

УДК 519.688:551.515.2

С.О. РОМАНСКИЙ, Е.М. ВЕРБИЦКАЯ

Краткосрочный численный прогноз погоды высокого пространственного разрешения по Владивостоку на базе модели WRF–ARW

Приведено описание варианта модели WRF–ARW для системы краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) по Владивостоку (включая о-в Русский) с горизонтальным разрешением до 500 м и заблаговременностью прогноза до 3 сут. Обсуждаются сложные аспекты разработки системы ЧПП. Представлены оценки достоверности прогноза элементов погоды. Система ЧПП прошла успешную апробацию во время проведения саммита АТЭС осенью 2012 г. Предложены возможные пути повышения качества прогнозов в системах ЧПП, основанных на моделях семейства WRF–ARW.

Ключевые слова: краткосрочный прогноз погоды, мезомасштабная модель, WRF–ARW, Дальний Восток.

Short-term high-resolution numerical weather prediction based on WRF–ARW model on the territory of Vladivostok City. S.O. ROMANSKIY, E.M. VERBITSKAYA (Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Khabarovsk).

The paper presents description of short-term numerical weather prediction (NWP) system based on WRF–ARW model for Vladivostok (including the Russky Island) with grid distance up to 500 m and lead time up to 3 days. Complex aspects of developing NWP system are discussed. Forecasts' estimating is shown. The NWP system was successfully approved during APEC Summit in autumn 2012. Proposed possible techniques to improve forecast accuracy of NWP systems based on WRF–ARW models.

Key words: short-term weather prediction, mesoscale model, WRF–ARW, Far East.

Одной из базовых компонент прогнозирования погодных условий является численный (гидродинамический) расчет параметров состояния атмосферы и элементов погоды. В настоящее время созданы численные модели краткосрочного прогноза погоды, позволяющие в том числе предсказывать мезомасштабные явления (атмосферные движения с горизонтальным масштабом порядка 2–200 км). Наиболее известные из них модели «Consortium for small-scale modeling» (COSMO, используется в том числе в России), «Mesoscale Model 5» (MM5, США), «Weather Research and Forecasting–Advanced Research WRF» (WRF–ARW, США).

В Вычислительном центре Регионального специализированного метеорологического центра Всемирной службы погоды в Хабаровске (РСМЦ–Хабаровск) с 2010 г. выполняются расчеты на базе модели WRF–ARW. Данная модель основана на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, разрешаемых с использованием семейства конечно-разностных схем Рунге–Кутта [9]. Вычислительное ядро ARW создано в Национальном

*РОМАНСКИЙ Станислав Олегович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ВЕРБИЦКАЯ Евгения Митрофановна – кандидат географических наук, заведующая отделом (Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Хабаровск).

*E-mail: sromanskiy@khbr.meteorf.ru

центре исследований атмосферы (США). Доступ к исходному коду модели является свободным.

С ростом вычислительных ресурсов в РСМЦ-Хабаровск [3] к середине 2011 г. в оперативных расчетах систем ЧПП осуществлен переход от горизонтального шага в 50 км к разрешению порядка 10 км, что позволило значительно повысить качество прогноза полей метеорологических элементов [2]. Но прогнозирование элементов погоды и наличия или отсутствия явлений погоды в крупных населенных пунктах или на ограниченной территории (побережье, заливы, бухты и т.д.) с достаточной достоверностью требует более детального описания мезомасштабных процессов в модели и более точного определения их пространственной локализации.

В работе [1] показано, что дальнейшее уменьшение шага до 1 км и менее даст возможность напрямую моделировать конвективные процессы. Установлено, что расчеты с горизонтальным разрешением 500–125 м более корректно описывают возникновение и развитие мезомасштабного явления в сравнении с экспериментами, выполненными с большим шагом [11]. Можно предположить, что переход к горизонтальному разрешению менее 1 км в совокупности с введением в модель описания орографии и свойств подстилающей поверхности соответствующей пространственной детализации приведет к повышению качества прогноза элементов и явлений погоды для ограниченной территории. Такой вариант модели WRF–ARW с горизонтальным шагом в 500 м был подготовлен для Владивостока. Это первый опыт численного прогноза с высоким горизонтальным разрешением для территории Дальнего Востока России. Система ЧПП с использованием указанного варианта модели была апробирована в оперативном режиме во время саммита АТЭС осенью 2012 г.

Целью исследования являлась оценка возможности повышения качества прогноза элементов и явлений погоды для ограниченных областей на территории Дальнего Востока России за счет увеличения горизонтального разрешения модели WRF–ARW.

