



Impact of radar radial velocity data assimilation using a WRF 3D-VAR system for a case with snowfall for Sofia region

Evgeni Vladimirov^{*},¹, Reneta Dimitrova², Ilian Gospodinov¹

¹ National Institute of Meteorology and Hydrology,
66 Tsarigradsko shose Blvd, 1784 Sofia, Bulgaria

² Sofia University, Faculty of Physics, Department of Meteorology and Geophysics,
5 James Bourchier Blvd, 1164 Sofia, Bulgaria

Abstract: Radial velocity retrieved from a Doppler weather radar (DWR) is a source of information assimilated in numerical weather modelling in limited-area models, e.g. Weather Research and Forecast (WRF) model. Understanding the impact of assimilation could be beneficial for accurate forecasting of weather events such as heavy rain, snowfall, damaging winds. This task is especially difficult for such events in complex terrain. Sofia region is located in the western part of Bulgaria, on a high valley surrounded by mountains. In the current study, radial velocity data from a DWR near Vakarel is processed and forwarded to the WRFDA module for 3D-Var data assimilation. The numerical experiment is conducted using a cold start scheme where the radial velocity data is assimilated only in the initial conditions. A case with snowfall on 25 February 2018 is studied. The differences in temperatures at 2 meters and the snow accumulation for 12 hours are examined. The difference in the fields of temperatures at 2 meters show a significant change in the first 4-6 hours, which diminishes after this period. The differences in the snow accumulation are most significant over the city part of the Sofia region, while patterns related to the topography are not seen.

Keywords: WRFDA, 3D-Var, radial velocity, data assimilation, snowfall

* evgeni.vladimirov@meteo.bg

Влияние на асимилацията на радарни данни при числено моделиране с модела WRF в случай със снеговалеж за района на град София

Евгени Владимиров ^{*},¹, Ренета Димитрова ², Илиан Господинов ¹

¹ *Национален институт по метеорология и хидрология, бул. " Цариградско шосе " №66, 1784 София*

² *Софийски университет "Св. Климент Охридски", Катедра "Метеорология и геофизика", бул. „Джеймс Баучер“ №5, 1164 София*

Резюме: Радиалната скорост получена от доплеров метеорологичен радар (ДМР) е източник на информация, асимилирана при числено моделиране на времето в мезомашабни метеорологични модели, като Weather Research and Forecasting (WRF). Изследването на въздействието на асимилацията може да бъде от полза за по-точно прогнозиране на метеорологични явления като силен дъжд, снеговалеж, силни ветрове. Тази задача е особено трудна за подобни явления, случващи се над сложен терен. Районът на София е разположен в западната част на България, във висока долина, заобиколена от планини. В настоящото изследване данните за радиалната скорост от ДМР близо до Вакарел са обработени и усвоени в модула на WRF – WRFDA за асимилация на 3D-Var данни. Численият експеримент бе проведен по схемата „студен старт“, при която данните за радиалната скорост се усвояват само в началния момент на прогнозата. Избран бе случай със снеговалеж на 25 февруари 2018 г. Изследвани са разликите в температурите на 2 метра и количеството натрупан сняг за 12 часа. Разликата в температурните полета на 2 метра показва значителна промяна през първите между 4 до 6 часа, която намалява след този период. Разликите в количеството натрупан сняг са най-значителни в град София, докато закономерности в натрупването на сняг свързани с релефа не се наблюдават.

Ключови думи: WRFDA, 3D-Var, радиална скорост, асимилация на данни, снеговалеж

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Мотивация за настоящата работа е да се изследва влиянието на асимилацията на данни за радиалната скорост от доплеров метеорологичен радар (ДМР), разположен край с. Вакарел, Софийска област, в числени експерименти с числения модел WRF (Skamarok, 2008). Изследваният район е Софийското поле, като избрания случай е от 25 февруари 2018 г. В рамките на деня, по информация от „Месечен хидрометеорологичен бюлетин“ на НИМХ за месец февруари 2018 г. се наблюдава слаб снеговалеж без значимо натрупване на сняг върху земната повърхност, който поставя началото на обстановка с обилен снеговалеж през следващите дни. От оперативна гледна точка, началният момент на процеса на снеговалежа представлява интерес, породен от необходимостта за издаване на съответните метеорологични предупреждения. В допълнение, разлики в полето

на сумарното количество снеговалеж при стартиране на числена прогноза без и с асимилация на данни биха били полезни в оперативната работа с повишаване на вниманието на синоптика върху тези зони за възможни несъответствия между числената прогноза и актуалното протичане на явлението. Използваният метод за асимилация, избран за настоящото изследване, е вариационен – 3D-Var. Методът е вграден в асимилационния модул на модела – WRFDA (Barker, 2018). За да се използват данните за радиалната скорост от ДМР, е нужно да се подготвят данните в подходящ формат. От оперативна гледна точка, полето на температурата на 2 метра е важен метеорологичен елемент, който е ориентир за вероятността за задържане на снежна покривка. От друга страна, прецизирането на количеството снеговалеж ще повлияе на степента на издаденото предупреждение – прогноза за по-голямо количество натрупан сняг, би наложила издаването на по-висока степен на предупреждение от дежурния метеоролог. От технологична гледна точка, метеорологичните модели за оперативна прогноза изискват висока изчислителна производителност, а в добавка, ако се използва и оперативна асимилация на данни – още по-голям изчислителен ресурс. Затова 3D-Var асимилационният метод е предпочитан в голяма част от съвременните прогностични центрове за асимилация на данни в оперативните метеорологични модели.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

В настоящата работа е извършена предварителна подготовка на данните за провеждане на числения експеримент, която включва: инсталация на работен мезометеорологичен модел WRF v 3.9.1 и на модула WRFDA 4.2, който усвоява информация от файлове в предварително зададен формат (обикновено текстов или BUFR файлов формат).

