

УДК 53.091

Моделирование скорости ветра при низовой метели с помощью модели WRF-ARW

М.М. Курбатова^{1,2}, В.И. Бычкова^{2,3}

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики РАН, г. Москва, Россия;*

*³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия
marja1702@gmail.com*

В статье предложена параметризация приземного слоя с включенным численным описанием процессов возникновения и эволюции метели. При наличии благоприятных условий для развития метелевой деятельности, снег с поверхности поднимается в приземный слой, что приводит к включению обратных связей на режим приземного слоя. Для оценки успешности работы предлагаемой параметризации с моделью WRF-ARW проведено две серии экспериментов. Первая серия экспериментов «метель» подразумевает использование параметризации приземного слоя с включением в него процессов метелевого переноса. Вторая серия экспериментов «полярная» использует стандартную параметризацию приземного слоя. В большинстве случаев использование параметризации приземного слоя с включенным в него описанием низовой метели улучшает прогноз скорости ветра.

Ключевые слова: низовые метели, двухфазный поток, приземный слой атмосферы, физическое моделирование

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-130-141>

Simulation of wind speed during blowing snow using the WRF-ARW model

M.M. Kurbatova^{1,2}, V.I. Bychkova^{2,3}

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

*³A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
marja1702@gmail.com*

The paper proposes a parametrization of the surface layer with the included numerical description of processes of the occurrence and evolution of blowing snow. If there are favorable conditions for the development of snowstorm activity, snow from the surface is lifted to the surface layer, which leads to the inclusion of feedbacks to the surface layer regime. Two series of experiments with the WRF-ARW model are carried out to assess the performance of the proposed parameterization. The first series of experiments "blizzard" implies the use of the surface layer parameterization with the inclusion of snow drifting processes into it. The second series of experiments "polar" uses the standard parametrization of the surface layer. In most cases, the use of the surface layer parameterization with the included description of blowing snow improves the wind speed forecast.

Keywords: blowing snow, two-phase flow, atmospheric surface layer, physical modeling

Введение

На большей части территории Российской Федерации и других северных Европейской стран метель является опасным метеорологическим явлением.

Метелевый перенос может сильно повлиять на динамический и тепловой режим приземного слоя атмосферы. При взаимодействии потока воздуха с шероховатой подстилающей поверхностью происходит генерация турбулентной энергии, вызывающая диффузионный поток частиц из приповерхностного слоя вверх. Часть этой турбулентной энергии затрачивается на процесс диффузии мелких частиц твердой фазы. Именно движение взвешенных частиц в потоке ведет к уменьшению турбулентности потока, что приводит к более высокому темпу роста скорости по мере удаления от поверхности [1, 2].

Для сублимации снега, увеличение интенсивности которой происходит при метели, необходимы дополнительные затраты тепла. Поэтому процесс сублимации меняет тепловой баланс нижнего слоя атмосферы, что может быть выражено в понижении температуры воздуха. Непрерывный снегообмен с поверхностью приводит к уплотнению снега и изменению снежного рельефа. При определенных условиях может наблюдаться выдувание снега или же его накопление. Нахождение снежных частиц в воздухе изменяет оптические свойства атмосферы, такие как, например, видимость. Таким образом, возникновение метели может существенно изменить состояние приземного слоя воздуха.

Во многих странах, в том числе и в России, задача описания и прогноза метелей решается с помощью синоптического прогноза, который основан на прогнозе атмосферных вихрей и фронтов. В прогностических центрах многих северных стран [<http://met.no>, <http://www.smhi.se>, <http://ilmatieteentaitos.fi>, <http://www.dmi.dk>] метели рассматриваются как сопутствующее явление при прохождении фронтов и на периферии циклонов и антициклонов.

Численный прогноз метели особо развит в Канаде. Канадскими исследователями разработаны две модели низового метелевого переноса, широко использующиеся в оперативной практике. Краткая характеристика всех известных алгоритмов физического описания метелевого переноса представлена в [9].

