

## Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования

Н. А. Калинин\*, А. Н. Шихов\*, А. В. Быков\*

*Представлены результаты моделирования формирования и эволюции мезомасштабных конвективных систем (МКС), сопровождающихся опасными явлениями погоды над территорией Западного Урала, с помощью численной модели атмосферы WRF-ARW. Рассмотрено 23 случая возникновения в 2002—2015 гг. мезомасштабных конвективных комплексов и мезомасштабных линий шквалов. Для проверки использовали данные MODIS спутника "Terra/Aqua", информацию метеорологических радиолокаторов в городах Пермь и Ижевск и данные наблюдательной сети Росгидромета. Показано, что характеристики интенсивности МКС воспроизводятся моделью с большой достоверностью, однако качество прогноза пространственного положения МКС в большинстве случаев неудовлетворительное. Выявлено, что большое влияние на успешность прогноза оказывает шаг сетки модели. В ряде случаев модель успешно воспроизводит формирование и эволюцию МКС с опасными явлениями погоды и может применяться для их сверхкраткосрочного прогноза с точностью по времени ±(1—2) ч.*

**Ключевые слова:** мезомасштабные конвективные системы, модель WRF-ARW, данные MODIS, температура и высота верхней границы облаков, Западный Урал.

### Введение

Конвекция как форма тепло- и массообмена чрезвычайно распространена в атмосфере Земли и реализуется в результате потери статической устойчивости горизонтальных слоев воздуха. Атмосферную конвекцию условно разделяют на мелкую и глубокую. Физически это оправданно, потому что условия погоды при развитии мелкой и глубокой конвекции существенно различаются. К мелкой конвекции относят системы течений, развивающиеся в неустойчиво стратифицированных горизонтальных слоях воздуха толщиной до 2—3 км. При мелкой конвекции вклад неадиабатических факторов, связанных с процессами образования осадков, незначителен. Мелкая конвекция представлена слоисто-кучевыми и кучевыми облаками и с ней не связаны опасные явления погоды [9]. Глубокая конвекция развивается в слоях большой вертикальной протяженности, охватывающих всю тропосферу, а иногда и нижние слои стратосферы. Основное отличие глубокой конвекции от мелкой состоит в том, что важную

\* Пермский государственный национальный исследовательский университет; [kalinin@psu.ru](mailto:kalinin@psu.ru).

Таблица 1

**Классификация систем глубокой конвекции [37]**

Системы глубокой конвекции		
линейного типа	симметричного типа	
Линии шквалов. Масштаб мезо-	Гряды кучево-дождевых облаков. Масштаб мезо-	Мезомасштабные конвективные комплексы (МКК). Масштаб мезо-

роль в ее развитии играют процессы, связанные с фазовыми переходами воды в атмосфере. Другая особенность глубокой конвекции — то, что вследствие ее больших вертикальных и горизонтальных масштабов существенное влияние на нее оказывают неоднородность метеорологических полей синоптического масштаба, вращение Земли и неоднородность подстилающей поверхности [9]. Известны разные классификации систем глубокой конвекции. Наиболее удобной как с генетической, так и с морфологической точек зрения является классификация, предложенная в работе [37] (табл. 1), где подразделения мезомасштаба трактуются в рамках классификации атмосферных процессов по пространственно-временным масштабам, предложенной автором работы [38]. Эта классификация широко используется при моделировании мезомасштабных процессов [9, 16, 17]. Чтобы подчеркнуть принадлежность систем глубокой конвекции к атмосферным процессам мезомасштаба, их часто определяют как мезомасштабные конвективные системы (МКС) [1, 2]. Ввиду условности разделения атмосферной циркуляции на мелкую и глубокую с отсутствием возможности проведения четкой границы между ними понятие “мезомасштабные конвективные системы” объединяет обе эти системы конвективных течений, т. е. включает широкий спектр форм и масштабов систем мелкой и глубокой конвекции — от конвективных ячеек, линий шквалов, мезомасштабных конвективных комплексов до систем осадков атмосферных фронтов [1, 2, 9].

Анализ и прогноз формирования, эволюции МКС, их положения в пространстве, а также интенсивности связанных с ними опасных явлений погоды (ОЯ) имеют большое практическое значение [4, 6, 15, 19, 20, 23, 27]. В этом отношении территория Западного Урала не является исключением, поскольку ежегодно здесь фиксируется несколько случаев прохождения мезомасштабных облачных систем глубокой конвекции, сопровождающихся сильными ливнями, градом и шквалистым усилением ветра. Поскольку большинство случаев ОЯ связано с МКС масштаба мезо-, то особенно актуально изучение именно таких систем (табл. 1) — мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) и мезомасштабных линий шквалов (МЛШ). В последние десятилетия во многих странах создавались негидростатические модели, способные непосредственно воспроизводить конвекцию без использования каких-либо процедур ее параметризации, применяемых обычно в гидростатических моделях [8]. Широкое распространение получили три модели из семейства негидростатических моделей WRF (Weather Research and Forecasting) — ARW, NMM и ARW Glob, которые являются моделями общего пользования и применяются как в иссле-

довательских, так и в прогностических целях. Результаты их использования для прогноза сильных осадков и ветра на европейской территории России [8] свидетельствуют о некотором преимуществе модели WRF-ARW, подробное описание которой приведено в работе [40].