В допълнение е разработен софтуер, който усвоява и обработва суровия формат на файловете, в които се записва информацията от ДМР Вакарел. Разработеният софтуер прочита данните от обемните файлове и подготвя текстови файлове, които включват в себе си информация за радиалната скорост, извлечена при процеса на сканиране. Получените данни са годни за асимилация в асимилационния модул WRFDA. Впоследствие се стартират два експеримента – един контролен числен експеримент, в който началните и граничните условия са стандартни, и втори с асимилация на получените данни за радиалните скорости от ДМР.

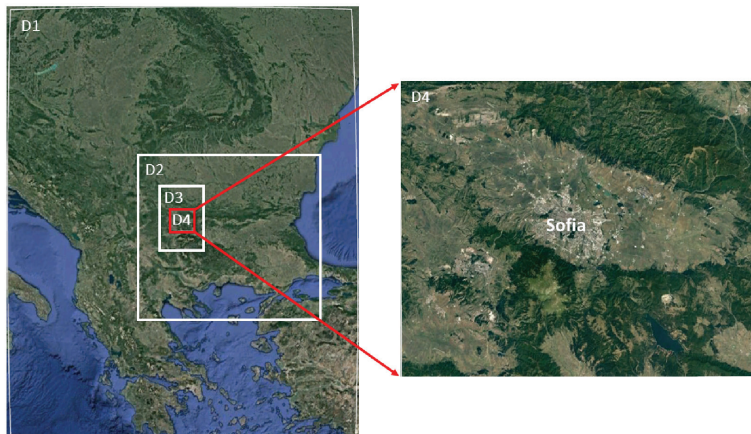


Fig. 1. Domains used in the numerical experiments are shown. D1 – Balkan peninsula, D2 – Bulgaria, D3 and D4 include Sofia region

Фиг. 1. Областите, използвани за числените експерименти са: D1 – Балкански полуостров, D2 – България, D3 и D4 включват Софийско поле.

2.1. Инсталация на атмосферния нехидростатичен числен модел WRF и настройки за експеримента за района на Софийско поле

За да се проведат настоящите числени експерименти, беше инсталиран модела WRF, версия 3.9.1. Последвалите изчисления се проведоха с висока резолюция, както в хоризонтално направление (500 m стъпка), така и по вертикалата с голям брой нива (50, неравномерно разположени в планетарния граничен слой (ПГС)). Освен високата резолюция, детайлно бяха представени топографията и подложната повърхност за района на Софийското поле. Две бази данни бяха използвани в модела WRF – топографията е с резолюция 1-arcsec (SRTM, NASA; <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>), а за по-точно представяне на подложната повърхност - CORINE 2012 с 3-arcsec резолюция (CLC2012, EEA; <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-landcover/clc-2012>). Подробности за направените модификации са представени във Vladimirov et al. (2018). Областите, които са използвани в симулациите са показани на фигура 1.

Четирите вложени области са базирани на Ламбертова проекция (фигура 1), които покриват Балкански полуостров (Област 1, D1), България (Област 2, D2), западната част на България (Област 3, D3) и Софийско поле (Област 4, D4). Използван е коефициент на телескопизация 1:4. Най-външната D1 е съставена от 36 на 44 клетки с резолюция 32 km; D2 е съставена от 73 на 65 клетки с резолюция 8 km; D4 е 69 на 97 клетки с резолюция 2 km; най-вътрешната област D4 е съставена от 157 на 129 клетки с резолюция 500 m. Началните и гранични условия за експеримента са от 06 до 18 UTC през 3 часа, за общо 12 часова прогноза от

модела NCEP GFS, стартиран с начални условия от 25 февруари 2018г., 06 UTC (за област D1) и са от база данни 0.25 degree NCEP GFS Global Forecast Grids Historical Archive с времева резолюция 6 часа. WRF пакета с физически параметризации включва: Lin et al. Микрофизична схема (Lin et al., 1983), Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) параметризация на дълговълновата радиация (Mlawer et al., 1997), Dudhia параметризация на късовълновата радиация (Dudhia, 1997), Noah модел за процесите в подложната повърхност (Niu et al., 2011). Опростена Arakawa - Schubert параметризация на конвективните процеси (Arakawa and Schubert, 1974) е използвана само за D1 и D2. За домейните с висока пространствена резолюция D3 и D4, конвективните процеси се изчисляват явно с помощта на микрофизичната схема на Yonsei University - YSU (Hong et al., 2006), която е избрана на базата на предходни изследвания (Egova et al., 2017; Vladimirov et al., 2018).