Владивосток был выбран в качестве полигона для апробации системы в связи с тем, что в его окрестностях были размещены автоматические датчики измерения параметров атмосферы, что существенно увеличило количество данных наблюдений для оценки качества прогнозов и повысило их достоверность благодаря устранению человеческого фактора.

В процессе исследования решались следующие задачи:

- разработка варианта модели WRF–ARW для прогноза полей метеорологических элементов по территории Приморского края и расчета элементов погоды (значений приземной температуры, скорости и направления приземного ветра), а также прогноза одного из основных явлений погоды – факта и количества осадков по территории Владивостока и его окрестностям;
- оценка качества прогноза перечисленных элементов и явлений погоды в сравнении с прогнозами оперативной модели РСМЦ-Хабаровск с шагом по горизонтали в 15 км;
- оценка степени стабильности работы предлагаемой системы ЧПП в оперативном режиме, в том числе определение степени устойчивости численной схемы модели WRF–ARW при высоком горизонтальном разрешении для реальных атмосферных процессов юга Дальнего Востока.

В работе использовалась информация с датчиков, размещенных в разных районах города:

Датчик и его местоположение	Метеорологические данные
1055 (сопка Рабочая)	Приземная температура, интенсивность осадков, скорость и направление приземного ветра
7012 (ул. Фанзавод)	Приземная температура
1100 (мыс Назимова)	Скорость и направление приземного ветра
1101 (о-в Русский)	– " –
1111 (Семеновская площадь)	– " –

Конфигурация модели WRF–ARW

На начальном этапе разработки выбирается оптимальная область расчета. Учитывая мнение синоптиков Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Приморское УГМС), были определены три вложенные сетки прогноза с шагами по горизонтали в 4500, 1500 и 500 м.

Первый (внешний) домен расчета (555 x 555 точек) покрывает область 38–54° с.ш., 115–150° в.д. и включает территории Приморья, юга Хабаровского края, северо-востока КНР и Японии. Второй домен (211 x 211 точек) охватывает южную часть Приморского края. Третья вложенная сетка (103 x 103 точки) включает Владивосток, в том числе о-в Русский, и прилегающие к нему территории (рис. 1). По вертикали от уровня земли до изобарической поверхности 50 гПа задана неравномерная сетка из 31 уровня с наиболее подробным разрешением в пограничном слое атмосферы.

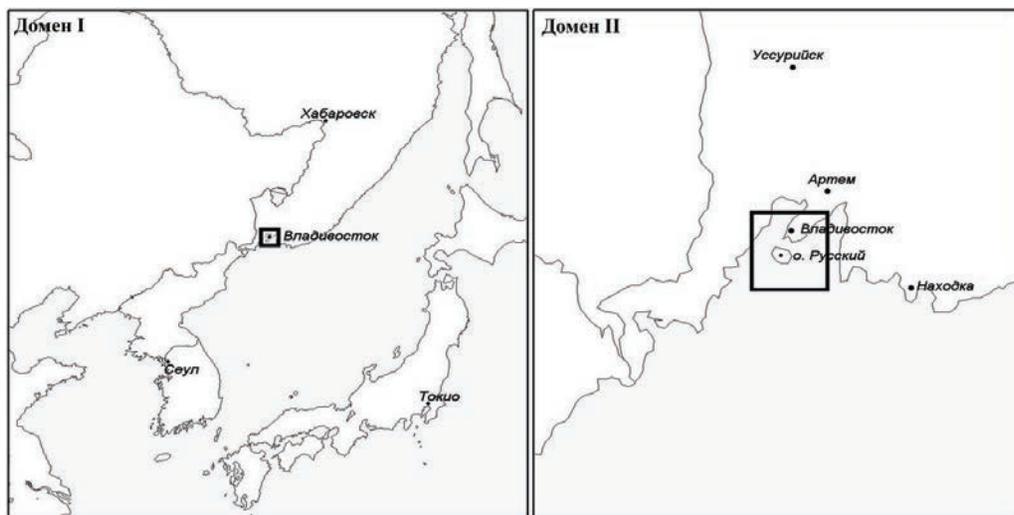


Рис. 1. Внешний и внутренние домены системы ЧПП для Владивостока. Слева – внешний и второй домены, справа – второй и третий домены. Жирной линией показана граница вложенного домена

В качестве начальных данных и на боковых границах используются прогнозы модели «Global Forecasting System» (США) с разрешением 0,5°; дискретность данных на границах составляет 6 ч.

