

УДК 551.509

П.А.Торопов¹, А.А. Шестакова²**ТЕСТИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ (WRF) ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗА НОВОРОССИЙСКОЙ БОРЫ³**

Исследована возможность использования мезомасштабной негидростатической версии модели WRF-ARW для прогноза новороссийской бory. Выполнено 8 численных экспериментов с разными граничными и начальными условиями, параметризациями физических процессов и разрешением расчетной сетки. Большой объем натурных данных, полученных в ходе экспедиционных исследований новороссийской бory, позволил выполнить достаточно детальные оценки результатов моделирования. На основе этих оценок обоснован подбор оптимальной конфигурации модели для численного моделирования новороссийской бory.

Ключевые слова: черноморское побережье Кавказа, новороссийская бора, мезомасштабные процессы, мезомасштабная модель WRF-ARW, параметризации, ветры подветренных склонов.

Введение. Интерес к новороссийской боре определяется ее исключительной опасностью. Это явление часто сопровождается ураганым ветром и сильным морозом, что нередко становится причиной крупного ущерба и человеческих жертв на Черноморском побережье Кавказа. Бора, как правило, наблюдается в холодное полугодие, в период с октября по апрель, и связана с ультраполярными вторжениями на юг европейской территории России. Горизонтальный масштаб явления составляет несколько десятков километров, вертикальный — несколько сотен метров [3]. В статье [10] дан обзор всех работ по исследованию физического механизма возникновения бory. На сегодняшний день большинство исследователей относят бору к разновидности “ветров подветренных склонов” (down-slope windstorms). Такие ветры наблюдаются во многих районах мира, наиболее изучены адриатическая бора [9, 10] и ветры на восточных склонах Скалистых гор (Боулдер, США) [11, 12, 15].

Постановка проблемы. Среди актуальных работ, так или иначе посвященных моделированию новороссийской бory, отметим статьи [1, 4, 20]. Однако в перечисленных работах отсутствует детальная оценка результатов моделирования по большой выборке натурных данных, не обоснованы результаты выбора той или иной конфигурации модели, нет детального анализа физических механизмов возникновения явления. Нами изучение новороссийской бory проводится на основе большого объема измерений, проведенных в ходе экспедиции кафедры метеорологии и климатологии МГУ в 2012 г., что позволяет детально оценить качество прогноза этого явления с помощью модели WRF-ARW. При этом решена задача подбора оптимальной конфигурации модели для воспроизведения новороссийской бory.

Материалы и методы исследований. Описание данных наблюдений. Рассмотрен случай сильной новороссийской бory, которая наблюдалась 26—28 января 2012 г. На рис. 1 показана сеть станций, которые использовались для оценки моделирования бory. Массив данных включал:

1) данные регулярных наблюдений на станциях Росгидромета (Крымск, Геленджик, Новороссийск), которые представляют собой стандартные стационарные наблюдения с дискретностью 3 ч. на высоте 2 м над поверхностью. Скорость ветра измеряется на уровне 10 м и осредняется за 10 мин.;

2) данные портовой службы Новороссийского порта (сеть из 5 действующих ветровых датчиков, размещенных по всему побережью Цемесской бухты (рис. 1), измерения проводятся с дискретностью 2 мин., высота измерений 10 м);

3) данные наблюдательной сети, созданной в зимней экспедиции научного студенческого общества (НСО) кафедры метеорологии и климатологии. Эти экспедиции проводятся ежегодно с 2005 г. 26 января—5 февраля на базе Южного отделения ИО РАН имени Ширшова в Геленджике. Наблюдательная сеть в 2012 г. состояла из автоматических метеостанций “Davis Vantage Pro”, частота наблюдений — 5 мин.

Изучение бory затруднительно без данных о вертикальной структуре потока с наветренной стороны хребта, т.е. натекающего потока [7, 8, 19]. Поскольку аэрологические наблюдения в области исследований отсутствуют, нами привлечены данные реанализа MERRA. Горизонтальное разрешение этих данных составляет $2/3^\circ$ по широте и $1/2^\circ$ по долготе, что, конечно, слишком грубо для задач, связанных с оценкой моделирования такого локального и пространственно неоднородного явления, как бора. Тем не менее

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: tormet@inbox.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, студент; e-mail: anilkrokodil@mail.ru

³ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-31508).