В обобщение, контролното пускане на модела, без асимилирани данни, се стартира в 06 UTC на 25 февруари 2018 г. за следващите 12 часа – до 18 UTC на същия ден. Изходът от модела се записва на всеки час, за да могат да се направят почасови сравнения на основни метеорологични полета (разлики на полетата на температурата на 2 m и разлика в акумулираното количество валеж) с получения изход от модела след като са асимилирани данни за радиалната скорост.

2.2. Инсталация на модул WRFDA към WRF, за асимилация на радиалните скорости от ДМР

В процеса на асимилиране на данни за изготвяне на числена прогноза на времето се използват различни методики, като някои основни от тях са: 3D-Var, 4D-Var, Ensemble DA, Hybrid 3D-Var/Ensemble. Към метеорологичния модел WRF е разработена система за асимилация на данни – WRFDA, която поддържа тези методи. Целта на настоящето изследване е да се симулира асимилационната част от една своеобразна оперативна среда, в която се стартират числени модели за прогноза на времето. Необходимо е методите за асимилация на данни, нужни за подобряване на резултатите от прогнозата, да не изискват значителен компютърен ресурс. На фигура 2 е представено графично сравнение на два от най-често използваните метода – 3D-Var и 4D-Var. Вижда се как при използването на първия метод (3D-Var), само в определени моменти се асимилира стойност на даден метеорологичен елемент, като влиянието е ограничено само до този момент. Например, ако се инициализира модела в 12:00 UTC, по 3D-Var метода се асимилират данни в прозорец от 11:30 UTC до 12:30 UTC, като се прави следното приближение – данните, измерени в едночасовия интервал се приемат за направени в 12:00 UTC. При метода 3D-Var се асимилират данни само в началния момент, докато 4D-Var представлява асимилация на постъпващи данни в целия времеви интервал. За целта се използват опростени метеорологични модели, с помощта на които се минимизират отклоненията на прогнозните стойности. За количествена мярка на отклонението от реалната атмосфера се използва т. нар. „кост“ функция,

която при минимални стойности, дава информация за количествените стойности на моделните параметри, при които прогнозата е най-близко до реалното състояние на атмосферата.

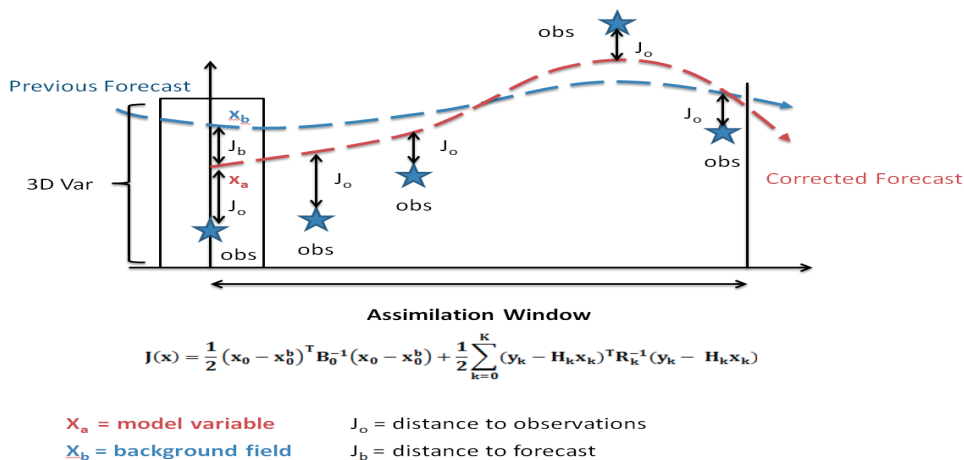


Fig. 2. Schematic representation of the two most used methods for data assimilation – 3D-Var and 4D-Var.

Фиг. 2. Схематично представяне на двата най-използвани метода за асимилация на данни – 3D-Var и 4D-Var.

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x^b)^T B^{-1} (x - x^b) + \frac{1}{2} (H[x] - y^0)^T R^{-1} (H[x] - y^0) \quad (1)$$

Нагледно на фигура 2 с “obs” са отбелязани моментите, в които се измерва стойност от наблюдение. J_o е отклонението на измерената стойност от прогнозираната, а J_b е отклонението на стойността на коригираната от асимилацията на данни стойност от предходно прогнозираната. 4D-Var, Ensemble DA, Hybrid 3D-Var/Ensemble методите изискват значителен компютърен ресурс, сравнено с 3D-Var и като следствие от това за числените експерименти беше избран именно 3D-Var метода.

За провеждане на изследването е избран вариационен метод, като за стойности на грешките на началното поле на моделните параметри (B , от формулата за изчисление на $J(x)$ в уравнение (1)) се използват стандартните таблици за стойностите от ковариационните матрици, предоставени с инсталацията на модула WRFDA. Периодът на асимилация на стойностите на радиалната скорост е ± 10 min около инициализацията на метеорологичния модел – 05:50 UTC до 06:10 UTC. По този начин се гарантира включването в асимилацията на всички наблюдения направени в този интервал. За избрания случай данните са от 06:04 UTC, с което се гарантира че с така избрания асимилационен прозорец (от фигура 2) те ще бъдат прочетени от асимилационния модул.

