

Верификация на скоростта и посоката на вятъра за летище София, получени от моделни симулации с моделна система WRF

**Росен Пенчев¹, Елисавета Пенева², Боряна Щиркова²,
Орлин Георгиев³**

¹ДП “Ръководство на въздушното движение”,
бул. Брюксел 1, 1540 София, България

²Софийски университет “Св. Климент Охридски”,
Физически факултет, Катедра “Метеорология и геофизика”,
бул. Дж. Баучер 5, 1164 София

³Национален институт по метеорология и хидрология,
Българска академия на науките,
бул. Цариградско шосе 66, 1784 София

Abstract. The objective of this study is to evaluate the ability of the numerical model to capture the variability of the near surface wind. This is important for the aeronautical meteorological forecasts at Sofia airport. The numerical model WRF version 3.4 was configured at 2 nested domains with spatial resolution up to 1,6km. The finest resolution domain covers the area of Sofia field and the close mountains. Several numerical experiments to tune the model sub-grid physics were performed varying the available options for the PBL and convection parameterization. The chosen model configuration was run for two test cases: one during January and the second in May 2015, with duration 72 hours each starting in 0 h. The results for the near surface wind for 5km and 1.6km domains are compared to meteorological data from Bulgarian international airports and the Sofia airport AWOS respectively. The results for upper levels are compared to atmospheric sounding for the PBL height for the grid point of Sofia airport. The model skill is evaluated for several different levels in PBL and the evolution of the error in time is investigated.

1 Въведение

Прогнозирането на полето на вятъра с помощта на числен модел от край време представлява интерес за службите, осигуряващи метеорологична информация за нуждите на въздухоплаването. Наличието на данни от глобални числени модели, регионални числени модели с отворен код и необходимата информационна инфраструктура дават възможност да бъдат получени числени прогнози за времето с

висока разрешаваща способност на сравнително ниска цена. Качеството на получените резултати до голяма степен зависи от началните, граничните условия и от конфигурацията на модела, а именно разделителна способност, брой нива по вертикалата и правилното представяне на подмрежовите атмосферни физични процеси в модела (параметризационните схеми). При избора на оптималната моделна конфигурация е необходимо да бъдат проведени серия от експерименти, чрез които да се определи чувствителността на получените резултати към различни параметризационни схеми.

Основната цел на настоящото изследване е 1) оценка на влиянието на параметризациите на микрофизичните процеси и планетарния граничен слой (ПГС) върху резултатите за приземния вятър (на 10 m); 2) влиянието на пространствената разрешаваща способност върху резултатите; 3) влияние върху вятъра във високите слоеве на атмосферата. Проведени са серия от числени експерименти, при които са използвани различни вариации на схемите за параметризация на микрофизичните процеси и ПГС (Таблица 1).

2 Моделна система, използвана в изследването

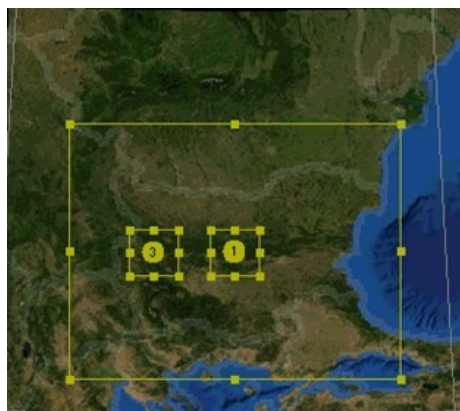
За целите на настоящото изследване е използвана моделната система WRF ARW версия 3.4.1. [1], разработка на National Center for Atmospheric Research (NCAR) и the National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Това е нехидростатичен, мезомасшабен числен модел, използван широко за изследвания и оперативни прогнози. Той работи в сигма-координатна (следваща терена) система и има 65 нива по вертикалата. Над 20 от тях са на височина под 3000 m, което позволява правдоподобно да се симулират процесите в планетарния граничен слой и съответно поведението на вятъра, което е задачата, поставена пред изследването.

Конфигурацията на модела включва 3 области, като едната обхваща другите две (Фиг. 1). Първата от тях включва територията на България и е със стъпка по хоризонтала от 5 km, а другите две области са вградени в първата: едната е района на вр. Бузлуджа, а другата включва Софийското поле и околните планини. Те са с резолюция 1,6 km.