За последние 15 лет накоплен большой опыт применения мезомасштабных моделей атмосферы для прогнозирования глубокой конвекции [31, 32, 39, 42]. Установлено, что прямое моделирование конвекции в большинстве случаев позволяет получить более достоверный прогноз, чем использование любой из параметризаций конвекции. В настоящее время наибольшую сложность представляет прогнозирование места и времени возникновения МКС и связанных с ними зон опасных явлений. Для получения адекватной оценки качества прогнозов МКС по мезомасштабным моделям были предложены разные варианты применения объектно-ориентированного подхода [8, 30]. В целях повышения надежности сверхкраткосрочного прогноза глубокой конвекции проводятся эксперименты по усвоению в модели WRF дополнительных данных станционных наблюдений, доплеровских радаров и сети грозопеленгаторов с использованием технологии 3DVAR, однако для прогноза на срок более 12 ч этот подход оказался малоэффективен [41, 43].

Модель WRF наряду с моделью COSMO [10, 11, 25] используется в Гидрометцентре России в целях сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды, связанных с интенсивной конвекцией. Оценке успешности прогнозов конвективных ОЯ с помощью модели WRF на Дальнем Востоке, в Сибири и на европейской территории России посвящены работы [5, 7, 8, 12, 14, 15, 17, 18, 21, 22, 24, 26, 28]. Примеры применения модели WRF для изучения случаев возникновения опасных явлений погоды за рубежом рассмотрены в работах [30, 33, 35, 36].

Для территории Урала ранее [18, 29] изучалась возможность прогнозирования с помощью модели WRF отдельных случаев выпадения крупного града, развития сильных шквалов и смерчей. Однако задача объективной оценки прогноза опасных конвективных явлений по модели WRF авторами этих работ не была решена. В связи с этим представляло интерес исследовать возможность применения модели WRF (в конфигурации ARW) для прогноза возникновения и эволюции конвективных систем масштаба мезо- на Западном Урале на примере 23 случаев МКС с опасными явлениями погоды в период с 2002 по 2015 г.

### **Исходные данные и методы исследования**

Для расчета использована модель WRF-ARW версии 3.6.1 — численная негидростатическая региональная система прогнозирования погоды. Программный комплекс модели WRF установлен на вычислительном узле, который представляет собой персональный компьютер на базе процессора Intel Core-i5 (4 ядра, частота 3,41 ГГц) с 24 ГБ оперативной памяти. Инициализация модели WRF и задание граничных условий (с шагом 1 ч) выполнены по данным реанализа численной модели прогноза CFS. Выбор данных CFS в качестве исходных обусловлен их сравнительно высоким пространственным ( $0,5^\circ$ ) и временными (1 ч) разрешением. Таким образом, численные эксперименты производились в режиме квазипрогноза.

Расчет выполнялся на 38 вертикальных уровнях, период моделирования составлял 24 ч, временной шаг вывода данных — 1 ч. Модель WRF запускалась со следующими схемами параметризации подсеточных процессов: микрофизика облачности — схема Томпсона, длинноволновая радиация — схема RRTM, коротковолновая радиация — схема Дудья, приземный слой — схема Монина — Обухова с вязким подслоем Карлсона — Боланда и стандартными функциями подобия, подстилающая поверхность и почва — схема NOAH; пограничный слой — схема Университета Енсей.

Визуализация выходных данных выполнялась в программных пакетах OpenGrADS 2.0 и ArcGis. Использовались следующие выходные данные модели: интенсивность осадков в виде дождя и града (крупы),  $\text{мм}/\text{ч}$ ; расчетное максимальное значение радиоэха конвективных облаков,  $\text{dBZ}$ ; средняя скорость ветра и скорость ветра в порывах (с учетом вертикальной составляющей) на высоте 10 м; высота верхней границы облаков (ВГО;  $H_{\text{ВГО}}$ , км) и температура на данном уровне (температура ВГО;  $T_{\text{ВГО}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ). При расчете  $H_{\text{ВГО}}$  пороговое значение наличия (отсутствия) облачности принималось равным 95% (т. е. высота облачности рассчитывается, если на данной высоте она покрывает от 95 до 100% небосвода).

Оценка качества результатов моделирования производилась путем их сопоставления с данными прибора MODIS спутника “Terra/Aqua”, полученными из архивов НАСА (Goddard Space Flight Center) [34] и успешно апробированными авторами работ [3, 13, 28]. Использовались данные измерений радиояркостной температуры верхней границы облаков в 31-м канале прибора MODIS (с пространственным разрешением 1000 м). Дополнительно выходные данные модели сопоставляли с информацией МРЛ-5, установленного в аэропорту Большое Савино (г. Пермь), и ДМРЛ в г. Ижевск. Пространственное совмещение данных спутниковых и радиолокационных наблюдений с результатами моделирования выполнялось средствами программного пакета ArcGis.

Для валидации результатов моделирования применялась модификация объектно-ориентированного метода оценки качества прогнозов, описанного в работе [8]. Объектно-ориентированный метод предполагает сопоставление фактического (определенного по данным спутниковых наблюдений и МРЛ) и прогностического положения МКС и зон опасных явлений погоды. Критериями оценки служат расстояние между центрами тяжести объектов по фактическим данным и по результатам моделирования, а также максимальные значения оцениваемых переменных ( $H_{\text{ВГО}}$ ,  $T_{\text{ВГО}}$ , интенсивность осадков, скорость шквала). В отличие от точечного анализа по данным метеорологических станций объектно-ориентированный метод оценки позволяет разделить ошибку прогноза на две составляющие: ошибку в амплитуде (интенсивности) и в положении объекта. Последняя обусловлена, главным образом, начальными условиями, поэтому ее устранение вызывает большие сложности [8].