В составе модели WRF–ARW распространяются поля характеристик подстилающей поверхности и орографии с разрешением 30'' (около 900 м). Такая детализация недостаточна для описания сложной береговой линии и рельефа третьего вложенного домена и учета процессов, связанных с урбанизацией. Шаг сетки в 500 м был выбран как примерная ширина бухты Новик, которая глубоко врзается в о-в Русский и делит его на две части.

Чтобы получить необходимое разрешение подстилающей поверхности, разработана программа, позволяющая загрузить и использовать в модели WRF–ARW геоданные с шагами 3'' и 10'', полученные в рамках научных проектов изучения Земли из космоса «Shuttle Radar Topographic Mission» (NASA, 2000 г.) и «Global Cover» (ESA, 2009 г.).

В модели WRF–ARW имеется возможность выбора вариантов параметризаций некоторых физических процессов. После проведения численных экспериментов с наборами различных схем и анализа публикаций по данной теме было решено использовать следующие параметризации: микрофизика – схема Томпсона, коротко- и длинноволновая радиация – схемы Дуди и Малвера, пограничный слой – нелокальная К-модель университета Ёнсей, процессы в почве – универсальная схема Noah. Параметризация конвекции отключена во всех вложенных доменах. Действие урбанизации, учитываемое только для третьего домена,

описано одноуровневой моделью «Urban canopy model» [7]. Подробное описание указанных схем приведено на сайте wrf-model.org и в руководстве к модели WRF-ARW [10].

Расчеты по трем вложенным сеткам проводятся циклически, поэтому шаги по времени должны быть кратны друг другу. Изначально значения шагов были заданы исходя из разрешения доменов – 18, 6 и 2 с соответственно. После проведения тестовой серии расчетов выяснилось, что такие величины не удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к системам ЧПП: а) прогнозы должны поступать синоптикам, выполняющим оперативное обслуживание саммита, к 7 ч утра владивостокского времени; б) модель должна работать без сбоев. На один сеанс расчета модели WRF-ARW на трое суток вперед с указанным набором шагов требуется около 12 ч машинного времени на суперкомпьютере SGI Altix 4700, что превышает допустимые сроки предоставления оперативных прогнозов потребителям. Кроме того, часть расчетов в третьем домене при использовании постоянного шага по времени завершается неудачно: по причине сложного рельефа в некоторых узлах сетки скорость ветра может достигать 30 м/с и более при прохождении мощных циклонов, что приводит к нарушению условия Куранта. Для достижения устойчивости вычислений и сокращения времени счета применен адаптивный шаг по времени: с предыдущего временного слоя для всех доменов находится максимальная по модулю скорость ветра и из критерия Куранта вычисляется требуемое значение шага с запасом в 20 %.

Дополнительно поля, получаемые на вложенных сетках, обрабатываются фильтром smooth-desmooth [8] для уменьшения влияния границ и восстановления гравитационных волн с амплитудами порядка $2dh$, где dh – шаг по пространству. Учет таких волн в модели необходим для описания характера мезомасштабных процессов, происходящих в области расчета [4].

Предложенный выше подход позволил сократить время расчета модели WRF-ARW до 8 ч и существенно повысить устойчивость вычислений. В период оперативного использования системы ЧПП был зафиксирован только один неудачный расчет, причиной которого стало нарушение условия Куранта.

Организация расчетов и описание системы ЧПП

С целью оперативного обслуживания саммита АТЭС-2012 элементы системы ЧПП были распределены по двум городам – Хабаровску и Владивостоку. Расчеты модели проводились в Хабаровске, здесь же накапливались прогностические и фактические данные для последующей «тонкой» настройки модели и анализа точности прогнозов. Расчетная информация (около 300 Мб в коде GRIB) ежедневно передавалась во Владивосток, где на серверах Приморского УГМС была установлена вторая часть системы – блок визуализации и публикации прогнозов в сети Интернет (на сайте ares2012.primrogoda.ru) в виде ежечасных карт приземного давления, температуры, ветра и интенсивности осадков для территории Владивостока и о-ва Русский в частности.

Для синхронизации работы двух частей системы ЧПП применены следующие решения:

- передача прогнозов во Владивосток по протоколу SFTP с последующим сравнением контрольных сумм отправленных и принятых файлов. При удачном завершении процесса передачи данных выполнялись программы визуализации;
- полная автоматизация работы системы ЧПП с постоянным ее контролем персоналом РСМЦ-Хабаровск. Операторы отслеживают технологические события, предусмотренные в программе управления, и в случае возникновения нештатной ситуации могут взять руководство на себя. Разработан набор скриптов, позволяющий персоналу запускать отдельные блоки системы ЧПП.