Извършените експерименти по чувствителност са спрямо микрофизичните процеси и ПГС. Останалите параметризационни схеми, които не се променят са:

- Дълговълнова радиация: RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) [2];
- Късовълнова радиация: Dudhia scheme [3];

Верификация на скоростта и посоката на вятъра с WRF



Фиг. 1: Конфигурация на моделните области. В настоящето изследване са използвани резултатите от голямата моделна област и отбелязаната с 3.

- Параметризация на земната повърхност: Noah Land Surface Model [4];
- Параметризация на конвективни процеси: Kain-Fritsch scheme [5], за моделна област с резолюция 5 km.

3 Параметризации на ПГС и приземния слой и микрофизични процеси в облаци

Като се изключат конвективните процеси, влияние върху вятъра в ниските слоеве на атмосферата оказва най-вече правилната симулация на планетарния граничен слой и приземния слой. По-малко, но съществено значение има параметризацията на микрофизичните процеси. Численият модел WRF 3.4 включва набор от различни параметризационни схеми и е въпрос на настройка да се избере комбинация с оптимални резултати за скоростта и посоката на вятъра.

За параметризиране на ПГС, съгласно класификация в Cohen et al 2015 [6], са избрани следните типове схеми:

- Локални, при които за затваряне на системата от уравнения на Рейнолдс [7] се използва най-често турбулентната кинетична енергия (ТКЕ), като се използва само информация от съседните нива на атмосферата: Mellor-Yamada-Janjic scheme (MYJ) [8] и Quasi-Normal-Scale Elimination PBL [9];
- Нелокални, при които за затварянето на системата се използват данни от всички нива — например затварянето може да

стане чрез използване на параметри като дифузията: Yonsei University scheme (YSU) [10];

- (в) Хибридни схеми: при които има елементи от горните две групи: Total Energy- Mass Flux (TEMF) [11].

За параметризиране на микрофизичните процеси (фазови преходи на водната пара и формиране и еволюция на различните видове хидрометеори) са избрани следните схеми: Lin et. Al. scheme [11]; Eta microphysics [12]; WRF Single – Moment 6 class [13]; Goddard microphysics [14]; New Thompson et. al. Scheme [15]; Milbrandt-Yau Double-Moment 7 class [16] WRF Double-Moment 6-class scheme [17]

4 Описание на експериментите

За да се изследва поведението на модела при различни конфигурации на описаните схеми, са проведени 23 експеримента, при които са комбинирани различни схеми на ПГС и микрофизика, които са дадени в Таблица 1:

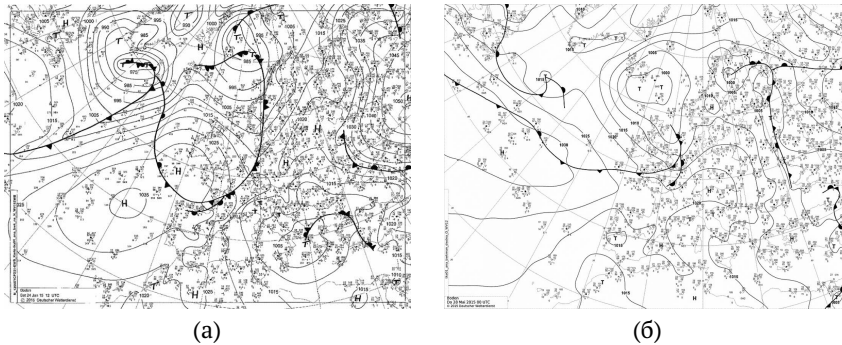
Таблица 1: Номенклатура на проведените числени експерименти: колоните са различни схеми за представяне на ПГС, а редовете – на микрофизичните процеси

PBL / Microphysics	Yonsei University (1)	MYJ(2) *sfclay_ph 2	QNSE(4) sfclay_ph 4	TEMF(10) sfclay_ph 10
Lin et. Al (2)	exp 2_1	exp 2_2	exp2_4	exp2_10
Eta microphys (5)	exp 5_1	exp 5_2	exp 5_4	exp 5_10
WSM 6 class (6)	exp 6_1	exp 6_2	exp 6_4	-
Goddard (7)	exp 7_1	Exp7_2	exp 7_4	-
New Thompson (8)	exp 8_1	exp 8_2	exp 8_4	exp 8_10
Milbrandt 7class (9)	exp 9_1	exp 9_2	exp 9_4	-
WRF DM 6 class (16)	exp 16_1	exp 16_2	-	-

Така конфигурираните експерименти са проведени за два периода: зимен 24.-27.01.2015 г.; и пролетен 28-31.05.2015 г. Тези периоди са избрани в ситуация с промяна в режима на вятъра. Синоптичната обстановка при зимния случай е Средиземноморски циклон, преминаващ през Балканския п-ов (Фиг. 2а), а вторият е нахлуване на континентален въздух по баричен гребен (Фиг. 2б).

