

УДК 551.509.32

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

*А.В. Быков, Н.А. Калинин, Е.В. Пищальникова, А.Н. Шихов*  
*Пермский государственный национальный исследовательский университет,*  
*г. Пермь, 614990, Россия*

### Аннотация

Работа посвящена верификации краткосрочного численного прогноза опасных и неблагоприятных явлений погоды по мезомасштабной модели атмосферы WRF на территории Среднего Урала. Рассматриваются синоптические ситуации, связанные с интенсивными осадками и развитием конвекции, которые наблюдались в Пермском крае и Свердловской области в 2016 г. Оценка успешности прогнозов сильных снегопадов производилась путем сравнения с данными метеостанций. Для прогноза сильных снегопадов помимо модели WRF использовались также данные глобальных моделей GFS и GEM. Их сравнение с данными модели WRF показало, что модель GEM обеспечивает наиболее высокую точность прогноза. При оценке прогнозов конвективных явлений использовался объектно-ориентированный подход, основанный на сопоставлении фактического и прогностического положения мезомасштабных конвективных систем. В ряде случаев модель WRF воспроизводит место и время возникновения опасных явлений (в том числе локальных), чего невозможно достичь с использованием синоптического метода. Основным ограничением численного прогноза конвективных опасных явлений остается определение пространственного положения мезомасштабных конвективных систем. Систематическим является также занижение скорости порывов ветра при шквалах, но данная проблема может быть устранена путем уменьшения шага сетки модели до 2–3 км.

**Ключевые слова:** конвективные осадки, сильные снегопады, глобальные модели атмосферы, модель WRF-ARW, краткосрочный прогноз

### Введение

Повышение точности краткосрочных прогнозов опасных явлений погоды является одной из наиболее актуальных проблем современной метеорологии. Известно, что значительный прогресс, достигнутый в численном прогнозировании погоды, относится в первую очередь к воспроизведению крупномасштабных атмосферных систем. В то же время прогнозы опасных явлений погоды локального характера часто связаны с неопределенностью в отношении местоположения ожидаемого явления, точного времени его возникновения и интенсивности [1, 2]. В связи с этим большой интерес представляет оценка применимости численных моделей атмосферы для прогнозирования опасных явлений погоды в том или ином регионе.

Основным инструментом для краткосрочного прогноза локальных конвективных явлений являются мезомасштабные модели атмосферы, способные непосредственно воспроизводить глубокую конвекцию без использования каких-либо процедур ее параметризации. Наибольшее распространение из них получила модель WRF (Weather Research and Forecasting), подробное описание которой с динамическим ядром ARW приведено в работе [3]. Преимуществами данной модели является возможность выбора из нескольких способов параметризации основных подсеточных процессов (коротковолновой и длинноволновой радиации, приземного и пограничного слоев тропосферы, микрофизических процессов в облаках и т. д.), что способствовало ее широкому применению как в исследовательских целях, так и в оперативной практике по всему миру. Опыт применения модели WRF для прогноза конвективных явлений на Урале представлен в работах [2, 4–6].

Для прогноза опасных явлений погоды, обусловленных процессами синоптического масштаба, могут успешно применяться как мезомасштабные, так и глобальные модели атмосферы. В настоящее время пространственное разрешение глобальных моделей прогноза погоды достигло 10–25 км [7], что позволяет получать весьма качественные прогнозы интенсивных осадков обложного характера, в том числе в районах со сложной орографией. Так, сравнение прогнозов сильных снегопадов на Урале в октябре 2014 г. по моделям WRF и GFS показало, что существенного улучшения качества прогноза при переходе от глобальной к мезомасштабной модели не происходит [8]. Это подтверждает актуальность региональной верификации прогнозов по нескольким моделям (как глобальным, так и мезомасштабным).

Настоящая статья посвящена верификации краткосрочных численных прогнозов опасных явлений погоды, наблюдавшихся на территории Пермского края и Свердловской области в 2016 г. Поскольку зачастую существенный ущерб связан с неблагоприятными явлениями, близкими по интенсивности к критерию опасных явлений (ОЯ), в данной работе рассматривались и эти случаи.

### Исходные данные и методы исследований

В 2016 г. на территории Пермского края и Свердловской области наблюдались следующие случаи опасных явлений погоды и неблагоприятных явлений, близких по интенсивности к ОЯ:

- 10 случаев сильных снегопадов (с количеством осадков  $\geq 6$  мм за 12 ч с охватом более 30% территории Пермского края или с максимальной суммой осадков  $> 10$  мм/12 ч).
- 7 случаев очень сильных дождей и сильных ливней.
- 2 случая шквалов, 1 случай крупного града.
- 5 случаев КНЯ – комплексов неблагоприятных явлений (сильный ливневый дождь, гроза, шквал, град).

В настоящей работе рассматриваются краткосрочные прогнозы опасных явлений с заблаговременностью 15 и 27 ч (такая заблаговременность выбрана, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения количества выпавших осадков на метеостанциях).

**Для прогноза опасных явлений погоды теплого периода** (сильных дождей, конвективных явлений) использовалась модель WRF версии 3.6.1. 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 (для обеспечения расчета прогноза на больших доменах). Продолжительность счета модели на срок 27 ч при использовании домена  $224 \times 224$  точки составляла около 2.5 ч.

Модель WRF запускалась с шагом сетки по горизонтали, равным 9 км (в холодный период) и 7.2 км (в теплый период). Расчет выполнялся на 38 вертикальных уровнях, шаг вывода данных по времени составлял 1 ч. В качестве начальных условий использовался прогноз глобальной модели атмосферы GFS/NCEP с шагом сетки по горизонтали, равным  $0.5^\circ$ . В ряде случаев также использовались данные модели GFS/NCEP высокого разрешения ( $0.25^\circ$ ). Однако последнее было признано нецелесообразным вследствие избыточного объема данных и отсутствия существенного улучшения качества прогноза. Прогноз рассчитывался от 0 и 12 ч ВСВ.

При моделировании использовались параметризации физических процессов, рекомендованные руководством по экспликации модели [3] для средних широт: 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. Глубокая конвекция моделировалась непосредственно (параметризация не использовалась). В работах [5, 6] было показано, что прямое моделирование конвекции обеспечивает получение более качественного прогноза, чем использование любой из предложенных в модели схем параметризации конвекции.

