

Числено моделиране на пролетна, лятна и есенна затворена бризова клетка в района на Ахтопол

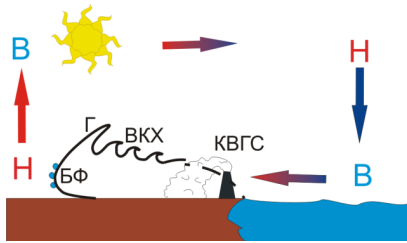
Х. Кирова, Д. Барантиев, Е. Бъчварова

Национален институт по метеорология и хидрология,
Българска академия на науките
бул. Цариградско шосе 66, 1784 София

Abstract. The sea breeze is local thermal circulation along the coasts of large water bodies. The breeze occurs due to the different heating of water and land, as a result of different thermal conductivities of these surfaces. Breeze circulation occurs when temperature contrast water-land is well-pronounced, the most favorable conditions for its development being in anticyclonic fields and weak pressure gradient fields. The importance of the phenomenon is defined by its impact on different areas of our life and ecosystems and emphasized by the fact that about 50% of world's population lives and works in coastal strip of 200 km width. The regime of wind is studied with Weather Research and Forecasting (WRF) model for 3 cases of closed breeze cell. The modeled vertical profiles of wind speed, wind direction and vertical wind speed are compared with MFAS sodar data at meteorological observatory in Ahtopol. The comparison model-observations reveals that the used configuration of WRF qualitatively reproduces the observed wind fields, but with shifted in time characteristics, with different vertical scales of breeze cell and with lower vertical wind speed. Measurements for determining horizontal scale of the sea breeze are not available at the studied region, but this parameter (more than 65 km inland in summer) is evaluated based on model results.

1 Въведение

Морският бриз е локална термична циркулация с денощен ход по крайбрежията на водните басейни. Бризът възниква вследствие на различното нагряване на вода-суша, резултат от различните топлинните капацитети на тези повърхности, като сушата се нагрява/изтвива по-бързо от морето (в резултат температурата на сушата има добре изразен денонощен ход, обратно на температурата на морската повърхност). Тази циркулация най-често се наблюдава при силно изразен температурен контраст вода-суша, като най-благоприятни условия за развитието и има при размити барични полета и антициклони. През топлиите сезони, сушата вследствие на бързото си нагряване през деня е с по-висока температурата от тази



Фиг. 1: Дневен бриз. Елементи на бризовата циркуляция: бризов фронт (БФ), глава (Г), вълни на Келвин-Хелмхолц (ВКХ), конвективен вътрешен граничен слой (КВГС).

на водата. Топлият въздух е с по-малка плътност, разширява се и в близост до брега над сушата се създава област на понижено налягане. Въздухът над морето е с отосително по-високо налягане, възниква сила на баричния градиент, насочена към сушата, и като резултат плитък слой от морски въздух се придвижва над сушата. Във височина между областите на противоположно разпределение на налягане възниква компенсационно течение, (Фиг. 1). Нощем, по същия механизъм възниква поток от сушата към морето.

Важността на явлението се определя от неговото влияние върху различни сфери на нашия живот и екосистемите [1] и се подсилва от факта, че около 50% населението на планетата (към 1998 г.) живее и работи в крайбрежната ивица с ширина до 200 km [2]. Наблюдаваната структура на бризовата циркуляция, както и исторически обзор на численото моделиране на явлението е направен в [3] и [4]. Изследването на бризовата циркуляция в дадена точка изисква дълги периоди от измервания. Поради ограничения пространствен размер на явлението и невъзможността във всяка точка, повлияна от бриза, да се извършват непрекъснати денонощни наблюдения се налага използването на числени модели. За надеждност на получената моделна информация са необходими проверки на моделните резултати спрямо данни (с възможно най-голяма проедространствена и времева резолюция) и определяне на най-успешна за даден район конфигурация от физически параметризации.