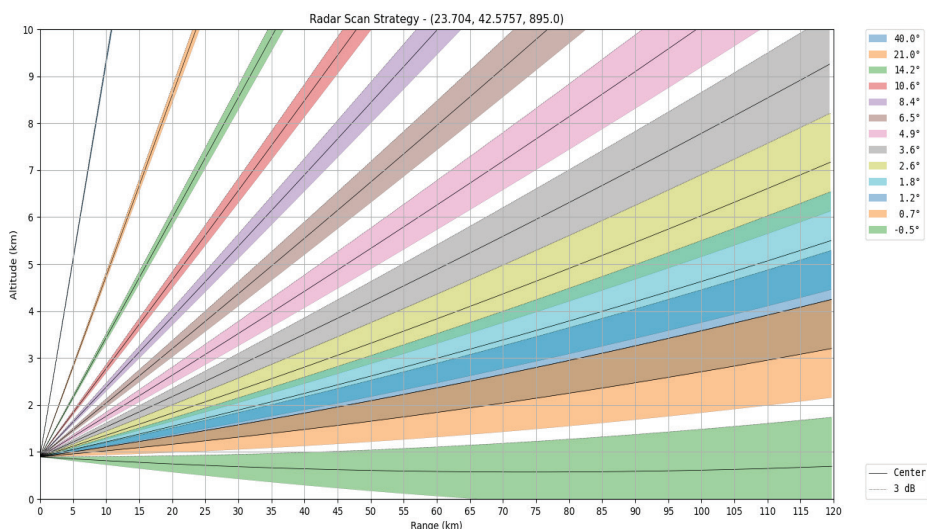


Fig. 3. The radar elevations of the azimuthal scans around the point of the DWR.
Фиг. 3. Нива на сканиране по азимут около радара.

2.3. Подготовка на суровите данни от ДМР, разположен край с. Вакарел, Софийска област

Радарът, разположен край с. Вакарел, се експлоатира от Държавно предприятие „Ръководство на въздушното движение“ (ДП РВД) и е един от двата от мрежата на предприятието (вторият е разположен край местност Аксаковска панорама, Варненска област). Служи за подпомагане на метеорологичните краткосрочни и свръхкраткосрочни прогнози за нуждите на предприятието в осигуряване на безопасността на провежданите полети на територията на Западна България. Радарът е разположен на надморска височина 895 m, с приблизителни координати 23,70 географска дължина и 42,57 географска ширина. Дължината на вълната на електромагнитния импулс, с които се правят измерванията е 5,3 cm, с което дадения радар се определя като радар от класа „С band“. Този тип радари са най-подходящи за краткосрочни прогнози. На фигура 3 е представена стратегията, която е избрана за провеждане на обемно сканиране на физическото пространство около радара, с което се получава информация за хидрометеорите в атмосферата около радара. Радарът може да получи информация от обратното разсейване на облъчените обекти до радиус от 250 km от точката на измерването. На фигура 3 разстоянието, до което достига лъча, е ограничено до 120 km, а данните, които са асимилирани са ограничени до 50 km радиус около радара и до 6 km височина.

Използваните данни са получени в суров формат, който е изработен от производителя на радара – Gematronik. Това е хибриден формат с елементи на XML файл и бинарна част. Поради тази специфика, стандартните четци на XML файлове не се справят с разчитането на суровите файлове. За да се усвоят данните, беше използвана `wrdarlib` библиотека с отворен код, написана в средата Python 3x, в която е интегрирана функционалност за четене на суровите файлове. За конкретното изследване данните са извлечени от суровия файл на едно обемно сканиране (със стратегия на радарното сканиране показана на фигура 3) от 06:04 UTC на 25 февруари 2018 г.

Обработката на данните се състои от следните стъпки: Стойностите, отговарящи на липсващи данни се филтрират. Провежда се „изтъняване на данните“ (в случая данните се вземат от всеки четен ъгъл и от всеки 5-ти импулс от лъча), с което да се гарантира минимизиране на корелацията на грешките между наблюденията.

След като се направят всички процедури по изчистване на данните, те се подреждат, така че всички сканирания от радара да започват от 0 градуса азимут – Север. Това спомага при следващата процедура по геореферирание на данните от радара.

Всички точки, в които са регистрирани измервания от ДМР „Вакарел“, се привеждат в географски координати, т.е. осъществява се трансформация на координатната система от полярни координати в географска дължина и ширина.

Последният етап от подготовката на радарните данни се състои във форматиране на изходния текстови файл. Нужно е да се запишат с точно определена структура (последователност на данните и брой символи определени за конкретно измерване), с което получения текстови файл позволява да бъде прочетен от асимилационния модул WRFDA.