В связи с большим объемом вычислений расчет прогноза выполнялся один раз в сутки на 72 ч вперед. Общая продолжительность работы, включая закачку исходных данных, –

13 ч. Прогнозы готовились к 7 ч утра местного времени. Общая схема системы ЧПП приведена в табл. 1.

Таблица 1

Общая схема системы ЧПП для Владивостока

Блок системы	Среднее время работы, ч	Размещение
Модуль закачки начальных и граничных данных	3	Серверы РСМЦ-Хабаровск
Преобработка модели WRF-ARW (WPS v. 3.1)	0,5	– " –
Вычислительное ядро системы – модель WRF-ARW v. 3.1.1	8	Суперкомпьютер SGI Altix 4700 (производительность 0,7 ТФлопс)
Постобработка модели на базе WPP v. 3.1	0,5	Серверы РСМЦ-Хабаровск
Модуль передачи прогнозов во Владивосток	0,5	– " –
Модуль визуализации и публикации прогнозов	0,5	Серверы Приморского УГМС

На рис. 2 представлен один из тестовых прогнозов погоды на 22 ч 7 сентября 2011 г. (расчет на 60 ч вперед). Заметный контраст температур на побережье указывает на положительный эффект, полученный от геоданных высокого пространственного разрешения. Согласно прогнозу, температура по городу составляет 18–22 °С, в пункте 1055 – 21,4 °С, в пункте 7012 – 17,0 °С. Ветер слабый, направление неустойчивое, осадки отсутствуют. Прогноз подтверждается наблюдениями.

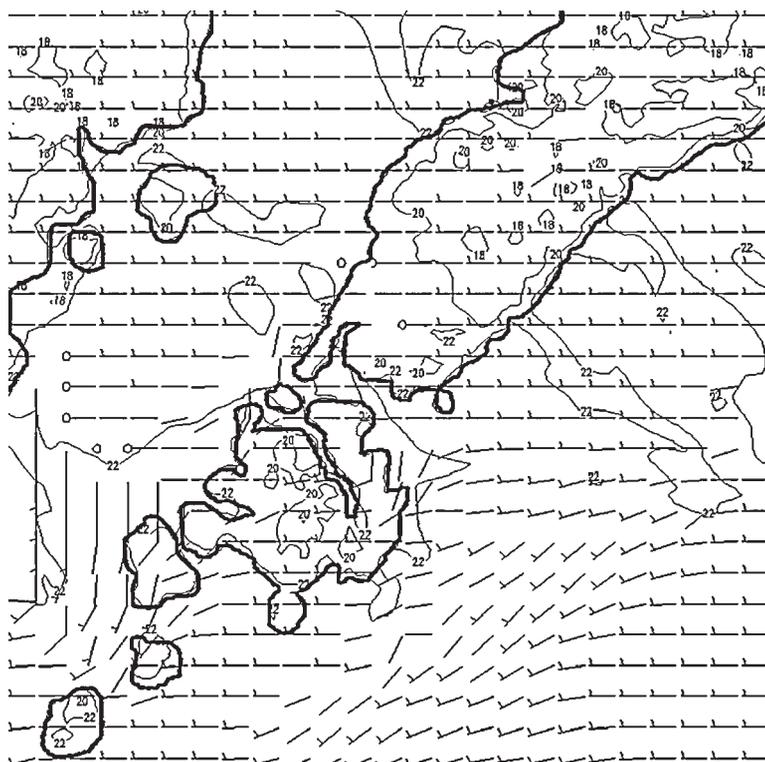


Рис. 2. Прогноз погоды на 22 ч 07.09.2011 г. Тонкими линиями указана приземная температура, флажками – поле приземного ветра

Анализ результатов моделирования

Оценим качество прогнозов элементов погоды, полученных с использованием предлагаемой системы ЧПП (модель I), в период с 25 августа по 11 сентября 2012 г. Для сравнения возьмем оценки, рассчитанные на тот же период по данным оперативной технологии на основе WRF–ARW версии 3.4.1 с горизонтальным шагом 15 км для территории Дальнего Востока (модель II) [2]. Владивосток покрыт примерно 20 узлами сетки модели II.

Прогностическое значение приземной температуры и скорости ветра у земли в пункте полагается равным значению в ближайшем узле сетки для модели I и билинейно интерполируется из четырех ближайших узлов в точку для модели II.