В литературе, посвященной описанию указанных моделей снегопереноса, не приведены данные валидации моделей. Указанные модели можно условно разбить на две группы по полноте описываемых процессов и сложности решения: более простые и сложные. Сложные модели [7, 13] являются не “чисто” метельными. Как правило, это модели пограничного слоя атмосферы, в которые включены переменные переноса метелевого снега. При создании таких моделей не предполагалось включение физического описания процессов при метели. Простые же модели [5, 8] численно не описывают обратное влияние метели на метеорологическое состояние нижних слоев атмосферы.

При высоких скоростях ветра метели могут перейти в разряд опасных метеорологических явлений, в том числе и с точки зрения экономической опасности. Интенсивные метели способны образовать снежные наносы, блокирующие транспортные пути. Стоит выделить отдельный подход к изучению метели с точки зрения прогноза метелевых снежных отложений и перераспределения снега

Ранее авторами данной статьи разработана параметризация процессов возникновения и эволюции низовой метели [3]. Предложенная параметризация процессов при низовой метели учитывает все основные физические механизмы возникновения метелевого переноса, динамики двухфазного потока, процесса испарения взвешенных частиц. В качестве основных параметров выступают концентрация твердой фазы метели и концентрация сублимированного вещества. Обратное влияние метелевой деятельности учитывается путем пересчета плотности и высоты снега, скорости ветра на 10 м, температуры воздуха, оптических характеристик атмосферы. Численная схема имеет 10 вертикальных уровней, нижний из которых определяется как высота уровня сальтации для каждого момента времени, вертикальный шаг составляет 1 м.

Для реализации численной схемы параметризации низовой метели необходимы входные данные, а именно: поля компонент скорости ветра на уровне 10 м, температуры и относительной влажности на 2 м, скорости трения, атмосферного давления, высоты снега и его плотности, количества приходящей коротковолновой радиации. В работе авторами в качестве метеорологической информации использовалась выходная продукция модели WRF-ARW [15]. Однако для получения метеорологической информации можно использовать и другие мезомасштабные модели, обладающие хорошим качеством прогноза температуры воздуха и скорости ветра.

До настоящего времени параметризация метелевого переноса работала автономно от модели WRF-ARW. Результаты работы параметризации не влияли на дальнейшее интегрирование схем WRF-ARW; изменения скорости ветра, температуры и других параметров происходили как пост-процессинг и не учитывались в расчетах дальнейшего развития атмосферного пограничного слоя в модели. В настоящей статье рассматривается возможность и эффективность внедрения параметризации метелевого переноса в рамках параметризации приземного слоя модели WRF-ARW.

Описание параметризации приземного слоя с включением численных алгоритмов, разрешающих метелевый перенос снега

Несмотря на обилие различных процессов, описываемых в рамках параметризаций приземного и пограничного слоев в модели WRF-ARW, ни в одной из схем не предусмотрено описание подъема снежных частиц с поверхности. За основу была взята параметризация приземного слоя

MYNN [14]. Для начала подъема снега важным решающим параметром служит скорость ветра, а эта параметризация в связке с соответствующей параметризацией пограничного слоя показывает хорошие оценки воспроизведения ветра [6, 10]. В рамках этой параметризации на каждом расчетном шаге модели после определения скорости ветра рассчитывалось критическое для начала метелевого переноса значение ветра [11]:

$$U_{th} = 6,975 + 0,0033 \cdot (T_2 + 27,27)^2, \quad (1)$$

где U_{th} – критическая скорость ветра, T_2 – температура воздуха на уровне 2 м.

Затем при превышении скорости ветра на уровне 10 м этого критического значения и наличии снежного покрова рассчитывалось количество поднятого с земли снега [8]:

$$Q_{sth} = \rho_{sn} \cdot 0,385 \left(1 - \frac{U_{th}}{U_{10}}\right)^{2,59} u^*, \quad (2)$$

где Q_{sth} – количество поднятого снега; ρ_{sn} – плотность снега; U_{10} – скорость ветра на уровне 10 м; u^* – приземная скорость трения.