Для моделирования конвекции в программном комплексе модели WRF предлагается несколько процедур параметризации. Они используются в том случае, если прогноз составляется на сетке с шагом более 4 км. При запуске модели с шагом сетки 4 км и менее возможно прямое моделирование конвективных течений без использования процедур параметризации.

Для оценки достоинств или недостатков прямого моделирования конвекции по сравнению с ее параметризацией было проанализировано шесть случаев развития над исследуемой территорией МКС с сильными ливнями, шквалами и градом, наблюдавшихся в 2002—2010 гг.

Запуск модели производился с использованием трех разных схем параметризации конвекции при шаге сетки 10 км, а также с отключенной параметризацией, т. е. в режиме прямого воспроизведения конвекции (при шаге сетки 4 км). По результатам выборки был сделан вывод о том, что в условиях изучаемой территории прямое моделирование конвекции на сетке с шагом 4 км (без использования параметризаций) обеспечивает получение более достоверного прогноза положения и интенсивности МКС, чем использование любой из предложенных в модели схем параметризации. С учетом этого обстоятельства последующие численные эксперименты проводились только в режиме прямого воспроизведения конвекции на сетке с шагом 2, 3, 4 и 9 км по горизонтали. Размеры расчетных областей составили соответственно 600 × 600, 534 × 534, 400 × 400 и 224 × 224 узла с центром в точке 58° с. ш., 56° в. д. (г. Пермь), что позволило уменьшить влияние краевых эффектов.

### Результаты и их обсуждение

Общая оценка успешности прогнозов (в долях единицы) производилась по трем градациям. В ряде случаев объект (МКС) вообще не воспроизводился моделью или местоположение его центра тяжести отличалось от фактического (определенного по спутниковым данным) более чем на 150 км. Такие прогнозы оценивались как неоправдавшиеся (оценка 0). Если МКС воспроизводилась моделью, но ее характеристики (высота ВГО, площадь, пространственное положение) существенно отличались от фактических (определенных по данным дистанционного зондирования), то прогноз считался частично оправдавшимся (оценка 0,5). Прогноз оценивался как оправдавшийся (оценка 1) в случае, если модель воспроизводила МКС с незначительными ошибками по ее положению в пространстве и параметрам интенсивности. Данные табл. 2 свидетельствуют, что в девяти из 23 рассмотренных случаев прогнозы модели WRF оцениваются как неоправдавшиеся. Из них в четырех случаях модель не воспроизводит появление МКС над изучаемой территорией, а в пяти случаях имеет место значительное смещение МКС относительно фактического положения в пространстве. Ошибки в прогнозе положения МКС, как правило, связаны с начальными условиями, например, со смещением фронтальной зоны относительно ее положения по данным глобальной модели. Модель не воспроизводит глубокую конвекцию внутри воздушной массы, когда отсутствует выраженная зона сходимости воздушных течений (случаи, наблюдавшиеся 24 июня 2013 г. и 20 июня 2015 г.). Существенно повышается успешность прогноза в случаях с хорошо выраженным фронтальными зонами, когда такие параметры, как температура и высота верхней границы облаков, средняя скорость ветра и скорость порывов ветра при шквалах, а также мгновенная интенсивность осадков (определенная по значениям радиоэха МРЛ), воспроизводятся моделью достаточно адекватно.

Заметное влияние на успешность прогноза пространственного положения и интенсивности МКС оказывает шаг модельной сетки по горизонта-

Таблица 2  
Оценка успешности прогноза мезомасштабных конвективных систем по модели WRF

Дата	Тип МКС	$H_{\text{ВГО}}$ , км (MPJ/модель)	$T_{\text{ВГО}}$ , °C (MODIS/модель)	Наблюдавшиеся явления погоды	Оценка качества прогноза
20 VII 2004	МКК	13/14	<-60/-60	Шквал (27 м/с), град (до 20 мм)	1
20 VIII 2008	МКК	15/_	<-60/_	Крупный град (20—70 мм)	0
6 VI 2009	МКК	13/12	<-60/<-60	Крупный град (33 мм)	1
19 VI 2009	МЛШ	13/13	<-60/<-60	Шквал (24—28 м/с), град (до 20 мм)	0,5
3 VIII 2010	МКК	13/13	<-60/-60	Шквал (18—21 м/с), град (до 20 мм)	0,5
5 VI 2011	МЛШ	12/12	-55/-55	Шквал (до 17 м/с), град (до 20 мм)	1
6 VII 2011	МКК	—*/11	<-60/-55	Сильный дождь (до 39 мм/12 ч)	0,5
4 VI 2012	МКК	—*/—	<-60/_	Сильный дождь (39—42 мм/12 ч)	0
9 VI 2012	МКК	13/13	<-60/<-60	Крупный град (до 30 мм), шквал (до 22 м/с), сильный дождь (до 49 мм/12 ч)	0
21 VI 2012	МКК	13/12	<-60/_	Сильный дождь (23—34 мм/12 ч)	0,5
22 VI 2012	МКК	12/12	-60/-55	Сильный дождь (58 мм/12 ч)	1
4 VII 2012	МКК	13/12	-60/-55	Сильный дождь (40—55 мм/12 ч)	0,5
18 VII 2012	МКК	13/13	<-60/-60	Шквал (20—28 м/с), сильный ливень (36 мм/1 ч), град (до 22 мм)	0,5
18 VII 2012	МЛШ	13/_	-55/_	Шквал (20—28 м/с), град (до 22 мм), сильный ливень (36 мм/1 ч)	0
9 VIII 2012	МКК	—*/13	-60/-60	Очень сильный дождь (до 63 мм/12 ч)	1
24 VI 2013	МКК	—*/—	<-60/_	Крупный град (до 30 мм)	0
11 VII 2013	МКК	—*/—	-55/_	Сильный дождь (30—35 мм/12 ч)	0
6 VII 2014	МКК	13/12	-55/-55	Сильный дождь (26—44 мм/12 ч)	0,5
17 VIII 2014	МКК	14/13	-60/-60	Шквал (до 28 м/с), град (20 мм)	0,5
29 VIII 2014	МКК	14/_	<-60/_	Смерч, град (до 50 мм), шквал (22 м/с), сильный дождь (30 мм/12 ч)	0
20 VI 2015	МКК	—*/—	<-60/_	Сильный дождь (22—45 мм/12 ч)	0
24 VI 2015	МКК	14/13	<-60/-60	Очень сильный дождь (до 117 мм/12 ч), град (до 20 мм)	1
29 VI 2015	МЛШ	14/_	<-60/_	Шквал (до 29 м/с), сильный дождь (до 40 мм/12 ч)	0