В табл. 2 приведены осредненные значения ошибки прогноза приземной температуры и указана обеспеченность прогноза в заданном интервале погрешности. Фактические значения взяты с датчиков 1055 и 7012.

Таблица 2

Оценки качества прогноза приземной температуры

Модель	Прогноз на первые сутки					Прогноз на вторые сутки				
	E_{ar}	E	Обеспеченность, %			E_{ar}	E	Обеспеченность, %		
			$E \leq 1^\circ$	$E \leq 2^\circ$	$E \leq 3^\circ$			$E \leq 1^\circ$	$E \leq 2^\circ$	$E \leq 3^\circ$
I	-0,1	1,2	58	82	91	-0,2	1,2	52	79	95
II	1,6	2,5	39	71	83	1,5	2,6	41	70	82

Примечание. $E_{ar} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Obs - Frst)$ – средняя арифметическая ошибка прогноза, $E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Obs - Frst|$ – средняя абсолютная ошибка прогноза, где N – количество случаев, Obs и $Frst$ – фактическое и расчетное значение элемента погоды соответственно.

Приведенные оценки показывают существенное превосходство качества прогноза модели I по сравнению с контрольными расчетами. Отметим, что оба варианта модели дают вполне удовлетворительный прогноз, так как прогноз температуры считается оправданным, если он отличается от фактического значения не более чем на 3,5 °C [5].

Некоторая нерегулярность оценок качества прогноза температуры, например рост обеспеченности в трехградусном интервале с увеличением заблаговременности расчета для модели I, объясняется коротким рядом данных и типами атмосферных процессов, проходивших в период подготовки прогноза. Эти же факторы могут влиять и на числовые значения оценок. Но для данного исследования важно, что предлагаемый вариант модели показал весьма высокое качество прогноза приземной температуры и продемонстрировал уверенное и систематическое преимущество в качестве прогноза над контрольным.

На рис. 3 приведены графики хода температуры для датчиков 1055 и 7012. Прогнозы суточных максимумов температуры в пункте 1055 выше фактических по обеим моделям, но в большей степени по модели I, что может объясняться расположением датчика на вершине сопки. Узлы сетки, из которых определяется прогностическое значение температуры, находятся у подножия сопки, поэтому они показывают более существенный прогрев воздуха у земли, чем это наблюдается на вершине. Для датчика 7012, расположенного вблизи Амурского залива, максимальные температуры, напротив, слегка занижены, поскольку на суточный ход температуры здесь может сказываться влияние моря. В любом случае модель I заметно лучше предсказывает амплитуду суточного хода.

Анализ качества прогноза скорости приземного ветра по данным датчиков 1055, 1100, 1101 и 1111, открытых ветрам всех румбов, показал, что особых различий в этих пунктах нет (табл. 3).

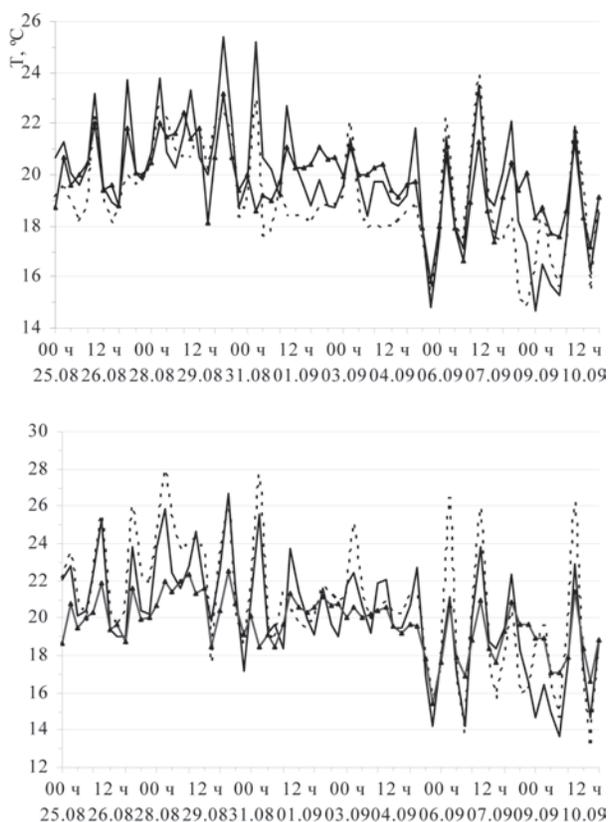


Рис. 3. Фактические и прогностические приземные температуры дискретностью 6 ч. Пунктирная линия – данные измерений, сплошная линия – расчетные данные по модели I, сплошная линия с маркерами – по модели II. Вверху – пункт 1055, внизу – пункт 7012