Крайбрежният атмосферен граничен слой, както и режимът на бризовата циркуляция в района на метеорологична обсерватория Ахтопол по данни от содар (MFAS SCINTEC) се изследва от 2008 г. [5-9]. Продължителността на морския бриз е около 6–8 часа, а наблюдаваните затворени бризови клетки в периода юли 2008 г. – октомври 2012 г. са 6% от всички случаи с бриз, като броят им варира значително от година в година [10]. Вертикалният мащаб на клетките е до 600 m през пролетта и есента и попада в обсега на содара, а през лятото е по-голям и компенсаторният поток не може да бъде регистриран. Скоростта на вятъра в клетката рядко надвишава 5 m/s при земята. В настоящото изследване са представени 3 случая на затворена

бризова клетка: през пролетта (07.05.2009 г.), лятото (05.08.2008 г.) и есента (05.09.2008 г.), моделирани с Weather Research and Forecasting (WRF) модел (с динамично ядро ARW), версия 3.3.1 [11].

2 Описания на използваните наблюдения

Експерименталните профили на вятъра са получени чрез акустичната система SCIENTEC Flat Array middle range instrument (MFAS) Sodar. Техническите характеристики на содара са: честотен обхват 1650–2750 Hz, 9 ъгъла на излъчване/приемане (0° , $\pm 22^\circ$, $\pm 29^\circ$), вертикален обхват от 30 до 1000 m, период на осреднение 20 min, записи се правят на всеки 10 min с вертикална резолюция от 10 m.

Началото на дейността по звуково сондиране на атмосферата започва през 2008 г. благодарение на сътрудничеството между НИМХ-БАН и Научно-производствено обединение “Тайфун” в Обнинск, което е част от Федералната служба на Русия по хидрометеорология и мониторинг на околната среда (Росгидромет). Содарът е монтиран в метеорологична обсерватория Ахтопол (Фиг. 2). Обсерваторията е разположена в равнинен терен, около 400 m от брега и с надморска височина 30 m. Ориентацията на бреговата линия в района от север-северозапад към юг-югоизток определя посоката на нахлувания на морски въздушни маси в сектора от 0 до 120° .

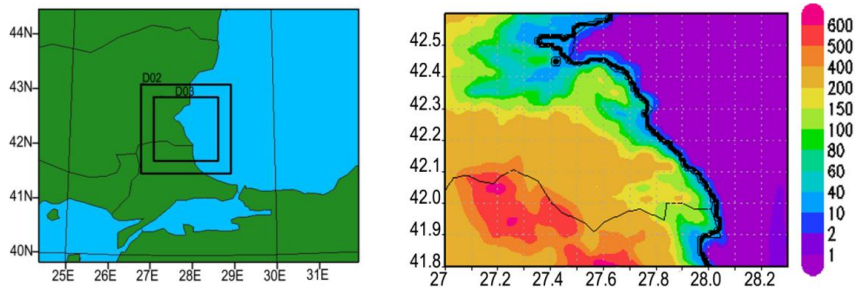
Метеорологични измервания в станция Ахтопол, разположена в този полигон, се извършват от 1971 г.



Фиг. 2: Метеорологична обсерватория Ахтопол (ляв панел), MFAS Sodar (десен панел).

3 Методи

WRF е инициализиран с US National Center for Environmental Prediction Final Analyses (FNL) с $1^\circ \times 1^\circ$ пространствена и 6 часа времева резолюция. Изчисленията са извършени с т.нар. “двупосочно



Фиг. 3: Конфигурация на моделните области (ляво) и релеф на МО3 (дясно).

вместване” върху три моделни области (МО) със стъпка на мрежата 25, 5 и 1 km, на точки в отделните МО както следва 26×21 , 36×36 , 111×111 (Фиг. 3). Използвана е Ламбертова конформна проекция (с параметри: $\text{truelat1} = 30^\circ$, $\text{truelat2} = 60^\circ$; координатите на центъра на най-външната моделна област: 42.084°N и 27.951°E). За описание на подложна повърхност са използвани 24 категории на USGS (US Geological Survey). Избраните параметризации на физичните процеси са представени в Таблица 1.

