

## Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS

А.Н. Шихов, А.В. Быков

*Пермский государственный национальный исследовательский университет  
Пермь, 614990, Россия  
E-mail: and3131@inbox.ru*

Проанализированы результаты моделирования формирования и эволюции мезомасштабных конвективных систем (МКС), сопровождающихся опасными явлениями погоды над территорией Западного Урала, с помощью численной модели атмосферы WRF/ARW. Всего рассмотрено 20 случаев возникновения мезомасштабных конвективных комплексов и линий шквалов за период 2004–2015 гг. Расчеты выполнены на сетке с шагом по пространству 4 км в режиме прямого моделирования конвекции. В качестве начальных условий использованы данные реанализа CFS. Проверочным материалом послужили спутниковые данные Terra/Aqua MODIS, а также данные метеорологического радиолокатора и сети метеостанций. Показано, что характеристики интенсивности МКС (температура и высота верхней границы облаков, максимальное значение радиоэха) воспроизводятся моделью с достаточной достоверностью. Однако качество прогноза пространственного положения МКС в большинстве случаев неудовлетворительное, что может определяться начальными условиями. Интенсивную конвекцию с образованием МКС во внутримассовых ситуациях модель часто вообще не воспроизводит. Тем не менее, в ряде случаев модель успешно воспроизводит формирование и эволюцию МКС с сильными ливнями, шквалами и градом и может применяться для сверхкраткосрочного прогноза конвективных опасных явлений в регионе с точностью по времени  $\pm 1-2$  ч. Перспективы повышения достоверности прогноза связаны, в частности, с возможностью ассимиляции дополнительных данных наблюдений с помощью модуля WRFDA-3DVAR, а также более детального учета характера подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** мезомасштабные конвективные системы, модель WRF, данные MODIS, температура и высота верхней границы облаков

*Одобрена к печати: 02.12.2015  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-137-148*

### Введение

Ежегодно по данным спутниковых наблюдений над территорией Западного Урала фиксируется несколько случаев прохождения мезомасштабных облачных систем глубокой конвекции, сопровождающихся сильными ливнями, градом и шквалистым усилением ветра. Под мезомасштабными конвективными системами (МКС) понимают ансамбль грозовых штормов, производящий непрерывную зону осадков масштаба не менее 100 км (Абдуллаев, 2010). Понятие МКС включает широкий спектр форм и масштабов систем глубокой конвекции от линий шквалов, скоплений локальных штормов, мезомасштабных конвективных комплексов до систем осадков атмосферных фронтов (Ленская, 2006). Наиболее известная классификация систем глубокой конвекции, основанная на их геометрии и горизонтальных размерах, наблюдаемых со спутников и с помощью метеорологических радиолокаторов (МРЛ), приведена в *табл. 1*.

Анализ и прогноз формирования и эволюции МКС, их положения в пространстве, а также интенсивности связанных с ними опасных явлений (ОЯ), представляет большой интерес для практики. Поскольку большинство случаев ОЯ связано с МКС масштаба мезо- $\alpha$ , то особенно актуально изучение именно таких систем – мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) и линий шквалов (ЛШ). Для решения этой задачи в настоящее время существует несколько негидростатических моделей атмосферы, способных непосредственно

воспроизводить глубокую конвекцию без использования процедур параметризации. Из них свободно доступными являются модели WRF-ARW и NMM. Подробное описание модели WRF в конфигурации ARW приведено в работе (Skamarock et al., 2008). Преимуществом данной модели является возможность выбора из нескольких способов параметризации основных подсеточных процессов, что способствовало ее широкому применению как в исследовательских целях, так и в оперативной практике по всему миру.

Таблица 1. Классификация облачных систем глубокой конвекции (Вельтищев, 2006)

<i>Масштаб</i>	<i>Линейные системы</i>	<i>Квазиокруглые системы</i>
Мезо- $\alpha$ (>200 км)	Линии шквалов	Мезомасштабные конвективные комплексы
Мезо- $\beta$ (20–200 км)	Гряды кучево-дождевых облаков	Скопления кучево-дождевых облаков

За последние 15 лет в мире накоплен большой опыт применения мезомасштабных моделей атмосферы для прогнозирования глубокой конвекции (Done et al., 2004; Davis et al., 2006; Weisman et al., 2008; Schwartz et al., 2009). В настоящее время наибольшую сложность представляет прогнозирование места и времени возникновения МКС и зон опасных явлений. Установлено, что прямое моделирование конвекции в большинстве случаев позволяет получить более достоверный прогноз, чем использование любой из параметризаций конвекции. Для получения адекватной оценки качества прогнозов МКС по мезомасштабным моделям были предложены различные варианты применения объектно-ориентированного подхода (Davis et al., 2006; Вельтищев, 2011). В целях повышения надежности сверхкраткосрочного прогноза глубокой конвекции, проводятся эксперименты по усвоению в модели WRF дополнительных данных стационарных наблюдений, доплеровских радаров и сети грозопеленгаторов с использованием технологии 3DVAR (Yang et al, 2014; Sugimoto et al, 2009). Однако для прогноза на срок более 12 ч. этот подход малоэффективен.