3. СИНОПТИЧНА СИТУАЦИЯ ЗА ЧИСЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ

На 25 февруари 2018 г. в 12 UTC България е под влияние на приземен баричен гребен (фигура 4, ляво), развил се между два добре изразени циклонални центъра - един над Централното Средиземноморие (Южна Италия) и втори, вече преминал през страната - разположен над Турция. В тила на преминалия циклон и свързаният с него студен атмосферен фронт, се пренася студен въздух, регистрирани са слаби, главно в Източна България, поради близостта до циклоналния център, до умерени снеговалежи. Западна България попада под влияние на приближаващия от запад топъл фронт, част от фронталната система над Балканите и свързан с разположеният над Южна Италия циклонален център. Очаква се обстановка с обилен снеговалеж.

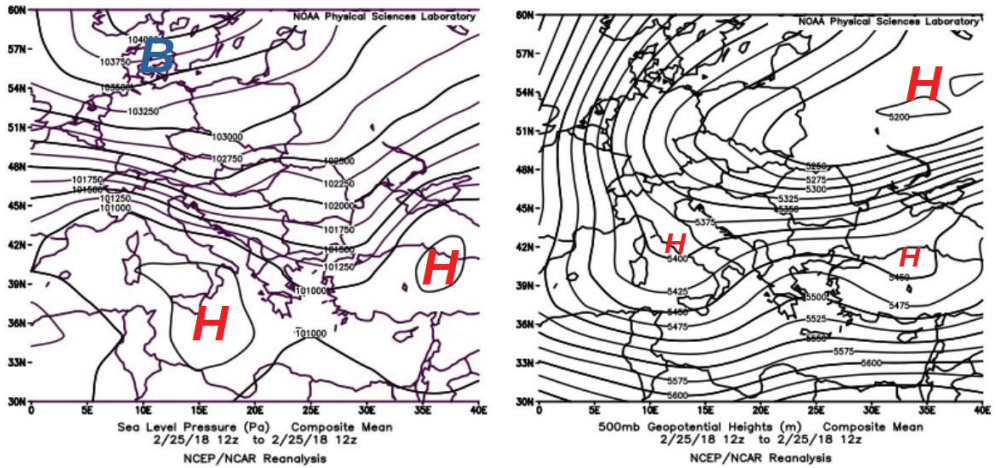


Fig. 4. Sea level pressure (Pa) (left) and height of 500 hPa (m) (right) at 12 UTC on 25 February 2018. (Source: <http://psl.noaa.gov/>)

Фиг. 4. Приведено към морско ниво атмосферно налягане (Pa) (ляво) и височина на изобарна повърхност 500 hPa (m) (дясно) в 12 UTC на 25 февруари 2018 г. (Източник: <http://psl.noaa.gov/>)

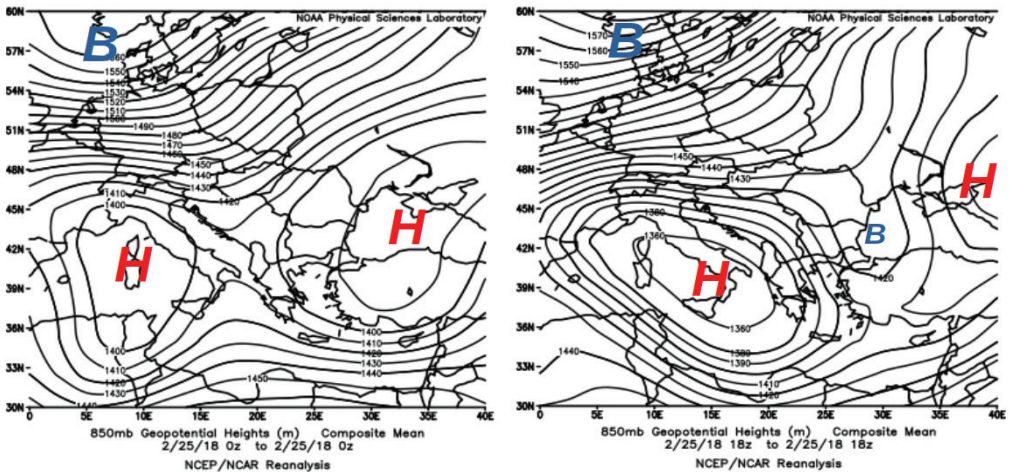


Fig. 5. 850 hPa isobar height (m) from 25 February 2018 at 00 UTC (left) and 18 UTC (right). (Source: <http://psl.noaa.gov/>)

Фиг. 5. Височина на изобарна повърхост на 850 hPa (m) на 25 февруари 2018 г. 00 UTC (ляво) и 18 UTC (дясно). (Източник: <http://psl.noaa.gov/>)

На 25 февруари 2018 г. от 00 UTC до 18 UTC в полето на геопотенциала на изобарна повърхнина 850 hPa (фигура 5) се наблюдава усилване на градиента над

България в челото на приближаващия от запад средиземноморски циклон. С южен пренос над страната се пренасят по-влажни въздушни маси от Средиземноморието, което повишава вероятността за обилен снеговалеж. Последващият анализ показва липса на значителни количества валеж и съответно липса на значителна снежна покривка по процеса.

