

Описание на Българската система за оперативна прогноза на атмосферното замърсяване, версия 2

Димитър Сираков¹, Мария Проданова¹, Ерик Етрополски¹, Костадин Ганев², Николай Милошев², Кирил Славов¹, Тодор Любенов²

¹Национален институт по метеорология и хидрология, Цариградско шосе 66, София 1784, България

²Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, ул. „Акад. ул. Г. Бончев, Бл.3, София 1113, България

ВЪВЕДЕНИЕ

Качеството на въздуха (КАВ) е ключов елемент за благосъстоянието и качеството на живот на европейските граждани. Според Световната здравна организация (СЗО) замърсяването на въздуха се отразява сериозно на здравето на европейските граждани. Има все повече доказателства за неблагоприятните ефекти от замърсяването на въздуха върху дихателните пътища и сърдечно-съдовата система в резултат както на остра, така и на хронична експозиция. По-специално, намаляването на продължителността на живота с година или повече се предполага, че е свързано с дългосрочно излагане на високи концентрации на прахови частици (PM) във въздуха. Съществува значителна загриженост относно лошото качество на въздуха в много райони в Европа, особено в урбанизираните райони въпреки около 30 години законодателство за намаляване на емисиите. Действащото законодателство, напр. Озоната дъщерна директива 2002/3/ЕО (Европейски парламент, 2002 г.), изисква информиране на обществеността относно КАВ, оценка на концентрациите на замърсители на въздуха на цялата територия на държавите-членки и индикиране на превишения на гранични и целеви стойности, прогнозиране на потенциални превишения и оценка на възможните спешни мерки за намаляване на превишенията. За целта трябва да се използват инструменти като моделиране, успоредно с измерванията на замърсяването на въздуха. Целите на надеждните прогнози за качеството на въздуха са ефективен контрол и защита на експозицията на населението, както и възможно намаляване на емисиите. През последните години се появи понятието „химическо време” и съответно в много страни заедно с обичайните метеорологични прогнози за времето се разработват системи за прогнозиране на замърсяване на атмосферата, т.е. на химическото време (вж. например Sofiev et al., 2006, Poupkou et al., 2008a, 2008b, Monteiro et al., 2005, San Jose et al., 2006 г. и други).

Замърсяването на въздуха лесно преминава националните граници. Би било рентабилно и полезно за гражданите, обществото и лицата, вземащи решения, тази национални системи за химическа прогноза да бъдат свързани в мрежа в цяла Европа. За целта няколко проекта по Европейските Рамкови програми (GEMS, PROMOTE, MEGAPOLI, MACC, PASODOBLE и др.), както и акцията COST ES0602 „Към Европейска мрежа за химическо прогнозиране на времето“) бяха стартирани с цел предоставяне на форум за хармонизиране, стандартизиране и създаване на сравнителни подходи и практики при обмен на данни и мултимоделни възможности за качествена прогноза в реално (или почти реално) време в Европа. Предполага се, да се изследват съществуващи и разработват нови решения за интегриране на усилията за развитие на национално и международно ниво.

Описанието на няколко такива системи могат да се видят във веб-портала (<http://www.chemicalweather.eu/Domains>).

България се присъедини към COST Action ES0602 от самото начало. Това участие предизвика създаването на проект с подкрепата на ФНИ към Министерството на образованието, младежта и науката. Основната му цел беше да създаде прототип на българска система за химическа прогноза за времето (BgCWFS v.1), предназначена да предоставя навременни, информативни и надеждни прогнози, съобразени с нуждите на различни потребители (вж. Syrakov et al. 2009, 2012). По-късно, частично в рамките на проекта PASODOBLE по FP7 на ЕС с наименование „Promote Air Quality Services Integrating Observations – Development of Basic Localized Information for Europe”), както и на финансирани от страна на Фонд научни изследвания бяха разработени нови версии на системата (v.2 и v.3) с намаляване на мащаба на услугата до разделителна способност от 1 км над град София. Тук ще бъде описана версия 2 на BgCWFS, както и нейните продукти за крайните потребители.