Интегрирането е направено за 72 часа, като началото е в 00UTC. От получените резултати, за областта с по-ниска резолюция (5 km) са извлечени данните за скорост и посока на вятъра за 23 основни изобарни нива (1000, 950, 925, 900, 850, 820, 800, 780, 760, 740, 700, 650,

Верификация на скоростта и посоката на вятъра с WRF



Фиг. 2: Карта на приземното налягането, приведено към морско ниво на Германската метеорологична служба за а) 24.01.2015 г. и б) 28.05.2015 г.

600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100 hPa) в най-близките моделни точки до международните летища в България: София, Бургас, Варна, Пловдив и Г. Оряховица. От моделната област с висока резолюция (1.6 km) по същия начин са получени данните за скорост и посока на вятъра за летище София.

За валидиране на моделните резултати са използвани данни за скоростта и посоката на вятъра, получени от автоматизираните метеорологични наблюдателни системи, разположени на летищата. За верификация на вертикалните профили на вятъра са използвани данни от ежедневните аерологични сондажи на НИМХ.

5 Статистически характеристики

За анализ на представителността на моделните резултати са използвани:

5.1 BIAS, което определя на разликите между моделните и измерените стойности. За посоката на вятъра разликите са пресметнати по методиката, описана в Jimenez et. al 2013. [18]

$$\Delta d = \begin{cases} d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} & \text{if } d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} \leq |180| \\ d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} - 360 & \text{if } d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} > 180 \\ d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} + 360 & \text{if } d_{\text{WRF}} - d_{\text{obs}} < -180 \end{cases} \quad (1)$$

5.2 Абсолютна средна грешка за скорост и посока:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta d_i|}{n}. \quad (2)$$

5.3 Индекси на абсолютна средна грешка.

Вятърът е векторна величина и добър резултат означава едновременно добре симулирани скорост и посока. Ето защо е въведен допълнителен безразмерен параметър – индекс MAE, чрез който количествено да бъде сравнена способността на различните конфигурации на модела правилно да симулират скоростта и посоката на вятъра.

$$I_k = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{MAE_{spd_i}}{\min(MAE_{spd_k})} \right) + \left(\frac{MAE_{dir_i}}{\min(MAE_{dir_k})} \right) \right), \quad (3)$$

където $n = 1$ за едно летище/общо, 5 -- за петте летища за един случай или 6 за слоевете на профила на вятъра, а $k = 1$ или 2 в зависимост от броя на случаите.

Този параметър представлява число, което позволява посредством сумата от съотношенията на средната абсолютна грешка на скоростта и посоката на вятъра за даден експеримент, за даден случай или летище към най-добрия резултат от експериментите (минимума от всички грешки), количествено да бъде оценено доколко резултатите за всички параметри на полето на вятъра, от съответния експеримент са близки до най-добрите получени. Средният индекс от всички сумирани съотношения дава възможност резултатът от всеки от експериментите да бъде представен като число, имащо стойност между едно и две и има вида:

$$I_{MAE} = \frac{I_k}{2n} \quad (4)$$

6 Резултати от експериментите за приземния вятър

Като общ извод от проведените симулации, обобщен от петте точки на верификация, повечето конфигурации завишават скоростта на вятъра, а посоката на моделния вятър е завъртяна на дясно спрямо наблюдаваната. За София локално се наблюдава занижаване на скоростта на вятъра от модела при повечето от конфигурациите.

Абсолютните средни грешки на скоростта и посоката на вятъра варират в зависимост от летището и разглеждания случай (зимен или пролетен), като за скоростта на вятъра размахът на грешката за всяко от летищата не надхвърля 1 m/s за скоростта и е до около 30° за посоката.

Използвайки индекса MAE, е направена оценка, коя от конфигурациите осигурява оптимален резултат за всяко едно от летищата и за

Верификация на скоростта и посоката на вятъра с WRF

Таблица 2: Конфигурации с оптимални резултати по индекса MAE

	Експеримент	Стойност
Бургас	exp_7_4	4.43
Варна	exp_8_10	4.57
Г. Оряховица	exp_16_1	4.4
Пловдив	exp_8_1	4.43
София	exp_9_2	4.44

всеки един от случаите. Обобщените резултати за всяко от летищата са представени в Таблица 2.