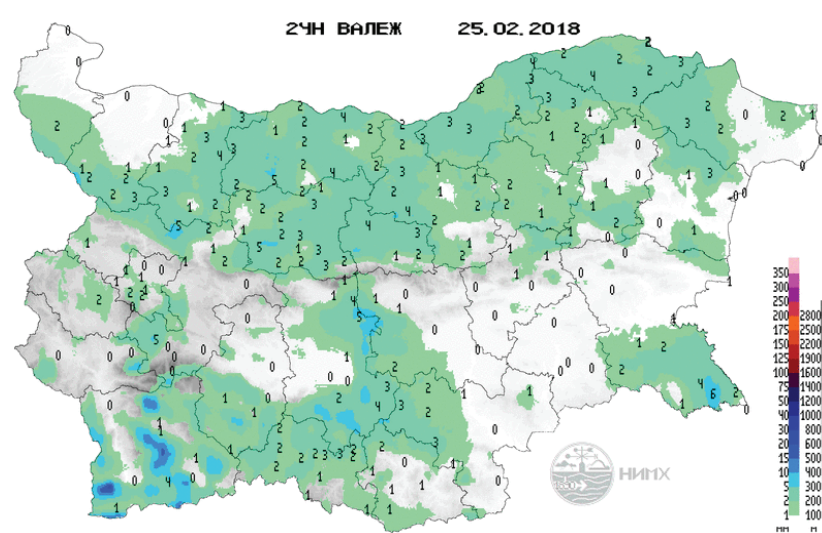


Fig. 6. Accumulated precipitation from 07:30 UTC on 24 February to 07:30 UTC on 25 February 2018. Left scale – precipitation (mm); right black and white scale – height (m) for places without precipitation („Archive operational materials NIMH“)

Фиг. 6. Сумарен валеж от 07:30 ч. на 24 февруари до 07:30 ч. на 25 февруари 2018 г. Лява цветна скала – количество валеж (mm) ; дясна черно-бяла скала – надморска височина (m) за местата без валеж („Архив на оперативни материали на НИМХ“)

На фигура 6 и фигура 7 се вижда разпределението на сумарното количество валеж и дебелината на снежната покривка в страната. Валежите в Софийска област са предимно по планините и в югозападната част на град София. Стойностите са между 1 и 3 см.

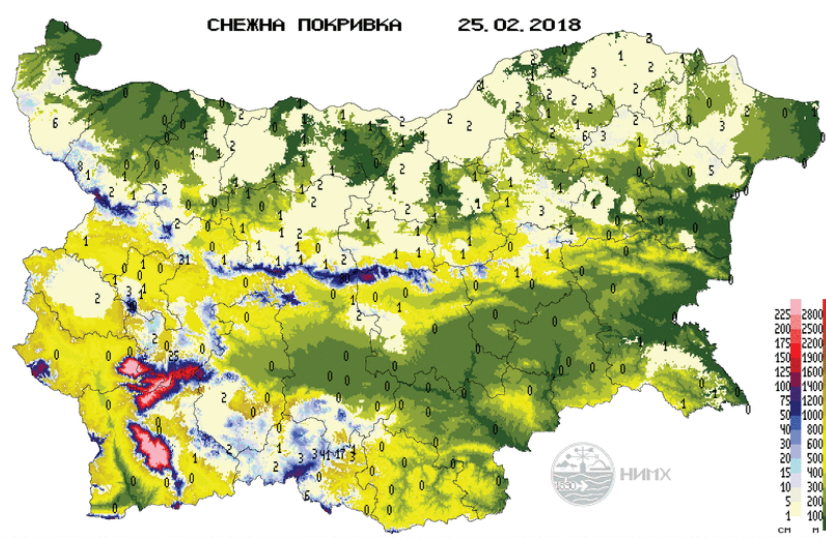


Fig. 7. Actual analysis of the snow cover till 07:30 UTC 25 February 2018. Left color scale – snow cover (cm); right color scale – height (m) for places without snow. „Archive operational materials NIMH“

Фиг. 7. Актуален анализ на снежната покривка към 07:30 ч. на 25 февруари 2018 г. Лява цветна скала – дебелина на снежната покривка (cm); дясна цветна скала – надморска височина (m) за местата без сняг. „Архив на оперативни материали на НИМХ“

4. ЧИСЛЕНИ СИМУЛАЦИИ С ДАННИ ЗА РАДИАЛНАТА СКОРОСТ ОТ ДМР

Проведени са два числени експеримента без и с асимилация, като са показани разликите в полетата на два основни метеорологични елемента – температура на 2 m и дебелина на снежната покривка.

Полето на снежната покривка е избрано, защото е важен фактор при взимане на решения за обработване на пътищата на транспортната система. В хода на експеримента с наличните радарни данни не се отчете рязко повишаване на снежната покривка и при двата експеримента, което означава че не се наблюдава интензивен снеговалеж в изследвания период. Затова беше взето решение да се изследват разликите в полето на температурата на 2 m и на сумарната снежна покривка при двата експеримента.