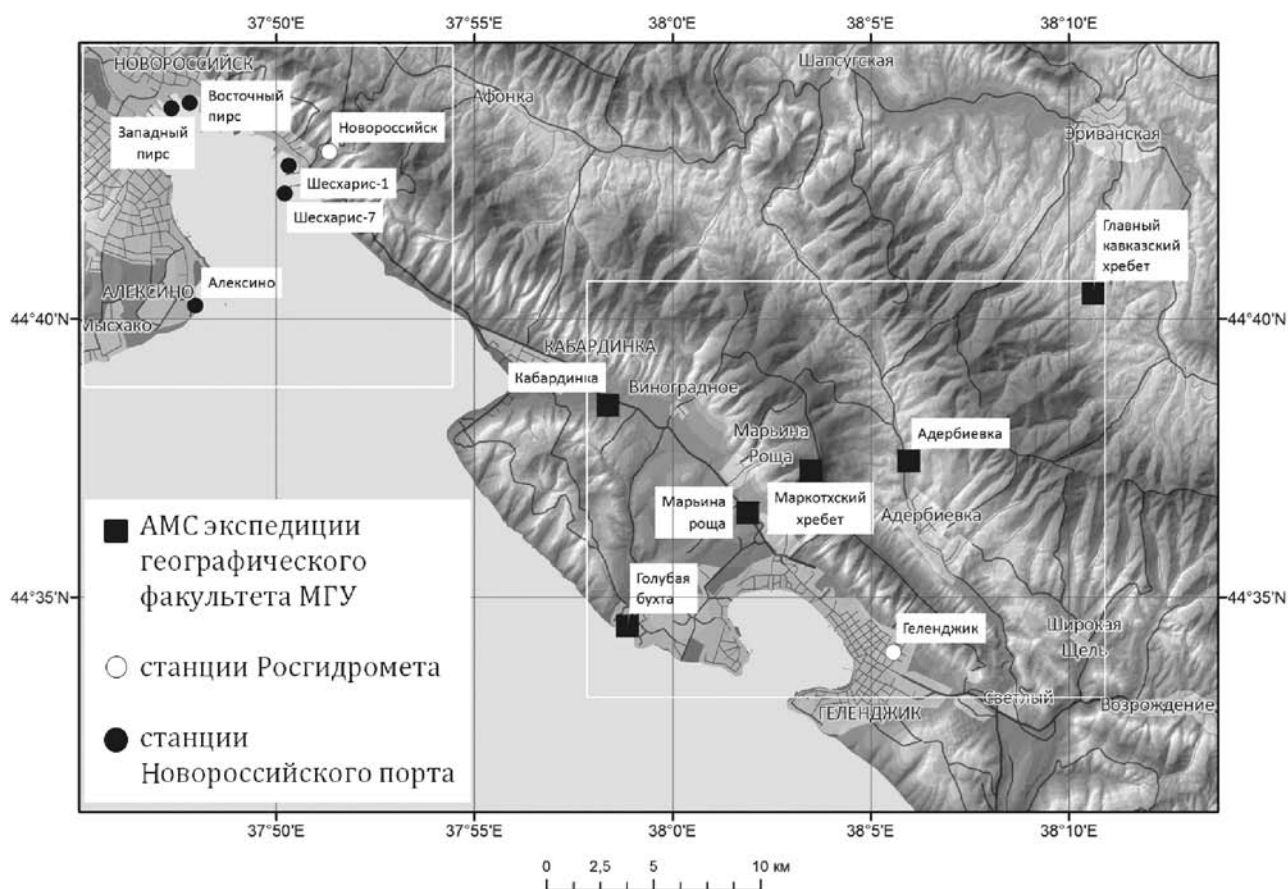


Рис. 1. Точки станций сети Росгидромет, ветровой сети новороссийского порта и автоматические метеостанции (АМС) экспедиции географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

использование этих данных можно считать правомерным, так как натекающий поток в случае новороссийской боры не возмущен горными препятствиями и относительно однороден. Для сравнения с результатами моделирования выбрана точка, расположенная далеко от боковых границ расчетной области и на удалении около 50 км от наветренной стороны Кавказского хребта.

Бора 27 января 2012 г. возникла на фоне ультраполярного вторжения на южной периферии обширного антициклона с центром над северной частью Западной Сибири; давление в центре антициклона превышало 1060 гПа. Средняя по всем подветренным станциям скорость ветра во время боры составила 14 м/с, максимальные значения средней скорости наблюдались непосредственно у подножия подветренного склона — на станциях в Новороссийском порту (до 35 м/с) и станции «Марьяна Роша» (до 25 м/с).