С используемым вертикальным разрешением нижний модельный уровень примерно соответствует 10 м. Это количество снега соответствует объему поднятого снега в нижнем модельном слое. Значение количества снега в воздухе на нижнем уровне приравнялось к количеству поднятого снега, пересчитанное в объемную концентрацию:

$$Q_{snow}(z = 1) = \frac{Q_{sth}}{\rho_{air}}, \quad (3)$$

где ρ_{air} – плотность воздуха.

После параметризации приземного слоя в модели WRF-ARW на каждом шаге запускается параметризация микрофизики, в которую уже заложены механизмы сублимации снега. В данной работе использована схема микрофизических процессов [17]. В этой схеме в качестве прогностических переменных используются (кг/кг) удельная влажность, водность облаков, ледность облаков, водность дождя, ледность снега, ледность граупелей и концентрация облачных кристаллов. Наиболее значимыми процессами, приводящими к образованию/изменению облачного снега является рост количества частиц снега вследствие отложения водяного пара (при перенасыщении надо льдом), испарение частиц снега (при отсутствии насыщения) и аккреция облачной воды снегом. При включении в расчетную схему модели метелевого переноса снег, поднятый в воздух с поверхности, также подвергается процессам сублимации.

Сублимация ($SUBL$) рассчитывается по формуле:

$$SUBL = \frac{(S-1)N_{os}}{A} + f(\rho, R), \quad (4)$$

где S – отношение насыщения; N_{os} – распределение частиц по размеру; A – скорость выпадения снега; ρ – плотность воздуха; R – приходящая радиация.

Наличие гидрометеоров в воздухе (в частности, снега) ведет к включению их турбулентного перемешивания и осаднения. Таким образом, появление в приземного слое дополнительного количества снежных частиц ведет к автоматическому учету влияния метели на режим атмосферного пограничного слоя.

Описание численных экспериментов с моделью WRF-ARW

С моделью WRF-ARW проводились две серии экспериментов для области, ограниченной координатами 110–80° з. д., 40–65° с. ш. (рис. 1) с пространственным шагом 18 км.

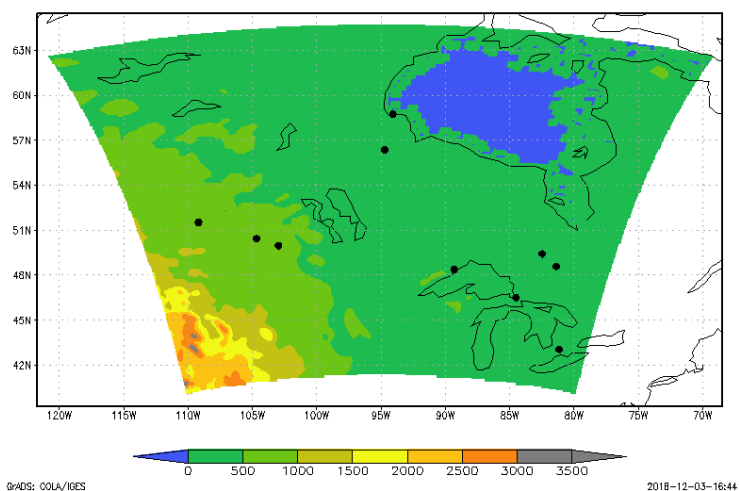


Рис. 1. Расчетная область модели WRF-ARW. Черным цветом отмечены точки расположения синоптических станций.

Fig. 1. The calculated area of the model WRF-ARW. The black points are the locations of the synoptic stations.