ИЗПОЛЗВАНИ МОДЕЛИ

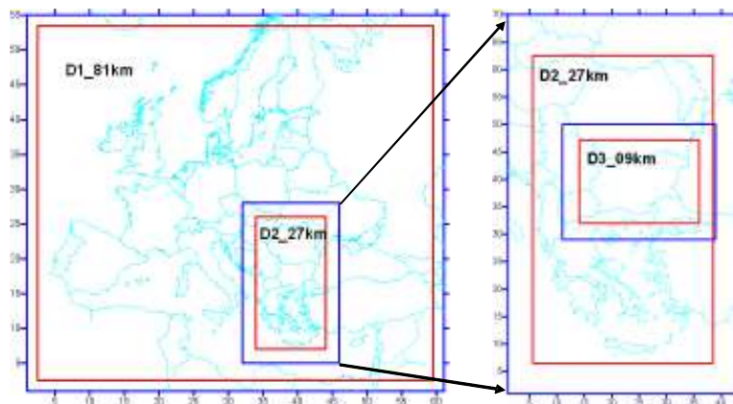
BgCWFS е проектирана по начин, който в реално време да предоставя прогнози за следващите 3 дни на почасова база. Тук се използва системата за моделиране на качеството на въздуха US EPA Models-3, състояща се от:

- **CMAQ v.4.6** - Community Multi-scale Air Quality model, (<http://www.cmaq-model.org/>, Denis et al., 1996, Byun and Ching, 1999, Byun and Schere, 2006), който е химически транспортен модел (CTM), основен компонент на BgCWFS;
- **WRF v.3.2.1** – Weather Research and Forecasting Model (<http://www.wrf-model.org>, Skamarock et al., 2005), който е метеорологичен пре-процесор към CMAQ;
- **SMOKE v.2.4** - Sparse Matrix Operator Kernel Emissions Modelling System, (<http://www.smoke-model.org>, Coats and Houyoux, 1996, Houyoux и Vukovich, 1999, CEP, 2003), който е емисионен пре-процесор към CMAQ.

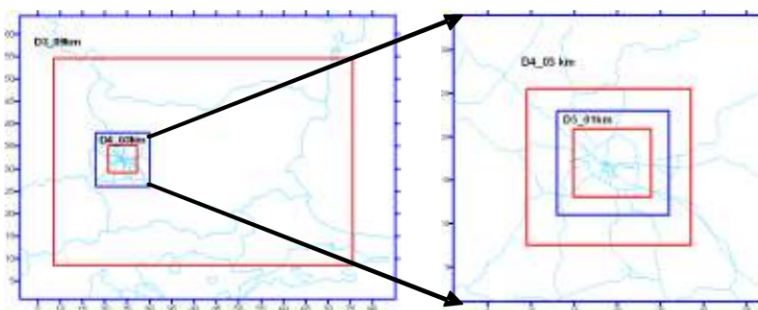
В системата WRF се запазва с GFS-данните (Global Forecast System) на американския Национален център за прогноза (NCEP), които са достъпни свободно от <http://www ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod>. Тези данни са глобална прогноза за времето във формат GRIB-2 с пространствена резолюция $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ и 6-часова времева резолюция. Изтеглянето на тези данни се извършва автоматично всеки ден в 00:00Z. Тегли се 84-часов комплект, започващ от 12:00Z на предходния ден последван от 3-дневна прогноза за времето. Първите 12 часа от този период се използват за автонапасване на WRF (spin-up), след което следва 3-дневната метеорологична прогноза. Продължителността на химическата прогноза е от 00:00Z на текущия ден до 00:00 Z на четвъртия ден (3-дневна прогноза)

МОДЕЛНИ РАЙОНИ

Така наречените възможности за влагане (nesting capabilities) на WRF и CMAQ се използват за намаляване на мащаба на прогнозите от европейската област към област София-град. Разделителната способност на основния район (Европа) е 81 km, достатъчно голяма за да съответства на резолюцията на GFS-данните. Четири други области са вложени в него и една в друга – Балкански полуостров (резолюция 27 km), България (9 km), област София (3 km) и град София (1 km) както е показано на Фиг. 1а,б.



Фиг. 1а. Области на BgCWFS, версия 2.1: *WRF* (в синьо) и *CMAQ* (в червено).



Фиг. 1б. Области на BgCWFS, версия 2.2: *WRF* (в синьо) и *CMAQ* (в червено).

Във версия 2 на BgCWFS като химични гранични условия в основния район (Европа) се използват осреднени данни (идват като част от софтуера на CMAQ). Разбира се така се внасят грешки, но поради непрекъснатото действие на източниците на замърсяване грешките, въведени от това предположение, намаляват бързо към центъра на региона, т.е. към следващите области. Всички други области получават своите гранични условия от предишната област в йерархията. За удобство уеб-изходът на тази версия на Системата е разделен на две части – ver.2.1 (Европа – Балкани – България, <http://info.meteo.bg/cw2.1/>) и ver. 2.2 (България – София-област – София-град, [http://info.meteo.bg/cw2.2.](http://info.meteo.bg/cw2.2/)).