Натекающий поток имел во время боры следующую структуру: нижний, нейтрально стратифицированный слой до высоты 350 м, слой приподнятой инверсии 400–1500 м, выше тропосфера имеет слабо неустойчивую стратификацию. Причина образования инверсии, вероятно, заключается в оседании воздуха в антициклоне. На профиле скорости ветра хорошо видно два максимума — на высоте 1 км, в слое инвер-

сии (низкотропосферное струйное течение, образующееся, согласно одной из гипотез [5], в результате незатухающих инерционных колебаний), и на уровне тропопаузы, соответствующий струйному течению.

Методика оценок численного прогноза по модели WRF-ARW. Точность прогноза моделью WRF-ARW скорости ветра во время боры оценивалась по таким количественным статистическим характеристикам, как коэффициент корреляции с натурными данными, средняя абсолютная ошибка, максимальная ошибка, среднеквадратичное отклонение (СКО) для каждой станции. В табл. 1, 2 указаны перечисленные параметры, осредненные по всем станциям. Кроме того, выполнен качественный анализ эмпирической функции распределения ошибок «прогноза», пространственного распределения скорости ветра, временного хода скорости ветра на разных станциях по данным наблюдений и по результатам моделирования, воспроизведение моделью вертикальных профилей температуры и скорости ветра путем сравнения с профилями реанализа MERRA.

Результаты моделирования предварительно билинейно интерполировались из узлов расчетной сетки в точки станций или в точку, для которой проводилась оценка моделирования профилей скорости ветра и температуры.

Таблица 1

Краткие характеристики проведенных численных экспериментов*

Начальное время	Номер эксперимента	Пространственное разрешение	Порядок адвекции	Параметризации		Начальные данные
				Пограничный слой	Микрофизика облаков	
26 января 2012 г. 00:00	1	1 км	4-й	BouLac	Thompson	Реанализ FNL $1^\circ \times 1^\circ$
	2	2 км	4-й	MYNN	WSM 6-class	
	3	2 км	6-й	MYNN	WSM 6-class	
	4	1 км	2-й	MYNN	WSM 6-class	
	5	1 км	4-й	MYNN	WSM 6-class	
	6	1 км	6-й	MYNN	WSM 6-class	
	7	1 км	4-й	MYNN	Thompson	
26 января 2012 г. 12:00	8	1 км	4-й	MYNN	Thompson	Прогноз GFS $0,5^\circ \times 0,5^\circ$

* Полу жирным шрифтом выделены характеристики эксперимента, который наиболее удачно воспроизвел явление новороссийской боры.

Таблица 2

Статистические характеристики успешности “прогноза”, осредненные по всем станциям, для численных экспериментов, указанных в табл. 1

Параметр	Номер эксперимента							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициент корреляции (мода)	0,4 (30)*	0,5 (30)	0,6 (35)	0,4 (35)	0,4 (35)	0,6 (20)	0,4 (30)	0,4 (20)
Средняя абсолютная ошибка, м/с	7,5	5,4	5,7	5,4	5,3	5,6	5,3	5,6
Максимальная ошибка, м/с	18,1	14,4	14	14,9	14,9	14,7	14,5	14,4

* В скобках — вероятность данного значения, %.

Следует отметить, что значения ошибок моделирования, осредненных для всех станций и приведенных в табл. 2, — репрезентативный показатель качества моделирования, так как распределение ошибок нормальное, а среднее стремится к математическому ожиданию величины. Этого нельзя сказать о значениях коэффициента корреляции, которые необходимо изучать для каждой станции, их осреднение не вполне правомерно, поэтому в табл. 2 приведены модальные (наиболее повторяемые) значения.

Описание численных экспериментов. Для изучения новороссийской боры кроме данных наблюдений использована мезомасштабная негидростатическая модель WRF-ARW (США). Первый численный эксперимент по моделированию этого явления с помощью указанной модели описан в работах [4, 20], он проводился для случая боры 27 января 2012 г. Однако точность “прогноза”⁴ скорости ветра оказалась низкой, поэтому нами были рассмотрены другие параметры, которые могли бы улучшить “прогноз”.

