

Объектно-ориентированная оценка краткосрочного прогноза конвективных опасных явлений погоды в Пермском крае по модели WRF

Н.А. Калинин¹, А.В. Быков¹, А.Н. Шихов^{1,2*}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, пер. Пыжевский, 3

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

Рассматривается оценка точности прогнозов конвективных опасных явлений погоды по модели WRF на примере территории Пермского края и прилегающих регионов в теплый период 2021 г. Заблаговременность прогнозов по модели WRF составляла до 27 ч, шаг сетки модели – 5 км. Для снижения числа ложных тревог при прогнозе была использована масштабируемая параметризация конвекции. Выборка случаев шквалов и крупного града сформирована на основе данных метеостанций, сообщений об ущербе и спутниковых снимков ветровалов и включает 56 событий; тогда как выборка случаев сильных ливневых дождей создана только по данным метеостанций. По модели WRF за этот же период прогнозировались 30 случаев шквалов (≥ 25 м/с) и 63 случая сильных ливней (≥ 30 мм/ч). Отдельно рассмотрены случаи формирования суперъчейковых облаков и смерчей. Для случаев шквалов по данным наблюдений и по модели выполнена кросс-валидация с применением пороговых критериев по расстоянию 50 км и по времени ± 3 ч. Прогнозы сильных осадков оценивались с применением индексов SCI и EDI. В целом качество прогнозов сильных осадков было неудовлетворительным. Доля успешных прогнозов шквалов составила 36%, причем в это число попали случаи с наибольшим ущербом. Несмотря на высокую долю пропусков явлений (которые преобладают над ложными тревогами), прогнозы шквалов можно считать практически значимыми.

Ключевые слова: шквал, сильный дождь, краткосрочный прогноз, модель WRF, масштабируемая параметризация конвекции, объектно-ориентированная оценка, пропуски явления, ложная тревога; squall, heavy rainfall, short-term forecast, WRF model, scale-dependent convection parameterization, object-oriented assessment, event omission, false alarm.

Введение

Опасные метеорологические явления (ОЯ), связанные с развитием глубокой конвекции в атмосфере (сильные ливни, крупный град, шквалы и смерчи), могут быть причиной возникновения чрезвычайных ситуаций в большинстве регионов России, в том числе в Пермском крае. Так, за период 1984–2020 гг. на территории Пермского края зафиксировано 165 случаев сильных шквалов и смерчей, большинство из которых нанесли ущерб населенным пунктам, объектам инфраструктуры или вызвали повреждения лесного покрова [1]. Задача совершенствования краткосрочного прогноза места и времени возникновения этих явлений, а также их интенсивности еще очень далека от своего решения [2].

Региональные модели численного прогноза погоды (ЧПП) представляют собой эффективный инструмент для исследования и краткосрочного прогнозирования конвективных ОЯ, поскольку по-

зволяют напрямую (без использования параметризации) воспроизводить процессы глубокой конвекции и формируемые ими мезомасштабные конвективные системы (МКС) [3]. Впервые оперативные прогнозы с применением прямого моделирования конвекции на основе мезомасштабной модели атмосферы ARPS были получены в начале XXI в. для США [4]. С середины 2000-х гг. региональные модели ЧПП используются для краткосрочного прогноза риска возникновения смерчей и других конвективных ОЯ в США [5–6]. В настоящее время список публикаций по этому направлению во всем мире насчитывает уже тысячи наименований.

Среди региональных моделей ЧПП наиболее широко используется модель WRF (Weather Research and Forecasting), разработанная совместными усилиями Национального центра атмосферных исследований США (NCAR) и ряда других организаций [7]. В России накоплен достаточно обширный опыт ее применения для диагностики и краткосрочного прогнозирования конвективных ОЯ. Однако в большинстве работ анализируется воспроизводимость лишь отдельных случаев, с которыми был связан значительный ущерб [8–15].

* Николай Александрович Калинин (kalinin@psu.ru); Алексей Васильевич Быков (blexx256@yandex.ru); Андрей Николаевич Шихов (shikhovan@gmail.com).

Исследования, в которых рассматривалась обширная выборка случаев конвективных ОЯ и оценивалась доля пропусков и ложных тревог, например на основе радиолокационных данных, весьма немногочисленны [16–19]. Исключение составляют работы, в которых оценивались прогнозы сильных осадков по станционным данным [20, 21].

Для оперативных прогнозов конвективных ОЯ Гидрометцентром РФ используется система ЧПП COSMO-Ru [22, 23]. Также на основе модели COSMO-CLM был получен наиболее продолжительный в России непрерывный временной ряд данных атмосферного моделирования с высоким пространственным разрешением (1 км) для Московского региона за период 2007–2016 гг. [24], однако воспроизводимость конвективных ОЯ по этим данным не анализировалась.