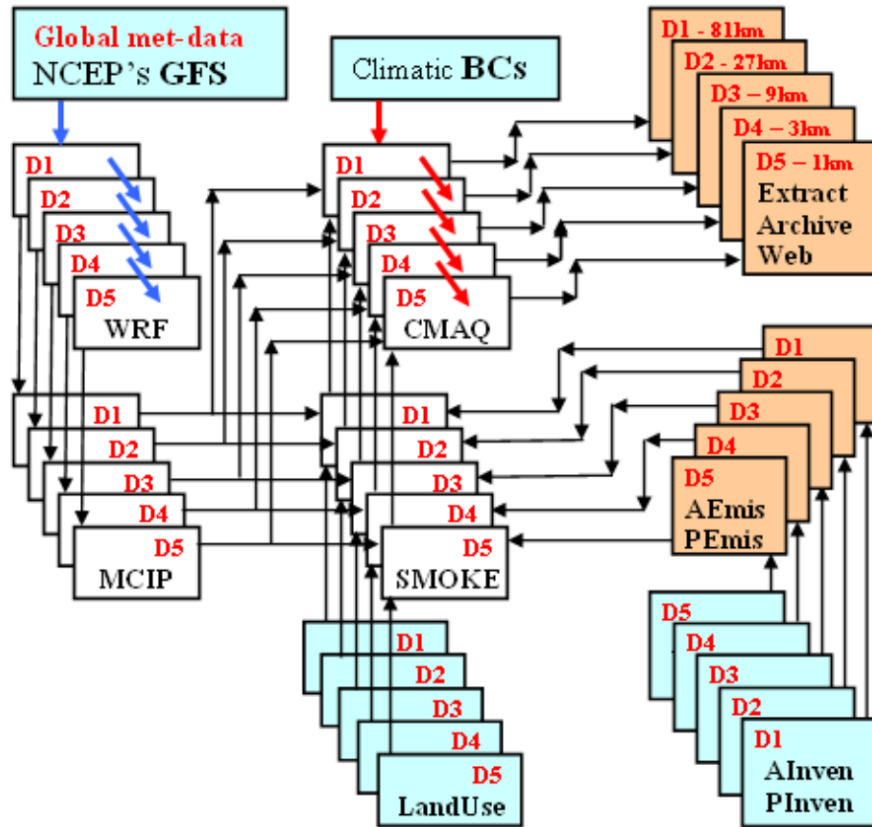
ПОТОК НА ИНФОРМАЦИЯТА

Моделите, посочени по-горе, са свързани с редица Linux-скриптове и интерфейсни програми по такъв начин, че да може да се изчисли бъдещото ниво на много замърсители на въздуха за всеки район на Системата. Диаграмата на потока от данни е представена на Фиг.2.

На фигурата, елементите от системата Models-3 са обозначени с бели кутийки, сините кутийки представят различните видове входна информация. Това са:

- метеорологичната цифрова прогноза, която задвижва метеорологичния препроцесор на системата (*WRF*) – *GFS* данни, изтеглени от уебсайта на NCEP;
- климатичните стойности на редица замърсители на въздуха, използвани като химични гранични условия за основния район (Европа), които не се променят с времето;
- данните за инвентаризацията на емисиите, предоставени от TNO, Холандия (Denier van der Gon et al., 2010), подредени в мрежи според областите на системата, и

- съответните пет набора от данни за характера на земната повърхност (land-use, база данни на USGS, <http://landcover.usgs.gov>). Данните за земеползване предварително се извличат от WRF, след което са обработени съответно.



Фиг. 2. BgCWFS, версия 2, диаграма на информационния поток. Белите кутийки представят елементите на Models-3, сините – входни данни, а кафявите – специфични процедури за предварителна и последваща обработка. Сините стрелки обозначават прехвърлянето на метеорологичните гранични условия между областите, а червените стрелки – химическите гранични условия. Черните стрелки показват обмена на информация между елементите на системата във всеки отделен район.

Кафявите кутии представят програми на FORTRAN, насочени към моделиране на емисионни входове за площни източници (Area Sources – AS) и големи точкови източници (Large Point Sources – LPS), както и последваща обработка на данни (извличане, архивиране, обработка на изображения).

Обменът на данни в системата е обозначен със стрелки. Цветните стрелки показват обмена на данни между изчислителните области, а черните стрелки – обмена на данни вътре във всеки един от районите. Накратко, изходите на WRF захранват модула MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor); MCIP подготвя метеорологичния вход към CMAQ, който се използва и от SMOKE за изчисляване на емисиите от биогенни източници (BgS) на базата на съответните данни за LandUse. Мрежовите данни за инвентаризациите на емисиите (AInven, PInven) се подават на програмите AEmis и PEmis, които създават съответните AS- и LPS-емисионни файлове. SMOKE се използва още веднъж за обединяване на AS-, LPS- и BgS-данни в общ емисионен вход към CMAQ. И накрая, изходът от CMAQ се подлага на обработка (post-processing), за да се извлекат най-важните замърсители, да се архивират, да се създадат почасови изображения с разпределение на

концентрацията на 4 ключови замърсители (NO₂, SO₂, озон и PM₁₀) и да се качат в съответните уеб-сайтове. Тези процедури се повтарят за всичките 5 области на системата в следния ред: WRF, MCIP, AEmis, PEmis, SMOKE (BgS и сливане), CMAQ, последваща обработка. Междувременно WRF и CMAQ създават файлове с гранични условия, които да се използват от по-нисшите области. Най-външните области на WRF и CMAQ вземат граничните си условия от GFS-данните и от климатичните химични профили на CMAQ.