В России модель WRF, наряду с моделью COSMO, используется в Гидрометцентре России в целях сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды, связанных с интенсивной конвекцией. Оценке качества прогнозов конвективных ОЯ с помощью модели WRF на территории Европейской России посвящены работы (Вельтищев, 2008, 2011; Дмитриева, 2011).

Для территории Урала ранее изучалась возможность прогнозирования с помощью модели WRF лишь отдельных случаев выпадения крупного града, развития сильных шквалов и смерчей (Калинин, 2013; Ветров, Шихов, 2013; Шихов, 2015). Однако задача объективной оценки качества прогноза опасных конвективных явлений по модели WRF в этих работах решена не была. В этой связи цель настоящего исследования – оценить применимость модели WRF для прогнозирования возникновения и эволюции конвективных систем масштаба мезо- $\alpha$  на Западном Урале на репрезентативной выборке случаев. Всего рассмотрено 20 случаев возникновения МКС с опасными явлениями погоды за период с 2002 по 2015 гг.

## Исходные данные и методы исследования

Для расчетов 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) выполнена по данным реанализа численной модели прогноза CFS. Выбор данных CFS в качестве исходных обусловлен их сравнительно высоким пространственным ( $0,5^\circ$ ) и временным (1 ч) разрешением. Таким образом, численные эксперименты производились в режиме «квазипрогноза».

Расчет выполнялся на 38 вертикальных уровнях, период моделирования составлял 24 ч, а 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 Мони́на-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), мм/ч, расчетное максимальное значение радиоэха конвективных облаков, DBz, скорость ветра на высоте 10 м, высота верхней границы облаков (Нвго, км) и температура на данном уровне (температура ВГО, °C). При расчете Нвго пороговое значение наличия/отсутствия облачности принималось равным 95% (т.е. облачность имеется, если она покрывает на данной высоте 95 и более процентов неба).

Оценка качества результатов моделирования производилась путем их сопоставления со спутниковыми данными Terra/Aqua MODIS, полученными из архивов NASA (Goddard Space Flight Center). Использовались измерения радиояркостной температуры верхней границы облаков в 31 канале прибора MODIS (с пространственным разрешением 1000 м). Дополнительно выполнялось сопоставление выходных данных модели с данными метеорологического радиолокатора МРЛ-5, установленного в аэропорту Бол. Савино.

Для валидации результатов моделирования применялся упрощенный вариант объектно-ориентированного метода оценки качества прогнозов, описанного в работе (Вельтищев, 2011). Объектно-ориентированный метод предполагает сопоставление фактического (определяемого по данным спутниковых наблюдений и МРЛ) и прогностического положения МКС и зон опасных явлений погоды. Критериями оценивания являются расстояние между центрами тяжести объектов по фактическим данным и по результатам моделирования, а также максимальные значения оцениваемых переменных (Нвго, температура ВГО, интенсивность осадков, скорость шквала). В отличие от точечного оценивания по данным метеостанций, данный метод позволяет разделить ошибку прогноза на две составляющие: ошибку в амплитуде (интенсивности) и в положении объекта. Последняя обусловлена, главным

образом, начальными условиями, поэтому ее устранение крайне затруднительно и возможно лишь по мере совершенствования глобальных моделей прогноза погоды (Вельтищев, 2011).

Для моделирования конвекции в программном комплексе модели WRF предлагается несколько процедур параметризации. Они используются, если прогноз составляется на сетке с шагом сетки от 4 км. При запуске модели с шагом сетки 4 км и менее возможно прямое моделирование конвективных течений, без использования процедур параметризации. Для оценки преимуществ или недостатков прямого моделирования конвекции в сравнении с применением ее параметризаций было проанализировано 6 случаев развития над исследуемой территорией МКС с сильными ливнями, шквалами и градом (наблюдавшихся в 2002–2010 гг.).