Между тем в мире накоплен значительный опыт применения объектно-ориентированного подхода для оценки численных прогнозов конвективных ОЯ на обширных выборках случаев, начиная с работы [25], в которой были сформулированы основы этого подхода. Для территории России его применение долгое время ограничивалось сложностью доступа к данным доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ) и неполным покрытием территории этими данными. Однако получение детального массива данных о случаях конвективных ОЯ на основе анализа информации о нанесенном ущербе, спутниковых снимков ветровалов, а также снимков с метеорологических спутников позволяет частично решить эту проблему.

Цель настоящего исследования – оценка применимости модели WRF версии 4.2 для краткосрочного прогноза двух типов конвективных ОЯ – ливневых дождей и шквалов – с определением доли ошибок разных типов (пропусков и ложных тревог) и их соотношения. Исследование выполнено для территории Пермского края и прилегающих регионов на примере теплого периода 2021 г. С учетом ранее проведенных экспериментов с моделью WRF в режиме прогноза [12, 14, 26] повышенное внимание было уделено ложным тревогам, для минимизации которых использована масштабируемая параметризация конвекции. Поскольку часть случаев шквалов может быть связана с суперъядерными облаками и мезоциклонами [см. 15, 27], также проанализировано их воспроизведение моделью. Для этого оценивались значения параметра завихренности восходящего потока в средней тропосфере [6, 27].

Данные и методы

Данные о случаях конвективных ОЯ

Прогнозы по модели WRF оценивались в пределах области, включающей Пермский край и прилегающие территории (55–62° с.ш., 49–61° в.д.) и расположенной вблизи центра модельного домена. Такая область для оценки прогнозов была выбрана

для исключения краевых эффектов. На этой территории находится 84 метеостанции. Продолжительность исследуемого периода составила 114 сут – с 4 мая по 25 августа 2021 г., когда в пределах региона по данным сети метеостанций и грозопеленгаторов наблюдались грозы. Оценивался прогноз четырех видов явлений – шквалов (≥ 25 м/с), сильных дождей (≥ 30 мм/12 ч) и ливней (≥ 30 мм/ч), а также мезоциклонов (случаев наблюдения суперъядерных облаков и смерчей). Прогноз града оценивался только применительно к наблюдавшимся случаям, т.е. без анализа ложных тревог.

Для оценки прогнозов было создано два проверочных набора данных. Первый набор включал сведения о случаях сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) по данным метеостанций [28] и использовался для оценки прогноза сильных дождей. Всего было зафиксировано 37 таких событий за 14 различных дат. Второй набор включал сведения о случаях шквалов, крупного града, смерчей, зафиксированных сетью метеостанций и полученных из публикаций в журнале «Метеорология и гидрология» [29], из базы данных ESWD [30] и по сообщениям об ущербе в СМИ, а также по сведениям о ветровалах, выделенных по спутниковым снимкам Sentinel-2 на основе методики [31]. Всего были подтверждены 41 случай шквалов, один случай смерча и 16 случаев крупного града за 31 различную дату. Наибольшее число случаев (6) отмечалось 4 августа 2021 г. Пространственное расположение этих событий показано на рис. 1 (цв. вкладка).

Для каждого случая в выборке был отмечен источник данных – наблюдения метеостанций, сведения об ущербе или данные о ветровалах. Так, из 41 случая шквалов 18 были зафиксированы метеостанциями, из них в 8 случаях скорость ветра достигала критерия ОЯ (≥ 25 м/с). 34 случая были получены по информации об ущербе, нанесенном населенным пунктам и инфраструктуре, 6 шквалов вызвали ветровалы в лесных массивах на площади от 20 до 567 га. В 13 случаях шквалы были подтверждены по двум или трем из перечисленных источников. Все 16 случаев с крупным градом были зафиксированы по данным очевидцев или по сообщениям об ущербе.

Выбор конфигурации модели WRF

Модель WRF используется для оперативного прогноза конвективных ОЯ для Уральского региона в ежедневном режиме с мая 2020 г. Запуск модели производится на начальных данных прогноза GFS/NCEP с шагом сетки 0,25°, полученным в 0:00 или 12:00 по Всемирному скоординированному времени (BCV). Программный комплекс модели WRF установлен на высокопроизводительной рабочей станции. Заблаговременность оцениваемых прогнозов составила до 27 ч. В 2020 г. оценка прогнозов была выполнена только для случаев, когда наблюдались ОЯ со значительным ущербом [26].