МЕТЕОРОЛОГИЧНО МОДЕЛИРАНЕ

Моделът WRF е мезомасщабна система за числено прогнозиране на времето от най-ново поколение, предназначена да обслужва както оперативните прогнози, така и нуждите на различни атмосферни изследвания. Създаването и развитието на WRF се дължи на съвместните усилия на няколко американски институции като NCAR, NOAA, NCEP и други. WRF е напълно свиваем и нехидростатичен модел с вертикална координата хидростатичното налягане, която следва терена. Хоризонталната мрежа е C-решетката на Arakawa. Повече информация може да се намери на <http://www.wrf-model.org/index.php>. Изтеглянето се прави от http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources.htm.

В BgCWFS се използва WRF-ARW (Advanced Research WRF), версия 3.2.1. Вертикалната структура е с 27 нива. Опцията Analysis Nudging (Four-Dimensional Data Assimilation, Stauffer and Seaman, 1994) е включена само за първия изчислителен район, т.е. прогнозата на WRF насилно се приближава към метеорологичните данни от GFS.

WRF-ARW предлага множество опции за параметризация на физическите подмрежови процеси, които могат да се комбинират по всякакъв начин. Тук се използват добре изпитани схеми, а именно:

| Физични процеси | Параметризационни схеми |
|--------------------------|---|
| Microphysics | WSM6 scheme (Hong and Lim, 2006) |
| Cumulus Parameterization | Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004) |
| Planetary Boundary Layer | YSU scheme (Hong et al., 2006) |
| Longwave Radiation | RRTM scheme (Mlawer et al., 1997) |
| Shortwave Radiation | Dudhia scheme (Dudhia, 1989) |
| Land Surface Model | NOAH LSM scheme (Chen and Dudhia, 2001) |

Свързването на метеорологичния модел (WRF) с химическия транспортен модел (CMAQ) не е тривиален въпрос. Тъй като почти всички метеорологични модели не са създадени за целите на моделиране на качеството на въздуха, е необходима обработка на резултатите от WRF, т.е. използване на интерфейсни програми. Такъв елемент в системата Models-3 е MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor). MCIP третира въпроси, свързани с преобразуване на формата на данните, диагностични оценки на параметри, които не са осигурени от WRF (като скорости на сухо отлагане за различни видове замърсители и land-use), извличане на данни за различни райони и реконструкция на метеорологични данни за различни мрежови и слоеви структури. Що се отнася до WRF-ARW и CMAQ, и двете използват C-схемата на Arakawa и конформни картографски проекции, така че не е необходима специална хоризонтална интерполация. Но MCIP задължително модифицира вертикалната структура на метеорологичните данни чрез интерполация между WRF-слоевите и сигма-нивата на CMAQ. В това приложение нивата на CMAQ са 14:

$$\sigma = 1,0, 0,993, 0,99, 0,98, 0,965, 0,945, 0,91, 0,86, 0,8, 0,74, 0,65, 0,55, 0,4, 0,2, 0,0.$$

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕМИСИИТЕ

СМАQ изисква като вход емисии в специфичен формат, отразяващ еволюцията във времето на всички замърсители, отчетени от използвания химичен механизъм (СВ-IV в този случай). Инвентаризациите на емисиите се използват като данни за антропогенните емисии. Инвентаризациите се правят ежегодно за големи територии; много замърсители се оценяват като групи (например ЛОС и PM_{2.5}). Подготовката на емисионен вход към модела на пренос на химическите замърсители изисква съответна обработка. Такъв компонент за обработка на емисиите в системата EPA Models-3 е SMOKE, но той само частично е използван тук, защото има доста силна връзка със спецификата на източниците на емисии в САЩ, доста различна от тази в Европа. В BgCWFS SMOKE се използва само за изчисляване на виогенните емисии (BgS) и за обединяване на AS-, LPS- и BgS-файлове във единен входен емисионен файл за СМАQ. Емисиите от площните антропогенни източници и емисиите от големи точкови източници се изготвят от създадените от нас интерфейсни програми AEmis и PEmis.