Оценка успешности прогнозов локальных опасных явлений погоды производилась как на основе сопоставления прогностических данных с наблюдениями метеостанций, так и с применением объектно-ориентированного подхода. Объектно-ориентированный подход используется для оценки успешности прогнозов локальных ОЯ конвективного характера, которые не фиксируются наблюдательной сетью [9]. Он предполагает сопоставление фактического (определяемого по данным спутниковых и радиолокационных наблюдений) и прогностического положения зон опасных явлений погоды. Критериями оценивания являются расстояние между центрами тяжести объектов по фактическим данным и результатам моделирования, а также максимальные значения оцениваемых переменных (высота верхней границы облаков и ее температура, интенсивность осадков, скорость шквала).

**Для прогноза опасных явлений погоды холодного периода** (сильных снегопадов) использовалась мезомасштабная модель WRF с описанными выше настройками, а также глобальные модели GFS (США) и GEM (Канада) с шагом сетки по горизонтали  $0.5$  и  $0.24^\circ$  соответственно. Данные глобальных моделей в коде GRIB2 были получены с web-серверов метеослужб США и Канады. Была проведена сравнительная оценка успешности прогнозов по трем моделям, результаты которой представлены ниже.

### Результаты и их обсуждение

**Прогноз опасных явлений погоды холодного периода.** Из опасных явлений погоды в холодный период 2016 г. на территории Пермского края были зафиксированы только сильные снегопады. Всего рассматривалось 10 случаев сильных снегопадов, которые отличались значительным охватом территории (количество осадков  $\geq 6$  мм/12 ч на 30% территории Пермского края) либо высокой интенсивностью ( $> 10$  мм/12 ч). Наиболее интенсивным был снегопад, наблюдавшийся с выходом активного западного циклона 8–9 ноября 2016 г. на большей части территории Пермского края и Свердловской области (за исключением северных районов). Количество осадков составило 19 мм за 12 ч и 26 мм за сутки соответственно. Общая оценка успешности прогноза сильных снегопадов по модели WRF, выполненная в соответствии с Методическими указаниями [10], приведена в табл. 1.

Из 10 рассмотренных обильных снегопадов в 6 случаях прогнозы по модели WRF оценены как успешные (критерий Пирса – Обухова  $T > 0.7$ ), в остальных случаях прогнозы оправдались частично (значение  $T$  лежит в пределах от 0.06 до 0.4). Ошибки прогноза сильных снегопадов по модели WRF в большинстве случаев связаны с ложными тревогами (явление прогнозировалось, но не наблюдалось). Преобладание ложных тревог над пропусками явления соответствует ранее полученному выводу о том, что модель WRF завышает количество осадков в холодный период года, особенно в феврале – марте [11, 12].

Наибольшее число ложных тревог зафиксировано при сильных снегопадах 18.01.2016 г., 09.11.2016 г и 29.11.2016 г. Однако в двух случаях (20.03.2016 г. и днем 29.03.2016 г.) зафиксировано большое число пропусков явления. Модель не воспроизвела снегопады, которые имели ливневый характер и наблюдались в тыловых частях циклонов на фоне интенсивной адвекции холодного воздуха. Как было показано ранее, при подобной синоптической ситуации точность прогноза сильных снегопадов существенно снижается [8].

Поскольку глобальные модели GFS и GEM также обеспечивают достаточно высокую успешность прогнозов сильных снегопадов, было проведено сравнение полученных с их помощью прогнозов с прогнозами по модели WRF (табл. 2). Оценка успешности этих прогнозов производилась в соответствии с Методическими рекомендациями [10].

В целом все рассматриваемые модели обеспечивают достаточно высокую надежность прогноза сильных снегопадов. Доля успешных прогнозов составляет от 88% до 90%. В то же время на материалах 2016 г. можно сделать предварительный вывод о том, что наиболее точные прогнозы сильных снегопадов могут быть получены по данным глобальной канадской модели GEM. Величина критерия Пирса – Обухова, а также показатель предупрежденности явления по данным модели GEM заметно выше, чем по данным моделей WRF и GFS. Кроме того, прогнозы по модели GEM характеризуются минимальным числом ошибок второго рода (пропусков явления). Однако для получения более надежных выводов требуется увеличение длины ряда наблюдений еще на 2–3 года.

Из рассмотренных сильных снегопадов наибольшей интенсивностью отличались два случая: 19–20 марта и 8–9 ноября 2016 г. (рис. 1, 2). Они сопровождалась комплексом неблагоприятных явлений погоды (усилением ветра и метелями).

Табл. 1

Случаи опасных и неблагоприятных явлений погоды на Среднем Урале в холодный период 2016 г. и оценка успешности их прогноза по модели WRF

Дата	Описание явления	Оценка прогноза	Число метеостанций
09.01.2016	Сильный снег (6–12 мм/12 ч) по северу, северо-западу Пермского края на 8 метеостанциях	Оправдался ( $T = 0.98$ )*	8 – совпадение 0 – пропуск явления 1 – ложная тревога
18.01.2016	Сильный снег (6–10 мм/12 ч) по территории Среднего Урала, на 8 метеостанциях	Частично оправдался ( $T = 0.40$ )	4 – совпадение 3 – пропуск явления 7 – ложная тревога
19.03.2016	Сильный снег (6–12 мм) по югу, востоку территории Пермского края на 7 метеостанциях	Оправдался ( $T = 0.95$ )	7 – совпадение 0 – пропуск явления 1 – ложная тревога
20.03.2016	Сильный снег (6–16 мм) по востоку территории Пермского края и в Свердловской обл. на 10 метеостанциях	Частично оправдался ( $T = 0.40$ )	4 – совпадение 6 – пропуск явления 0 – ложная тревога
06.04.2016	Сильный мокрый снег (6–17 мм) по востоку территории Пермского края и в Свердловской обл. на 8 метеостанциях	Оправдался ( $T = 0.93$ )	8 – совпадение 0 – пропуск явления 3 – ложная тревога
07.04.2016	Сильный мокрый снег (6–19 мм) по востоку территории Пермского края и в Свердловской обл. на 8 метеостанциях	Оправдался ( $T = 0.71$ )	5 – совпадение 0 – пропуск явления 2 – ложная тревога
08.11.2016	Сильный и очень сильный снег (до 21 мм/12 ч) в центральных и южных районах Пермского края, на юго-западе Свердловской обл.	Оправдался ( $T = 0.96$ )	20 – совпадение, 0 – пропуск явления 1 – ложная тревога
09.11.2016	Сильный снег (6–14 мм/12 ч) на большей части территории Пермского края и Свердловской обл.	Оправдался ( $T = 0.74$ )	22 – совпадение 1 – пропуск явления 6 – ложная тревога
29.11.2016, ночь	Сильный снег (6–11 мм/12 ч) на большей части территории Пермского края и Свердловской обл.	Частично оправдался ( $T = 0.1$ )	23 – совпадение 7 – пропуск явления 12 – ложная тревога
29.11.2016, день	Сильный снег (6–11 мм/12 ч) в северных и южных районах Пермского края и Свердловской обл.	Частично оправдался ( $T = 0.06$ )	1 – совпадение 8 – пропуск явления 2 – ложная тревога