Первая серия экспериментов «метель» подразумевает использование параметризации приземного слоя с включением в него процессов метелевого переноса. Вторая серия экспериментов «полярная» использует стандартную параметризацию приземного слоя MYNN. Остальные параметры конфигурации модели WRF-ARW у двух серий экспериментов

идентичны. Использована полярная версия, конвективные процессы согласно [12], микрофизические процессы по [17], процессы, происходящие в планетарном пограничном слое в соответствии с [14], процессы на подстилающей поверхности в соответствии с [16]. Для описания характеристик подстилающей поверхности рассматриваемой территории использована база данных о подстилающей поверхности MODIS с разрешением 30 с. Модель запускалась на 48 ч, первые и последние 12 ч не использовались. Получен ряд прогнозов с 12 ч ВСВ 1 января по 23 ч ВСВ 30 января 2013 года.

На рис. 1 также представлено расположение станций канадской метеорологической сети, данные которых использовались при оценке. За январь 2013 г. на 10 станциях канадской метеорологической сети наблюдалось 48 случаев метели разной продолжительности.

Результаты работы параметризации приземного слоя с включением метелей

На рис. 2 показан пример рассчитанного поля концентрации твердой фазы метели на нижнем модельном уровне для 12 ч ВСВ 12 января. Метель разной интенсивности охватывает значительную часть области. Как было сказано выше, наличие метели ведет к уменьшению интенсивности турбулентности, а как следствие – к увеличению скорости ветра. На рис. 3 показана разница в прогнозах скорости ветра в экспериментах «метель» и «полярный» в этот же момент времени. Области увеличения скорости ветра в целом совпадают с областями возникновения метелей, что говорит об адекватности включения обратной связи метели на режим атмосферного пограничного слоя.

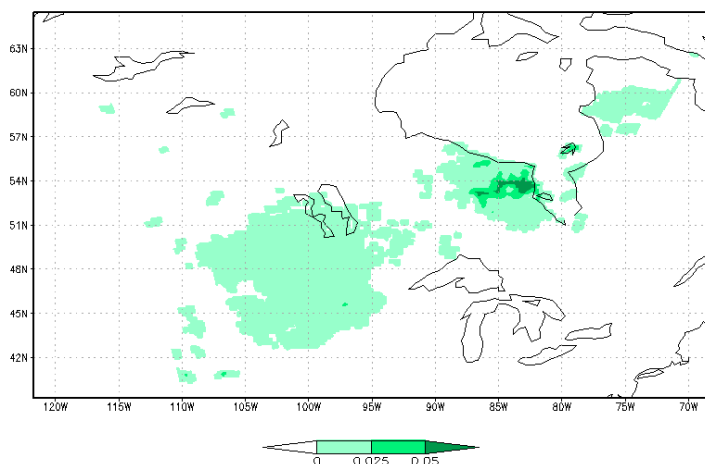


Рис. 2. Концентрация твердой фазы метели на нижнем модельном уровне ($\text{кг}/\text{м}^3$) построенная для 12 ч ВСВ 12 января.

Fig. 2. The concentration of the solid phase of a blizzard at the lower model level (kg/m^3) built for 12 h January 12.

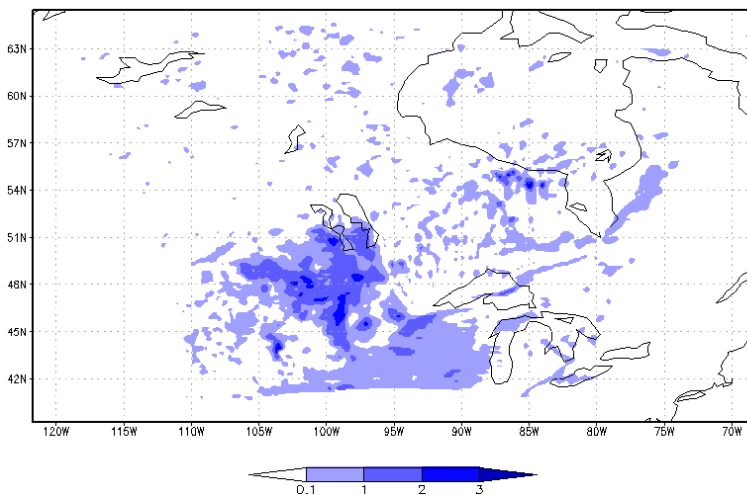


Рис. 3. Разница в прогнозах скорости ветра в экспериментах «метель» и «полярный», построенная для 12 ч ВСВ 12 января.