Среди основных факторов, влияющих на точность воспроизведения полей метеорологических величин во время боры, рассмотренных нами, а также в других исследованиях [11, 16], отметим горизонтальное разрешение модели, порядок дискретизации

адвективных членов, параметризацию микрофизики облаков, параметризацию турбулентности и пограничного слоя атмосферы.

Горизонтальное разрешение модели. Исходя из соображений масштабов явления горизонтальный шаг сетки модели не должен превышать 10 км, а для удовлетворительного разрешения рельефа местности в исследуемом районе шаг сетки не должен превышать 1—2 км. Были реализованы две серии численных экспериментов — с шагом 1 и 2 км, число вертикальных уровней выбрано равным 40 (из них 15 — в пределах пограничного слоя), что вполне соответствует пространственной изменчивости явления.

Порядок дискретизации адвективных членов. Влияние порядка адвекции (здесь и далее под порядком адвекции понимается порядок дискретизации адвективных членов в системе уравнений движения) на результат моделирования подробно исследовано в работе [15]. В настройках модели WRF-ARW V3.4.1. адвекция импульса, скаляров и геопотенциала может осуществляться от 2-го до 6-го порядка точности пространственной дискретизации [18]. Нами реализованы три серии экспериментов: со 2, 4 и 6-м порядком адвекции.

⁴ Слово “прогноз” в кавычках, так как во всех экспериментах (кроме одного) в качестве начальных и граничных условий служили данные реанализа FNL, а не прогноз по модели GFS.

Параметризация микрофизики облаков. В работе [16] исследовано влияние разных схем параметризаций микрофизических процессов в облаках на прогноз ветров подветренных склонов. На основе результатов, полученных в [16], был сделан вывод о необходимости использовать схемы WSM 6 и Томпсона в качестве наиболее полных и сложных. Кроме того, схема Томпсона признана лучшей при прогнозе подветренной бури в работе [16].

Параметризация турбулентности и пограничного слоя атмосферы. Численные эксперименты проводились с использованием замыкания 1-го порядка Смагоринского (двумерное). Эксперименты с трехмерным турбулентным замыканием требуют больших затрат времени и высокого пространственного разрешения (<1 км); такие замыкания подходят для LES-моделирования. С другой стороны, К-модель, основанная на постоянстве коэффициента диффузии, слишком упрощенная. В двумерном замыкании Смагоринского часть уравнений решается явно (для двумерной диффузии), а часть (для вертикальной диффузии) параметризуется. Выполнены две серии экспериментов с параметризациями пограничного слоя BouLac (Bougeault и Lacarrere, 1989) и MYNN (схема Меллора—Ямады уровня 2.5). Обе схемы основаны на уравнениях для турбулентной кинетической энергии. Подробнее со схемами параметризации турбулентности, которые используются в модели WRF-ARW, можно ознакомиться, например, в [17].

Таким образом, на основе опыта многочисленных исследований по выбору параметризаций в задачах численного моделирования ветров подветренных

склонов, а также из логических соображений нами выполнен ряд численных экспериментов (табл. 1) для формирования окончательной конфигурации модели WRF-ARW [13, 18] для задач, связанных с исследованием новороссийской боры.

В качестве начальных и граничных условий использованы глобальные поля реанализа FNL модели GFS $1^\circ \times 1^\circ$ с временным разрешением 6 ч. [6]. Фактически все численные эксперименты в рамках нашей работы проводились по схеме усвоения 4DVAR. Один эксперимент (№ 8, табл. 1) проведен с усвоением в качестве граничных условий не реанализа, а прогноза GFS [14].

В качестве тестового выбран случай 27 января 2012 г. Все эксперименты (кроме № 1 и 8) осуществлялись на ПК INTEL (4 процессора). Эксперимент № 1 реализовывался на СК ALTIX (64 процессора) в Гидрометцентре РФ, № 8 — на ПК AMD (8 процессоров).