*Примечание.*  $T$  – значения критерия Пирса – Обухова, используемого для оценки успешности прогноза на основе сравнения числа случаев наличия или отсутствия явления по метеостанциям [10]. Для расчета критерия использовались данные с 48 метеостанций Пермского края и Свердловской области.

Сумма осадков за 12 ч в первом случае составила до 12 мм, во втором – до 21 мм. За сутки выпало в первом случае до 19 мм, во втором – до 26 мм осадков. 20 марта 2016 г. наблюдалось также усиление ветра (в Свердловской области с порывами до 25–30 м/с) на фоне резкого углубления южного циклона, который перемещался через Средний Урал. Во втором случае снегопады были связаны с заполняющимся циклоном, поэтому максимальные порывы ветра не превышали 13–15 м/с.

Табл. 2

Сравнение успешности прогнозов сильных снегопадов по моделям GEM, GFS и WRF в 2016 г.

Критерии успешности прогноза	Модель		
	GEM	GFS	WRF
Критерий Пирса – Обухова	0.55	0.45	0.47
Процент успешных прогнозов	90	90	88
Оправдываемость прогноза наличия явления	0.62	0.65	0.62
Предупрежденность явления	0.63	0.53	0.53
Число ложных тревог	47	44	56
Число пропусков явления	40	55	54

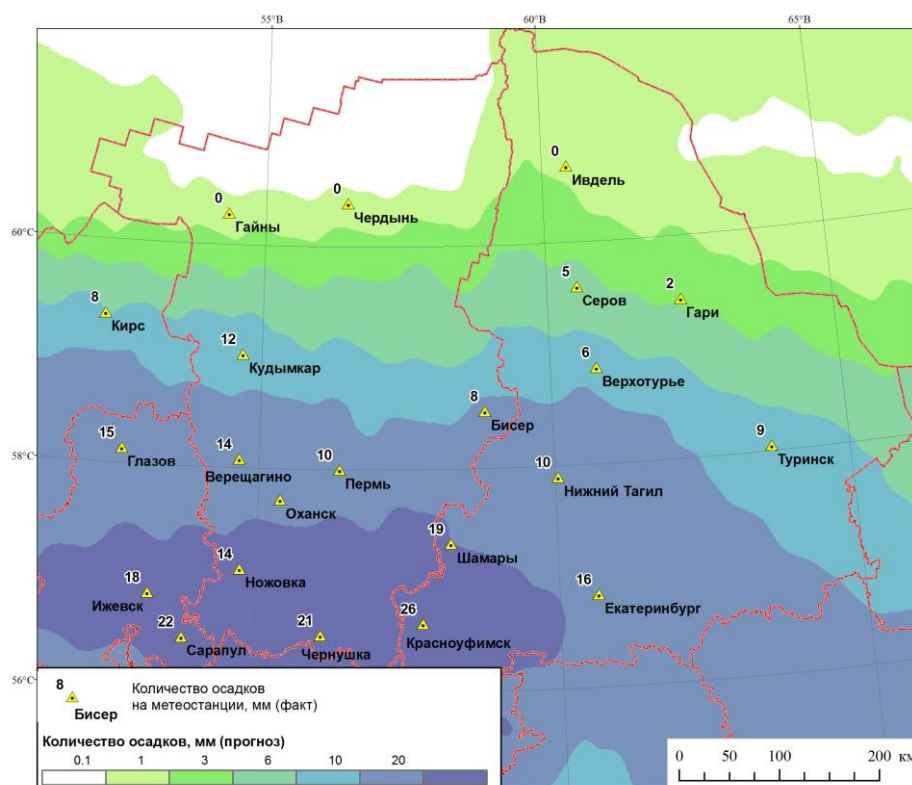


Рис. 1. Прогноз сильного снегопада на Среднем Урале 19–20 марта 2016 г. по модели GEM

Прогностические суточные суммы осадков по модели, которая дала наиболее достоверный прогноз (в обоих случаях это модель GEM), приведены на рис. 1–2. Модель адекватно воспроизводит зоны осадков высокой интенсивности, что видно при сравнении прогностического поля осадков с их фактической суммой на метеостанциях, а также по высокому значению критерия Пирса – Обухова (в первом случае  $T = 0.85$ , во втором случае –  $0.96$ ).