В ходе этой работы было выявлено несколько случаев ложных тревог, когда модель воспроизводила МКС, которые фактически не наблюдались, в связи с чем в 2021 г. конфигурация модели была изменена.

Основной модификацией конфигурации модели стало включение масштабируемой параметризации конвекции. Традиционно конвекция параметризуется в глобальных моделях ЧПП, имеющих шаг сетки ≥ 10 км. При шаге сетки 3–8 км в региональных моделях ЧПП конвекция обычно моделируется напрямую, хотя такое разрешение позволяет лишь частично воспроизвести конвективные процессы. Эта проблема получила название «серой зоны» [32]. Один из путей ее решения – применение подхода unified parameterization, который обеспечивает плавный переход от полной параметризации конвективных процессов к их прямому моделированию по мере увеличения разрешения [33].

В настоящей работе была использована модифицированная схема Аракавы–Шуберта, известная как SAS [34]. Эта схема ранее использовалась в модели GFS/NCEP [35] и относительно недавно стала доступной в модели WRF. Она может применяться при моделировании с разным пространственным разрешением и позволяет повысить точность прогноза конвективных явлений за счет снижения числа ложных тревог, что показано, в частности, в [36] применительно к ливневым осадкам. Также в 2021 г. (в отличие от 2020 г.) модель запускалась на одном домене. Шаг сетки по горизонтали составил 5 км, а размер домена – 600×450 точек (табл. 1). Для запуска модели производилось предварительное усвоение данных

объективного анализа за 12 ч, предшествующих началу прогноза. Опция «спектрального притягивания» при этом не использовалась.

Идентификация случаев конвективных ОЯ в выходных данных модели

По выходным данным модели WRF выделены все случаи с сильными шквалами (≥ 25 м/с), которые прогнозировались в пределах рассматриваемой области в теплый период 2021 г. Продолжительность одного события шквала по модели составляла от 1 до 7 ч, поэтому модельные события были представлены в виде треков. Трек – это линейный объект, соединяющий начальную и конечную точку области, в которой прогнозировался шквал, связанный с одной модельной МКС. Для каждого модельного события были определены время начала и конца, максимальная скорость ветра и время, когда она прогнозировалась. С целью обеспечения совпадения по срокам с данными метеостанций события сильных осадков за 12 ч были выделены как разность накопленных осадков за 3 и 15 ч по ВСВ. Отдельно были рассмотрены сильные ливни – события с интенсивностью осадков ≥ 30 мм/ч, для которых были построены такие же треки, как и для шквалов.

Для выделения мезоциклонов в выходных данных модели рассчитывался параметр Updraft Helicity – спиральность восходящего потока в слое 2–5 км (UH_{2-5km}). Этот параметр широко применяется в качестве индикатора интенсивности вращения в средней тропосфере при прогнозировании суперъячеек и торнадо [37, 38]. Критическое значение UH_{2-5km} , однозначно указывающее на наличие мезоциклона, принято равным $200 \text{ м}^2/\text{с}^2$ согласно [38].

Таблица 1

Конфигурация модели WRF для прогноза конвективных ОЯ

Характеристика модели	Принятая настройка
Начальные и граничные условия	Прогноз GFS с шагом сетки по горизонтали $0,25^\circ$ и шагом по времени 1 ч
Модельный домен (шаг сетки/число узлов)	5 км/ 600×450
Координаты центра домена	58° с.ш., 56° в.д.
Число вертикальных уровней и верхняя граница области расчета	48 (50 гПа)
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Картографическая проекция	Lat/Long (WGS 1984)
Максимальная заблаговременность прогноза	24 ч
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	ARW
Шаг интегрирования по времени	Адаптивный
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Планетарный пограничный слой	Схема Меллора–Ямады–Янича (Eta)
Подстилающая поверхность	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Схема GFDL (Eta)
Приземный слой	Схема Монина–Обухова с вязким подслоем Карлсона–Боланда и стандартными функциями подобия
Конвекция	Модифицированная схема SAS

Методика оценки прогнозов

Прогнозы сильных дождей оценивались на основе индексов критического успеха (CSI) и экстремальной зависимости (EDI), рассмотренных в ряде работ [см., например, 39, 40]. Оба индекса рассчитываются на основе значений таблицы сопряженности прогнозов и наблюдений рассматриваемого явления. Учитывая тот факт, что области с сильными осадками, воспроизводимые моделью WRF, имеют локальный характер, по данным модели определялось количество осадков в ячейках, соответствующих метеостанциям, а также максимумы осадков в радиусе 50 км вокруг каждой станции. Поэтому были рассчитаны индексы CSI и EDI как для точечной оценки, так и для максимумов в радиусе 50 км. Такой радиус был принят как пороговый по аналогии с работой [16].