Результаты исследований и их обсуждение. Некоторые результаты экспериментов представлены на рис. 2, 3 и в табл. 2. Распределение ошибок для экспериментов № 2 и 3 оказалось схожим (так как порядок адвекции, как будет показано ниже, слабо влияет на результаты моделирования новороссийской боры), поэтому на рис. 2 представлен только эксперимент № 3; аналогично для экспериментов № 4, 5 и 6 (представлен эксперимент № 4), а также № 7 и 8 (представлен эксперимент № 7). На рис. 3 ход скорости ветра по экспериментам № 2—6 слабо отличается (что свидетельствует также о незначительном влиянии выбора шага сетки между 1 и 2 км на результат моделирования), поэтому представлен лишь эксперимент № 4. В результате анализа численных экспериментов и их сравнения с натурными данными по вышеописанной методике получены следующие результаты:

— уменьшение шага сетки с 2 до 1 км дает незначительное, но статистически значимое улучшение прогноза скорости ветра — на 2 м/с (результат осреднения ошибок по данным 13 станций в пределах изучаемой области, рис. 1, табл. 2). Вместе с тем результаты эксперимента № 1 (с пространственным шагом 2 км) характеризуются более реалистичной временной изменчивостью скорости ветра во время боры (рис. 3), чем результаты эксперимента № 4 (с пространственным шагом 1 км). Так, среднеквадратичное отклонение скорости ветра по результатам эксперимента № 4 для точек Маркотхский хребет и Крымск составляет 1,5—2,5 м/с, что хорошо согласуется с натурными данными (рис. 3), в то время как СКО по результатам эксперимента № 4 в 2 раза больше — от 3 до 5 м/с. На подветренном склоне, характеризуемом точкой Восточный пирс, наблюдаются самые большие значения скорости ветра и вместе с тем самая значительная ее временная изменчивость (СКО составляет 7,5 м/с), что объясняется большой неоднородностью ветрового потока во время боры, связанной с периодическими “сбросами” масс холодного плотного воздуха, опрокидыванием подветренных волн, формированием под-

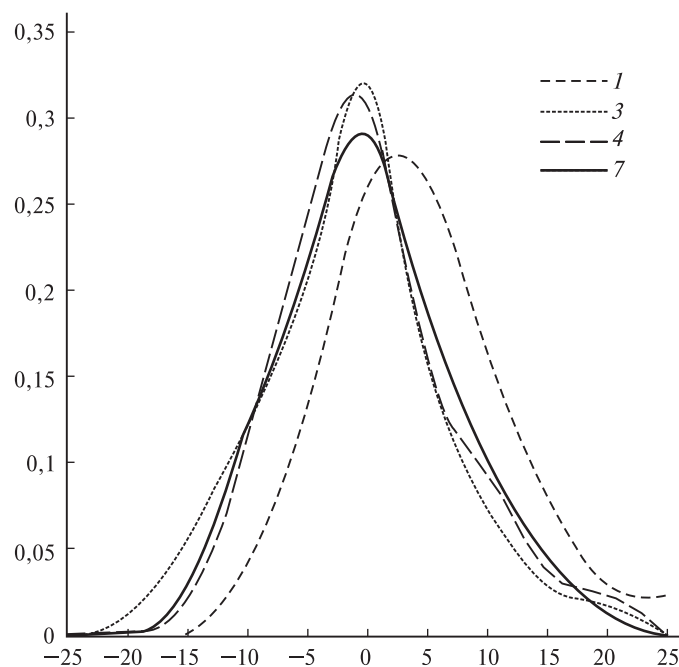


Рис. 2. Распределение ошибок “прогноза” скорости ветра (разность значений скорости ветра по данным наблюдений и по результатам моделирования) для нескольких экспериментов на всех станциях (пунктир); 1, 3, 4, 7 — номера экспериментов (см. табл. 1)