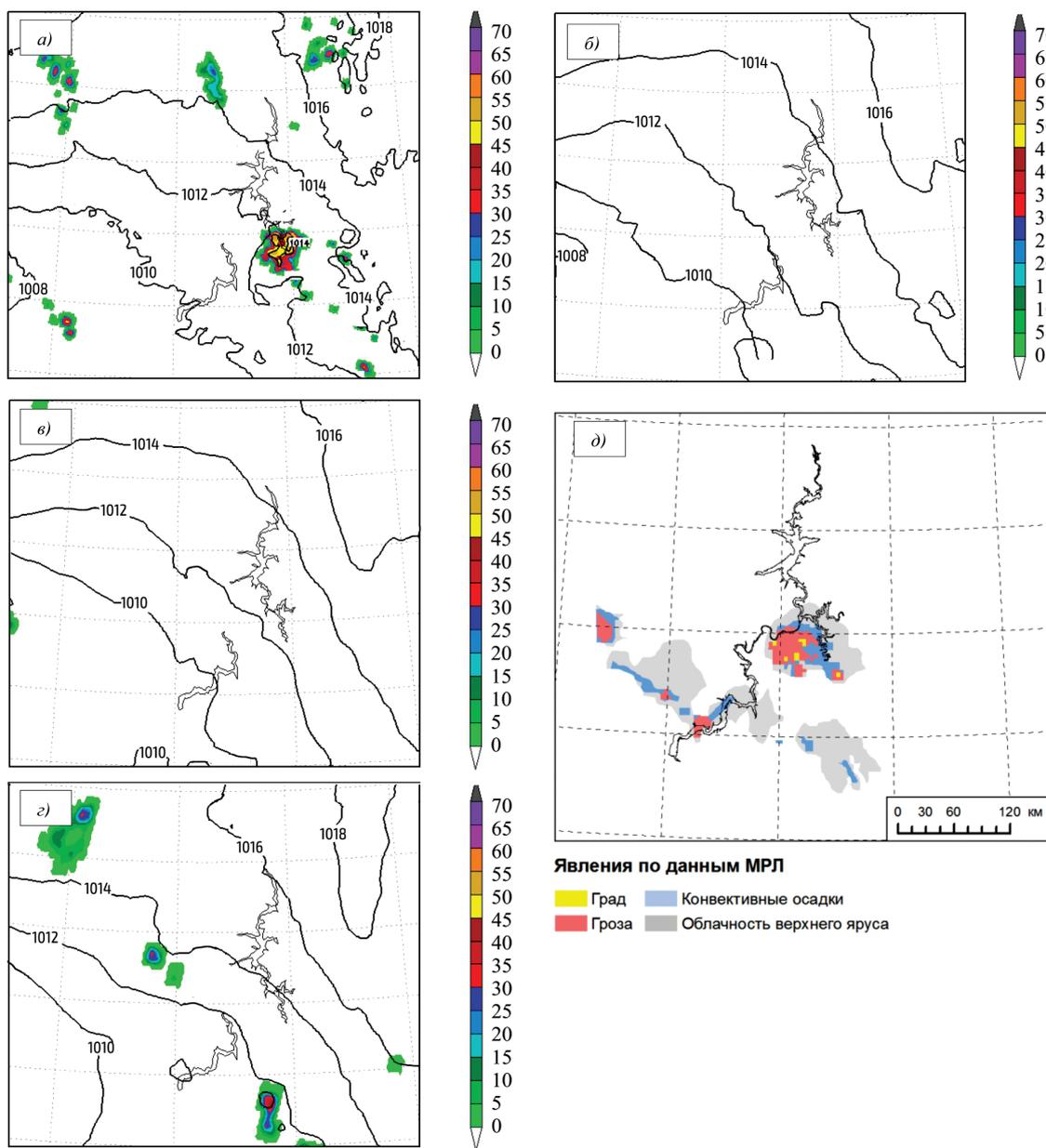


Рис. 1. Оценка прогноза конвективных осадков (по максимальному значению радиоэха) на 13 ч ВСВ 20.07.2004: а) – прямое моделирование конвекции на сетке 4 км, б) – параметризация Каина-Фритша в) – параметризация Грелла-Девени, г) – параметризация Беттса-Миллера-Янича, д) – фактические данные (метеоявления по данным МРЛ Большое Савино, 13.14 ВСВ)

Запуск модели производился с использованием трех различных 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). Проверочным материалом для оценки качества моделирования послужили данные МРЛ и спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS. По ним оценивали фактическое положение и интенсивность МКС и сопоставляли с их прогностическим положением. Совмещение фактических и модельных данных выполнялось средствами ПО ArcGis. По данной выборке случаев был получен вывод, что в условиях изучаемой территории прямое моделирование конвекции на сетке 4 км (без использования параметризаций) обеспечивает получение более достоверного прогноза положения и интенсивности МКС, чем любая из предложенных в модели схем параметризации. Данный вывод проиллюстрирован на *рис. 1* на примере случая прохождения МКС с сильными грозами и шквалами до 27 м/с над территорией Пермского края 20.07.2004 г.

Последующие численные эксперименты проводились только в режиме прямого воспроизведения конвекции на сетке с шагом 4 км. Шаг сетки был выбран как максимальный, на котором целесообразно прямое моделирование конвекции. Размер расчетной области составлял 400×400 точек с центром в точке 58° с.ш. и 56° в.д. (г. Пермь), что позволило уменьшить влияние краевых эффектов.

### Результаты и их обсуждение

Общая оценка качества прогнозов производилась по трем градациям. В ряде случаев объект (МКС) либо вообще не воспроизводился моделью, или же местоположение его центра тяжести отличалось от фактического (определенного по спутниковым данным) более чем на 150 км. Такие прогнозы оценивались как не оправдавшиеся (оценка «0»). Если МКС воспроизводилась моделью, но ее характеристики (Нвго, площадь, пространственное положение) существенно отличались от фактических (данных ДЗЗ и МРЛ), 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. Полученные оценки прогнозов приведены в *табл. 2*.

Как видно из *табл. 2*, в половине рассмотренных случаев прогнозы модели WRF оцениваются как не оправдавшиеся. Из них в 4-х случаях модель не воспроизводит появление МКС над изучаемой территорией, а в 6-ти случаях имеет место значительное смещение МКС относительно фактического положения в пространстве. Ошибки в прогнозе положения МКС, как правило, обусловлены влиянием начальных условий (например, смещением фронтальной зоны относительно ее положения по данным глобальной модели). Случаи же, когда модель WRF вообще не воспроизводит глубокую конвекцию, связаны с определенными типами синоптических ситуаций. Модель не прогнозирует возникновение МКС во внутримассовых ситуациях, когда отсутствует выраженная зона сходимости воздушных течений (из рассмотренных случаев – 24.06.2013 и 20.06.2015). Заметно повышается качество

прогноза в случаях с хорошо выраженными фронтальными зонами. Также стоит отметить, что модель обычно занижает скорость шквалистого ветра в зонах активной конвекции. Данная систематическая ошибка может быть обусловлена недостаточным разрешением сетки по горизонтали (Вельтищев, 2011).