Fig. 3. The difference in forecasts of wind speed in the experiments "blizzard" and "polar", built for 12 h January 12.

На рис. 4 приведен пример прогноза скорости ветра на станции Еставан для временного периода с 12 ч ВСВ 8 января по 12 ч ВСВ 12 января. За этот период на станции отмечено две метели (выделены синими линиями). Данные наблюдений подтверждают увеличение ветра при метелевом переносе. По графику хорошо видно, что данные эксперимента «метель» в период ветрового подъема снега оказываются ближе к наблюдениям.

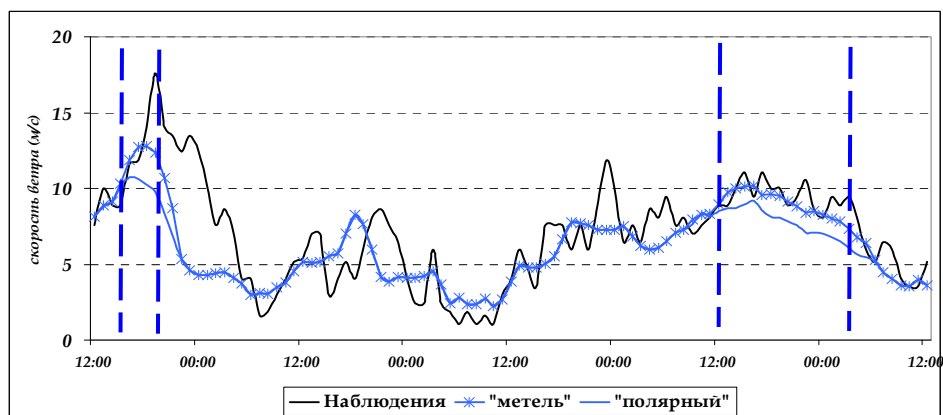


Рис. 4. Скорость ветра, построенная по данным наблюдений на станции Естеван и полученная по данным двух экспериментов.

Fig. 4. Wind speed based on observations at Estevan station and obtained from two experiments.

Оценка качества прогноза метели

При оценке качества диагностики факта начала метели было использовано следующее предположение. Начало метели считалось предсказанным, если разница во времени начала метели по экспериментальным данным и данным наблюдений составляла 3 ч и менее. Таким образом из 48 случаев было верно предсказано 40. Отметим, что в данном случае речь идет о метелях разной продолжительности. В табл. 1 представлены оценки прогноза факта метели без указания на продолжительность.

Таблица 1. Оценки прогноза факта метели

Table 1. Estimates of the forecast of the fact of a snowstorm

Показатель	Количество метелей
Было всего метелей на станциях	48
Верно предсказанные метели	40
Не предсказанные метели	8
Ошибочно предсказанные метели	9

Рассмотрим далее качество прогноза продолжительности метели. Оценки прогноза продолжительности метели разделены на три градации: первая – продолжительность метели, рассчитанной по модели, отличается от наблюдавшейся не более чем на 30 %, вторая – не более чем на 60 %, третья – остальные случаи.

Продолжительность 27 метелей (из 40 верно предсказанных метелей) отличается от наблюдавшейся продолжительности не более чем на 30 %, продолжительность 10 метелей – не более чем на 60 %. И только продолжительность 3 случаев прогноза метелевого переноса существенно отличается от зафиксированной на станции (более чем на 60 %). Анализируя данные моделирования можно говорить о том, что наблюдается небольшая тенденция к завышению продолжительности метели.

Наилучшее качество прогноза факта наличия метели и ее продолжительности отмечено в точках станций Реджайна, Тимминс и Черчилл. Географическая характеристика у трех пунктов различная: Реджайна расположен в предгорьях Скалистых гор, Черчилл находится на берегу Гудзонова залива, а Тимминс расположен на равнине, в радиусе 500 км от водных объектов.