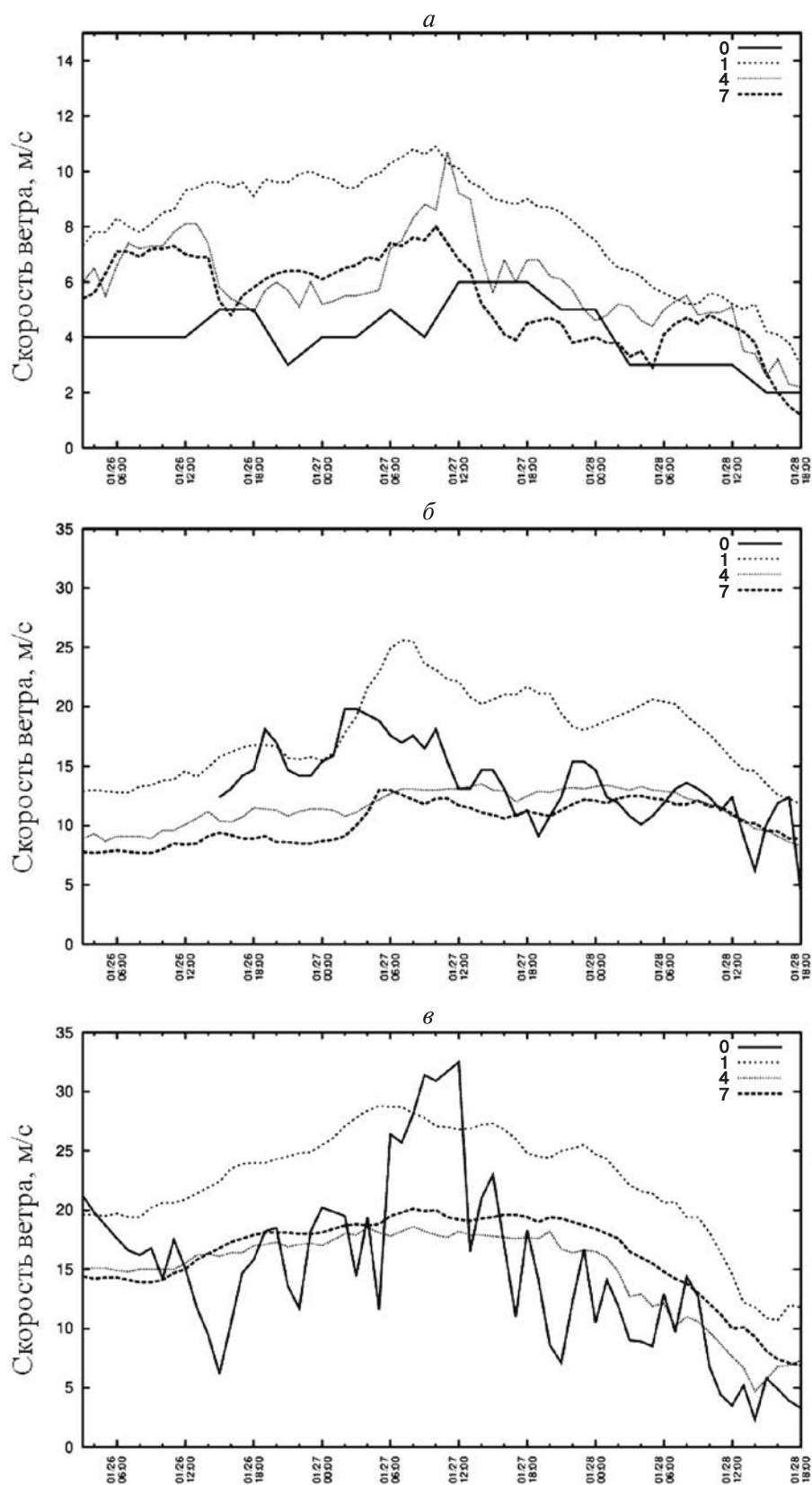


Рис. 3. Скорость ветра 26—28 января 2012 г. на станциях: *a* — Крымск, *б* — Маркотхский хребет, *в* — Восточный пирс по данным наблюдений (сплошная линия, или “0”) и по результатам моделирования (пунктир); 1, 4, 7 — номера экспериментов (см. табл. 1)

ветренного ротора и т.д. Ни один из численных экспериментов не воспроизвел эту изменчивость.

Таким образом, только высокое горизонтальное разрешение модельной сетки не позволяет достигнуть решительного успеха в численном прогнозе такого явления, как бора. Именно поэтому наряду с подбором пространственного разрешения эксперимента рассматривалось влияние параметризаций планетарного пограничного слоя, микрофизики облаков и дискретизации адвективных членов;

— оказалось, что порядок дискретизации адвективных членов мало влияет на величину приземной скорости ветра. Вместе с тем вертикальная структура при расчетах с адвекцией 2-го порядка существенно отличается от таковой при адвекции 4-го и 6-го порядка (вплоть до того, что при адвекции 2-го порядка ветер с высотой меняет направление с северного на южное). Адвекция 4- и 6-го порядка дает результаты, в большей степени соответствующие фактическим данным. Это объясняется в общем случае тем, что чем выше порядок численной схемы, описывающей перенос импульса, тем точнее будет восстановлено трехмерное поле скорости. В пределах пограничного слоя атмосферы влияние этого эффекта размывается на фоне вклада более весомых факторов, таких, как параметризация турбулентного обмена, фазовые переходы влаги (при боре они осуществляются в пределах пограничного слоя). По всей видимости, этим и объясняется отсутствие влияния порядка адвекции на величину приземной скорости ветра и, наоборот, осязаемое влияние на скорость ветра в свободной атмосфере, что отражается на изменении профиля ветра;