Таблица 2. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем по модели WRF

<i>Дата</i>	<i>Тип МКК</i>	<i>Максимальная Нвго, км (данные МРЛ/ модель)</i>	<i>Температура ВГО, °С (данные MODIS/ модель)</i>	<i>Наблюдавшиеся опасные явления</i>	<i>Оценка качества прогноза</i>
20.07.2004	МКК	13/14	<-60/<-60	Шквал 27 м/с, град	1
20.08.2008	МКК	15/-	<-60/-	Крупный град 20–70 мм	0
06.06.2009	МКК	13/12	<-60/<-60	Крупный град 33 мм	1
19.06.2009	ЛШ	13/13	<-60/<-60	Шквал 24–28 м/с, град	0,5
03.08.2010	МКК	13/13	-60/-60	Шквал 18–21 м/с, град	0,5
05.06.2011	ЛШ	12/12	-55/-55	Ливневые дожди, шквал до 17 м/с, град	1
06.07.2011	МКК	-*/11	<-60/-55	Сильный ливень (до 39 мм/12ч)	0,5
04.06.2012	МКК	-*/-	<-60/-	Сильный ливень (39–42 мм/12ч)	0
09.06.2012	МКК	13/13	<-60/<-60	Крупный град 30 мм, шквал 19-22 м/с, сильный ливень (до 49 мм)	0
21.06.2012	МКК	13/-	<-60/-	Сильный ливень (23–34 мм/12ч)	0
22.06.2012	МКК	12/12	-60/-55	Сильный ливень (58 мм/12ч)	1
04.07.2012	МКК	13/12	-60/-55	Сильный ливень (40–55 мм/12ч)	0,5
18.07.2012	МКК	13/13	<-60/-60	Шквал 20-28 м/с, сильный ливень (до 36 мм), град (до 22 мм)	0,5
18.07.2012	ЛШ	13/-	-55/-	Шквал 20-28 м/с	0
24.06.2013	МКК	-*/-	<-60/-	Крупный град 18–30 мм	0
11.07.2013	МКК	-*/-	-55/-	Сильные ливни (30–35 мм/12ч)	0
06.07.2014	МКК	13/12	-55/-55	Сильные ливни (26–44 мм/12ч)	0,5
29.08.2014	МКК	14/-	<-60/-	Смерч, град до 50 мм, шквал 22 м/с, сильный дождь (до 30 мм)	0
20.06.2015	МКК	-*/-	<-60/-	Сильные ливни (22–45 мм/12ч)	0
24.06.2015	МКК	14/13	<-60/-60	Сильные ливни (до 117 мм/12ч), шквал, град	1
29.06.2015	ЛШ	14/-	<-60/-	Шквал до 29 м/с, сильные ливни (до 40 мм/12ч)	0

\* – данные МРЛ отсутствуют

В свою очередь, такие параметры, как температура ВГО и Нвго, а также мгновенная интенсивность осадков (определяемая по значениям радиоэха) воспроизводятся моделью достаточно хорошо. Несмотря на высокий процент неоправдавшихся прогнозов, в ряде случаев модель WRF может быть полезным инструментом для оперативного предупреждения о конвективных ОЯ. Для примера рассмотрим подробнее результаты моделирования двух

случаев развития МКС с сильными ливнями, шквалами и градом, с которыми был связан значительный ущерб.

### Примеры модельных прогнозов возникновения и эволюции МКС с опасными явлениями погоды

18.07.2012 г. в период между с 7 до 13 ч ВСВ через территорию Западного Урала с юга на север переместился усиливающийся мезомасштабный конвективный комплекс, сформировавшийся в теплом секторе углубляющегося южного циклона перед полярным холодным фронтом. Наблюдались сильные шквалы (20–28 м/с), с крупным градом (до 22 мм) и сильными ливнями (до 36 мм), которые нанесли значительный ущерб.

По данным ДЗЗ Terra MODIS, формирование МКК началось в 06.30 ВСВ в районе Янаула. Модель WRF воспроизводит появление двух скоплений Сб с Нвго до 12 км над севером Башкортостана к 7 ч ВСВ, которые через час объединились в одну МКС. В дальнейшем наблюдалось смещение модельной траектории МКС примерно на 100 км к востоку относительно фактической траектории (рис. 2). Так, по модели воспроизводится сильный шквал (20–25 м/с) и град в 9 ч ВСВ в районе г. Пермь, фактически более сильные шквалы (до 28 м/с) наблюдались в это время западнее, в полосе от Осы до Верещагино.