*Примечание.* В третьем столбце приведено максимальное значение  $H_{\text{ВГО}}$ ; \* данные МРЛ отсутствуют.

ли. Для оценки степени этого влияния был проведен численный эксперимент по подбору шага сетки для нескольких случаев возникновения МКС (6 июня 2009 г., 21 июня 2012 г., 18 июля 2012 г. и 24 июня 2013 г.). Расчеты производились с шагом сетки 2, 3, 4 и 9 км при одинаковых начальных условиях.

Анализ данных численных экспериментов показал, что результаты моделирования с разным шагом сетки могут принципиально различаться. Следует отметить, что только в одном из рассмотренных случаев (24 июня 2013 г.) модель WRF не воспроизвела конвекцию при проведении расчетов для всех вариантов пространственного разрешения. В других случаях удалось подобрать оптимальный шаг сетки (2 или 3 км), при котором пространственное положение МКС воспроизводится с наибольшей достоверностью. Кроме того, увеличение пространственного разрешения позволяет получить более адекватную оценку максимальной скорости ветра при шквале. Пример влияния шага сетки на прогноз пространственного положения МКС приведен на рис. 1, когда при выполнении расчета с шагом сетки 9 км модель воспроизводит формирование МКС существенно южнее ее фактического положения. При шаге сетки 3 км пространственное положение МКС воспроизводится точнее, однако результаты счета модели свидетельствуют о том, что конвективная система уже находится в стадии диссипации, в то время как по фактическим данным она была на максимальной стадии развития.

Поскольку модель WRF в основном адекватно воспроизводит интенсивность мезомасштабных конвективных систем и связанных с ними опасных явлений погоды, ее можно использовать для прогноза времени и места их возникновения даже с учетом большой доли неоправданных прогнозов. Для примера ниже рассмотрены результаты моделирования двух случаев развития МКС, при которых наблюдались наиболее сильные шквалы на Западном Урале за последнее десятилетие: 18 июля 2012 г. в северных районах Пермского края и 17 августа 2014 г. в его Чайковском районе.

### Примеры прогнозов МКС

**Пример 1.** 18 июля 2012 г. с 7 до 13 ч ВСВ (рис. 1 $\varepsilon$ — $e$ ) с юга на север территории Западного Урала переместился усиливающийся мезомасштабный конвективный комплекс, сформировавшийся перед полярным холодным фронтом в теплом секторе углубляющегося южного циклона. Наблюдались сильные шквалы (скорость ветра 20—28 м/с) с выпадением крупного града (до 22 мм) и сильным ливнем (36 мм/1 ч), которые нанесли значительный ущерб. Наиболее сильные шквалы отмечались в северо-западных и северо-восточных районах Пермского края. Они не были зафиксированы метеорологическими станциями, но вызвали массовые ветровалы в лесных массивах на общей площади около 24 тыс. га [28]. По спутниковым данным MODIS, формирование МКК началось 18 июля 2012 г. в 6 ч 30 мин ВСВ в районе г. Янаул. Между 7 и 8 ч ВСВ усиливающийся конвективный кластер перемещался через юго-западные районы Пермского края, где были зафиксированы шквалы 23—28 м/с. Модель WRF воспроизвела появление двух скоплений кучево-дождевых облаков с  $H_{\text{ВГО}}$