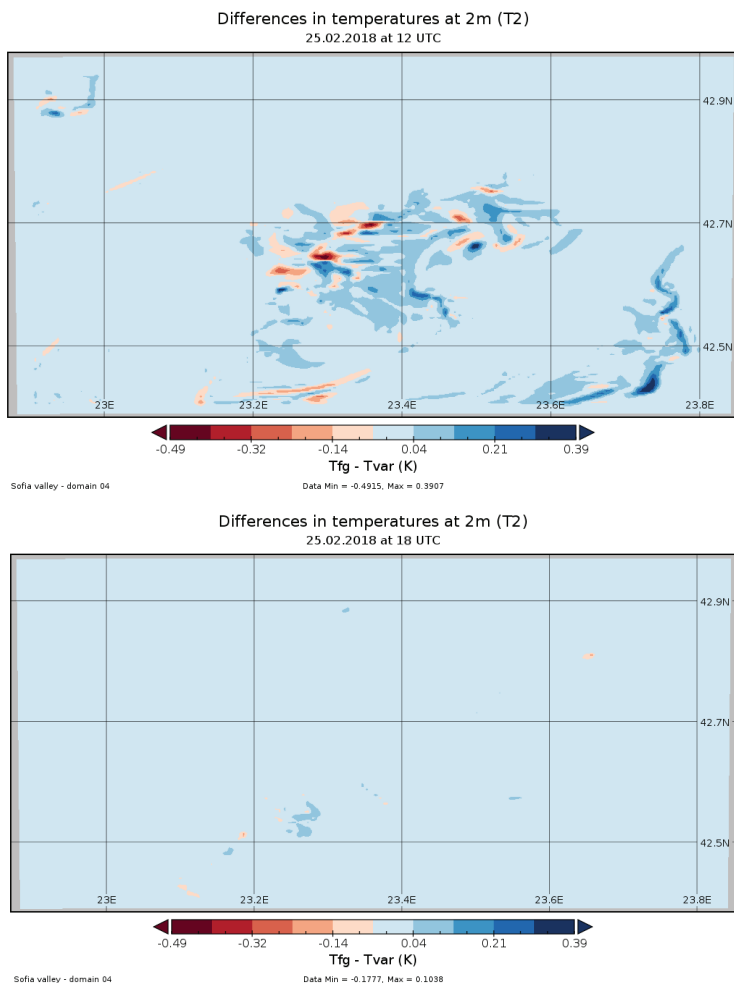


Fig. 8. Differences in fields of 2 m temperature between 12 UTC and 18 UTC forecasts from the two runs – without and with data assimilation

Фиг. 8. Разлики между полетата на температурата на два метра над земята между прогнозата за 12 UTC и 18 UTC, при симулации без и с асимилация на радиална скорост

Важно уточнение за експеримента с асимилация на радиална скорост е, че в началните условия се променя полето на вятъра. При получаване на информация за полето на вятъра от ДМР, след техническата обработка на данните, то може да се дискретизира по подобие на аерологичен сондаж в много точки около ДМР, но с няколко изключения: измерва се само посоката и скоростта на вятъра, и всички измервания във височина остават над първоначално избраната точка на сондаж. Така с помощта на асимилационния модул се асимилират своеобразни аерологични сондажи, измерващи само характеристиките на вятъра и промените,

които се следват от процедурата, се наблюдават като промени в началните условия единствено в полето на вятъра.

С течение на времето в числения експеримент е направено сравнение на температурата на 2 m след 6 часа в 12 UTC и след 12 часа – в 18 UTC на 25 февруари 2018 г. На фигура 8 са представени разликите за двата периода. Вижда се, че разликата в 12 UTC е в рамките на $0,8^{\circ}\text{C}$, докато в 18 UTC разликата е в рамките на $0,5^{\circ}\text{C}$. Оценявайки намаляващата разлика може да се съди за влиянието на асимилацията върху резултата от моделирането с течение на времето. В конкретния случай най-съществена разлика в полето на температурата на 2 m се наблюдава между 4-тия и 6-тия час, като след това тя постепенно намалява.

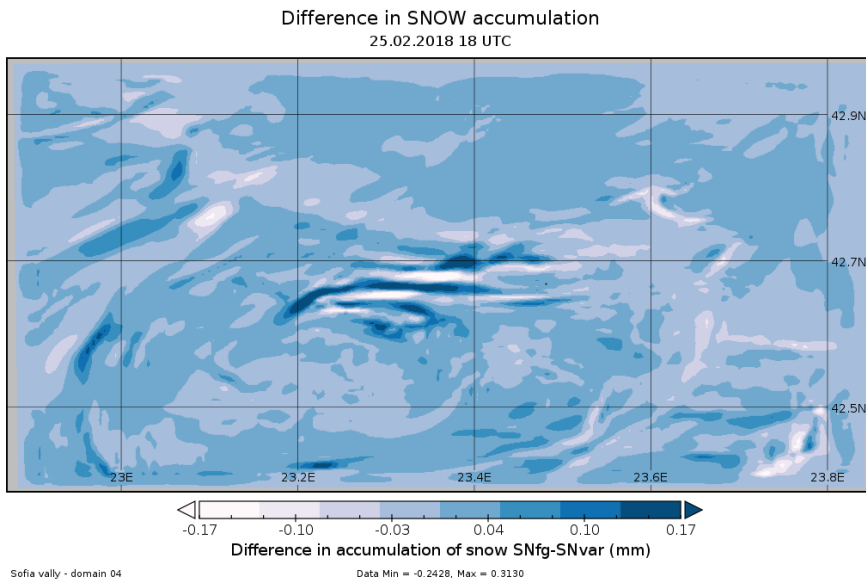


Fig. 9. Field of difference between accumulated snow fall for 12 hours from the run without and with radar data assimilation