При анализе качества прогноза осадков следует учитывать, что, в отличие от температуры и скорости ветра, осадки не являются непрерывной функцией пространственных и временных координат и параметров состояния атмосферы. Осадки – это явление погоды. Кроме того, необходимо достаточно точно предсказать их интенсивность и время наступления. Вопрос определения количества прогностических осадков в пункте для моделей различного пространственного разрешения может решаться по-разному. В данном исследовании прогностическое значение факта и количества осадков в том или ином пункте полагается равным значению в ближайшем узле сетки для обеих моделей, что обосновано рядом исследований и целями настоящей работы.

При использовании показаний автоматических датчиков для определения факта наличия осадков возникают некоторые затруднения. Датчик фиксирует значение 0,0 мм как

Обе модели прогнозируют ветер примерно с одинаковым качеством, но модель I в среднем показывает несколько лучшие результаты. Систематические ошибки невелики: модель I немного завышает, а модель II слегка занижает значения скорости приземного ветра. Заметно некоторое падение качества прогноза с ростом заблаговременности. Средняя абсолютная ошибка по модели I для расчета на 48 ч достигает 2 м/с, т.е. качество прогноза находится на границе оправдываемости [5].

На рис. 4 представлен ход скорости ветра в пунктах 1055 и 1101. Прогноз хорошо коррелирует с фактическими данными, но максимальная скорость ветра занижена, что особенно заметно в период прохождения тайфуна Volaven (28–29 августа 2012 г.). Величина ошибки прогноза по модели I существенно меньше по сравнению с контрольным вариантом, т.е. уменьшение шага сетки привело к увеличению максимальных скоростей ветра, воспроизводимых моделью.

Таблица 3

Оценки качества прогноза приземного ветра

Модель	Заблаговременность прогноза							
	12 ч		24 ч		36 ч		48 ч	
	E_{ar}	E	E_{ar}	E	E_{ar}	E	E_{ar}	E
I	-0,2	1,4	-0,3	1,8	-0,3	1,9	0,0	2,0
II	0,2	1,6	0,8	1,6	0,3	2,2	0,4	2,6

в случае отсутствия осадков, так и при их наличии в очень малых количествах (следы осадков). Наблюдатель различает такие ситуации, поэтому в стандартных телеграммах четко определены классы «осадки» и «без осадков».

Нами выполнено сравнение значений полусуточных сумм осадков по данным датчика 1055 и стандартных наблюдений метеостанции Владивостока. Измерительные приборы располагаются на одной площадке, расстояние между ними около 2 м. Выявлено, что показания в количестве полусуточных сумм осадков практически совпадают. Поэтому оценки качества прогноза количества осадков рассчитывались по данным датчика 1055, а класс «без осадков» определялся по данным телеграмм.

Ввиду невозможности точного выделения класса «без осадков» по данным автоматического датчика рассмотрены следующие варианты оценок:

- 1) «строгие оценки»: класс «без осадков» определяется по данным стандартных наблюдений;
- 2) «нестрогие оценки»: прогноз считается оправдавшимся, если по модели прогнозируется «без осадков», а по данным наблюдений зафиксированы следы, и наоборот;
- 3) «без следов»: все следы осадков, как прогностические, так и фактические, относятся к классу «без осадков». Такой подход оправдан, если наблюдения выполняются исключительно автоматическими датчиками, что в будущем наиболее вероятно. Тогда и в моделях определение следов осадков не имеет смысла.

Для оценки успешности прогноза факта выпадения осадков рассчитывались показатели, принятые в отечественной практике [5]: P_{oc} , $P_{o/o}$ – предупрежденность классов «осадки» и «без осадков» (%); $P_{н}$ – оправдываемость прогноза по наставлению (%); U_{oc} , $U_{o/o}$ – оправдываемость прогноза в классах «осадки» и «без осадков» (%) и T, HSS – критерии Пирси–Обухова и Хайдке–Багрова соответственно. Различия между значениями критериев T и HSS показывают наличие случайных совпадений прогноза и факта явления.

Дополнительно рассмотрены характеристики степени успешности моделирования явления, применяемые иностранными специалистами [6]: CSI – критический индекс успеха, FAR – показатель ложных тревог, BIAS – отношение количества модельных явлений к количеству реально наблюдавшихся. Эти характеристики не зависят от длины выборки и обычно применяются для оценки успешности моделирования редких явлений.