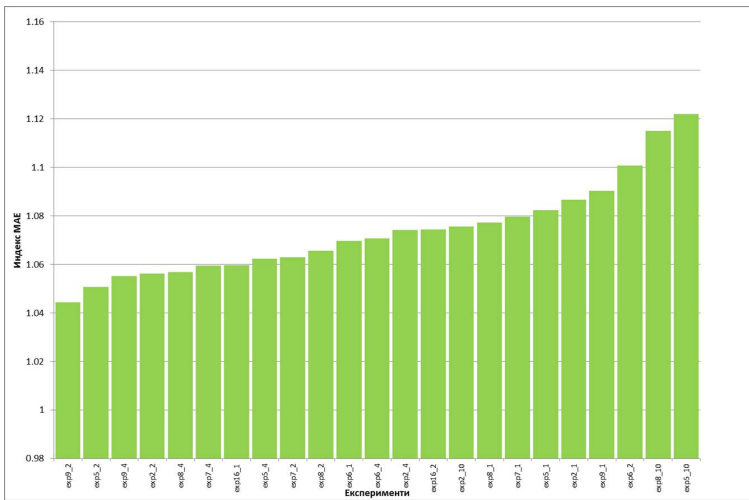
Сравнението между средните индекси MAE, получени от всички летища, за всеки от разглежданите случаи показва, че резултатите от модела зависят от сезона. През зимата оптимална е конфигурацията на модела с микрофизика New Thompson и схема за ПГС: QNSE, докато през пролетта най-добри резултати за приземния вятър се получават при комбинацията: WRF Double-Moment 6-class – Yonsei University scheme (YSU). QNSE е схема, която е разработвана за описание на добре стратифицирани ПГС, каквито често се наблюдават през зимата, докато YSU е схема, способна да симулира дълбоки и динамични ПГС, каквито често се наблюдават през месец май. Двете микрофизични схеми предлагат едни от най-комплексните възможности за описание на процесите в облаците.

Обобщаването на средни индекси за двата случая показва, че оптимални резултати за скоростта и посоката на вятъра на 10 m височина има при комбинацията Микрофизика: Milbrandt и ПГС: MYJ, като разликите между различните конфигурации са сравнително малки с $\Delta I_{MAE} \sim 0.1$ (Фиг. 3).

Интересно е сравнението на резултатите, получени при различна пространствена разрешаваща способност на летище София. Получените резултати са представени отделно за зимния и летния случай съответно на Фиг. 4а) и б).

При всички експерименти за зимния случай се наблюдава подобрене при повишаване на резолюцията. Подобренето е от порядъка на 0.1 до 0.2 m/s. Пролетният случай показва, че не винаги повишаването на резолюцията е от полза. Тогава се наблюдават множество конфигурации, при които повишаването на резолюцията води до увеличаване на абсолютната средна грешка.

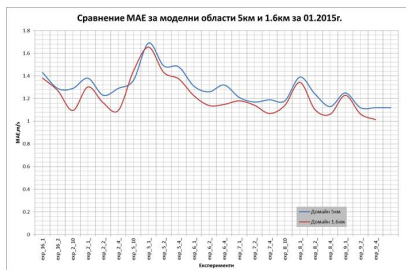
Сравнението на индексите за София в моделната област с висока резолюция показва наличие на промяна в оптималната схема, т.е. промяната в резолюцията води до промяна в най-добрата схема за PBL -- QNSE.



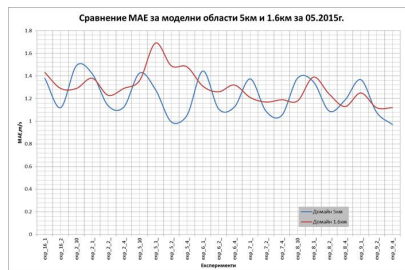
Фиг. 3: Индекс на MAE за всеки от проведените експерименти.

С цел да се провери поведението на модела във времето на Фиг. 5 са дадени сравнения на времевите редове на скоростта и BIAS-а на посоката, получени съответно от оптималната конфигурация за област с резолюция 1.6 km и измервания за съответните периоди за летище София.

От графиките се вижда наличието на добра корелация между измерената и симулирана скорост, когато скоростите на вятъра са над 4 m/s. Съответно в тези интервали BIAS-а на посоката е малък $\sim 20^\circ \div 30^\circ$, когато скоростта е по-малка той може да достигне до 180° .