Фиг. 9. Разлика на полето на сумарния валеж от сняг, акумулиран почасово за 12 часа между поле получено от прогноза без и поле с асимилирани радарни данни

От друга страна, на фигура 9 са представени разликите в полетата на акумулираното количество валеж от сняг за района на Софийско поле само за 18 UTC. В този случай разликите с нарастване на времето се сумират и колкото по-късен е етапа от прогнозата, толкова по-значителна е разликата в полетата на изхода от модела без и с асимилация на радиална скорост от ДМР. Затова е показана графика само на крайния период, в който разликите достигат до $0,55\text{ mm}$. Несъществената стойност на разликата се дължи на липсата на обилен снеговалеж през този период. Въпреки това, отново най-бързо нараства разликата между двете полета в началото на прогностичния период – между 3 и 6 часа от началото

на прогнозата. В този случай отново не се наблюдава специфично пространствено разпределение на разликите.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е показана асимилация на радарни данни от ДМР, разположен край с. Вакарел, в частност на информацията за радиалната скорост, получена от радара в числен модел за прогноза на времето, извършена за първи път в България. Суровият формат на данните, изходящ от софтуера на фирмата производител на радара Gematronik, беше усвоен и подготвен в подходящ вид за подаване към асимилационния модул на модела WRF – WRFDA. Технологичната верига на подготовка на данните за асимилация беше изпробвана за случай със слаб снеговалеж. Извършената работа може да послужи за основа при въвеждането на технологичната верига в оперативно стартиране на модел за числена прогноза, с оперативно усвояване на данни за радиалната скорост от ДМР. За изследвания случай със слаб снеговалеж от 25 февруари 2018 г., могат да се направят два основни извода:

- влиянието от асимилация на радиалната скорост върху полето на температурата на 2 m е най-съществено в първите 4-6 часа от началото на числената симулация. След този период, разликите между двата експеримента с и без асимилация намаляват;
- Второ: разликите в полето с акумулирания снеговалеж показват най-големи разлики над района на град София. Разликите за Област 4 достигат до 0,55 mm. Не се наблюдават специфични разлики с оглед на сложния релеф около града.

С настоящата работа се поставя началото на изграждане на една функционална система за оперативна асимилация на данни, с използване на модела WRF и неговата асимилационна система WRFDA.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статията е реализирана с помощта на Национална програма на Министерството на образованието и науката „Млади учени и постдокторанти“ 2021 г. – модул „Млади учени“.

ЛИТЕРАТУРА

- Arakawa, A., and Schubert, W. H. (1974) Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I, *J. Atmos. Sci.*, 31, 674701.
- Arnold, D., I. Schicker, and Seibert, P. (2010) High-Resolution Atmospheric Modelling in Complex Terrain for Future Climate Simulations (HiRmod). VSC Report 2010.

- Barker, D., Huang, X., Liu, Z., Auligné, T., Zhang, X., Rugg, S., Ajjaji, R., Bourgeois, A., Bray, J., Chen, Y., Demirtas, M., Guo, Y., Henderson, T., Huang, W., Lin, H., Michalakes, J., Rizvi, S., & Zhang, X. (2012) The Weather Research and Forecasting Model's Community Variational/Ensemble Data Assimilation System: WRFDA, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (6), 831-843. Retrieved Oct 4, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/93/6/bams-d-11-00167.1.xml>
- Dudhia, J., (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46:30773107.
- Egova E., Dimitrova R., Danchevski V. (2017) Numerical study of meso-scale circulation specifics in the Sofia region under different large-scale conditions. *Bul. J. Meteo & Hydro*, 22 (3-4), 54-72.
- Hong, S., Y. Noh, J. Dudhia, (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.*, 134 (9):23182341.
- Kalnay, E. and Coauthors, (1996) The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Lin, Y.L., R.D. Farley, H.D. (1983) Orville, Bulk parametrization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteorol.*, 22:10651092 .
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, S.A. Clough, (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 102 (14):16,66316,682.
- National Centers For Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department Of Commerce (2015) "NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive." UCAR/NCAR - Research Data Archive. doi: 10.5065/D65D8PWK.
- Niu, G.-Y., et al. (2011) The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 116, D12109, doi: 10.1029/2010JD015139.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVHS
- Vladimirov, E.; Dimitrova, R.; Danchevski, V. (2018) Sensitivity of WRF Model Results to Topography and Land Cover: Study for the Sofia Region. 2018, *Annu. Univ. Sofia St. Kliment Ohridski*, 111, 87–101.
- (PDF) Fine-Resolution WRF Simulation of Stably Stratified Flows in Shallow Pre-Alpine Valleys: A Case Study of the KASCADE-2017 Campaign. Available from: https://www.researchgate.net/publication/354016890_Fine-Resolution_WRF_Simulation_of_Stably_Stratified_Flows_in_Shallow_Pre-Alpine_Valleys_A_Case_Study_of_the_KASCADE-2017_Campaign [accessed Oct 04 2021].