Табл. 1: Използвани параметризационни схеми

Микрофизика	8 (МО2 и 3)= Thompson graupel scheme [12]; 4(МО1)=WSM 5-class scheme [13]
Дълговълнова радиация	1= RRTM: Rapid Radiative Transfer Model [14]
Късовълнова радиация	2= Goddard [15]
Приземен слой	2= Eta similarity [16]
Земна повърхност	2=Noah LSM [17]
Планетарен граничен слой	2= MYJ: Mellor-Yamada-Janjic TKE [18-20]
Кумулусова параметризация	5 (само за МО1 и 2) = Grell3D (подобнена версия на [21])

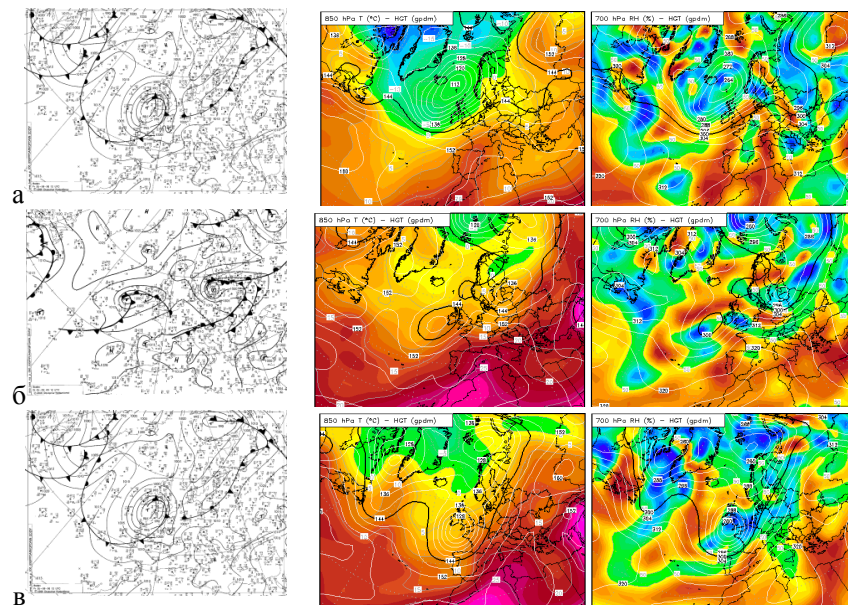
За горната граница на атмосферата е определено нивото 50 hPa. Броят на нивата по вертикалата е 43, като 30 от тях са под 2000 m. Три 36-часови симулации (05.08.2008, 05.09.2008, 07.05.2009) са извършени с WRF, като първите 12 часа от прогнозата не участват в представения анализ (spin-up). Прогнозираните променливи са записани на всеки 10 min.

Моделираните профили на модула на скоростта (WS), посоката на вятъра (WD) и вертикалната скорост (W) са сравнени с измерените такива от содара. Температурата (T2) и влажността на 2 m (RH2), получени с WRF, са съпоставени с данните от синоптична станция Ахтопол.