**Прогноз опасных явлений погоды в теплый период 2016 г.** В теплый период 2016 г. большинство случаев опасных и комплексов неблагоприятных явлений было обусловлено развитием конвекции. Для их прогноза использовалась модель WRF, которая запускалась в режиме прямого моделирования конвекции

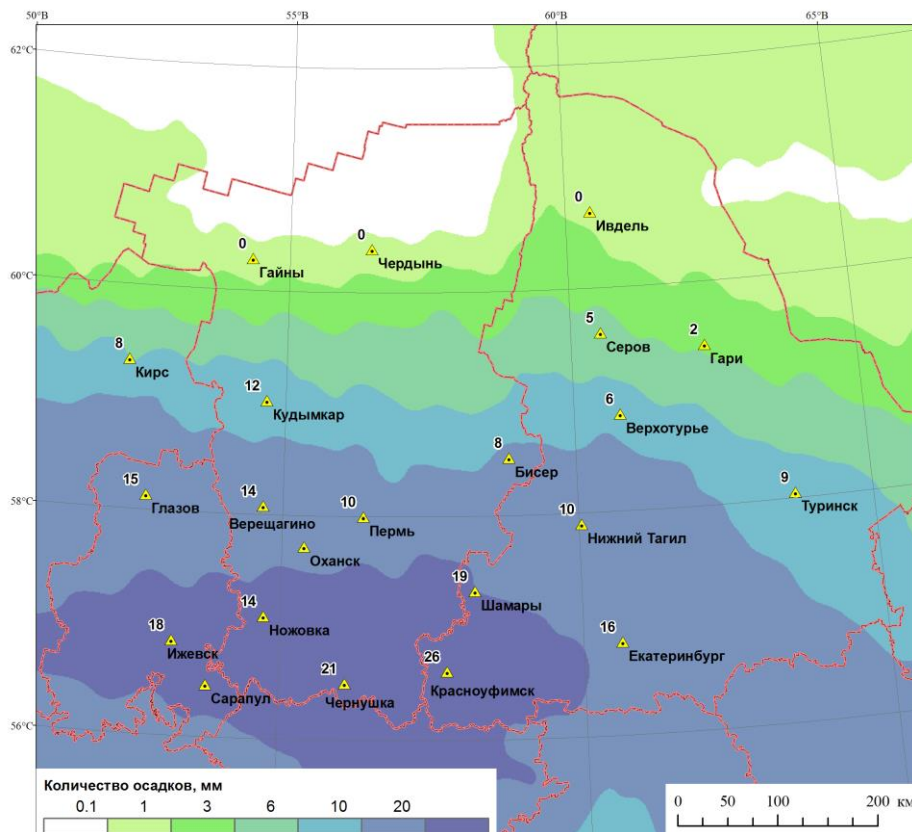


Рис. 2. Прогноз сильного снегопада на Среднем Урале 8–9 ноября 2016 г. по модели GEM

с шагом сетки по горизонтали, равным 7.2 км. Общая оценка успешности прогнозов опасных и неблагоприятных явлений в теплый период года приведена в табл. 3.

Из одиннадцати рассмотренных случаев опасных и неблагоприятных явлений в четырех случаях были получены успешные прогнозы, когда время и место возникновения явления совпадало с его фактической локализацией. В двух случаях прогнозы не оправдались, поскольку модель не воспроизвела развитие конвекции. В остальных случаях прогнозы оправдались частично. Модель воспроизвела развитие интенсивной конвекции, но зоны прогностического развития опасных явлений не совпадают с их фактической локализацией. В целом достоверность прогноза конвективных явлений оказалась выше полученных ранее оценок с применением той же версии модели [6]. Улучшение может быть обусловлено оптимизацией шага сетки модели по горизонтали, а также совершенствованием глобальной прогностической модели GFS, данные которой являются начальными условиями при запуске WRF.

**Прогнозы сильных дождей и ливней.** В 2016 г. в Пермском крае было зафиксировано два случая сильных дождей со значительным охватом территории. Они были обусловлены смещением на Средний Урал интенсивно углубляющихся циклонов. 27 июня 2016 г. сильные дожди прошли по северным и центральным

Табл. 3

Случаи опасных и неблагоприятных явлений погоды на Среднем Урале в теплый период 2016 г. и оценка успешности их прогноза по модели WRF

Дата	Описание явления	Оценка прогноза	Комментарий
07.06.2016	КНЯ в г. Пермь. Сильные ливневые дожди (до 49 мм осадков за сутки), грозы, в отдельных районах град	Частично оправдался	Прогнозируемая зона сильных осадков $\geq 30$ мм находится в 50 км северо-западнее фактического положения
27.06.2016	КНЯ на большей части территории Пермского края: сильные ливневые дожди до 29 мм/12ч, грозы, в г. Оса шквал 22 м/с	Оправдался	Модель воспроизводит сильные ливни до 40мм/12 ч
12.07.2016	КНЯ в гг. Чернушка и Пермь: сильные ливневые дожди до 29 мм/12 ч, грозы, град до 10 мм, шквал до 24 м/с	Оправдался	Модель воспроизводит траекторию мезомасштабной конвективной системы (МКС) и зоны сильных ливней (до 40 мм осадков)
18.07.2016	Локальные сильные ливни до 51мм/6 ч в гг. Кунгур, Оханск и п. Октябрьский	Частично оправдался	Модель воспроизводит локальные ячейки с ливнями (до 30 мм/ч) в центральных и южных районах края
31.07.2016	Локальный сильный ливень в Кочеве (45 мм/52 мин)	Частично оправдался	Модель воспроизводит сильный ливень (более 30 мм/ч) в 50 км юго-восточнее станции Кочеве
01.08.2016	КНЯ по северным районам Пермского края: сильные ливни до 27 мм, шквал до 22 м/с, град диаметром до 30 мм (метеостанции Кочеве, Гайны, г. Соликамск)	Частично оправдался	Модель воспроизводит формирование линии шквалов, время и место прогнозируемого развития явления не совпадает с фактической локализацией
04.08.2016	Локальный шквал 25 м/с в г. Чермоз, шквалы 17–19 м/с по центральным и восточным районам края	Не оправдался	Модель не воспроизводит развитие конвекции
11.08.2016	Локальный сильный ливень 50 мм/2 ч в г. Оханск	Не оправдался	Модель не воспроизводит развитие конвекции
13.08.2016	Локальный сильный ливень 32 мм/1 ч в г. Чердынь	Оправдался	Модель воспроизводит МКС и вызванные ей сильные ливни (до 30 мм) в районе г. Чердынь
28.08.2016	КНЯ в Перми: ливень 19 мм, град диаметром 14 мм, шквал около 20 м/с	Частично оправдался	Модель воспроизводит усиление ветра до 18 м/с и локальные грозы в районе Перми
06.09.2016	Очень сильные дожди до 63 мм/12 ч в центральных районах Пермского края (метеостанции Верещагино, Чермоз, Губаха, Пермь, Добрянка), усиление ветра до 22 м/с в г. Чернушка	Оправдался	Модель воспроизводит сильные дожди до 50 мм/12 ч в центральных районах края, усиление ветра до 22 м/с в районе г. Чернушка