Входните данни за AEmis и PEmis са съответните мрежовите стойности на AS- и LPS-инвентаризациите. За момента инвентаризацията на TNO за 2005 г. (Denier van der Gon et al., 2010) се използва за двата старши района (Европа и Балкани). За българските области се използва националната инвентаризация за 2010 г., предоставена от българската Изпълнителна агенция по околна среда (ИАОС). TNO изготви няколко комплекта инвентаризации за различни години. Антропогенните източници в този списък са разпределени в 10 категории, наречени SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution), класифицирайки ги според процесите, водещи до изпускане на вредни вещества в атмосферата (EMEP/CORINAIR, 2002).

Инвентаризацията на TNO има разделителна способност от 0,125°x0,0625° (около 7x8 km). Разпространява се като текстов файл (.csv), разделен със запетая или точка и запетая. Всеки ред от файла съдържа данни за един източник, а именно координатите на центъра на кутийка от мрежата за AS или координатите на LPS, страната, годината, вида на източника (A/P), SNAP и годишните емисии на 8 замърсителя. SNAP 7 (пътен транспорт) е представен като 5 под-категории. Замърсителите са: метан (CH₄), въглероден оксид (CO), азотни оксиди (NO_x), серни оксиди (SO_x), неметанови летливи органични съединения (NMVOC), амоняк (NH₃), прахови частици с d<10µm (PM₁₀).) и прахови частици с d<2,5 µm (PM_{2.5}). ИАОС предоставя същите замърсители, но количествата са за цялата страна за конкретна година.

Както вече беше посочено, данните от инвентаризацията не могат да се използват директно като входни данни за емисиите в СТМ. Три операции трябва да бъдат приложени към тези данни, предварително: *гридиране*, *разпределение във времето* (налагане на вариации във времето върху годишните стойности) и *специация* (разделяне на груповите замърсители на няколко по-прости или обобщени замърсители).

Гридирането е преизчисляване на данните за инвентаризациите към използваните мрежи (тук 5 мрежи с различна резолюция). За целта е създадена веб-базирана ГИС система. Данните за TNO се въвеждат в системата. Въвеждат се и различните потребителски мрежи на базата на стандартното описание (тип на проекцията, координати на централната точка, главен меридиан, разстояния до началото на мрежата, брой точки, резолюция). Системата преизчислява инвентарните количества за всяка клетка от съответната мрежа и типа източник. Въведени са допълнителни функционалности на системата, свързани с българската инвентаризация. Специфична характеристика на тази инвентаризация е, че

данните за SNAP 1-6 се задават като източници с определени координати. За SNAP 7-10 са налични общите количества на изпуснатите замърсители за страната. Първата функционалност е възможността на ГИС системата да агрегира източниците от SNAP 1-6 към потребителските мрежи. Данните за инвентаризациите на източниците със SNAP 7-10 се разпределят в различните мрежи, като се използват различни геометрични елементи (сурогати). Например SNAP 7 (Пътен транспорт) е дезагрегиран по HighWays (15%), RoadsClass1 (25%), RoadsClass2 (20%) и TownStreets (40%). SNAP 8 (Извънпътен транспорт) използва Летища (45%), RoadsClass2 (20%), RailRoads (25%), AgricultureAreas (10%). За SNAP 9 (Изхвърляне на отпадъци) сурогатите са Население (50%) и сметища (50%). И накрая, SNAP 10 (Селско стопанство) се разпределя според AgricultureAreas (30%) и Pastures (70%). Струва си да се спомене, че нови сурогати могат да бъдат добавени към системата и използвани при дезагрегацията. Делът на всеки сурогат също може да бъде променен.

Разпределението във времето се извършва на базата на времеви профили, предоставени от TNO (Bultjes et al., 2003), които се налагат върху годишната стойност на всяка гридирана инвентаризация. Според антропогенната дейност профилите се разделят на три групи – месечен, седмичен и почасов профил. Първите два са специфични за страната, SNAP и замърсителя; почасовите фактори се отнасят за местно време и са специфични само за SNAP. Заедно с тях, TNO предоставя вертикален профил за големи точкови източници, който е специфичен за SNAP.

Специацията се извършва чрез разделяне на комплексните замърсители на няколко по прости такива. Това разделяне се извършва на базата на т.нар. специонни профили. За VgCWFS тези профили са разработени на базата на подобни профили предложени от US EPA (<http://www.epa.gov/ttn/chief/emch/speciation/>), като се използва експертен подход. Американските профили са специфични за всеки от десетте хиляди вида източници. Затова първо се търси съпадение между основните американски източници и тези от всеки европейски SNAP. Претеглените средни стойности на съответните профили на специация се приемат като специфични за дадения SNAP фактори на разделяне, като теглата са процентът на приноса на всеки тип източник в общите емисии за конкретен SNAP. По този начин се извличат специфични профили на VOC, PM2.5, NOx и SOx. Трябва да се отбележи, че изборът на типове американски източници и теглата на техния принос към съответните SNAP емисии са доста субективни. Необходима е много повече работа, за да се изработят специфични за всяка страна профили.