4 Резултати

4.1 Синоптична обстановка

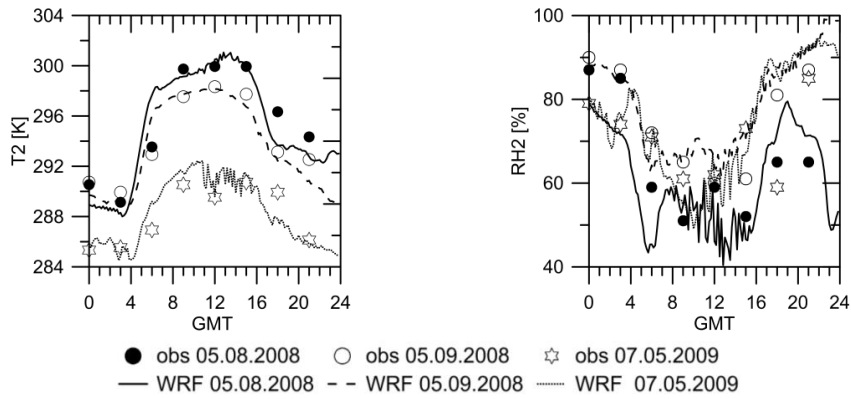
На 07.05.2009 районът на българското черноморско крайбрежие е в долина на ниско налягане (Фиг. 4а). Въздушната маса е влажна, а вятърът е слаб от северозапад. На 05.08.2008 (Фиг. 4б) гребен на високо налягане се установява над Черно море със слаб баричен градиент. На 06.08.2008 преминава размит студен фронт без валежи. Въздушната маса е много топла и суха. На 05.09.2008 районът е западната периферия на антициклон (Фиг. 4в). Вятърът е слаб от североизток, а въздушната маса е топла и суха.



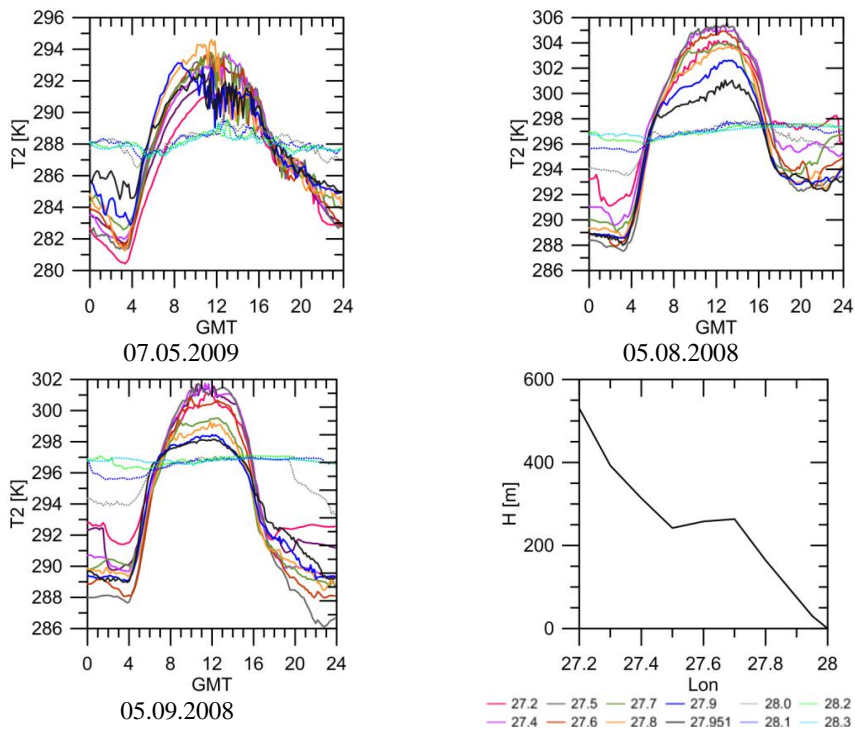
Фиг. 4: Синоптични карти за: а) 07.05.2009, б) 05.08.2008, в) 05.09.2008 Източник на картите <http://www.wetterzentrale.de/>.

4.2 Денонощен ход на T2 и RH2

Сравнението на измерения и моделиран денонощен ход на T2 с (Фиг. 5, ляв панел) показва, че моделът възпроизвежда характерното плато във времевия ход на температурата. Моделираната T2 е със занижени стойности в сутрешните и вечерните часове на 05.08 и



Фиг. 5: Денонощен ход на T2 и RH2 в станция Ахтопол.