Оценка прогнозов шквалов основана на объектно-ориентированном подходе [25]. Выполнена кросс-валидация прогнозируемых и фактически наблюдавшихся событий с применением пороговых критериев по расстоянию и по времени (± 3 ч). Для каждого наблюдавшегося шквала была определена максимальная скорость порывов ветра, которая прогнозировалась моделью WRF в радиусе 50 км от места события (для случаев с ветровалами – от центроида ветровала) и в пределах интервала времени ± 3 ч от момента, когда наблюдалось явление. События, не соответствовавшие этим критериям, а также случаи с максимальной скоростью ветра по модели < 20 м/с оценивались как пропуски явления. Для определения ложных тревог выполнена такая же оценка для спрогнозированных событий. Если в радиусе 50 км и во временном интервале ± 3 ч относительно модельного события шквалы не были зафиксированы ни по данным метеостанций, ни на основе сведений об ущербе, то такой случай рассматривался как ложная тревога. Пороговое значение скорости ветра по данным метеостанции при оценке ложных тревог принято равным 20 м/с.

С учетом того, что некоторые локальные шквалы могли быть не зафиксированы метеостанциями и не нанесли никакого значимого ущерба, для каждого модельного шквала были также проанализированы спутниковые снимки Meteosat-8 с целью выявления МКС, которые могли бы вызвать шквал. В результате в перечне ложных тревог было отдельно определено число случаев, не подтвержденных по данным как наземных, так и спутниковых наблюдений.

Результаты

Оценка прогноза сильных осадков

Полученные оценки прогнозов сильных дождей (≥ 30 мм/12 ч) по модели WRF приведены в табл. 2. В целом точность этих прогнозов летом 2021 г. оказалась неудовлетворительной, значения

параметров SCI и EDI существенно ниже, чем полученные ранее оценки по данным глобальных моделей ЧПП для этого же региона [41]. Модель занижает количество осадков в тех случаях, когда они были обусловлены в основном процессами синоптического масштаба, и часто пропускает локальные сильные ливни. При проведении оценки по узлам сетки число попаданий (nH) ожидаемо оказалось многократно меньше числа пропусков явления. Оценка по максимальному количеству осадков в радиусе 50 км от метеостанции дает большое число ложных тревог, но при этом незначительно увеличивает nH.

Таблица 2

Оценка успешности прогноза сильных осадков по модели WRF в 2021 г.

Метод оценки	nH	nM	nF	nD	SCI	EDI
В узлах сетки, ближайших к метеостанции	4	33	9	1297	0,09	0,38
Максимум в радиусе 50 км от метеостанции	9	28	85	1221	0,07	0,32

Примечание. nH – число успешных прогнозов наличия явления (попаданий), nM – число пропусков, nF – число ложных тревог, nD – число успешных прогнозов отсутствия явления.

Выделяется случай 4 июля 2021 г., когда на многих метеостанциях Среднего Урала наблюдались очень сильные дожди с суточной суммой осадков до 152 мм (в Нижнем Тагиле), что привело к формированию паводка, нанесшего значительный ущерб [42]. В данном случае модель воспроизвела очень сильный дождь (до 154 мм за 12 ч) в 50–100 км к востоку от Нижнего Тагила, и не воспроизвела вторую зону сильных дождей, которая наблюдалась в Предуралье, где выпало до 84 мм осадков за сутки (рис. 2, цв. владка). Таким образом, основной вклад в низкую точность прогноза внесла именно ошибка по положению. Стоит отметить, что прогнозы модели WRF в случаях сильных паводкоформирующих осадков на Урале в 2019 г. [41] и в 2020 г. [26] были более успешными.

Отдельно были рассмотрены случаи, когда по модели прогнозировались сильные ливни с интенсивностью осадков ≥ 30 мм/ч. Всего в выходных данных модели было выявлено 63 таких случая, которые, как и шквалы, были представлены в виде треков. Продолжительность существования зон сильных ливней по модели составила 1–6 ч, а прогнозируемая интенсивность осадков достигала 30–72 мм/ч. Однако лишь в 9 случаях по данным метеостанций, попадающих в радиус 50 км вокруг этих зон, количество осадков достигло 15 мм/12 ч и более. Отнести все оставшиеся 54 случая к ложным тревогам нельзя, поскольку сильные осадки могли пройти между метеостанциями. Для решения этой задачи была проведена дополнительная верификация по снимкам Meteosat-8,

в результате чего определено 29 случаев однозначных ложных тревог. В период, когда они прогнозировались (с допуском ± 3 ч), по спутниковым снимкам в радиусе 50 км от области с прогнозируемым сильным ливнем не наблюдались облачные системы, способные вызвать интенсивные осадки. Таким образом, доля ложных тревог при прогнозе сильных ливней в 2021 г. по модели WRF может быть оценена как минимум в 46%. Для более корректной оценки необходимо привлечение данных ДМРЛ.