Гридираните по различните мрежи инвентаризации се въвеждат в програмите за обработка на емисии AEmis и PEmis, където се прилагат останалите две процедури. В PEmis се извършва и вертикално разпределение. И двете програми създават съответен емисионен файл. За AEmis изходът е двумерен, за PEmis – тримерен. И двата изхода са във формат Ю/API NetCDF и съдържат почасови данни за целия прогнозен период.

Биогенните емисии се изготвят от SMOKE чрез механизма BEIS-3.13 (Schwede et al., 2005) на базата на данните за LandUse в дадената мрежа. SMOKE също така обединява 3-те емисионни файла в общ емисионен вход към CMAQ – файлът съдържа почасови данни във формат NetCDF.

ОПЕРАТИВНА РАБОТА НА VgCWFS

Четиринадесет σ -нива с различна дебелина определят вертикалната структура на CMAQ. Планетарният граничен слой (PBL) е представен от най-ниските 8 от тези нива.

Изходът на CMAQ v.4.6 се състои от различни файлове, съдържащи концентрация, депозиции, видимост и други променливи. Файлът с концентрациите е NetCDF файл с 3-D почасови данни за 78 замърсители, от които: 52 газообразни, 21 аерозоли (Aitken-ови, PM1 и акумулативни, PM2.5–PM1), 5 аерозолни разпределения (3 по брой частички, 2 по площ на аерозолите).

Полета горе вдясно на Фиг. 2 маркират последващата обработка, която е доста важна за визуализиране на резултатите от BgCWFS. Първо, програмата XtrCON извлича част от замърсителите за архивиране и по-нататъшна обработка. Запазени са само повърхностните стойности на 17 замърсителя, считани за най-важни – 8 газа и 9 аерозола. Част от тези замърсители повече или по-малко се измерват и са посочени в европейското законодателство със съответните прагове. Трябва да се спомене, че сумата от всички аерозолни съединения образува PM10, които обикновено се измерват. Напоследък се увеличиха и пунктовете с измерване на PM2.5. Грубите прахови частици (CPRM = PM10-PM2.5) също се изчисляват и архивират като отделен замърсител. Всички тези данни се съхраняват в съответни ежедневни архивни файлове. Архивът на системата се попълва от 2012 г.

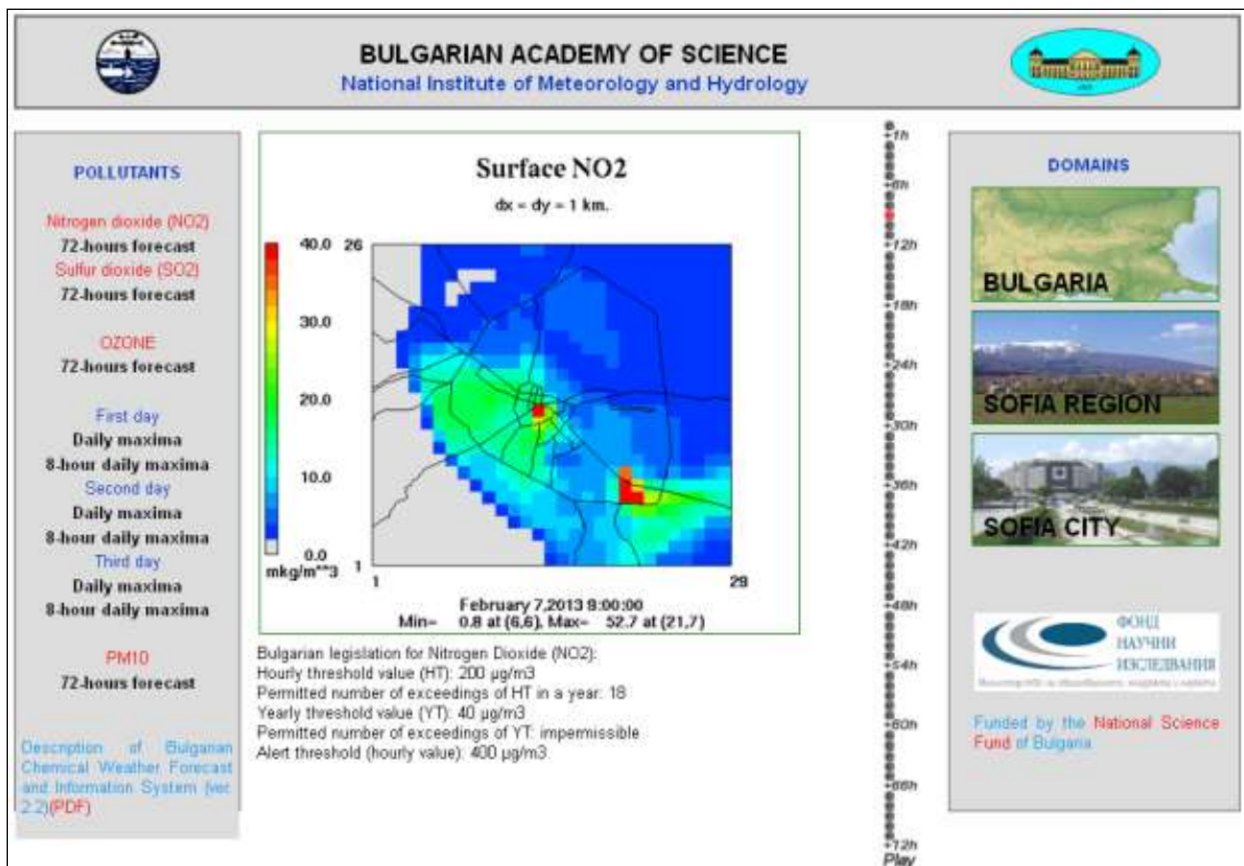
За да станат резултатите от работата на BgCWIS видими са създадени два специализирани сайта на сървъра на НИМХ (<http://www.meteo.bg/cw2.1> и <http://www.meteo.bg/cw2.2>). За момента в тях се представят 4 основни замърсители – озон, NO2, SO2 и PM10. Те се запазват с изображения, създадени с помощта на софтуерния пакет PAVE (http://www.ie.unc.edu/cempd/EDSS/pave_doc/index.shtml). PAVE поддържа свой собствен мета-език, който позволява изчертаването на графиките да става по автоматичен начин чрез запускане в действие на съответни скриптове.