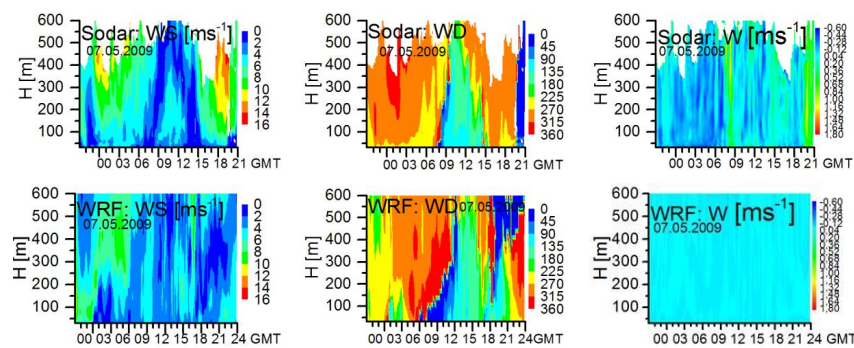
Фиг. 6: Моделиран дневен ход на T2 за различни отстояния от брега и релеф (долен десен панел) през 42.084N.

05.09.2008. Съответно, RH2 (Фиг. 5, десен панел) е с до 20% завишена от модела във вечерните и сутрешни часове.

Коректното описание на T2 в периода на дневния бриз в крайбрежната синоптична станция Ахтопол дава основание да се оцени проникването на морския бриз навътре в сушата само по моделираните метеорологични полета (Фиг. 6). Сушата е повлияна от дневния бриз докъдето в дневния ход на T2 се наблюдава плато вследствие на достигането до там на по-хладен морски въздух, прекъсващ характерния синусоидален ход на загреване на земната повърхност. В разглежданите случаи бризът прониква при случая от май до 45 km навътре над сушата и над 65 km за случаите от август и септември. Представеното сечение на релефа предполага и наличието на комбиниран ефект от морски бриз и надморска височина, което се изразява в по-ниски температури на 27.2E в сравнение с 27.3E. Използваната конфигурация успешно описва слабо изразен денонощен ход в T2 над морската повърхност (за географски дължини на изток от 28E).

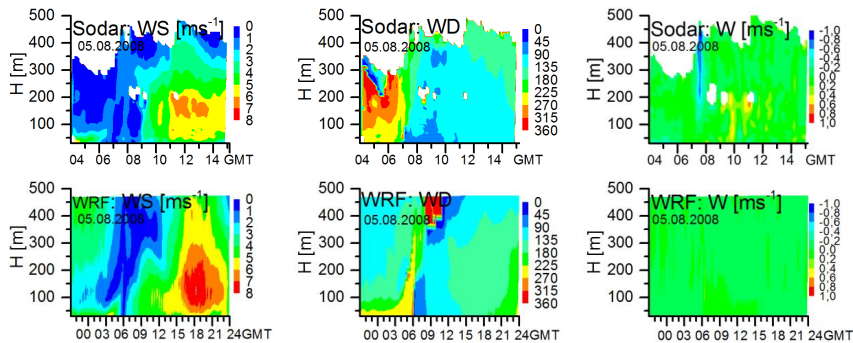
4.3 Пространствено-времеви профили-сравнение с данни от содара

По данни от содара (Фиг. 7, горен ред) поток откъм морето се установява около 11 часа местно време (източно европейско лятно време=GMT+3) за случая на пролетна затворена бризова клетка (07.05.2009). Наблюдава се ясно зона на затишие между морския поток при земята и компенсаторното течение от сушата към морето във височина. В сечението височина-време за вертикалната скорост чрез високи стойности се откроява началото на морския бриз също около 11 часа. Наблюдаваната клетка е с ясно изразени зона на затишие и вертикален мащаб на ядрото на максимална скорост 400 m. Моделираната клетка (Фиг. 7, долен ред) е с подобни вертикални мащаби, но с раздвоено ядро. Вертикалната скорост е с порядък по-



Фиг. 7: Пространствено-времеви разрези на WS, WD и W за 07.05.2009. Моделираните полета обхващат 24 часов диапазон.