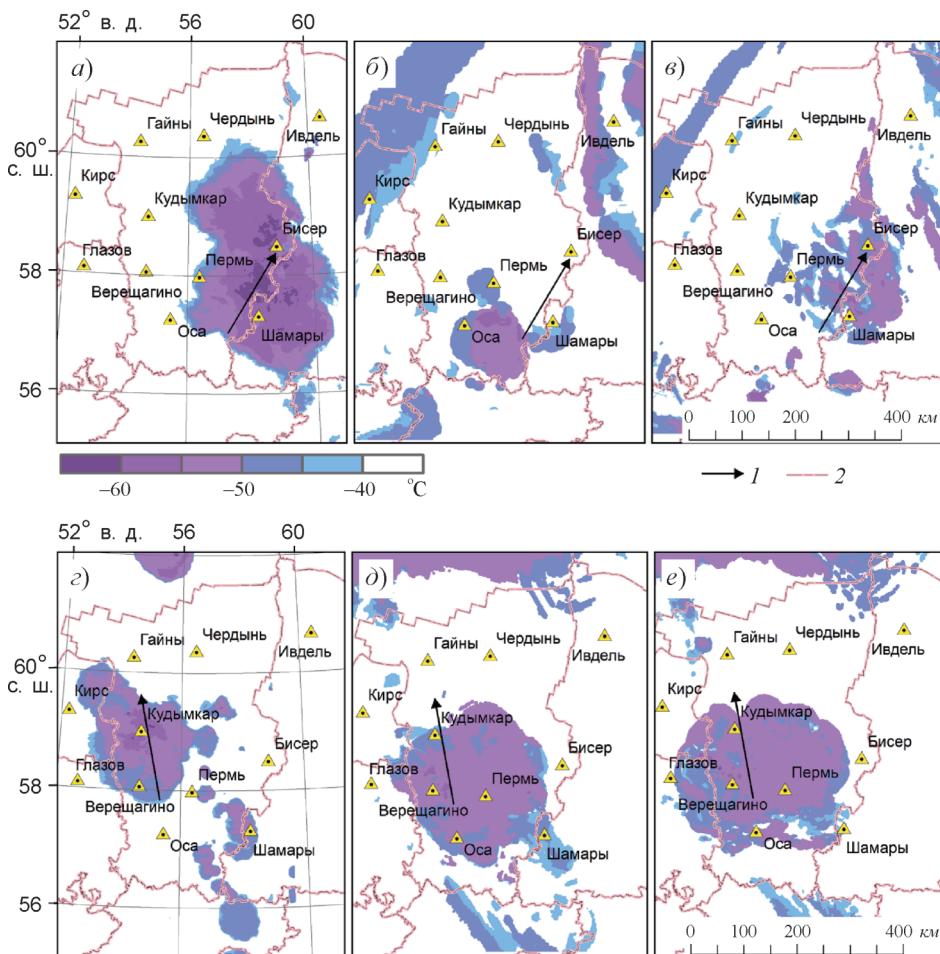


Рис. 1. Температура верхней границы облаков 21 июня 2012 г. в 18 ч ВСВ (*а—в*) и 18 июля 2012 г. в 10 ч ВСВ (*г—е*).  
*а, г* — по спутниковым данным MODIS; *б, в, д, е* — по модели WRF (шаг сетки соответственно 9 (*б, д*) и 3 км (*в, е*)); стрелка — направление перемещения МКС.

12 км над северной частью Республики Башкортостан в 7 ч ВСВ, которые через час объединились в одну мезомасштабную конвективную систему. В дальнейшем наблюдалось смещение модельной траектории МКС примерно на 100 км к востоку относительно фактической траектории (рис. 1 $г$ — $е$ ). При расчете с шагом 4 км модель воспроизвела шквал (20—25 м/с) и град в 9 ч ВСВ в районе г. Пермь. Фактически шквалы (до 28 м/с) наблюдались в это время юго-западнее г. Пермь в районе г. Оса, где, в свою очередь, при расчете с шагом 2 км модель воспроизвела сильный шквал со средней скоростью ветра 25—26 м/с. Сильный шквал (25 м/с) и крупный град прогнозировался в этот день и синоптиками Пермского ЦГМС.

В дальнейшем по модели прогнозировали увеличение площади МКК и смещение зоны интенсивной конвекции на северо-запад Пермского края. Расчетная скорость ветра при шквалах оказалась несколько меньше факти-

ческой (до 21 м/с), в то время как метеорологическими станциями был зафиксирован шквал 28 м/с в г. Глазов и 24 м/с в г. Кудымкар, где он наблюдался на час раньше (в 10 ч ВСВ), чем прогнозировался по модели WRF. В целом траектория прохождения МКК и интенсивность осадков (до 30 мм/ч) успешно воспроизводятся моделью. Результат моделирования скорости ветра при шквале также можно считать удовлетворительным. Однако наиболее сильные шквалы прогнозировались в центральных районах Пермского края, хотя фактически они наблюдались в северной части территории (рис. 2).

**Пример 2.** 17 августа 2014 г. в Чайковском районе Пермского края наблюдался локальный сильный шквал, который не был зафиксирован метеорологическими станциями, но нанес значительный ущерб, оцененный в