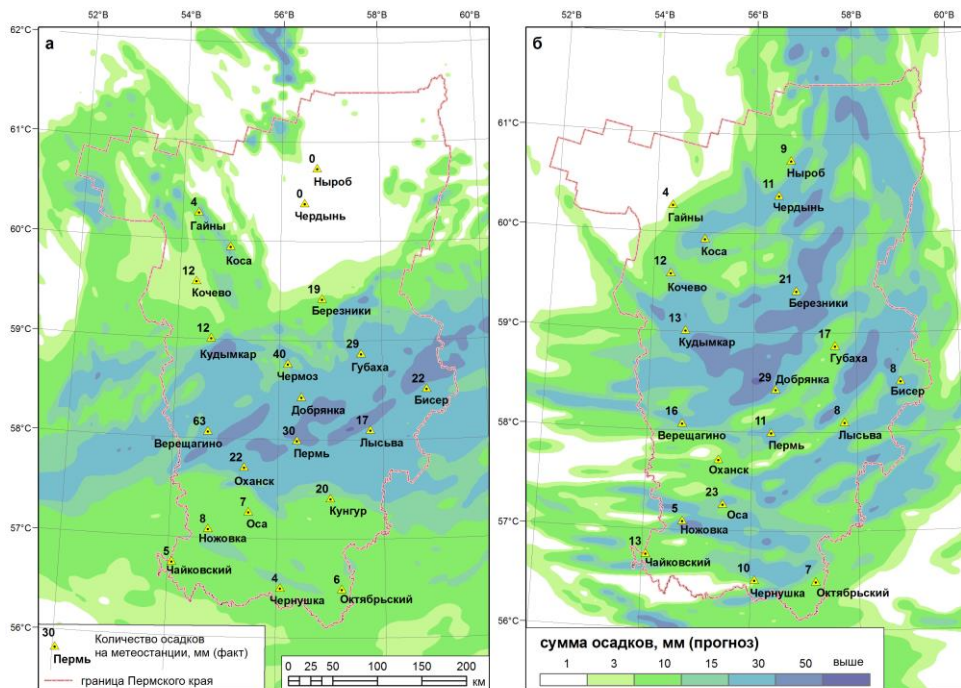


Рис. 3. Успешный прогноз сильных осадков по модели WRF: а) 27 июня 2016 г.; б) 9 июня 2016 г.

районам края (до 30 мм осадков за 12 ч), а 6 сентября 2016 г. – по центральным районам края (до 63 мм осадков за 12 ч), в том числе в Перми (30 мм/12 ч). В первом случае дожди имели ливневой характер и сопровождалась грозами, по югу края шквалами до 22 м/с. Во втором случае из-за увеличения барического градиента на юге края ветер также усиливался до 22 м/с.

Модель WRF в обоих рассматриваемых случаях успешно воспроизводит зоны интенсивных осадков (рис. 3). Прогнозируемые зоны сильных осадков либо совпадают с фактическим, либо находятся на незначительном расстоянии от них (до 20 км). Значение критерия Пирса – Обухова для прогноза сильных дождей ( $\geq 15$  мм/12 ч) в первом случае составило 0.3, во втором – 0.8. Критерий рассчитывался по данным 21 метеостанции Пермского края. Точность прогноза сильных осадков в сентябре ожидаемо выше, чем в июне, когда осадки имели в основном ливневый характер и распределялись по территории крайне неравномерно (рис. 3).

Помимо сильных дождей, охватывавших значительные территории, летом 2016 г. было зафиксировано несколько случаев локальных сильных ливней, когда за час выпадало до 50 мм осадков. Прогноз таких явлений представляет наибольшую сложность, поскольку зона интенсивных осадков имеет обычно диаметр порядка нескольких километров и не всегда воспроизводится даже мезомасштабной моделью. Тем не менее в ряде случаев (12 июля 2016 г. по югу Пермского края, 12 августа 2016 г. по северным районам) эти явления были успешно спрогнозированы. Примеры прогнозов локальных ливней по модели WRF приведены на рис. 4.

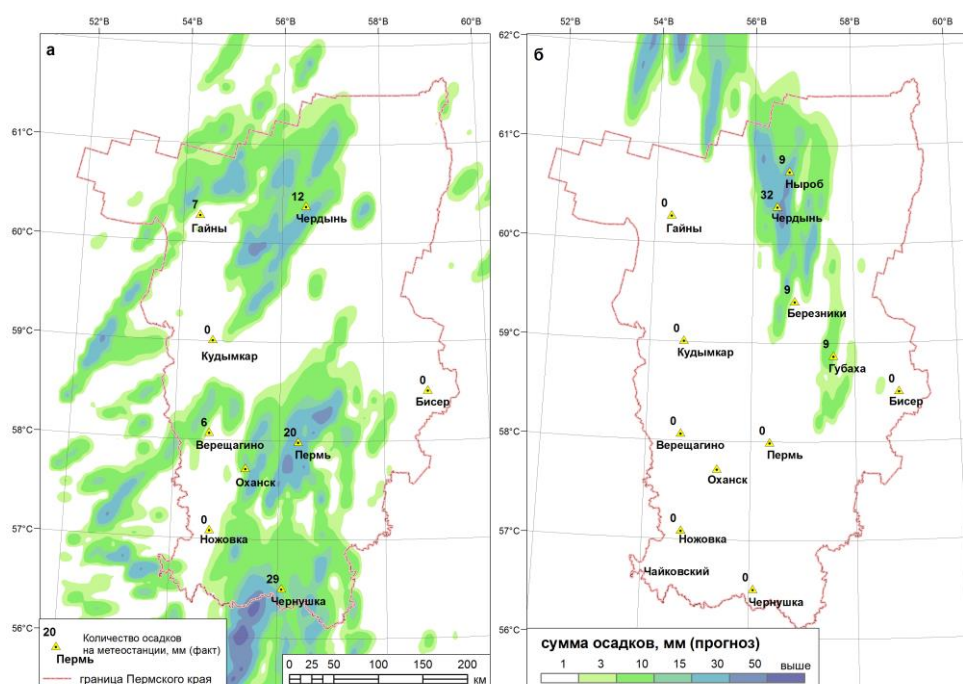


Рис. 4. Успешный прогноз локальных сильных ливней по модели WRF: а) 12 июля 2016 г.; б) 13 августа 2016 г.