Из табл. 4 видно, что даже при строгой оценке получены высокие значения критериев Пирси–Обухова и Хайдке–Багрова по обеим моделям. Модель II практически не имеет случайных совпадений прогноза и факта осадков. Для модели I различия в значениях

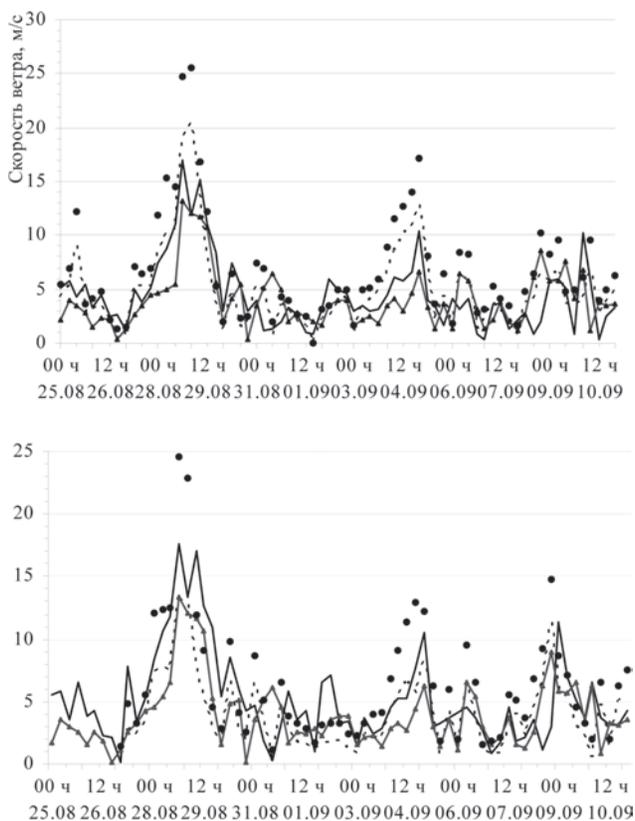


Рис. 4. Фактические и прогностические скорости приземного ветра дискретностью 6 ч. Обозначения см. на рис. 3, черными кружками показана максимальная измеренная скорость. Вверху – пункт 1055, внизу – пункт 1101

Оценки качества прогноза осадков в пункте 1055

Модель	T	HSS	P _{ос}	P _{б/о}	U _{ос}	U _{б/о}	P _н	E	E _{ар}	CSI	FAR	BIAS
Строгие оценки												
I	0,72	0,67	81	91	94	71	81	1,9	1,1	0,77	0,06	0,86
II	0,85	0,85	95	90	95	90	87	1,8	0,9	0,90	0,05	1,00
Нестрогие оценки												
I	0,86	0,84	90	96	97	86	85	1,9	1,1	0,87	0,03	0,92
II	0,96	0,96	100	96	97	100	89	1,8	0,9	0,97	0,03	1,03
Без следов												
I	0,77	0,72	78	96	97	76	87	1,9	-1,1	0,76	0,03	0,81
II	0,84	0,84	91	93	94	89	87	1,8	-0,9	0,86	0,06	0,97

указанных критериев существуют. Они незначительны при нестрогом подходе и более значимы для других вариантов оценок. Случайные совпадения факта и прогноза осадков в модели I происходят в основном при прогнозировании следов при отсутствии фактических осадков или прогнозе «без осадков» при наблюдавшихся следах. Практически все оценки качества расчетов для модели II лучше, чем для модели I. По оценкам успешности моделирования явления контрольная модель явно превосходит модель I. Это указывает на то, что классы «осадки» и «без осадков» лучше определяются моделью II.

Степени успешности прогноза количества осадков в обеих моделях близки: средние значения абсолютной и арифметической ошибок мало различаются, оправдываемость прогноза по наставлению при строгом и нестрогом подходах выше у модели II. Следовательно, ошибки в прогнозе с использованием модели I наблюдаются преимущественно в градации слабых осадков.

Полученные результаты сравнения оценок прогноза осадков показывают, что для улучшения качества прогноза недостаточно просто уменьшения горизонтального шага и повышения детализации полей характеристик подстилающей поверхности. Необходимо увеличить количество вертикальных уровней в высоких слоях атмосферы, т.е. там, где формируются осадки. В нашем случае этого нельзя было сделать из-за ограниченности вычислительных ресурсов. В модели I на прогноз осадков, порождаемых процессами синоптического масштаба, которые наблюдались в рассматриваемый период, негативное влияние также оказал слишком малый размер среднего домена.