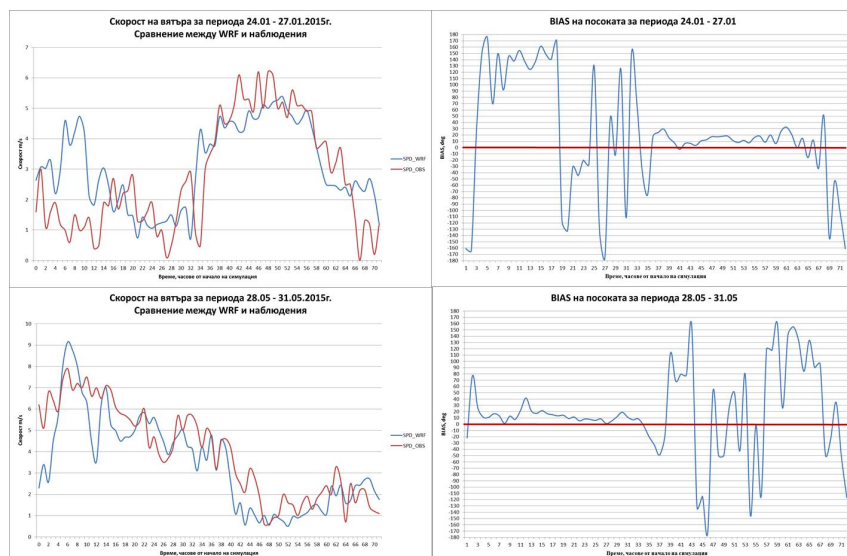
(а)



(б)

Фиг. 4: Индекс на MAE между моделния и измерения вятър на летище София за моделните конфигурации с резолюция: (а) 5 km и (б) 1.6 km

Верификация на скоростта и посоката на вятъра с WRF



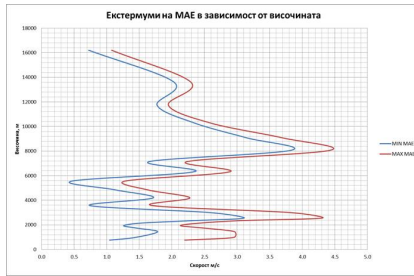
Фиг. 5: Скорост на вятъра от модел и измервания (ляв панел) и BIAS на посоката на вятъра (десен панел) за зимния и летния случай.

7 Резултати от експериментите за вятъра във височина

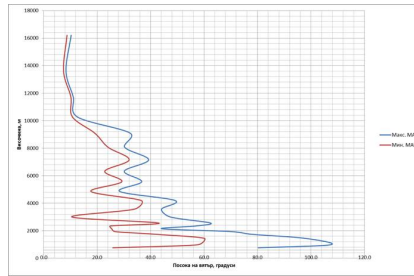
Друга цел на изследването беше да провери чувствителността на вятъра във височина към различните схеми. За съжаление извадката е изключително малка, тъй като измервания има веднъж дневно, съответно 6 сондажа. Независимо от това сме се опитали да направим полезни изводи.

На Фиг. 6 и 7 е показан диапазонът, в който се намират абсолютните грешки на скоростта и посоката (минимални и максимални стойности от всички разглеждани конфигурации). За скоростта на вятъра прави впечатление наличието на два максимума на грешката, приблизително на 2.5 и 8 km (Фиг. 6). Допълнителното проучване на използваните случаи показва, че вероятно те се дължат на наличие на ниско струйно течение в единия от случаите и ядра на струйни течения на височина около 8-10 km и в двата случая.

Трябва да се отбележи, че размахът на грешките е по-голям в ПГС и остава почти един и същ на височина над 5 km. Подобна е картината и при посоката на вятъра (Фиг. 7). Големите грешки в посоката са в ниските слоеве на атмосферата. С височината размахът на грешката се стеснява, т.е. с височината чувствителността на модела спрямо параметризиациите намалява.