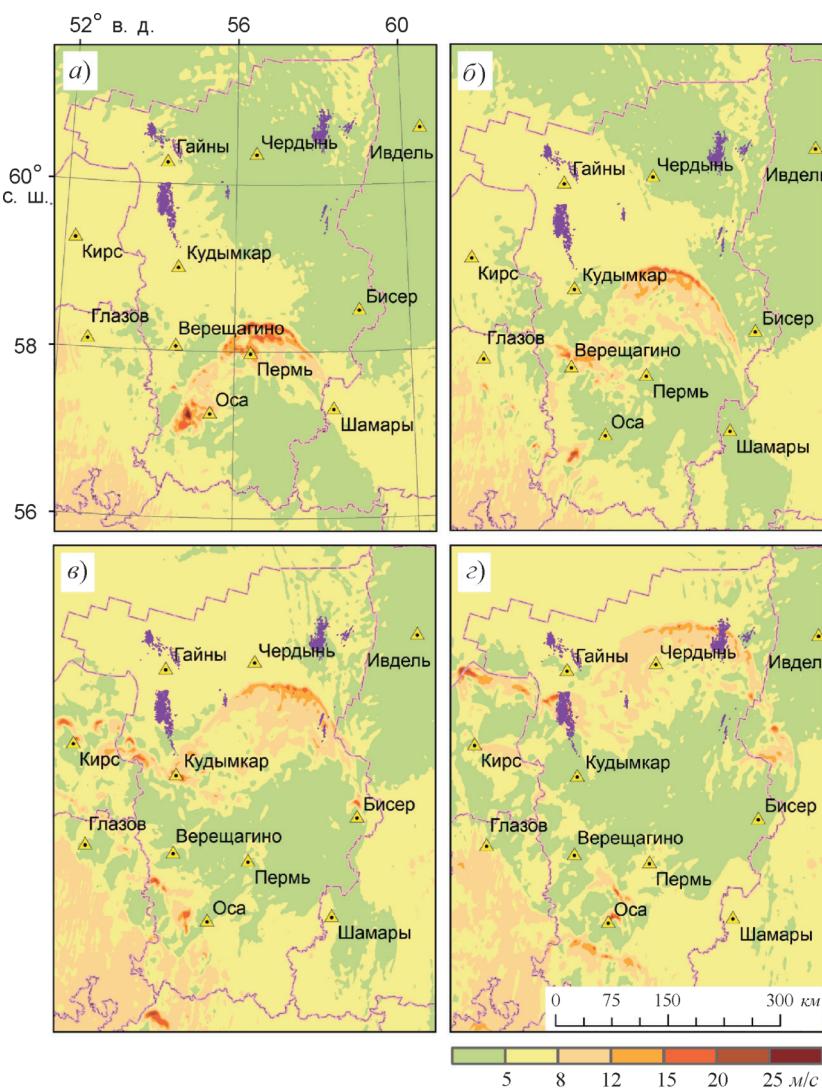


Рис. 2. Скорость ветра 18 июля 2012 г. по модели WRF.

а—е—в 9, 10, 11 и 12 ч ВСВ соответственно. Фиолетовыми точками отмечены ветроповалы.

80 млн. руб. В результате шквала на площади свыше 600 га был повален лес, в нескольких населенных пунктах было повреждено более 100 жилых домов и социально значимых объектов. По результатам обследования, проведенного специалистами Пермского ЦГМС, скорость ветра при шквале в 60 км юго-восточнее г. Чайковский составила не менее 28 м/с. Шквал сопровождался выпадением града диаметром около 20 мм. Шквал наблюдался на южной периферии мезомасштабного конвективного комплекса, который был связан с волновым возмущением на малоподвижном полярном фронте, ориентированном с юго-запада на северо-восток. На изобарической поверхности 300 гПа ему соответствовало струйное течение, скорость ветра в котором достигала 40 м/с.

Мезомасштабный конвективный комплекс сформировался около 8 ч ВСВ над территорией Татарстана и к 9 ч 10 мин ВСВ находился в 100 км северо-восточнее г. Казань. Затем данный МКК сместился на южные районы Удмуртии и Пермского края, где достиг стадии максимального развития. При его прохождении на метеорологических станциях городов Ижевск и Чайковский отмечались ливневые дожди с грозой и усилением ветра до 17—19 м/с. Конвективная ячейка с мезоциклоном, которая вызвала разрушительный шквал, сформировалась южнее г. Чайковский на периферии МКК в 12 ч 50 мин ВСВ и достигла стадии максимального развития в 13 ч ВСВ. По данным ДМРЛ в г. Ижевск, значение  $H_{\text{ВГО}}$  в это время составило 14 км. Мезоциклонический вихрь просуществовал около 20 мин, после чего разрушился.

По модели WRF (с шагом сетки 3 км) успешно воспроизвелась траектория прохождения МКК и связанных с ним сильных шквалов (до 35 м/с) на юге Пермского края (рис. 3). Однако шквал в Чайковском районе по модели прогнозировался в 11 ч ВСВ, фактически он наблюдался в 13 ч ВСВ. По модели также прогнозировались сильные шквалы (до 30—35 м/с) севернее г. Чернушка в 12 ч ВСВ. По данным метеорологических станций сильные шквалы в этих районах не фиксировались, был отмечен только град диаметром до 20 мм. Таким образом, модель WRF и в данном случае могла быть использована для прогноза сильного шквала, поскольку траектория прохождения МКС и скорость порывов ветра были определены с большой достоверностью. Следует отметить, что синоптики Пермского ЦГМС в этот день опасные явления погоды не прогнозировали (ожидались грозы с усилением ветра до 17—22 м/с).

### Заключение

Анализ результатов численных экспериментов по моделированию возникновения и эволюции мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF позволяет сделать следующие выводы.

Прямое моделирование конвекции (на сетке с шагом 4 км) обеспечивает получение более качественного прогноза, чем использование любой из предложенных в модели схем параметризации конвекции.