Х. Кирова, Д. Барантиев, Е. Бъчварова



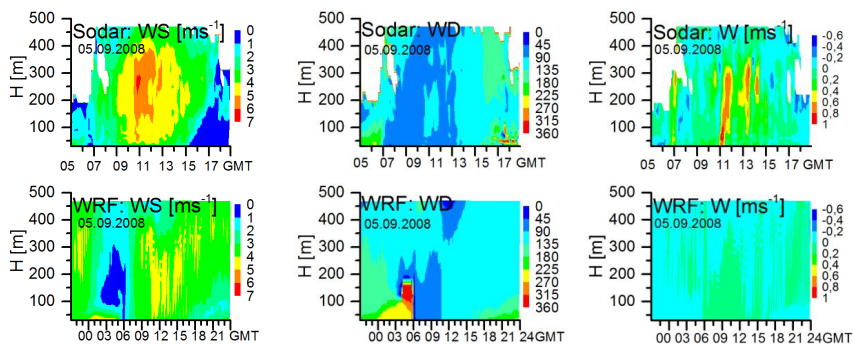
Фиг. 8: Пространствено-времени разрези на WS, WD и W за 05.08.2008. Моделираните полета обхващат 24 часов диапазон.

малка от измерената, а настъпването на морския бриз е около 10 часа местно време.

Началото на бриза по данни от измервания е в 10 часа, а от модела с 1 час по-рано (Фиг. 8), за лятна бризова клетка (05.08.2008). Максималната скорост в ядрото на клетката се наблюдава в слоя 150–250 m, в полето на WRF този слой е 50–250 m.

Моделът успешно възпроизвежда промяната в посоката на вятъра при земята от югозападен към северозиточен в началото на морския бриз. Поради по-големия вертикален мащаб на локалната циркулация, содарът не достига до височината на обратния поток, но има индикация за зоната на затишие над морския бриз.

През септември началото на морския бриз по данни от содара в 10 часа, а в модела - 9 часа местно време, Фиг. 9. Измерванията показ-



Фиг. 9: Пространствено-времени разрези на WS, WD и W за 05.09.2008. Моделираните полета обхващат 24-часов диапазон.

ват, че слойт, обхванат от бризовата циркулация, е с дебелина над 500 m, а ядрото на максимална скорост е в слоя 150–400 m. Ядрото на максимална скорост в модела е между 50 и 400 m. Измерената максимална стойност за WS е 7 m/s, моделираната 5 m/s. Характерният източен поток за периода на дневния бриз е пресъздаден от модела, както и промята в WD към западна след 19 часа местно време.

5 Заключение

Възможността на WRF (с локална схема за планетарния граничен слой MYJ) да възпроизведе явлението “затворена бризова клетка” е изследвано за района на Ахтопол. Получените резултати са съпоставени с приземни данни в синоптични срокове, а вертикалните профили на WS, WD и W с измерените от MFAS содар.

Моделът възпроизвежда платото във времевия ход на T2 и на трите разглеждани дати. RH2 е с до 20% завишена във сутрешните и вечерни часове. По моделни данни сушата е повлияна от морския бриз до разстояние около 45 km от брега на 07.05.2009 и над 65 km на 05.08 и 05.09.2008.

Сравнението на измерените пространствено-времеви профили на WS, WD и W с тези от WRF показва, че използваната конфигурация качествено възпроизвежда наблюдаваните полета на скоростта и посоката на вятъра, но с отместено начало на морския бриз, с по-малка максимална хоризонтална скорост, с различен мащаб на клетката на максимална скорост във височина, както и с вертикална скорост на порядък по-ниска от измерената.