Анализ оценок качества прогнозирования и диагностики факта начала метели с помощью представленного алгоритма выявил весьма хорошее качество прогнозов, а также универсальность в использовании алгоритма для разных типов ландшафта, встречающихся в средних и высоких широтах.

В табл. 2 представлены стандартные показатели качества прогноза метелевого переноса. В данном случае ежечасно оценивались прогнозы наличия метели. Если в конкретный час наличие/отсутствие метели прогнозировалось и наблюдалось, прогноз считался оправдавшимся. Всего на 10 станциях за январь 2013 г. было 7440 наблюдений. В таблице приведены средненные оценки качества по 10 станциям.

Таблица 2. Оценки качества прогноза метелевого переноса
Table 2. Estimates of the quality of the forecast of snowstorm transfer

Показатель качества	Значение
Общая оправдываемость метели	0.93
Оправдываемость наличия метели	0.53
Оправдываемость отсутствия метели	0.96
Предупрежденность прогноза метели	0.66
Предупрежденность прогноза отсутствия метели	0.95
Критерий Пирси-Обухова	0.61

Показатели качества прогнозов наличия метели рассчитаны по методическим указаниям оценки надежности методов, прогнозирующих факт метеорологических явлений, таких как метель, гололед, град [4]. Показатели качества прогнозов наличия метели достаточно высоки, критерий Пирси-Обухова составил 0,61. Как указано в Методических указаниях [4], прогнозы, характеризующиеся критерием Н.А. Багрова выше 0,33, являются надежными. В данном случае критерий Н.А. Багрова составил 0,5.

Как было указано выше, метелевый перенос влияет на многие метеорологические характеристики нижнего слоя атмосферы: скорость ветра, температуру, турбулентные потоки тепла и влаги, изменяет микрорельеф и плотность снега и пр. Но оценить качество прогнозирования всех метеорологических элементов в период метели не представляется возможным. Оценить качество прогноза турбулентных потоков скрытого и явного тепла, а также плотности снежного покрова возможно при наличии специализированных данных наблюдений. Однако подобные метеорологические наблюдения проводятся редко. При подготовке данной работы не удалось получить интересующие ряды наблюдений за плотностью снега и характеристиками турбулентного обмена. Масштаб сублимационного понижения температуры относительно мал – до 1 °С, в среднем 0,4 °С. В практике работы с моделями оценить вклад сублимационного охлаждения, масштаб которого одного порядка с точностью измерений температуры, крайне затруднительно. Масштаб изменения скорости ветра вполне позволяет оценить качество прогноза динамики нижнего слоя атмосферы при низовой метели. Результаты сравнения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели качества прогноза скорости ветра, рассчитанного для эксперимента «метель» и «полярный». MID – средняя абсолютная ошибка, MAX – максимальная, DISP – дисперсия ошибки

Table 3. Indicators of the quality of the forecast of wind speed calculated for the experiment "blizzard" and "polar". MID is the average error, MAX is the maximum error, DISP is the error variance

Станция	Эксперимент «метель»			Эксперимент «полярный»		
	MID	MAX	DISP	MID	MAX	DISP
Черчилл	<u>2.0</u>	4.9	2.5	2.2	5.0	2.4
Тимминс	<u>2.28</u>	6.3	4.3	3.25	6.7	2.5
Лак-Сеул	2.7	5.1	2.5	2.7	5.1	2.4
Реджайна	<u>1.9</u>	7.2	3.6	2.7	7.4	3.7
Киндерсли	<u>3.3</u>	4.8	1.7	3.6	5.7	2.2
Капускейсинг	<u>2.9</u>	8.7	3.3	3.6	10.0	4.3
Естевань	<u>2.5</u>	5.7	2.1	2.6	8.3	3.5
Гиллам	1.8	4.2	1.7	1.8	4.2	1.8
Тендер-Бей	1.9	4.9	5.4	<u>1.3</u>	3.5	5.5
Лондон	3.6	9.5	5.0	<u>3.2</u>	10.3	4.8