В девяти из 23 рассмотренных случаев качество прогноза формирования и эволюции МКС и связанных с ними конвективных опасных явлений погоды оценивается как неудовлетворительное, т. е. либо модель вообще не воспроизводит появление МКС, либо прогнозируемое пространственное положение МКС заметно отличается от фактического. В большинстве

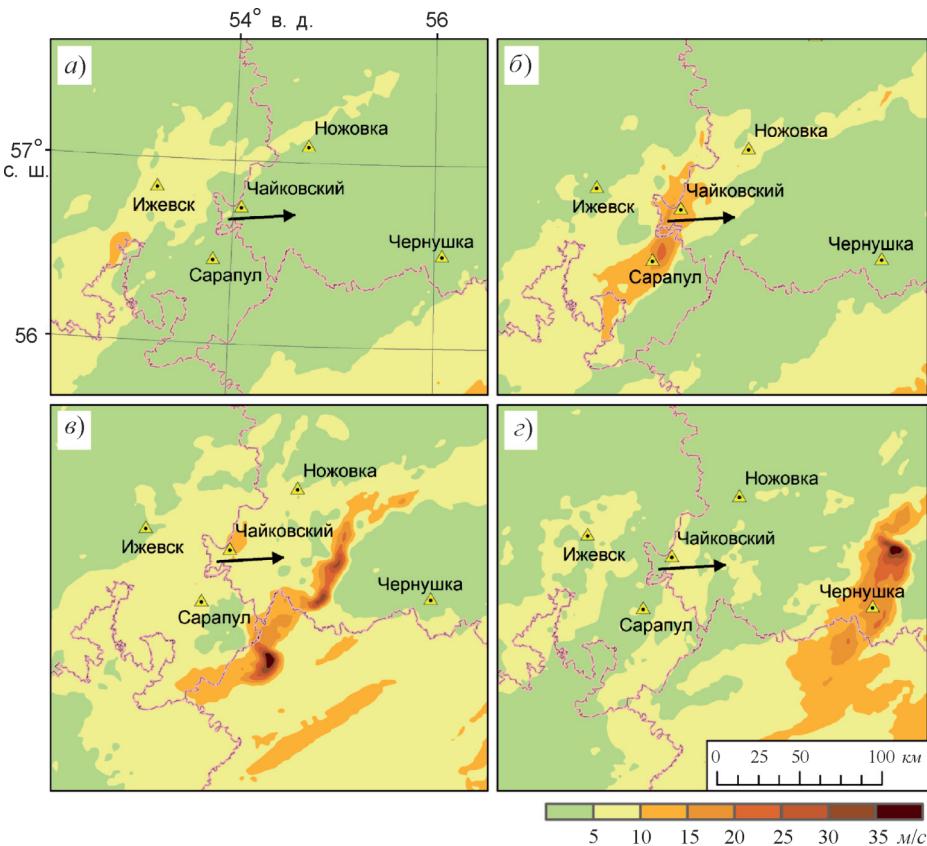


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 17 августа 2014 г.

Стрелка — фактическая траектория шквала.

случаев неправильно прогнозируется положение конвективных систем в пространстве, что зависит от начальных условий (данных реанализа CFS). Положение зон сходимости по данным глобальных моделей часто определяется с ошибкой в 50—100 км и более, что приводит к ошибкам при прогнозе места и времени возникновения МКС по мезомасштабной модели. Таким образом, качество прогноза может повышаться по мере совершенствования глобальных моделей.

Выбор шага сетки модели оказывает значительное влияние на успешность прогноза пространственного положения мезомасштабных конвективных систем и их интенсивности. Однако в отсутствие выраженной сходимости воздушных течений модель WRF не воспроизводит конвекцию при любом шаге сетки. Однозначным преимуществом использования мелких сеток является повышение качества воспроизведения скорости ветра при шквалах.

Поскольку в ряде случаев модель WRF успешно воспроизводит формирование МКС с сильными шквалами, крупным градом и сильными ливнями (дождями), ее применение для сверхкраткосрочного прогноза конвективных опасных явлений погоды представляет практический интерес.

Работа выполнена в рамках государственного задания на научные исследования (проект № 271), а также при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-05-96000 р\_урал\_a и 16-45-590823 р\_a).

## Литература

1. Абдуллаев С. М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем. — Метеорология и гидрология, 2009, № 5, с. 34—45.
2. Абдуллаев С. М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России. — Метеорология и гидрология, 2012, № 1, с. 20—32.
3. Агуренко А. О., Колесов А. М., Коршунов А. А. и др. Оценка экономической полезности использования спутниковой информации при прогнозе конвективных явлений в теплый период. — Метеорология и гидрология, 2014, № 5, с. 31—39.
4. Алексеева А. А., Лосев В. М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 351, с. 43—63.
5. Беркович Л. В., Ткачева Ю. В. Успешность прогноза сильных осадков в Краснодарском и Ставропольском краях в летний период 2013 года по модели WRF-ARW. — Труды Гидрометцентра России, 2014, вып. 351, с. 23—33.
6. Васильев А. А. Рекомендации по прогнозу неблагоприятных и стихийных явлений, связанных с зонами активной конвекции. — М., Гидрометцентр России, 1999, 27 с.
7. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции. — Метеорология и гидрология, 2008, № 9, с. 30—44.
8. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д., Павлюков Ю. Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF. — Метеорология и гидрология, 2011, № 1, с. 5—18.
9. Вельтищев Н. Ф., Степаненко В. М. Мезометеорологические процессы. — М., Изд-во МГУ, 2006, 101 с.
10. Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU. — Метеорология и гидрология, 2010, № 1, с. 5—17.
11. Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития. — Метеорология и гидрология, 2010, № 8, с. 5—20.
12. Гончуков Л. В., Ламаш Б. Е. Численный прогноз опасных явлений погоды по северу Приморского края. — Вестник Дальневосточного отделения РАН, 2010, № 6, с. 17—23.
13. Горбатенко В. П., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю., Нечепуренко О. Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири. — Метеорология и гидрология, 2015, № 5, с. 10—19.
14. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW. — Метеорология и гидрология, 2015, № 1, с. 27—37.
15. Дмитриева Т. Г., Бухаров М. В., Песков Б. Е. Анализ условий возникновения сильных шквалов по спутниковой и прогностической информации. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011, т. 8, № 3, с. 244—250.
16. Калинин Н. А. Динамическая метеорология. — Пермь, Перм. кн. изд-во, 2009, 256 с.
17. Калинин Н. А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. — Пермь, Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2015, 308 с.
18. Калинин Н. А., Ветров А. Л., Свиязов Е. М., Попова Е. В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF. — Метеорология и гидрология, 2013, № 9, с. 21—30.
19. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью. — Метеорология и гидрология, 2005, № 1, с. 84—95.
20. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Определение водности и водозапаса кучево-дождевой облачности по информации метеорологического радиолокатора. — Метеорология и гидрология, 2011, № 2, с. 30—43.