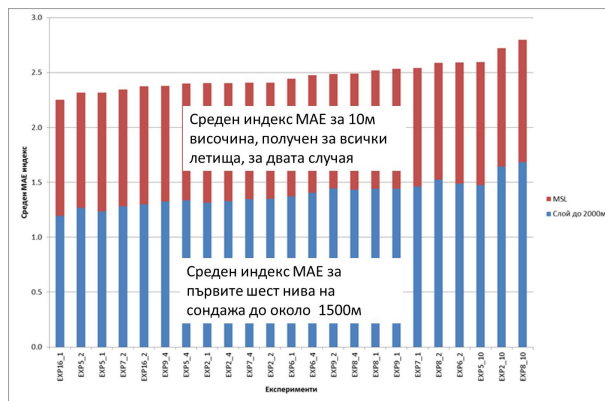


Фиг. 6: Минимални и максимални индекси на MAE за скоростта на вятъра



Фиг. 7: Минимални и максимални индекси на MAE за посоката на вятъра

Сумирането и осредняването на всички индекси на грешката доведе до идентифициране на оптималната конфигурация за цялата моделна атмосфера. Параметрите на вятъра са сравнително слабо чувствителни към промяна в изследваните параметризационните схеми. Като оптимален изпъква следният експеримент: Микрофизика: WRF Double-Moment 6-class и ПГС: Yonsei University scheme (YSU) (Фиг. 8).



Фиг. 8: Осреднен индекс на MAE за всички експерименти. В синьо е показано осреднение само за първите 6 нива (до 820 hPa), а в червено – за останалите.

8 Заключение

Полето на вятъра е сравнително слабо чувствително към промяна в параметризацията на ПГС и микрофизиката на облаците, въпреки това избирането на подходяща схема подобрява получените резул-

Верификация на скоростта и посоката на вятъра с WRF

тати. Прилагането на различни схеми за различни региони и в различните сезони би могло да доведе до подобрене, но това изисква извършването на продължителни допълнителни симулации.

Използването на осреднения индекс на MAE позволява да бъде направена комплексна оценка за скоростта и посоката на вятъра при съответната моделна конфигурация.

За района на летище София сравнението между експерименти с различна разделителна способност показва, че повишаването ѝ би могло да доведе до подобрене на MAE с около 0.1 до 0.2 m/s. При някои конфигурации обаче се наблюдава влошаване на получените резултати.

Направените оценки за BIAS на скоростта и посоката показва, че като цяло моделът завишава скоростта, а посоката на вятъра е вдясно от наблюдаваната.

Сравнението на данните от експериментите показва, че при резолюция 1.6 km за летище София най-добри резултати се получават при използване на: PBL параметризация: QNSE [4] и Микрофизика: Milbrandt [9].

Направената верификация на резултатите от експериментите с данните, получени от аерологичните сондажи в разглежданите периоди потвърждава, че полето на вятъра е чувствително към разглежданите параметризационни схеми в първите 3 km;

Сравнението на експериментите с отчитане на резултатите от симулациите във височина показва, че за симулиране на полето на вятъра в тропосферата за територията на България комплексно най-подходяща е конфигурация, която включва микрофизика: WRF DM6 [16] и PBL: YSU.

Литература

- [1] NCEP, User's Guide for the ARW WRF Modeling System Version 3.5, (2014)
- [2] Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough (1997), Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682.
- [3] 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.
- [4] Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.

- [5] Kain, John S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- [6] Cohen, A. E.; Cavallo, S M.; Coniglio, M. C.; Brooks, H. E. 2015 A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments *Weather and Forecasting*, vol. 30, issue 3, pp. 591–612
- [7] Сираков Е. 2011 Атмосферен граничен слой: структура, параметризация, взаимодействия, стр. 33– 36, Heron Press
- [8] Janjic, Zavisla I., 1994: The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- [9] Sukoriansky, S., B. Galperin, and V. Perov, 2005: Application of a new spectral model of stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Bound.–Layer Meteor.*, 117, 231–257.
- [10] Hong, Song–You, Yign Noh, Jimmy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
- [11] Lin, Yuh–Lang, Richard D. Farley, and Harold D. Orville, 1983: Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *J. Climate Appl. Met.*, 22, 1065–1092.
- [12] NOAA, cited 2001: National Oceanic and Atmospheric Administration Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. [<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpl1/eta12tpb/>]
- [13] 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.
- [14] Tao, Wei–Kuo, Joanne Simpson, Michael McCumber, 1989: An Ice–Water Saturation Adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 231–235.
- [15] Thompson, Gregory, Paul R. Field, Roy M. Rasmussen, William D. Hall, 2008: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115.
- [16] Milbrandt, J. A., and M. K. Yau, 2005: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three–moment closure and scheme description. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3065–3081.
- [17] Lim, K.–S. S., and S.–Y. Hong, 2010: Development of an effective double–moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, 138, 1587–1612.
- [18] P. JIMENEZ and J. DUDHIA On the Ability of the WRF Model to Reproduce the Surface Wind Direction over Complex Terrain *J. App. Met. And Clim Vol. 52* 1610–1616