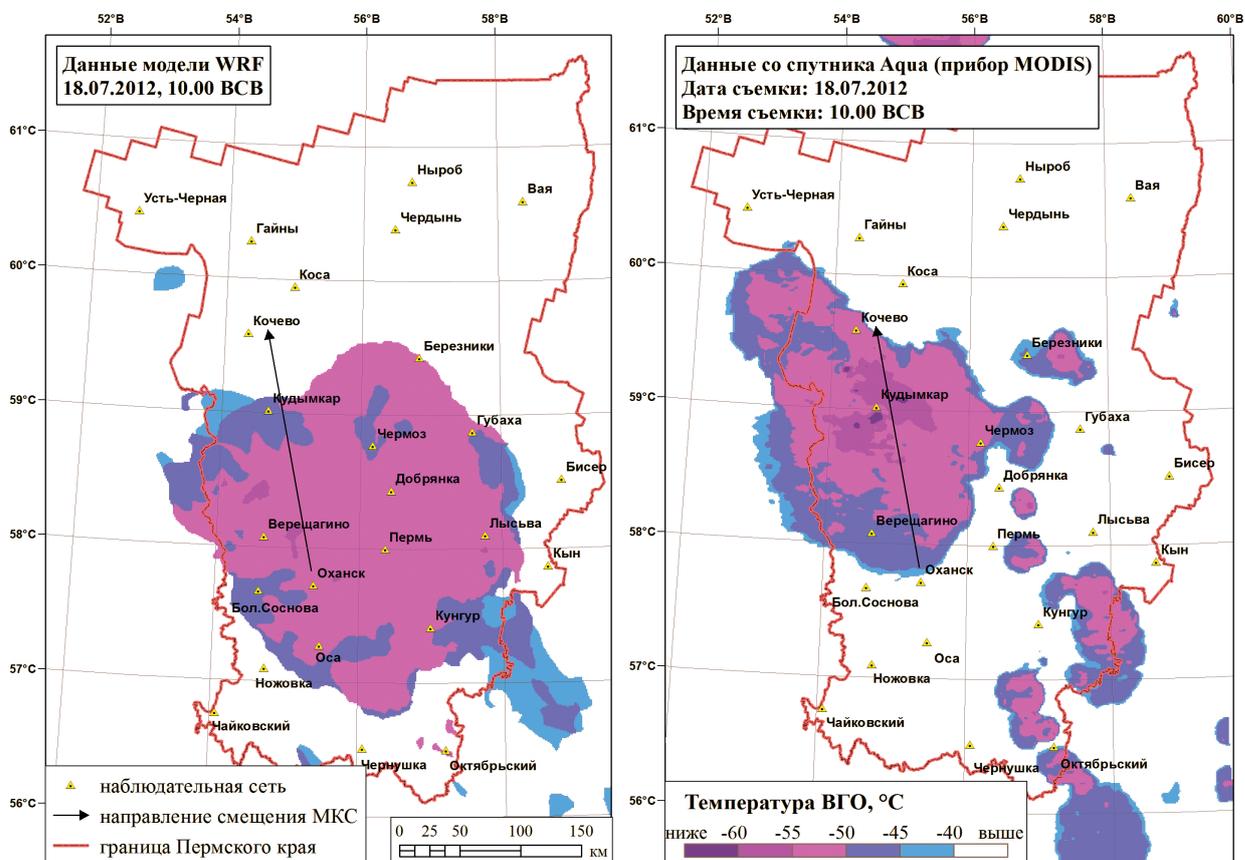


Рис. 2. МКК над Западным Уралом 18.07.2012 по данным модели WRF (слева) и по снимку Aqua MODIS (справа)

В дальнейшем по модели прогнозировалось увеличение площади МКК и смещение зоны сильных шквалов и града на северо-запад Пермского края. Расчетная скорость ветра при шквалах оказалась ниже фактической (до 21 м/с), в то время как метеостанциями зафиксирован шквал 28 м/с в Глазове и 24 м/с в Кудымкаре. Сильный шквал (24 м/с) в Кудымкаре 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) воспроизводятся моделью удовлетворительно, а скорость ветра при шквалах несколько занижена. В то же время, модель не воспроизводит формирование во второй половине дня над восточной частью Пермского края еще одной МКС – линии шквалов. Это связано со смещением траектории основного МКК на восток относительно его фактического положения (рис. 2). Таким образом, в данном случае по модели WRF мог быть дан сверхкраткосрочный прогноз времени прохождения МКК с развитием опасных явлений с точностью  $\pm 1$  ч. Однако пространственное положение зон наиболее интенсивных ливней и шквалов не совпадает с фактическим.

Вечером 24 и в ночь на 25 июня 2015 г. через территорию Пермского края переместился МКК с сильными ливнями, шквалами и градом. В ночь на 25 июня на метеостанции Губаха выпало 117 мм осадков, что привело к размыву участка путей на Свердловской железной дороге и другим разрушениям.

Формирование МКК началось в 9 ч ВСВ над территорией Удмуртии на полярном холодном фронте у вершины волнового циклона, который медленно смещался с юго-запада на северо-восток. В последующие несколько часов МКК усиливался и смещался на северо-восток. В период между 13 и 14 ч ВСВ он достиг стадии максимального развития. В районе г. Перми по данным ДМРЛ зафиксированы сильные шквалы, а Нвго превышала 14 км. Наблюдавшийся в это время шквал в г. Перми нанес значительный ущерб. В ночь на 25 июня МКК стационарировал над западным склоном Среднего Урала и вызвал здесь сильные продолжительные ливни (выпало до 117 мм осадков).

