS, pp. 390-396.
- Gadzhev G., Ganev K., Miloshev N. 2015a. Numerical study of the atmospheric composition climate of Bulgaria – validation of the computer simulation results. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 57, Nos. 3/4, pp. 189-201.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2015b. HPC simulations of the fine particulate matter climate of Bulgaria. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8962, pp. 178-186.
- Gadzhev G., Ganev K., Mukhtarov P., 2020. Statistical Moments Of The Vertical Distribution Of Air Pollution Over Bulgaria. *I. Lirkov and S. Margenov (Eds. (sad) LSSC 2019, LNCS 11958*, pp. 213–219, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41032-2_24
- Gadzhev G., Ganev K., Mukhtarov P., 2021a. HPC Simulations of the Atmospheric Composition Bulgaria's Climate (on the example of coarse particulate matter pollution), *HPC 2019, SCI 902*, pp. 221-233, (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-55347-0_19
- Gadzhev G., V. Ivanov, K. Ganev, 2021b. Modelling of dry and wet deposition processes for the Sulphur and Nitrogen compounds over Bulgaria, *The 20th conference on „Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes“* was held in Tartu, Estonia, in June 2021.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2018a. VERTICAL STRUCTURE OF SOME POLLUTANT OVER BULGARIA - OZONE AND NITROGEN DIOXIDE. *SGEM 2018*, 18, 4.3, (2018), ISBN:978-619-7408-70-6, ISSN:1314-2704, DOI:10.5593/sgem2018/4.3, pp. 449-454.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2018b. Vertical structure of atmospheric composition fields over Bulgaria, *International Conference on „Numerical Methods for Scientific Computations and Advanced Applications“ (NMSCAA'18)*, Hisarya. Bulgaria, 27 – 31 May 2018, pp. 38-41.

- Gadzhev G. and K. Ganev., 2019. VERTICAL STRUCTURE OF AIR POLLUTANT FIELDS OVER BULGARIA, *19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (Harmo'19)* 3-6 June 2019, Bruges, Belgium.
- Gadzhev G. and V. Ivanov, 2020. MODELLING OF THE SULPHUR AND NITROGEN DEPOSITIONS OVER THE BALKAN PENINSULA BY CMAQ AND EMEP-MSC-W – PRELIMINARY RESULTS, (2020), *Proceeding of 1st International conference on ENVIRONMENTAL protection and disaster RISKS*, 29-30 September 2020, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-619-7065-38-1, pp. 90-100, <https://doi.org/10.48365/envr-2020.1.8>
- Gadzhev G. and V. Ivanov, 2021. Modelling of the Seasonal Sulphur and Nitrogen Depositions over the Balkan Peninsula by CMAQ and EMEP-MSC-W, N. Dobrinkova and G. Gadzhev (eds.), *Environmental Protection and Disaster Risks, Studies in Systems, Decision and Control* 361, (2021), pp. 171 – 183, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_12
- Gadzhev, G., 2018. Recurrence of Air Quality for the city of Sofia for 2013 and 2014, *Bulgarian Geophysical Journal*, 41, 46-58.
- Gadzhev, G., 2020. PRELIMINARY RESULTS FOR THE RECURRENCE OF AIR QUALITY INDEX FOR THE CITY OF SOFIA FROM 2008 TO 2019, *Proceeding of 1st International conference on ENVIRONMENTAL protection and disaster RISKS*, 29-30 September 2020, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-619-7065-38-1, 53-64, <https://doi.org/10.48365/envr-2020.1.5>
- Gadzhev, G., 2021. The Seasonal Recurrence of Air Quality Index for the Period 2008-2019 Over the Territory of Sofia City, Dobrinkova and G. Gadzhev (eds.), *Environmental Protection and Disaster Risks, Studies in Systems, Decision and Control* 361, 161–170, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_11
- Georgieva, I., Gadzhev, G., Ganev, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Miloshev, N. 2014. Numerical study of the air quality in the city of Sofia -Some preliminary results. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 57, Nos. 3/4, pp. 162-174.
- Georgieva, I., Gadzhev, G., Ganev, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Miloshev, N. 2015. Numerical study of the Air Quality in the city of Sofia, *8th Congress of the Balkan Geophysical Society, BGS 2015*.
- Georgieva, I and Ivanov V. 2017. Air Quality Index Evaluations for Sofia city, *IEEE EUROCON 2017 – 17th IEEE International Conference on Smart Technologies, IEEE EUROCON 2017*, pp. 920-925.
- Georgieva, I., Ivanov, I., 2018. Computer simulations of the impact of air pollution on the quality of life and health risks in Bulgaria, *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 64, Nos. 1/3, 2018, pp. 35-46.
- Leeuw, F. de, Mol, W., (2005). Air Quality and Air Quality Indices: a world apart. ETC/ACC *Technical Paper 2005/5* http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TechPaper_2005_5_AQ_Indices.pdf
- Shamarock et al., 2007. “A description of the Advanced Research WRF Version 2”, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf
- Schwede, D., G. Pouliot, and T. Pierce 2005. Changes to the Biogenic Emissions Inventory System Version 3 (BEIS3), *Proc. of 4th Annual CMAS Models-3 Users's Conference*, September 26-28, 2005, Chapel Hill, NC.
- Syrakov, D., Etropolska, I., Prodanova, M., Ganev, K., Miloshev, N., Slavov, K., 2012. Operational Pollution Forecast for the Region of Bulgaria, *American Institute of Physics, Conf. Proc.* 1487, p. 88 - 94; DOI: 10.1063/1.4758945.
- Syrakov, D., Etropolska, I., Prodanova, M., Slavov, K., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov T., 2013. Downscaling of Bulgarian Chemical Weather Forecast from Bulgaria region to

- Sofia city, *American Institute of Physics, Conf. Proc.* 1561, p. 120-132, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4827221>.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Etropolska, I., Slavov, K., Ganey, K., Miloshev, N., Ljubenov T., 2014a. A multy-domain operational chemical weather forecast system, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Volume 8353 LNCS, 2014, Pages 413-420.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Georgieva, E., Etropolska, I., Slavov, K., 2014b. Impact of NOx emissions on air quality simulations with the Bulgarian WRF-CMAQ modelling system, *HARMO 2014 - 16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Proceedings* 2014, Pages 187-190.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Georgieva, E., Etropolska, I., Slavov, K., 2015. Impact of NOx emissions on air quality simulations with the Bulgarian WRF-CMAQ modelling system, *International Journal of Environment and Pollution*, Volume 57, Issue 3-4, 2015, Pages 285-296.

Fine particles (pm) air pollution - analysis of the results of computer simulations for bulgaria and sofia city

I. Georgieva and N. Miloshev

Abstract. Recently, in the study of air pollution, special attention has been paid to particulate matter (PM) because of great importance for the quality of life and Human Health (HH). The topic is especially relevant for Bulgaria and Sofia city, where the situation is especially severe regarding PM concentrations, where several times exceeded the limit values for concentrations. The research aims to provide a statistically reliable assessment of the atmospheric composition climate, particularly PM surface concentrations, the role in forming the Air Quality Index, and the relationship with the processes that determine. The following results are presented in the paper: Analysis of the spatial and temporal variability of the PM concentrations fields and behavior, the establishment of the connections with meteorological conditions and the pollution sources; Enrichment knowledge about the interactions of the processes forming the PM pollution; Highlighting cases with the most unfavorable PM pollution - „hot spots“ and the most unfavorable synoptic episodes, and clarifying the role of meteorological conditions and local processes.