Для оценки успешности прогноза ливневых осадков сравнение с данными станционных наблюдений обычно не применяется, так как зоны осадков имеют небольшую площадь и ожидаемое количество осадков крайне редко совпадает с фактическим. Чаще используется объектно-ориентированный подход. Под объектом в данном случае понимается зона развития опасного явления, существующая по факту или воспроизводимая моделью. При использовании объектно-ориентированного подхода оценивается расстояние между фактическим и прогностическим положением объекта, а также разность по времени его появления (прохождения), особенности фактической и модельной траекторий прохождения объекта, интенсивности явлений, охваченной ими площади. Для визуализации формирования и перемещения мезомасштабных конвективных систем (МКС) используются данные о температуре верхней границы облаков, которые могут быть сопоставлены с результатами обработки спутниковых снимков Terra/Aqua MODIS. Используются также данные о максимальной отражаемости, которые могут быть сопоставлены с радиолокационными наблюдениями [5].

В обоих рассмотренных случаях модель WRF успешно воспроизводит развитие МКС, вызвавших интенсивные осадки (пример приведен на рис. 5). Время прогнозируемого развития опасных явлений также совпадает с фактическим.

**Прогноз сильных ветров и шквалов.** Усиления ветра, вызванные увеличением барических градиентов, достаточно успешно прогнозируются как по модели WRF, так и по глобальным моделям. При прогнозе этих явлений преимущество мезомасштабной модели состоит в более детальном учете характера рельефа, что позволяет точнее определить скорость ветра в конкретном пункте.

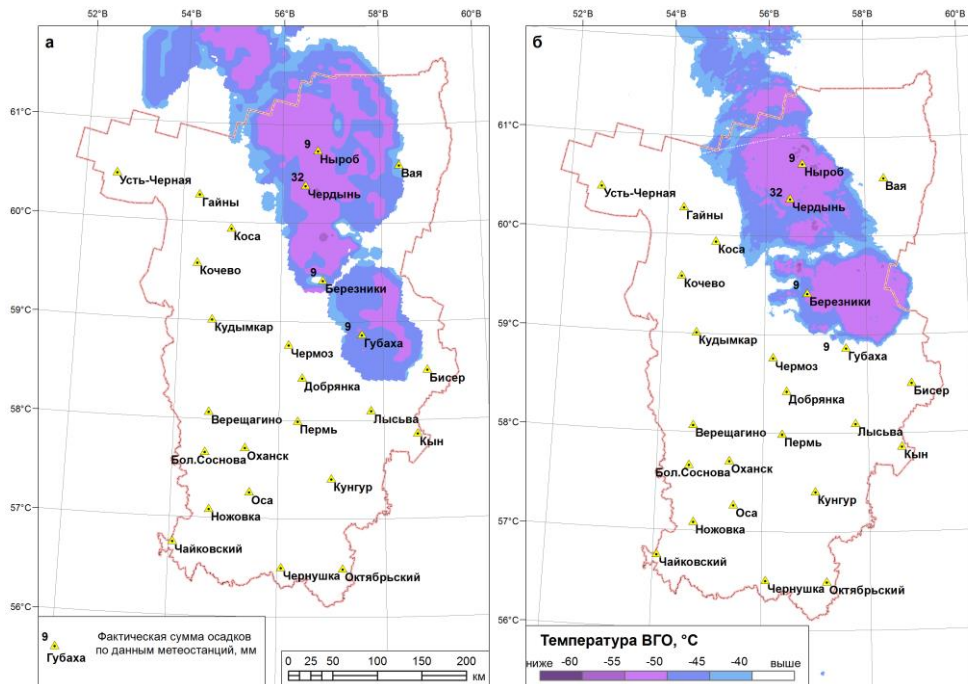


Рис. 5. Сравнение прогностического (а) и фактического (б) положения мезомасштабной конвективной системы, 12 августа 2016 г.

Значительные ошибки в численном прогнозе ветра возникают, когда модель не воспроизводит соответствующую величину барического градиента, например, при «взрывном» циклогенезе.

Пример успешного численного прогноза усиления ветра приведен на рис. 6. В рассматриваемом случае (6 сентября 2016 г.) сильный ветер с порывами до 22 м/с наблюдался в южной части Пермского края в тыловой части углубляющегося юго-западного циклона на фоне интенсивной адвекции холодного воздуха. Максимальная скорость ветра при порывах по модели отличается от фактической не более чем на 1–3 м/с.

Модель WRF также использовалась для прогноза шквалов. Успешность прогноза шквалов определяется качеством воспроизведения моделью процесса глубокой конвекции. Поскольку прогноз пространственного положения зон активной конвекции часто сопровождается значительными ошибками, шквалы прогнозируются по мезомасштабной модели как непосредственно, так и с помощью вычисления различных дополнительных предикторов (например, индекса гигротермодинамической неустойчивости Б.Е. Пескова) [13].

В 2016 г. на территории Пермского края зафиксирован один случай шквала в градации опасного явления ( $\geq 25$  м/с) и четыре случая шквалов (20–24 м/с), наблюдавшихся в комплексе с другими неблагоприятными явлениями (сильными ливнями, градом). В случае шквала в градации ОЯ, наблюдавшегося 4 августа 2016 г. в г. Чермоз, модель WRF не воспроизвела развитие конвекции и связанного с ней усиления ветра. Данный случай шквала имел внутримассовый характер и был связан с развитием мезомасштабной конвективной системы в тропической воздушной массе.