По модели WRF прогнозировалось формирование зоны активной конвекции над территорией Удмуртии вблизи границы Пермского края с 9 ч ВСВ 24.06.2015. Через час модель воспроизводит уже достаточно крупный конвективный кластер с Нвго до 13 км и температурой ВГО до  $-60^\circ$ , что в целом соответствует данным спутниковых наблюдений (рис. 3). В последующие часы скорость смещения данной МКС на северо-восток по модели оказалась завышенной. Так, по модели ливневые осадки (до 30 мм/ч), град и усиление ветра в районе Перми прогнозировались в 12 ч ВСВ, фактически шквал с градом в Перми прошел в 13.30 ВСВ, т.е. на полтора часа позже. Кроме того, модель прогнозировала сильные ливни (до 60 мм осадков) и град в обширной зоне от Кудымкара до Березников, которые фактически не зафиксированы метеостанциями.

Модель воспроизводит сильные ливни (30–70 мм/12ч) на западном склоне Среднего Урала в ночь на 25 июня, однако интенсивность осадков оказывается ниже фактической (117 мм/12ч). Одна из областей интенсивных осадков (до 65 мм) по модели располагалась в 20 км юго-восточнее Губахи. Пространственное положение МКС и зон интенсивных осадков по модели в 17 ВСВ 25 июня оказывается близким к фактическому, но площадь МКС по модели существенно больше, за счет облачности верхнего яруса (рис. 4).

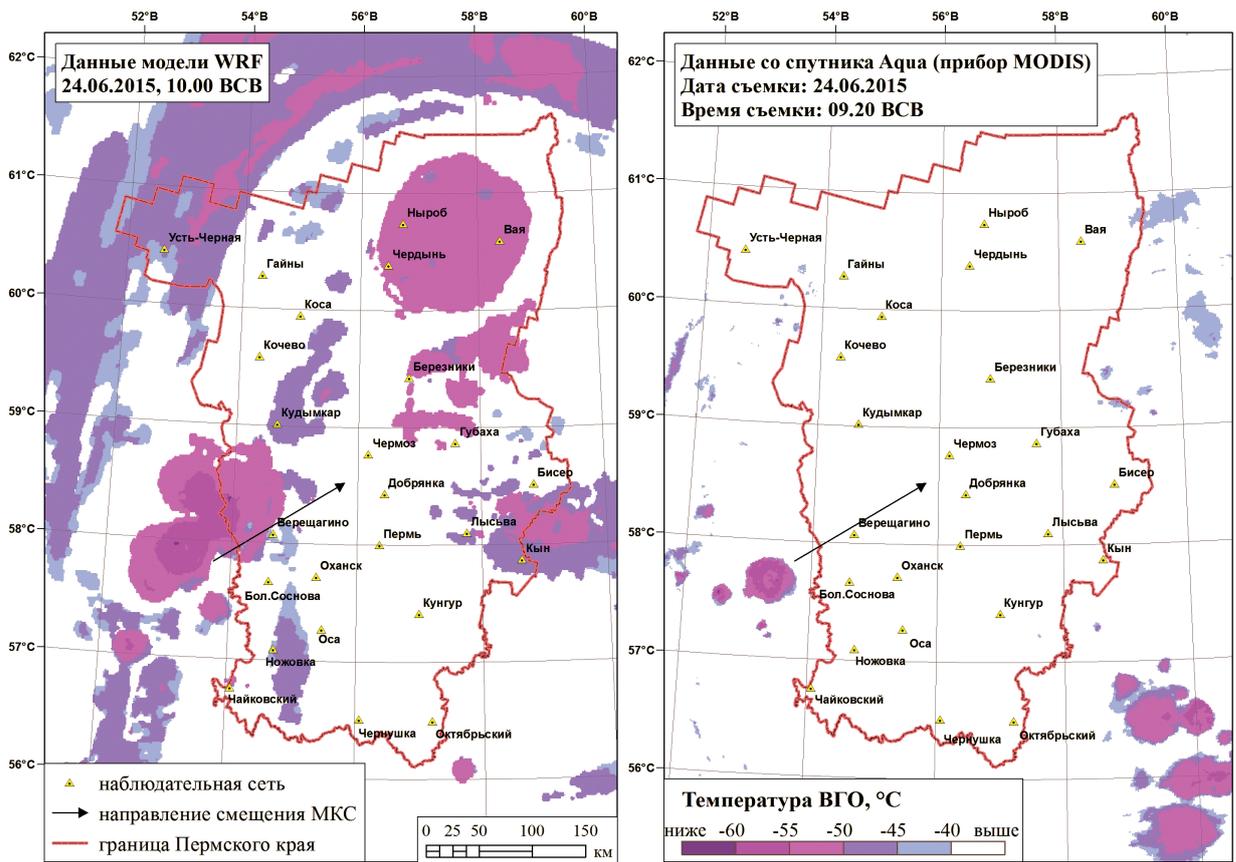


Рис. 3. Начало формирования МКК 24.06.2015 г. над территорией Удмуртии по данным модели WRF (слева) и снимку Aqua MODIS (справа)