Оценка прогноза шквалов на основе объектно-ориентированного подхода

Всего модель WRF воспроизвела 30 случаев шквалов с порывами ветра от 25 до 35 м/с, которые относятся к 16 различным датам (табл. 3). Из них только в одном случае (16 июля 2021 г.) шквалы на рассматриваемой территории не наблюдались, хотя был отмечен крупный град. С другой стороны, в течение девяти дней, когда шквалы фактически наблюдались, они не прогнозировались моделью, что указывает на преобладание пропусков явления над ложными тревогами.

Таблица 3
Оценка прогноза шквалов по модели WRF в теплый период 2021 г.

Характеристика	По данным наблюдений		По модели WRF	
	Всего	Совпадающих с данными модели	Всего	Совпадающих с данными наблюдений
Число дней со шквалами	23	15	16	14
Число случаев шквалов	41	14	30	11

Среди 30 предсказанных моделью случаев шквалов только 11 совпадают с данными наблюдения, остальные 19 оценены как ложные тревоги. Среди оправдавшихся прогнозов в 9 случаях были зафиксированы порывы ветра ≥ 20 м/с, в 8 случаях поступили сообщения об ущербе от шквалов, в одном случае выявлен крупный ветровал. Рассматривая случаи ложных тревог, можно отметить, что в 11 из них по снимкам Meteosat-8 вообще не были обнаружены МКС, способные вызвать шквал в том месте и в то время (± 3 ч), где и когда он прогнозировался. В оставшихся 8 случаях МКС на снимках наблюдались, но, судя по данным наблюдений и отсутствию информации об ущербе, скорость ветра в них была завышена моделью.

Завышение интенсивности явления имело место и для некоторых оправдавшихся прогнозов. Так, два раза за весь исследуемый период (16 и 30 июня 2021 г.) по модели прогнозировались шквалы ураганной силы (33–35 м/с), но фактически на метеостанциях были отмечены порывы ветра не более 22–23 м/с, разрушения от шквалов имели локальный характер, а крупные ветровалы в лесных массивах отсутствовали.

Из 41 случая шквалов, выявленных по данным наблюдений, сообщениям об ущербе и анализу ветровалов, прогноз оправдался только для 14 случаев, а также для единственного случая со смерчем (по модели прогнозировался шквал до 27 м/с). Таким образом, доля оправдавшихся прогнозов составила 36%. В этих случаях модель воспроизводит порывы ветра ≥ 20 м/с в радиусе 50 км от места возникновения шквала с ошибкой по времени не более ± 3 ч. Всего в 5 случаях прогнозируемая скорость ветра соответствовала критерию ОЯ (≥ 25 м/с). Однако к числу оправдавшихся относятся прогнозы шквалов 23 июня, 22 июля, 4 августа в Башкортостане и 4 августа в Кировской области, с которыми был связан значительный ущерб, а в Кировской области также крупный ветровал (табл. 4). Пример успешного прогноза шквала 4 августа 2021 г. в Кировской области показан на рис. 3 (цв. вкладка). Отметим, что большинство шквалов, которые были успешно спрогнозированы, связаны с МКС масштаба мезо- α (линиями шквалов), что согласуется с ранее полученными результатами [26].

Прочие 27 случаев отнесены к пропускам явления, причем в 8 из них модель вообще не воспроизвела глубокую конвекцию в радиусе 50 км от места возникновения шквала. В остальных случаях шквалы прогнозировались, но скорость ветра была < 20 м/с (14 случаев), имела место ошибка по времени > 3 ч (1 случай) или отмечались одновременно как ошибка по времени, так и занижение скорости ветра (4 случая). Из 6 случаев шквалов, вызвавших ветровалы, был успешно спрогнозирован только один (4 августа 2021 г.). В остальных 5 случаях скорость ветра по модели была сильно занижена или глубокая конвекция вообще не воспроизводилась моделью.