На рис. 5 приведен временной ход значений трехчасовых сумм осадков за исследуемый период. В целом обе модели хорошо прогнозируют интервалы выпадения и отсутствия осадков, но модель II имеет преимущество по времени начала и окончания таких периодов и амплитуде пиков интенсивности осадков.

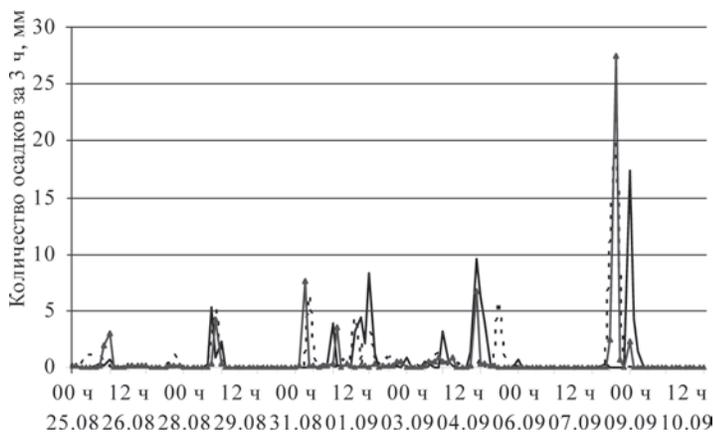


Рис. 5. Фактические и прогнозные трехчасовые суммы осадков в пункте 1055. Обозначения см. на рис. 3

Заключение

Анализ результатов эксплуатации представленной системы ЧПП и качества прогноза элементов погоды позволяет сделать следующие выводы.

Применение адаптивного шага по времени в модели WRF–ARW приводит к существенному уменьшению общего времени работы системы и повышает устойчивость вычислений.

Предлагаемый вариант модели дает вполне удовлетворительный прогноз по району Владивостока и превосходит контрольную модель по качеству прогноза приземной температуры и ветра за счет выполнения расчета на мелкой сетке и использования геоданных высокого пространственного разрешения. Включение параметризации урбанизации также дало положительный эффект в прогнозировании указанных элементов погоды.

Качество прогноза осадков не улучшилось в сравнении с контрольной моделью, так как практически все выполненные нами усовершенствования касаются более адекватного описания приземного и пограничного слоев атмосферы и подстилающей поверхности.

Дальнейшее повышение качества прогноза возможно в следующих направлениях: а) для приземного ветра необходимо уменьшать шаг сетки и повышать детализацию ортографических данных; б) для осадков нужно сбалансированно подбирать размеры вложенных доменов. При необходимости сохранения достаточно обширных размеров внешней области расчета и переходе к горизонтальному разрешению менее 1 км следует использовать четыре вложенные сетки с последовательным увеличением количества вертикальных уровней в высоких слоях атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вельтишев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // *Метеорол. и гидрология*. 2008. № 9. С. 30–44.
2. Вербицкая Е.М., Любицкий Ю.В., Романский С.О. Оценка точности краткосрочного прогноза сильных ветров над акваторией дальневосточных морей, рассчитанного по региональным гидродинамическим моделям // *Тр. ДВНИГМИ*. 2012. Вып. 154. С. 22–40.
3. Вербицкая Е.М. Перспективы развития системы численных прогнозов погоды в РСМЦ Хабаровск // *Тр. ДВНИГМИ*. 2010. Юбил. вып. ДВНИГМИ – 60 лет. С. 12–24.
4. Гутман Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 297 с.
5. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения (РД 52.27.724–2009). Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 66 с.
6. Doswell C., Davies-Jones R., Keller D. On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables // *Wea. Forecasting*. 1990. Vol. 5, N 12. P. 576–585.
7. Ryu Y., Baik J., Lee S. A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmospheric models // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2011. Vol. 50, N 9. P. 1773–1794.
8. Shapiro R. Smoothing, filtering and boundary effects // *Rev. Geophys.* 1970. Vol. 8, N 2. P. 359–387.
9. Skamarock W., Klemp J. A time-split non-hydrostatic atmospheric model for research and NWP applications // *J. Comp. Phys.* 2007. Spec. iss. on environmental modeling. P. 3465–3485.
10. WRF–ARW User's Guide v. 3.4. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2012. 384 p. – http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.4/ARWUsersGuideV3.4.pdf (дата обращения: 23.09.2013).
11. Wyngaard J., Bryan G., Fritsch J. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131, N 10. P. 2394–2416.