В большинстве случаев использование параметризации приземного слоя с включенным в него описанием низовой метели улучшает прогноз скорости ветра. Особенно ярко улучшения проявились на станциях Капускейсинг, Реджайна и Тимминс. Напомним, что нахождение твердой фазы в воздухе (снежинок) приводит к более быстрому (в отличии от «чистого» потока) росту скорости с увеличением расстояния от подстилающей поверхности. Численное описание этого процесса в эксперименте «метель» и позволяет приблизить прогнозы к наблюдаемым значениям.

В некоторых случаях качество прогноза ветра у эксперимента «метель» не превышает или уступает эксперименту «полярный». Это связано с тем, что модель WRF-ARW статистически завышает скорость потока. Для станций Лак-Сеул и Лондон завышение превышает 80 %. В таких случаях процедура увеличения скорости за счет метели не влечет за собой улучшение качества прогноза, хотя и с физической точки зрения верна.

Выводы

В статье предложена параметризация приземного слоя с включенным численным описанием процессов возникновения и эволюции метели. При наличии благоприятных условий для развития метелевой деятельности снег с поверхности поднимается в приземный слой, что приводит к включению обратных связей на режим приземного слоя.

Для оценки успешности работы предлагаемой параметризации с моделью WRF-ARW проведено две серии экспериментов. Первая серия экспериментов «метель» подразумевает использование параметризации приземного слоя с включением в него процессов метелевого переноса. Вторая серия экспериментов «полярная» использует стандартную параметризацию приземного слоя. Остальные параметры конфигурации модели WRF-ARW у двух серий экспериментов идентичны.

Прогноз факта метели можно считать вполне успешным. Осредненные показатели качества прогноза по рассматриваемым синоптическим данным составили: критерий Пирси-Обухова – 0,61, критерий Н.А. Багрова – 0,5. Согласно [4], подобные численные значения указанных критериев указывают на весьма удовлетворительное качество прогнозов. В большинстве случаев использование параметризации приземного слоя с включенным в него описанием низовой метели улучшает прогноз скорости ветра. Нахождение твердой фазы в воздухе (снежинок) приводит к более быстрому (в отличии от «чистого» потока) росту скорости с увеличением расстояния от подстилающей поверхности. Численное описание этого процесса в эксперименте «метель» и позволяет приблизить прогнозы к наблюдаемым значениям.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 18-35-00044 мол_а, 16-05-00822 а.

Список литературы

1. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика. 1953. Том.17, вып. 3. С. 261–274.
2. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. М.: Изд-во МГУ, 1973. 44 с.
3. Бычкова В.И., Рубинштейн К.Г. Параметризация процессов возникновения и эволюции низовой метели // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 143-150.
4. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. 145 с.
5. Bintanja R. The interaction between drifting snow and atmospheric turbulence // Ann. Glaciol. 1997. Vol. 26. P. 167-173.
6. Coniglio, M.C., Correia Jr.J., Marsh P.T., Kong F. Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations // Wea. Forecast. 2013. Vol. 28. P. 842-862,
7. Decker R., Brown L. Two dimensional solutions for a turbulent continuum theory for the atmospheric mixture of snow and air // Ann. Glaciol. 1985. Vol. 6. P. 53-58.
8. Déry S.J., Yau M.K. A BULK blowing snow model // Boundary-Layer Meteorology. 1999. Vol. 93. P. 237-251.
9. Gauder P. Blowing and Drifting Snow in Alpine Terrain: A Physically-Based Numerical Model and Related Field measurements. Swiss federal institute of technology, Zurich, 1999.
10. Giannakopoulou E.-M., Nthili R. WRF model methodology for offshore wind energy applications // Adv. Meteorol. 2014. Vol. 9. P. 1-14. DOI: 10.1155/2014/319819.
11. Li L., Pomeroy J.W. Estimates of threshold wind speeds for snow transport using meteorological data division of hydrology // J. Appl. Meteorol. Clim. 1997. Vol. 36. P. 205-213.
12. Ma Lei-Ming, Zhe-Min Tan. Improving the behavior of the cumulus parameterization for tropical cyclone prediction: Convection trigger // Atmos. Res. 2009. Vol. 92. P. 190-211.
13. Masselot A., Chopard B. A lattice Boltzmann model for particle transport and deposition // Europhys. Lett. 1998. Vol. 100, no. 6. P. 1-15.