Отдельно была выполнена оценка случаев с возникновением смерчей и хорошо выраженных мезоциклонов (суперъячейковых облаков) на основе прогноза закритических значений параметра UH_{2-5km} (> 200 м²/с²). Однако выборка этих событий оказалась слишком мала как по данным наблюдений (один случай смерча и 4 случая суперъячейек, зафиксированных по фотографиям очевидцев и подтвержденных по спутниковым снимкам), так и по прогнозу (всего один случай с закритическими значениями UH_{2-km} за весь рассматриваемый период). Эти случаи перечислены в табл. 5. Единственный случай, когда по модели прогнозировалось закритическое значение UH_{2-5km} (до 218 м²/с²), оказался ложной тревогой. Как показано на рис. 4 (цв. вкладка), по снимку Meteosat-8 в это время наблюдались лишь умеренно-развитые кучево-дождевые облака с температурой на верхней границе облаков до -55° С на 100 км севернее спрогнозированной траектории прохождения мезоциклона. Тем не менее на основе полученных данных уже можно сделать вывод о том, что модель WRF в данной конфигурации крайне редко воспроизводит «ложные» мезоциклоны, в отличие от конфигурации, использованной в 2020 г. [26].

Случаи шквалов, успешно спрогнозированных моделью WRF в теплый период 2021 г.

Дата	Время (факт), ВСВ	Время (модель), ВСВ	Максимальный порыв ветра, м/с (факт*/модель)	Тип МКС по снимкам Meteosat-8	Ущерб
16.06	18:00	15:00–17:00	23/35	Линия шквалов	Нарушено электроснабжение, повалены деревья в г. Красновишерске и пос. Вильгорт
23.06	10:00	10:00–12:00	21/25	Линия шквалов	Многочисленные повреждения кровель зданий в нескольких районах Башкортостана
25.06	11:10	09:00–10:00	28/26	Кластер масштаба мезо- α	Повреждены кровли управления образования, трех частных жилых домов и производственного здания
30.06	18:00	15:00–22:00	23/33	Линия шквалов	Нет данных об ущербе
20.07	12:00	10:00–15:00	20/28	Линия шквалов	Снесена кровля многоэтажного дома, повалены деревья
22.07	11:00	10:00–15:00	–/25	Линия шквалов	Многочисленные повреждения кровель зданий в нескольких районах Башкортостана
04.08	12:30	08:00–11:00	24/23	Суперьячейка	Многочисленные повреждение кровель зданий, сплошной ветровал на площади 567 га
04.08	13:00	11:00–14:00	–/26	Мультиячейка	Снесены кровли нескольких многоэтажных домов в пос. Чекамгуш
20.08	13:00	11:00–16:00	28/26	Изолированная ячейка (вероятно, суперьячейка**)	Снесены кровли 6 частных домов в с. Помоздино, упали опоры ЛЭП
22.08	13:00	11:00–13:00	24/25	Мультиячейка	Снесен кирпичный балкон и повреждены кровли 11 домов

* Фактическая скорость ветра дана по данным метеостанций, оценки по характеру ущерба не использовались.

** Оценка только по спутниковым данным.

Тот факт, что модель редко воспроизводит критические значения UH_{2-5km} , может быть обусловлен ее грубым пространственным разрешением (5 км). Так, в работе [38], авторами которой было

предложено пороговое значение $200 \text{ м}^2/\text{с}^2$, шаг сетки модели составлял 3 км, а в работе [27] – 1 км, что, вероятно, способствовало лучшему воспроизведению мезоциклонов.

Случаи со смерчами и мезоциклонами по данным наблюдений и моделирования в теплый период 2021 г.

Дата, время (ВСВ)	Тип по данным наблюдений	Сопутствующие явления	Максимальное значение UH по модели ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$)	Максимальная скорость ветра по модели, м/с	Ошибка по положению (км) по времени (ч)
<i>По данным моделирования</i>					
15.05, 14:00–16:00	Не наблюдались (ложная тревога)	Не наблюдались (ложная тревога)	218	27	–/–
<i>По данным наблюдений</i>					
29.05, 11:00	Суперьячейка	Град диаметром 30 мм	12	10	–/–
30.05	Суперьячейка	Локальный сильный шквал, град (20 мм)	10	10	–/–
30.06, 13:00	Смерч	Ливневый дождь, гроза	64	27	75/2
02.08, 15:00	Суперьячейка	Град диаметром 20 мм	26	12	–/–
04.08, 12:00–13:00	Суперьячейка	Шквал, град. Шквал вызвал сплошной ветровал на площади 567 га	56	23	0/2

Примечание. Ошибки по положению и по времени определены только в тех случаях, когда суперьячейка наблюдалась фактически и была воспроизведена моделью.