На фиг.3 е показан пример за уеб сайт на BgCWFS. Конкретен замърсител се извиква чрез щракване в списъка в лявата част на страницата. Обърнете внимание, че заедно с почасовите концентрации на озон могат да се визуализират два вида дневни максимуми на озон за трите прогностични дни. В долната част на списъка със замърсители е поставен линк към pdf-файл с описание на Българската система за химична прогноза, версия 2.

Районът на прогнозата може да бъде избран, като се щракне върху една от картивките вдясно. В центъра на страницата е разположено полето с почасовата концентрация на избрания замърсител. Поставянето на курсора на мишката върху една от точките от колоната с точки от дясната страна на изображението извиква полето за съответния ден и час. Поставянето на курсора върху „Play“ предизвиква анимация на прогнозата. Под изображението с концентрации на всеки замърсител са показани съответните прагови стойности съгласно българското законодателство (хармонизирано с европейското).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Българската система за прогноза на химическото време е проектирана на базата на US EPA Models-3 System: WRF (метеорологичен пре-процесор), SMOKE (емисионен пре-процесор) и CMAQ (модел за химичен транспорт). Метеорологичният вход към системата са данните от глобалната прогноза на NCEP. На този етап като емисии се използва инвентаризацията с висока разделителна способност, изготвена от TNO, Холандия, за Европа. За България се използва българската национална инвентаризация на емисиите, предоставена от ИАОС. Системата е реализирана на 5 вложени области с нарастваща разделителна способност.



Фиг. 3. Пример за уеб-сайта на BgCWFS

В момента системата работи автоматично – запуска се веднъж на ден в 00Z. Прогнозният период е 3 дни (72 часа). Резултатите от всяко изпълнение на системата се обработват така че да се архивират най-важните замърсители. Част от тези замърсители се визуализират като последователности от карти, представящи еволюцията на качеството на въздуха над Европа и България и могат да се видят на сайтовете на системата (<http://www.meteo.bg/cw2.1> и <http://www.meteo.bg/cw2.2>).

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването е направено с финансовата подкрепа на Фонд „Научни изследвания“ (грант № Д002-161/16.12.2008 г. и ДЦВП-02/1/29.12.2009 г.). Представените резултати не биха били възможни без опита, придобит по време на участието в FP5 проект BULAIR, FP6 Network of Excellence ACCENT, FP6 Интегриран проект QUANTIFY, FP7 проекти PASODOBLE (Проект № 241557) и EGI-InSpire (Проект № 261323).