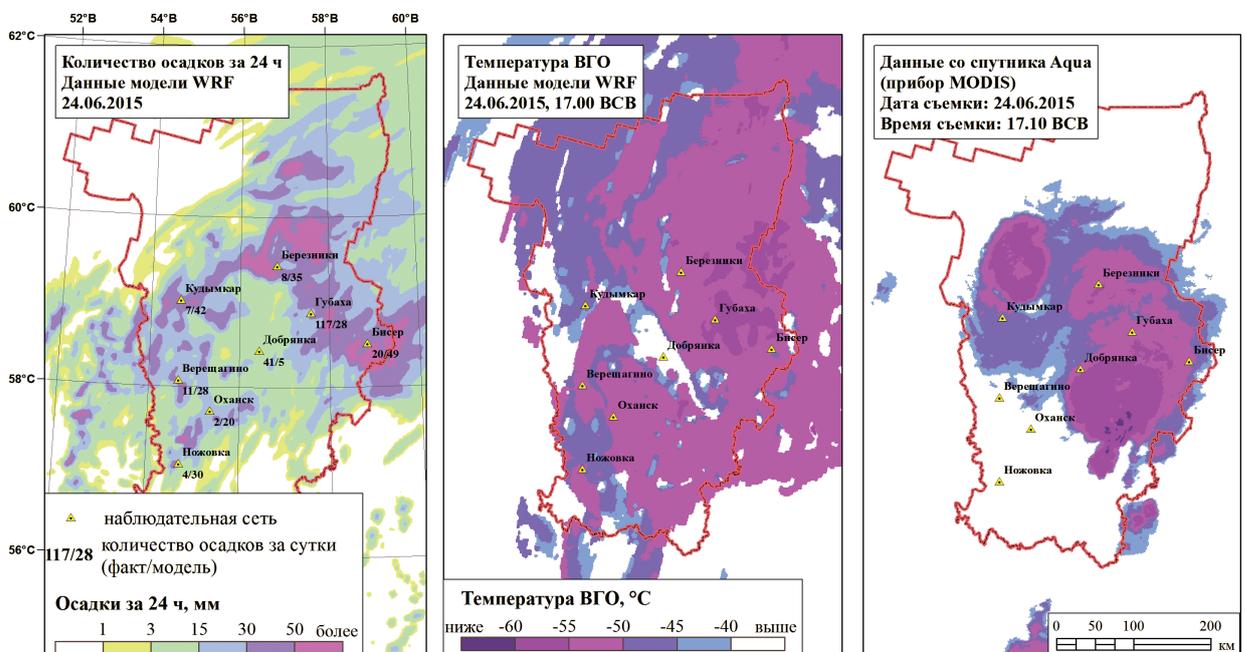


Рис. 4. МКК над Западным Уралом в 17 ч ВСУ 24.06.2015

Таким образом, по модели WRF мог быть дан сверхкраткосрочный прогноз сильных ливней ( $\geq 30$  мм/ч), града и шквалов во второй половине дня 24 июня и в ночь 25 июня с

точностью оценки времени наступления ОЯ  $\pm 1,5$  ч. Однако осадки экстремальной интенсивности (более 100 мм/12 ч) спрогнозированы не были.

### Заключение

Анализ результатов численных экспериментов по моделированию возникновения и эволюции мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF позволяет сформулировать 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 половине случаев качество прогноза формирования и эволюции МКС и связанных с ними конвективных опасных явлений оценивается как неудовлетворительное, т.е. модель либо вообще не воспроизводит появление МКС, либо пространственное положение МКС по прогнозу сильно отличается от фактического. В большинстве 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. Для получения сверхкраткосрочного прогноза перспективы повышения надежности связаны также с ассимиляцией дополнительных данных с помощью системы трехмерного усвоения WRFDA-3DVAR.

В ряде случаев модель WRF успешно воспроизводит формирование МКС с сильными шквалами, крупным градом и сильными ливнями, поэтому применение ее для сверхкраткосрочного прогноза конвективных опасных явлений представляет определенный интерес, несмотря на большой процент неоправдавшихся прогнозов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-96000–р-Урал-а) и Фонда содействия инновациям (Проект № 4323ГУ1/2014).

### Литература

1. *Абдуллаев С.М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз. Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.30. М., 2010. 50 с.
2. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30–44.
3. *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.
4. *Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М.* Мезометеорологические процессы. М., 2006. 101 с.
5. *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.

6. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 9. С. 21–30.
7. Ленская О.Ю. Мезомасштабная организация и эволюция систем осадков на юге Бразилии. Дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.30. М., 2006. 220 с.
8. 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.
9. Davis C.A., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 1785–1795.
10. Done J.A., Davis C.A., Weisman M., The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model // *Atm. Sci. Lett.* 2004. Vol. 5. P. 110–117.
11. Schwartz C.S., Kain J.S., Weiss S.J., Xue M., Bright D.R., Kong F., Thomas K.W., Levit J.J., Coniglio M.C. Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing // *Mon. Wea. Rev.*, 2009. Vol. 137. P. 3351–3372.
12. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Powers J.G. A description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008. 125 p.
13. Sugimoto S., Crook N., Sun J., Xiao Q., Barker D.M. 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. P. 4011–4029.
14. Weisman M.L., Davis C., Wang W., Manning K.W., Klemp J.B. Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model // *Wea. Forecasting*. 2008. Vol. 23. P. 407–437.
15. Yang Y., Wang Y., Zhu K. Assimilation of Chinese Doppler radar and lightning data using WRF-GSI: case study of mesoscale convective system // *Advances in Meteorology*. Vol. 2015. P. 1–17.