— влияние параметризаций микрофизики облаков на “прогноз” приземной скорости ветра невелико, хотя эксперименты со схемой Томпсона (№ 7) на большинстве станций дают несколько лучшие результаты, чем со схемой WSM6 (№ 2—6) (рис. 3). Однако это улучшение (в среднем на 0,5—1 м/с) нельзя считать статистически значимым. Вместе с тем преждевременно делать вывод о малой роли схемы параметризации микрофизики облаков, в частности принимая во внимание данные работы [16], в которой показано, что подветренные бури в Скалистых горах воспроизводятся ощутимо лучше при использовании параметризации Томпсона. Скорее всего, для выяснения роли параметризации микрофизики облаков недостаточно использовать результаты воспроизведения одного случая боры. В частности, “неуспех” выявления параметризации мог быть связан с тем, что в случае боры 26—28 января 2012 г. воздух, перетекающий через хребты, был далек от состояния насыщения, вал фоновых облаков не образовывался либо был выражен слабо (что подтверждается результатами визуальных наблюдений облачности в экспедиции НСО кафедры метеорологии МГУ). Конденсация водяного пара над горными хребтами, судя по всему, оказалась незначительной и по результатам численных экспериментов. Таким образом, не проявилось влияние параметризации микрофизики облаков;

— влияние параметризаций пограничного слоя атмосферы на прогноз приземной скорости ветра, напротив, велико, средняя ошибка при использовании схемы MYNN уменьшилась почти в 1,5 раза, максимальная — в 1,2, а СКО — в 1,3 раза по сравнению со схемой BouLac. Этот результат имеет четкое физическое обоснование. Бора — явление, которое развивается в пограничном слое, поэтому схема его параметризации может играть ключевую роль при моделировании процесса. Схема MYNN — одна из наиболее детальных и развитых, поэтому улучшение результатов прогноза неудивительно (хотя априори не очевидно, необходимы численные эксперименты, которые и были выполнены нами);

— результаты эксперимента с усвоением в качестве граничных условий прогностической информации GFS практически не отличаются от результатов эксперимента с усвоением данных реанализа FNL (табл. 2). Подчеркнем, что в общем случае прогностические поля метеорологических величин содержат больше ошибок, чем такие же поля данных реанализа. Полученный результат позволяет надеяться на успешность оперативного прогноза новороссийской боры;

— для всех численных экспериментов эмпирическая функция распределения ошибок скорости ветра близка к нормальной (рис. 2). Почти для всех экспериментов ошибка модели распределена от –5 до 5 м/с с вероятностью 70%, а мода приходится на 0 м/с (кроме эксперимента № 1), что свидетельствует об отсутствии систематических ошибок численного моделирования боры.

По итогам сравнения была выбрана наилучшая конфигурация, соответствующая численному эксперименту № 7, т.е. шаг сетки 1 км, порядок адвективных членов 4, параметризация микрофизики Томпсона и пограничного слоя атмосферы MYNN, которая дает “прогноз” скорости ветра в среднем в 1,5 раза, а на некоторых станциях (например, в Геленджике) в 3 раза более точный, чем рассчитанный с конфигурацией “по умолчанию” (эксперимент № 1).

Выводы:

— из всех исследованных параметризаций модели наибольшее влияние на результат численного моделирования боры оказывает параметризация пограничного слоя атмосферы и турбулентности, что свидетельствует о чувствительности явления к описанию пограничного слоя;

— различия между экспериментами с усвоением в качестве граничных и начальных условий реанализа и прогноза глобальной модели невелики, что в будущем позволит применять прогноз WRF в оперативной практике, используя результаты прогноза в прикладных целях (для расчета рисков, ветровых нагрузок, морского волнения, обледенения судов и т.д.);

— оценки точности прогноза скорости ветра во всех экспериментах в точках метеостанций показали, что ошибки модели с вероятностью 70% находятся в пределах ± 5 м/с. Такие значения ошибок соответствуют интервалу допусков [2] в прогнозе скорости