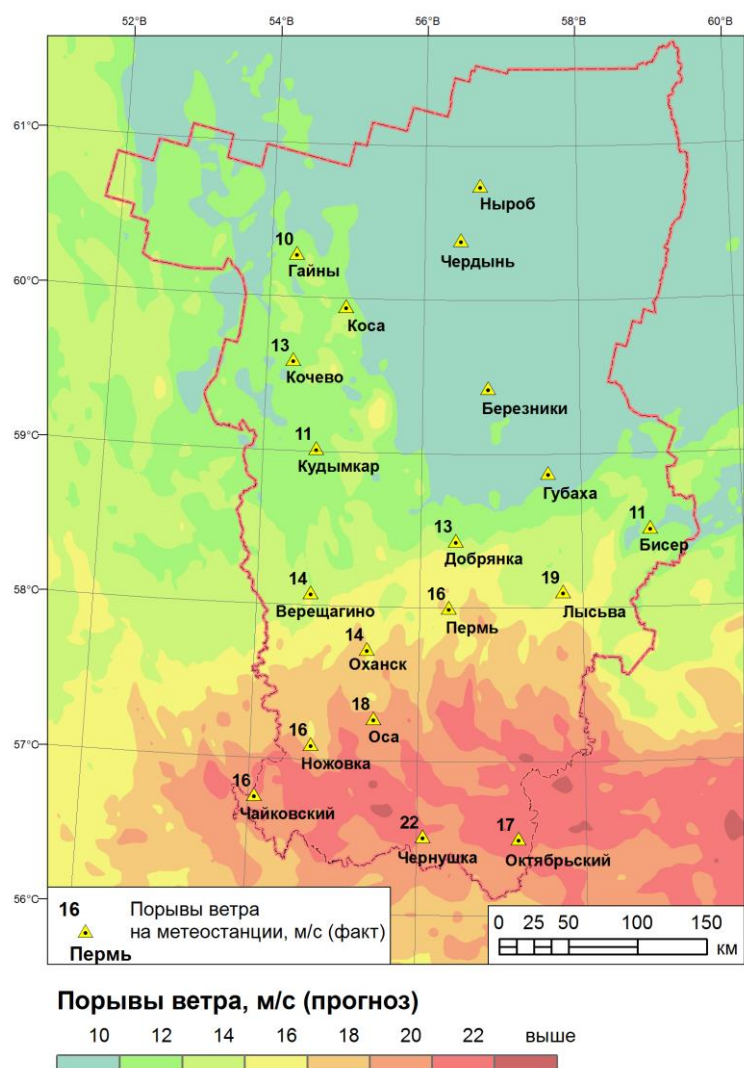


Рис. 6. Прогноз максимальной скорости ветра при порывах по модели WRF, 6 сентября 2016 г.

В случаях фронтальных шквалов, которые наблюдались 27 июня, 12 июля, 1 и 28 августа 2016 г., модель воспроизвела развитие конвекции и усиление ветра до 15–18 м/с в зонах осадков. Однако максимальная скорость порывистого ветра при расчете с шагом сетки, равным 7.2 км, оказалась заниженной на 3–6 м/с в сравнении с фактическими значениями.

### Заключение

Анализ рассмотренных синоптических ситуаций, связанных с интенсивными осадками и развитием конвекции, которые наблюдались на территории Пермского края и Свердловской области, показывает, что в целом модель WRF является достаточно эффективным инструментом для краткосрочного прогноза опасных и неблагоприятных явлений погоды, включая место и время их возникновения,

а также характеристики интенсивности. Однако в холодный период года прогнозы с аналогичным уровнем оправдываемости можно получить на основе глобальных моделей. Наиболее надежные прогнозы сильных снегопадов в 2016 г. были получены по глобальной модели GEM. Минимальной оправдываемостью характеризуется прогноз сильных снегопадов ливневого характера в тыловых частях циклонов. При этом прогнозы сильных снегопадов, возникающих на теплых фронтах, отличаются очень высоким уровнем надежности.

Из опасных явлений погоды теплого периода в 2016 г. наиболее успешным был прогноз сильных дождей, охватывающих большие территории, а наименее успешным – прогноз локальных ливней и шквалов. В двух рассмотренных случаях модель WRF вообще не воспроизвела развитие глубокой конвекции. Возможно, это обусловлено ошибками в начальных данных глобальной модели GFS. В то же время в ряде случаев (27 июня и 12 июля 2016 г.) место и время возникновения опасных конвективных явлений были успешно спрогнозированы по модели WRF. Такой результат, как правило, невозможен при использовании синоптического метода прогноза и указывает на практическую ценность мезомасштабного численного прогноза конвективных явлений.

Основное ограничение численного прогноза конвективных опасных явлений связано с определением пространственного положения мезомасштабных конвективных систем, что приводит к ошибкам при прогнозе места и времени возникновения опасных явлений. Систематической ошибкой является также занижение скорости порывистого ветра при шквалах, но данную проблему, возможно, устранить путем уменьшения горизонтального шага сетки модели до 2–3 км.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-45-590823-р\_а, 17-45-590850-р\_а и 16-35-00410-мол-а).

#### Литература

1. *Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Голубев А.Д.* Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 359. – С. 48–57.
2. *Калинин Н.А.* Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. – 308 с.
3. *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 Technical Note NCAR/TN-475+STR. – Boulder, Colorado, USA: Nat. Center for Atmospheric Res., 2008. – 125 p. – doi: 10.5065/D68S4MVH.
4. *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.
5. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В.* Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 1. – С. 16–28.
6. *Шихов А.Н., Быков А.В.* Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 137–148.

7. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 359. – С. 5–32.
8. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Пищальникова Е.В., Связов Е.М., Шихов А.Н. Оценка качества прогноза очень сильного снегопада на Урале с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 3. – С. 55–62.
9. 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.
10. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284-91. – Л.: Гидрометеиздат. 1991. – 149 с.
11. Калинин Н.А., Связов Е.М., Шихов А.Н. Моделирование процессов снегонакопления и снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища с использованием модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 11. – С. 57–68.
12. Пищальникова Е.В., Калинин Н.А., Ветров А.Л., Шихов А.Н., Связов Е.М., Быков А.В. Прогноз сильного и очень сильного снегопада на Урале на основе модели WRF // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 359. – С. 58–72.
13. Дмитриева Т.Г., Песков Б.Е. Численный прогноз с мезосиноптическим уточнением двух случаев особо сильных шквалов на Европейской части России летом 2010 г. // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 2. – С. 18–29.