- 21.** Лхамжавын Ж., Маналжавын Ц., Аргучинцев В. К. Исследование конвекции с использованием численной модели Кайна — Фритша. — Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле, 2012, т. 5, № 1, с. 186—194.
- 22.** Мартынова Ю. В., Зарипов Р. Б., Крупчатников В. Н., Петров А. П. Оценка качества прогноза динамики атмосферы в Сибирском регионе мезомасштабной моделью WRF-ARW. — Метеорология и гидрология, 2014, № 7, с. 14—24.
- 23.** Новицкий М. А., Шмерлин Б. Я., Петриченко С. А. и др. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчеопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. — Метеорология и гидрология, 2015, № 2, с. 13—20.
- 24.** Песков Б. Е., Дмитриева Т. Г. Уточнение мезомасштабного численного прогноза сильных ливней. — Метеорология и гидрология, 2010, № 9, с. 5—16.
- 25.** Ривин Г. С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития. — Метеорология и гидрология, 2015, № 6, с. 58—70.
- 26.** Торопов П. А., Шестакова А. А. Оценка качества моделирования новороссийской бопры с помощью модели WRF-ARW. — Метеорология и гидрология, 2014, № 7, с. 38—51.
- 27.** Черногубова Ю. Я. Возникновение опасных конвективных явлений погоды на территории Центрально-Черноземного УГМС и их прогнозирование. — Труды Гидрометцентра России, 2015, вып. 357, с. 125—145.
- 28.** Шихов А. Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, № 1, с. 21—30.
- 29.** Шихов А. Н., Быков А. В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье. — Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 3, с. 124—133.
- 30.** Aligo E. A. and Gallus W. A. On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts. — Wea. Forecasting, 2009, vol. 24, No. 2, pp. 575—594.
- 31.** Davis C. A., Brown B., and Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems. — Mon. Wea. Rev., 2006, vol. 134, No. 7, pp. 1785—1795.
- 32.** Done J. A., Davis C. A., and Weisman M. B. The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. — Atmos. Sci. Lett., 2004, vol. 5, pp. 110—117.
- 33.** Gallus W. A. and Pfeifer M. Intercomparison of simulations using 5WRF microphysical schemes with dual-polarization data for a German squall line. — Adv. Geosci., 2008, vol. 16, pp. 109—116.
- 34.** Hoddard Space Fight Center. LAADS WEB — Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System; <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>.
- 35.** Jankov I., Bao J.-W., Neiman P. J., et al. Evaluation and comparison of microphysical algorithms in ARW-WRF model simulations of atmospheric river events affecting the California coast. — J. Hydrometeorol., 2009, vol. 10, pp. 847—870.
- 36.** Litta A. J., Mohanty U. C., Das S., and Mary Indicula S. Numerical simulation of severe local storms over east India using WRF-NMM mesoscale model. — Atmos. Res., 2012, vol. 116, pp. 161—184.
- 37.** Maddox R. A. Mesoscale convective complexes. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1980, vol. 61, pp. 1374—1387.
- 38.** Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1975, vol. 56, No. 5, pp. 527—530.
- 39.** Schwartz C. S., Kain J. S., Weiss S. J., et al. Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing. — Mon. Wea. Rev., 2009, vol. 137, No. 10, pp. 3351—3372.
- 40.** Skamarock W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. — NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008, 125 p.
- 41.** Sugimoto S., Crook N., Sun J., et al. An examination of WRF 3DVAR radar data assimilation on its capability in retrieving unobserved variables and forecasting precipitation through observing system simulation experiments. — Mon. Wea. Rev., 2009, vol. 137, No. 11, pp. 4011—4029.
- 42.** Weisman M. L., Davis C., Wang W., et al. Experiences with 0—36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. — Wea. Forecasting, 2008, vol. 23, No. 3, pp. 407—437.
- 43.** Yang Y., Wang Y., and Zhu K. Assimilation of Chinese Doppler radar and lightning data using WRF-GSI: Case study of mesoscale convective system. — Adv. Meteorol., 2015, pp. 1—17.