Литература

- [1] Simpson J. E: Sea breeze and local wind, 1994. Cambridge University Press 7.
- [2] Hinrichsen, D., The Coastal Population Explosion, http://oceanservice.noaa.gov/websites/retiredsites/natdia_pdf/3hinrichsen.pdf, Last access 26.11.2016
- [3] Abbs D. J., and Physick, W. L. (1992) Sea-breeze Observations and Modelling a Review, Australian Meteorological Magazine Vol. 41.
- [4] Crosman, E. T., and Horel, J. D. (2010) Sea and Lake Breezes: A Review of Numerical Studies, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 137.
- [5] Barantiev, D., Batchvarova E., Novitsky M. (2013). Exploration of the Coastal Boundary Layer in Ahtopol through Remote Acoustic Sounding of the Atmosphere, paper in conference proceedings, 2nd National Congress on Physical Sciences, Section: Physics of Earth, Atmosphere and Space (S07.26), 25-29 September 2013, Sofia, Bulgaria.

- [6] Barantiev D, Novitsky M., Batchvarova E. (2011). Meteorological observations of the coastal boundary layer structure at the Bulgarian Black Sea coast, *Adv. Sci. Res.*, 6, 251-259 3.
- [7] Batchvarova, E., Barantiev D., Novitsky M. (2012). Coastal Boundary layer wind profile based on SODAR data – Bulgarian contribution to COST Action ES0702, paper in conference proceedings, The 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing – ISARS 2012, 5-8 June 2012, Boulder, Colorado, USA.
- [8] Batchvarova, E., D. Barantiev, M. Novitzky, 2011: Characteristics of the sea breeze at the southern Bulgarian Black sea coast based on sodar and eddy correlation measurements. *Energy&Meteorology - Weather and Climate for the Energy Industry, ICEM2011*, 8-11 November, Surfers paradise, Queensland, Australia, p.64.
- [9] Novitskii, M. A., Kulizhnikova, L. K., Kalinicheva, O. Yu., Gaitandzhiev, D., Barantiev, D, Bachvarova, E, Krysteva, K. (2012). Characteristics of wind speed and wind direction in the atmospheric boundary layer on the southern coast of Bulgaria, *Russian Meteorology and Hydrology*, 37, 159-164.
- [10] Барантиев, Д. (2016) Характеристики на атмосферен граничен слой в крайбрежната зона на град Ахтопол по содарни и моделни данни, дисертация за присъждане на образователна и научна степен „доктор”
- [11] Skamarock, W., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X-Y, Wang, W., Powers, J. G. (2008) A Description of Advanced Research WRF Version3 <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs>.
- [12] Thompson, G., Rasmussen, R.M., Manning, K. (2004) Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis, *Monthly Weather Review*, Vol. 132, pp. 519–542
- [13] Hong, S.-Y., Dudhia, J. and Chen, S.-H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Monthly Weather Review*, Vol. 132, pp. 103–120.
- [14] Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J. and Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. D14, pp. 16663–16682.
- [15] Chou, M.-D. and Suarez, M.J. (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, *NASA Technical Memorandum*. 104606, Vol. 3, pp. 85.
- [16] Janjic, Z. I., (1994) The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Monthly Weather Review*, 122, 927–945.
- [17] Chen, F. and Dudhia, J. (2001) Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation, *Monthly Weather Review*, Vol. 129, pp. 569–585.
- [18] Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982) Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Review of Geophysics*, Vol. 20, pp. 851–875.

Числено моделиране на пролетна, лятна и есенна затворена ...

- [19] Janjic, Z.I. (1996) The surface layer in the NCEP Eta Model, Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August; American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 354–355.
- [20] Janjic, Z.I. (2002) Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, No. 437, pp. 61.
- [21] Grell, G.A. and Devenyi, D. (2002) A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques, Geophysical Research Letters, Vol. 29, No. 14, Article 1693.