Поступила в редакцию  
01.08.17

---

**Быков Алексей Васильевич**, аспирант кафедры метеорологии и охраны атмосферы

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [blexx256@yandex.ru](mailto:blexx256@yandex.ru)

**Калинин Николай Александрович**, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [kalinin@psu.ru](mailto:kalinin@psu.ru)

**Пищальникова Евгения Владимировна**, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [sinoptik.perm@yandex.ru](mailto:sinoptik.perm@yandex.ru)

**Шихов Андрей Николаевич**, кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614990, Россия  
E-mail: [shikhovan@gmail.com](mailto:shikhovan@gmail.com)

**Forecasting Hazardous and Adverse Weather  
in the Middle Urals Using Hydrodynamic Atmosphere Models***A.V. Bykov*<sup>\*</sup>, *N.A. Kalinin*<sup>\*\*</sup>, *E.V. Pishchal'nikova*<sup>\*\*\*</sup>, *A.N. Shikhov*<sup>\*\*\*\*</sup>*Perm State University, Perm, 614990 Russia*E-mail: *\*blxx256@yandex.ru*, *\*\*kalinin@psu.ru*, *\*\*\*sinoptik.perm@yandex.ru*,  
*\*\*\*\*shikhovan@gmail.com*

Received December 15, 2017

**Abstract**

The problem of verification of short-term numerical forecast of hazardous and adverse weather using the WRF mesoscale atmosphere model for the territory of the Middle Urals has been considered. The meteorological situations associated with the intense precipitation and convection development in Perm krai and Sverdlovsk oblast (Russia) in 2016 have been studied. The success of heavy snow forecast has been assessed by comparison with the data from weather stations. To forecast heavy snow, data from the GFS and GEM global models have been used along with the WRF model. The comparison with data from the WRF model has demonstrated that the GEM model provides the most accurate forecast. The forecasts of convective phenomena have been assessed with the help of the object-oriented approach based on the comparison of the real and forecasted positions of mesoscale convection-allowing systems. In a number of cases, the WRF model is able to forecast the place and time of adverse weather (including the local ones), which is impossible when the synoptic method is used. The main restriction for numerical forecast of convective hazardous weather is the inability to determine the spatial position of mesoscale convection-allowing systems. Understating the gust velocity of squall winds also occurs, but this problem can be solved by reducing the grid step to 2–3 km.

**Keywords:** convective precipitation, heavy snowfall, global atmospheric models, WRF-ARW model, short-range forecast

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects nos. 16-45-590823-r\_a, 17-45-590850-r\_a, and 16-35-00410-mol-a).

**Figure Captions**

- Fig. 1. The forecast of heavy snow in the Middle Urals on March 19–20, 2016 using the GEM model.  
Fig. 2. The forecast of heavy snow in the Middle Urals on November 8–9, 2016 using the GEM model.  
Fig. 3. A successful forecast of heavy precipitation events using the WRF model: *a)* June 27, 2016; *b)* June 9, 2016.  
Fig. 4. A successful forecast of local heavy rainfalls using the WRF model: *a)* July 12, 2016; *b)* August 13, 2016.  
Fig. 5. The comparison of the forecasted (*a*) and real (*b*) position of the mesoscale convection-allowing system, August 12, 2016.  
Fig. 6. The forecast of maximum gust velocity using the WRF model, September 6, 2016.

**References**

1. Vasil'ev A.A., Vilfand R.M., Golubev A.D. Joint use of numerical mesogrid and conceptual models for real-time forecast of hazardous weather. *Tr. Gidromettsentra Ross.*, 2016, vol. 359, pp. 48–57. (In Russian)

2. Kalinin N.A. *Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotakh* [Monitoring, Modeling, and Forecasting the Atmosphere State in Temperate Latitudes]. Perm, Perm. Gos. Nats. Issled. Univ., 2015. 308 p. (In Russian)
3. 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 Technical Note NCAR/TN-475+STR*. Boulder, Colorado, USA, Nat. Cent. Atmos. Res., 2008. 125 p. doi: 10.5065/D68S4MVH.
4. Kalinin N.A., Vetrov A.L., Sviyazov E.M., Popova E.V. Studying intensive convection in Perm krai using the WRF model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 38, no. 9, pp. 598–604. doi: 10.3103/S1068373913090021.
5. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V. Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, no. 1, pp. 16–28. doi: 10.3103/S1068373917010022.
6. Shikhov A.N., Bykov A.V. Assessing the quality of mesoscale convection-allowing systems in the Western Urals using the WRF model and MODIS satellite data. *Sovr. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 137–148. (In Russian)
7. Tolstykh M.A. Global atmosphere models: Current state and development prospects. *Tr. Gidromettsentra Ross.*, 2016, no. 359, pp. 5–32. (In Russian)
8. Kalinin N.A., Vetrov A.L., Pishchal'nikova E.V., Sviyazov E.M., Shikhov A.N. Estimating the accuracy of the very heavy snowfall forecast in the Urals by the WRF model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, no. 3, pp. 193–198. doi: 10.3103/S1068373916030043.
9. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Pavlyukov Yu.B. Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 1, pp. 1–10. doi: 10.3103/S1068373911010018.
10. *Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. RD 52.27.284-91* [Methodology Guidelines. Industrial (Operational) Tests of New and Advanced Methods for Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecast. RD 52.27.284-91]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991. 149 p. (In Russian)
11. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M. Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 11, pp. 749–757. doi: 10.3103/S1068373915110059.
12. Pishchal'nikova E.V., Kalinin N.A., Vetrov A.L., Shikhov A.N., Sviyazov E.M., Bykov A.V. Heavy and extremely heavy snowfall forecast in the Urals using the WRF model. *Tr. Gidromettsentra Ross.*, 2016, no. 359, pp. 58–72. (In Russian)
13. Dmitrieva T.G., Peskov B.E. Numerical forecast with the mesosynoptic specification of extremely severe squalls in the European part of Russia (Case study for June 13 and July 29, 2010). *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 2, pp. 71–79. doi: 10.3103/S1068373913020027.

**Для цитирования:** Быков А.В., Калинин Н.А., Пищальникова Е.В., Шихов А.Н. Прогнозирование опасных и неблагоприятных явлений погоды на Среднем Урале с использованием гидродинамических моделей атмосферы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 2. – С. 352–367.

**For citation:** Bykov A.V., Kalinin N.A., Pishchal'nikova E.V., Shikhov A.N. Forecasting hazardous and adverse weather in the Middle Urals using hydrodynamic atmosphere models. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 2, pp. 352–367. (In Russian)