14. Nakanishi M., Niino H. An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog // *Boundary-Layer Meteorology*. 2006. Vol. 119, no. 2. P. 397–407.
15. Skamarock W.C., Klemp J.B. A Time-Split Non-Hydrostatic Atmospheric Model // *Journal of Computational Physics*. 2008. Vol. 227. P. 3645–3485.
16. Tewari, M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H. 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, 2004. P. 11–15.
17. Thompson G., Field P.R., Rasmussen R.M., Hall W.D. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 5095–5115.

References

1. Barenblatt G.I. O dvizhenii vzveshennykh chastic v turbulentnom potoke. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1953, vol.17, no. 3, pp. 261–274 [in Russ.].
2. Barenblatt G.I., Golitsyn G.S. Lokal'naya struktura razvitykh pyl'nykh bur'. Moscow, Moscow State University publ., 1973, 44 p. [in Russ.].
3. Bychkova V.I., Rubinshtein K.G. The parameterization of blowing snow beginning and evolution. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2018, vol. 31, no. 2, pp. 143–150 [in Russ.].
4. RD 52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliofizicheskikh prognozov. 145 p. [in Russ.].
5. Bintanja R. The interaction between drifting snow and atmospheric turbulence. *Ann. Glaciol.*, 1997, vol. 26, pp. 167–173.
6. Coniglio, M.C., Correia Jr.J., Marsh P.T., Kong F. Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations. *Wea. Forecast.*, 2013, vol. 28, pp. 842–862.
7. Decker R., Brown L. Two dimensional solutions for a turbulent continuum theory for the atmospheric mixture of snow and air. *Ann. Glaciol.*, 1985, vol. 6, pp. 53–58.
8. Déry S.J., Yau M.K. A BULK blowing snow model. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, vol. 93, pp. 237–251.
9. Gauder P. Blowing and Drifting Snow in Alpine Terrain: A Physically-Based Numerical Model and Related Field measurements. Swiss federal institute of technology, Zurich, 1999.
10. Giannakopoulou E.-M., Nhili R. WRF model methodology for offshore wind energy applications. *Adv. Meteorol.*, 2014, vol. 9, pp. 1–14. DOI: 10.1155/2014/319819.
11. Li L., Pomeroy J.W. Estimates of threshold wind speeds for snow transport using meteorological data division of hydrology. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 1997, vol. 36, pp. 205–213.
12. Ma Lei-Ming, Zhe-Min Tan. Improving the behavior of the cumulus parameterization for tropical cyclone prediction: Convection trigger. *Atmos. Res.*, 2009, vol. 92, pp. 190–211.
13. Masselot A., Chopard B. A lattice Boltzmann model for particle transport and deposition. *Europhys. Lett.*, 1998, vol. 100, no. 6, pp. 1–15.
14. Nakanishi M., Niino H. An improved Mellor–Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, vol. 119, no. 2, pp. 397–407.
15. Skamarock W.C., Klemp J.B. A Time-Split Non-Hydrostatic Atmospheric Model // *Journal of Computational Physics*, 2008, vol. 227, pp. 3645–3485.
16. Tewari, M., Chen F., Wang W., Dudhia J., LeMone M.A., Mitchell K., Ek M., Gayno G., Wegiel J., Cuenca R.H. 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, 2004, pp. 11–15.
17. Thompson G., Field P.R., Rasmussen R.M., Hall W.D. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, pp. 5095–5115.

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

Received by the editor 06.12.2019.