ветра на сутки (прогноз дается обычно в интервале 5 м/с, а допустимой ошибкой считаются отклонения от минимальной и максимальной границы интервала на ± 2 м/с). Таким образом, результаты воспроизведения скорости ветра при боре моделью WRF-ARW можно считать удовлетворительными. Однако нельзя забывать, что максимальные значения ошибок в точках станций могут превышать 15 м/с с вероятностью 1–3%. Также следует отметить, что в данном случае речь идет о прогнозе в конкретных точках в орографически сложном районе. В среднем для расчетной области величина ошибки составляет 4–5 м/с, т.е. прогноз можно считать успешным;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.В., Барабанов В.С. Моделирование новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 2013. Т. 38, № 3. С. 171–176.
2. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.
3. Новороссийская бора / Под ред. А.М. Гусева // Тр. МГИАН СССР. 1959. Т. 14. 355 с.
4. Торопов П.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 2. С. 38–46.
5. Andreas E.L., Claffey K.J., Makshtas A.P. Low-level atmospheric jets and inversions over the western Weddell sea // Boundary-Layer Meteorology. 2000. Vol. 97. P. 459–486.
6. CISL Research Data Archive. URL: <http://rda.ucar.edu/> (дата обращения: 15.05.2013).
7. Durran D.R. Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep, continuously stratified fluid // J. Atmos. Sci. 1986. Vol. 43, N 21. P. 2527–2543.
8. Durran D.R., Klemp J.B. Another look at downslope windstorms. Part II: Nonlinear amplification beneath wave-overturning layers // J. Atmos. Sci. 1987. Vol. 44, N 22. P. 3402–3412.
9. Gohm A., Mayor G.J. Numerical and observational case-study of a deep Adriatic bora // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2005. Vol. 131. P. 1363–1392.
10. Grisogono B., Belusic D. A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora winds // Tellus. 2009. Vol. 61A, N 1. P. 1–16.
11. Jiang Q., Doyle J.D., Smith R.B. Interaction between trapped waves and boundary layers // J. Atmos. Sci. 2006. Vol. 63. P. 617–633.
12. Klemp J.B., Lilly D.K. The dynamics of wave-induced downslope winds // J. Atmos. Sci. 1975. Vol. 32. P. 320–339.
13. Mesoscale&Microscale Meteorology. URL: <http://www.mmm.ucar.edu> (дата обращения: 14.07.2013).
14. NOAA National Operational Model Archive & Distribution System. URL: <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php> (дата обращения: 10.09.2013).
15. Reinecke P.A. Mountain waves and downslope winds: Forecasts, Predictability, and Data Assimilation: Doctor of Philosophy. University of Washington, 2008. 131 p.
16. Rögnvaldsson Ó., Bao J.W., Ágústsson H. et al. Downslope windstorm in Iceland — WRF/MM5 model comparison // Atmos. Chem. Phys. 2011. Vol. 11. P. 103–120.
17. Shin H.H., Hong S.-Y. Intercomparison of planetary boundary-layer parametrizations in the WRF model for a single Day from CASES-99 // Boundary-Layer Meteorol. 2011. Vol. 139. P. 261–281.
18. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 NCAR // Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Res. Boulder, Colorado, USA, 2008. 113 p.
19. Smith C.M., Skillingstad E.D. Investigation of upstream boundary layer influence on mountain wave breaking and lee wave rotors using a large eddy simulation // J. Atmos. Sci. 2009. Vol. 66. P. 3147–3164.
20. Toropov P.A., Myslenkov S.A., Shestakova A.A. Numerical simulation of Novorossiysk bora and related waves using the WRF-ARW and SWAN models // Russ. J. Earth. Sci. 2012. Vol. 12. P. 1–7.

Поступила в редакцию
17.12.2013

П.А. Торопов, А.А. Шестакова

TESTING OF THE WRF MODEL FOR FORECASTING THE NOVOROSIYSK BORA

Possible application of a mesoscale non-hydrostatic version of the WRF-ARW model for forecasting the Novorossiysk bora is analyzed. Eight numerical experiments were carried out with different boundary and initial conditions, parameters of physical processes and resolution of computational grid. Large amount of data collected during field investigations of the Novorossiysk bora allowed thorough verification of the modeling results. Optimum configuration of the model for numerical modeling of the Novorossiysk bora was suggested basing on the evaluation.

Key words: the Caucasian coast of the Black Sea, the Novorossiysk bora, mesoscale processes, mesoscale WRF-ARW model, parametrization, downslope windstorms.