Дължим дълбока благодарност на всички организации, предоставящи безплатно данни и софтуер, използвани за създаването на тази система, а именно US EPA, US NCEP и европейски институции като EMEP, EEA, UBA и много други. Специални благодарности на Холандската организация за приложни научни изследвания (TNO) за предоставянето на европейската инвентаризация на емисиите с висока разделителна способност, времеви и вертикални профили. Без базите данни с отворен код на тези организации реализацията на тази система не би била възможна.

ЛИТЕРАТУРА

- Builtjes, P.J.H., van Loon, M., Schaap, M., Teeuwisse, S., Visschedijk, A.J.H. and Bloos, J.P. (2003) Project on the modelling and verification of ozone reduction strategies: contribution of TNO-MEP, TNO-report, MEP-R2003/166, Apeldoorn, The Netherlands.
- Byun, D. and J. Ching (1999) Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report 600/R-99/030, Washington DC.
- Byun D. and K.L. Schere (2006) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, Applied Mechanics Reviews 59: 51-77.
- CEP (2003): Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE) Modeling System, University of North Carolina, Carolina Environmental Programs - CEP, Research Triangle Park, North Carolina.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.
- Coats, C.J., Jr., and Houyoux, M.R. (1996): Fast Emissions Modeling With the Sparse Matrix Operator Kernel Emissions Modeling System, *The Emissions Inventory: Key to Planning, Permits, Compliance, and Reporting*, Air and Waste Management Association, New Orleans, September
- Dennis, R.L., Byun, D.W., Novak, J.H., Galluppi, K.J., Coats, C.J., and Vouk, M.A (1996): The Next Generation of Integrated Air Quality Modeling: EPA's Models-3, *Atmospheric Environment* 30:1925–1938.
- Denier van der Gon, H., A. Visschedijk, H. van de Brugh, R. Dröge (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., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107
- EMEP/CORINAIR (2002) Atmospheric emission inventory guidebook, third edition, European Environmental Agency (<http://reports.eea.europa.eu/EMEPCORINAIR3/en/page002.html>).
- European Parliament (2002) DIRECTIVE 2002/3/EC of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air, *Official Journal of the European Communities* (9.3.2002) L67: 14-30.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.
- Hong, S.-Y., and Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
- Houyoux, M.R., and Vukovich, J.M. (1999): Updates to the Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE) Modeling System and Integration with Models-3, *The Emission Inventory: Regional Strategies for the Future*, Raleigh, NC, Air and Waste Management Association.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16663–16682.

- Monteiro, A., Lopes, M., Miranda, A.I., Borrego, C. and Vautard, R. (2005) Air pollution forecast in Portugal: a demand from the new air quality framework directive, *Internat. J. Environment and Pollution* 25: 4–15.
- Poupkou, A., I. Kioutsioukis, I. Lisaridis, K. Markakis, T. Giannaros, E. Katragkou, D. Melas, C. Zerefos and L. Viras (2008a) Evaluation in the Greater Athens Area of an air quality forecast system, *Proc. of the IX EMTE National-International Conference of Meteorology-Climatology and Atmospheric Physics*, 28-31 May 2008, Thessaloniki, Greece, 759-766.
- Poupkou, A., I. Kioutsioukis, I. Lisaridis, K. Markakis, D. Melas, C. Zerefos and Giannaros, T. (2008b): Air quality forecasting for Europe, the Balkans and Athens, 3rd Environmental conference of Macedonia, 14-17 March 2008, Thessaloniki, Greece.
- San Jose, R., J. Perez and R. Gonzalez (2006) Air Quality Real-Time Operational Forecasting System for Europe: an application of MM5-CMAQ-EMIMO modeling system, in Brebia, C. (Ed.), “Air Pollution XIV”, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 75-83.
- 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.
- Skamarock et al., 2007, “A description of the Advanced Research WRF Version 2”, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf
- Sofiev, M., P. Siljamo, I. Valkama, M. Ikonen, J. Kukkonen (2006) A dispersion modeling system SILAM and its evaluation against ETEX data, *Atmospheric Environment* 40: 674–685.
- Stauffer, D.R. and N.L. Seaman (1990) Use of four-dimensional data assimilation in a limited area mesoscale model. Part I: experiments with synoptic data. *Monthly Weather Review* 118: 1250-1277.
- Syrakov D., K. Ganev, M. Prodanova, K. Slavov, I. Etropolska, N. Miloshev, and G. Jordanov, (2009) Background pollution forecast over Bulgaria, *Journal of International Scientific Publications ECOLOGY & SAFETY*, Volume 3, Part 1 (<http://www.science-journals.eu>), ISSN: 1313-2563, 32-41.
- Syrakov D, I. Etropolska, M. Prodanova, K. Ganev, N. Miloshev, K. Slavov (2012) Operational Pollution Forecast for the Region of Bulgaria, *AIP Conf. Proc.* 1487, 88 (2012); doi: 10.1063/1.4758945.