## Assessment of forecast quality of mesoscale convective systems in Western Urals region using WRF model and MODIS satellite data

A.N. Shikhov, A.V. Bykov

*Perm State National Research University, Perm 614990, Russia*

*E-mail: and3131@inbox.ru*

The article describes the results of simulation of formation and evolution of mesoscale convective systems (MCS) accompanied by dangerous weather events over the territory of Western Urals using numerical atmospheric model WRF/ARW. 20 cases of mesoscale convective complexes and squall lines formation for the period of 2004-2015 were studied. The simulation was performed on a grid with a spatial step of 4 km for direct convection modeling.

The CFS reanalysis data were used as initial conditions for modeling. Validation of the results was performed using Terra/Aqua MODIS satellite data, as well as radar observation and weather stations data. The characteristics of convection intensity (temperature and height of convective clouds tops, maximum value of reflectivity) were simulated with sufficient reliability. However, the quality of MCS spatial position forecast was unsatisfactory in most cases, probably due to the initial conditions. Also, the model did not reproduce intense convection and MCS formation outside frontal zones. However, in some cases, the model successfully reproduced the formation and evolution of mesoscale convective clusters with strong precipitations, squalls and hail. It can be used for the short-range forecasting of convective hazard in the region, with a time accuracy of  $\pm 1-2$  hours. Prospects for improvement of forecast reliability are connected with the possibility to assimilate additional observational data using WRFDA-3DVAR module, as well as taking a more detailed account of the underlying surface.

**Keywords:** mesoscale convective systems, WRF model, MODIS data, cloud top temperature, cloud top height

*Accepted: 02.12.2015*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-137-148*

### References

1. Abdullaev S.M., *Zhiznennyi tsikl mezomasshtabnykh konvektivnykh sistem: kontseptsiya, klimatologiya i prognoz. Avtoref. dis. d-ra geogr. nauk* (The life cycle of mesoscale convective systems: the concept, climatology and forecast. Doctor's geography thesis), Moscow, 2010, 50 p.
2. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Eksperimenty po chislennomu modelirovaniyu intensivnoi konveksii (Experiments on the numerical simulation of intense convection), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2008, No. 9, pp. 30–44.
3. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Pavlyukov Yu.B., Kratkosrochnyi prognoz sil'nykh osadkov i vetra s pomoshch'yu razreshayushchikh konveksiyu modelei WRF (Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, No. 1, pp. 5–18.

4. Vel'tishchev N.F., Stepanenko V.M., *Mezometeorologicheskie protsessy* (Mesometeorological processes), Moscow, 2006, 101 p.
5. Dmitrieva T.G., Bukharov M.V., Peskov B.E., Analiz uslovii vozniknoveniya sil'nykh shkvalov po sputnikovoi i prognosticheskoi informatsii (Analysis of arising of strong squalls using satellite and forecast data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 244–250.
6. Kalinin N.A., Vetrov A.L., Sviyazov E.M., Popova E.V., Izuchenie intensivnoi konveksii v Permskom krae s pomoshch'yu modeli WRF (Studying intensive convection in Perm krai using the WRF model), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, No. 9, pp. 21–30.
7. Lenskaya O.Yu., *Mezomasshtabnaya organizatsiya i evolyutsiya sistem osadkov na yuge Brazili. Dis. kand. geogr. nauk* (Mesoscale organization and evolution of rainfall systems in southern Brazil. Candidate's geography thesis), Moscow, 2006, 220 p.
8. Shikhov A.N., Bykov A.V., Izuchenie dvukh sluchaev sil'nykh smerchei v Predural'e (Study of two cases of severe tornadoes in the Predural'e region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 124–133.
9. Davis C.A., Brown B., Bullock R., Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems, *Mon. Wea. Rev.*, 2006, Vol. 134, pp. 1785–1795.
10. Done J.A., Davis C.A., Weisman M., The next generation of NWP: Explicit forecasts of convection using the weather research and forecasting (WRF) model, *Atm. Sci. Lett.*, 2004, Vol. 5, pp. 1–117.
11. Schwartz C.S., Kain J.S., Weiss S.J., Xue M., Bright D.R., Kong F., Thomas K.W., Levit J.J., Coniglio M.C. Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing, *Mon. Wea. Rev.*, 2009, Vol. 137, pp. 3351–3372.
12. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Powers J.G., A description of the Advanced Research WRF Version 3, *NCAR Techn. Note. 475 + STR*, June 2008, 125 p.
13. Sugimoto S., Crook N., Sun J., Xiao Q., Barker D.M., 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, pp. 4011–4029.
14. Weisman M.L., Davis C., Wang W., Manning K.W., Klemp J.B., Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model, *Wea. Forecasting*, 2008, Vol. 23, pp. 407–437.
15. Yang Y., Wang Y., Zhu K. Assimilation of Chinese Doppler radar and lightning data using WRF-GSI: case study of mesoscale convective system, *Advances in Meteorology*, Vol. 2015, pp. 1–17.