Для событий крупного града были оценены только прогнозы по модели WRF для фактически наблюдавшихся случаев, причем оценка прогнозов производилась с привлечением спутниковых снимков Meteosat-8. В 10 из 16 случаев модель не воспроизводит МКС и интенсивных осадков в том месте и в то время, где и когда наблюдался крупный град, т.е. отмечаются пропуски явления. К числу пропусков относится и случай 25 мая 2021 г. на юго-западе Свердловской области, когда диаметр града (50 мм) был наибольшим за весь рассматриваемый период. Низкая точность прогноза крупного града может быть обусловлена тем, что он часто связан с локальными суперъядчковыми облаками, которые воспроизводятся моделью существенно хуже, чем МКС масштаба мезо- α , что было показано, в частности, в [26].

Заключение

Проведенное исследование качества прогнозов конвективных ОЯ по модели WRF на основе объектно-ориентированного подхода — одна из первых работ такого рода в России. Отличие от ранее опубликованных исследований [16–19] состоит в более точной локализации случаев ОЯ с использованием всех доступных данных (радиолокационных, спутниковых, наблюдений на метеостанциях, информации о нанесенном ущербе и сведений о ветровалах), поскольку в пределах рассматриваемого региона в радиус обзора ДМРЛ входит ~50% площади. Кроме того, в настоящей работе основное внимание уделено оценке прогноза сильных шквалов, для которых ранее в большинстве работ анализировались прогнозы только отдельных событий, тогда как число пропусков, ложных тревог и их соотношение не оценивались. Второй особенностью проведенного исследования было использование масштабируемой параметризации конвекции в модели WRF, что, вероятно, позволило сократить число ложных тревог.

В целом полученные оценки точности прогнозов для сильных осадков и шквалов оказались существенно ниже, чем в [16], однако и использованные пороговые значения были более высокими, т.е. упор сделан именно на прогноз ОЯ. Качество прогнозов сильных осадков в летний период 2021 г. было неудовлетворительным вследствие как многочисленных пропусков явлений моделью, так и пространственных смещений зон спрогнозированных сильных дождей относительно мест их фактического наблюдения (в частности, в случае 4 июля 2021 г.). Низкая точность прогнозов сильных ливней в 2021 г., в сравнении с более ранними оценками для этого же региона [41], может объясняться и тем, что процент случаев ливней локального характера в теплый период 2021 г. был значительно выше, чем в 2019 г.

Для случаев шквалов прогноз оказался в целом более успешным, чем для сильных ливней. Доля

успешных прогнозов составила 36%, причем в это число попало большинство случаев, нанесших значительный ущерб. Несмотря на высокую долю пропусков явления, прогнозы шквалов можно считать практически значимыми. Доля ложных тревог при прогнозе шквалов была меньше доли пропусков, причем две трети из них связаны с занижением моделью скорости ветра. Также стоит отметить, что за весь исследуемый период модель WRF только один раз воспроизвела мезоциклон со значениями параметра $UH_{2-5km} > 200 \text{ м}^2/\text{с}^2$, что указывает на сравнительно небольшую вероятность появления «ложных» мезоциклонов в выходных данных модели.

Таким образом, оценку соотношения числа пропусков и ложных тревог при прогнозе шквалов и сильных ливней можно считать важнейшим результатом исследования. Выявленное преобладание пропусков над ложными тревогами указывает на то, что повышение пространственного разрешения модели может способствовать росту общей точности прогноза, даже если доля ложных тревог при этом увеличится. Применение масштабируемой параметризации конвекции оказалось успешным экспериментом, так как позволило существенно снизить частоту возникновения ложных тревог, что подтверждает ранее полученные оценки [36].

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-77-10076), данные модели WRF получены при поддержке гранта Президента РФ № МК 313.2020.5.

1. Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E. Climatology and formation environments of severe convective windstorms and tornadoes in the Perm region (Russia) in 1984–2020 // *Atmos.* 2021. V. 12. N 1407.
2. Yano J.-I., Ziemianski M.Z., Cullen M., Termonia P., Onville J., Bengtsson L., Carrassi A., Davy R., Deluca A., Gray S.L., Homar V., Köhler M., Krichak S., Michaelides S., Phillips V.T.J., Soares P.M.M., Wysogrodzki A.A. Scientific challenges of convective-scale numerical weather prediction // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2018. V. 99, N 4. P. 699–710.
3. 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 // *Weather Forecast.* 2008. V. 23, N 3. P. 407–437.
4. Xue M., Wang D., Gao J., Brewster K., Droegemeier K.K. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2003. V. 82. P. 139–170.
5. Kain J.S., Weiss S.J., Levit J.J., Baldwin M.E., Bright D.R. Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather // *Weather Forecast.* 2006. V. 21, N 2. P. 167–181.
6. Kain J.S., Weiss S.J., Bright D.R., Baldwin M.E., Levit J.J., Carbin G.W., Schwartz C.S., Weisman M.L., Droegemeier K.K., Weber D.B., Thomas K.W. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP // *Weather Forecast.* 2008. V. 23, N 5. P. 931–952.

7. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Dudhia J., Gill D.O., Coen J.L., Gochis D.J., Ahmadov R., Peckham S.E., Grell G.A., Michalakes J., Trahan S., Benjamin S.G., Alexander C.R., Dimego G.J., Wang W., Schwartz C.S., Romine G.S., Liu Z., Snyder C., Chen F., Barlage M.J., Yu W., Duda M.G. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98. P. 1717–1737.
8. Дмитриева Т.Г., Песков Б.Е. Численный прогноз с мезосиноптическим уточнением двух случаев особо сильных шквалов на Европейской части России летом 2010 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 2. С. 18–30.
9. 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.
10. Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я., Махнорылова С.В., Серебряник Н.И., Петриченко С.А., Терев Л.А., Калмыкова О.В. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 10. С. 30–40.
11. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терев Л.А., Калмыкова О.В. О совместном расчете полей вертикальной скорости и конвективных индексов в модели WRF для анализа и прогноза смерчопасных ситуаций // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 9. С. 14–26.
12. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Ажигов И.О. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей на Европейской территории России // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 1. С. 62–69; Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Azhigov I.O. Conditions for the appearance and short-time prediction of strong squalls and tornadoes in the European part of Russia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 3. P. 334–344.
13. Романский С.О., Вербичка Е.М., Суляндзига П.Б. Результаты численного моделирования формирования и развития интенсивной конвекции, вызвавшей смерч в Благовещенске 31 июля 2011 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 6. С. 25–36.
14. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Azhigov I. Satellite-based study and numerical forecasting of two tornado outbreaks in the Ural region in June 2017 // *Atmosphere.* 2020. N 11. N 1146.
15. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Y. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // *Atmos. Res.* 2021. N 105928. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105928.
16. Вельтицев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // *Метеорол. и гидрол.* 2011. № 1. С. 5–18.
17. Вельтицев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // *80 лет Гидрометцентру России. М., Гидрометцентр России, 2010.* С. 94–135.
18. Зартов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Шумилин А.А., Травов А.В. Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением // *Гидромет. исслед. и прогнозы.* 2018. № 2. С. 60–86.
19. Зайко П.О., Красовский А.Н., Бородко С.К. Совершенствование мезомасштабного численного прогнозирования погоды WRF-ARW в Республике Беларусь путем ассимиляции радиолокационных данных о ветре и отражаемости // *Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология.* 2020. № 2. С. 3–13.
20. Беркович Л.В., Ткачева Ю.В. Успешность прогноза сильных осадков в Краснодарском и Ставропольском краях в летний период 2013 года по модели WRF-ARW // *Тр. Гидрометцентра России.* 2014. Вып. 351. С. 23–33.
21. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // *Гидромет. исслед. и прогнозы.* 2019. № 3. С. 43–59.
22. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 8. С. 5–20.
23. Ривин Г.С., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Розинкина И.А., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Бундель А.Ю., Курсанов А.А., Захарченко Д.И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 11. С. 33–45.
24. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower Atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia // *Atmos.* 2018. V. 9. N 50.
25. Davis C.A., Brown B., Bullock R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application mesoscale rain areas // *Mon. Weather. Rev.* 2006. V. 134. P. 1772–1784.
26. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Поморцева А.А., Абдуллин Р.К., Ажигов И.О. Условия формирования и краткосрочный прогноз конвективных опасных явлений погоды в Уральском регионе в теплый период 2020 года // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 1. С. 46–56; Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Pomortseva A.A., Abdullin R.K., Azhigov I.O. Formation conditions and short-term forecast of convective hazardous weather events in the Ural region in the warm period of 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 3. P. 250–262.
27. Taszarek M., Pilguy N., Orlikowski J., Surowiecki A., Walczakiewicz S., Pilorz W., Piasecki K., Pajurek L., Pytlończak M. Derecho evolving from a mesocyclone—a study of 11 August 2017 severe weather outbreak in Poland: Event analysis and high-resolution simulation // *Mon. Weather Rev.* 2019. V. 147, N 6. P. 2283–2306.
28. *Архив фактической погоды по метеостанциям* [Электронный ресурс]. URL: <http://pogodaiklimat.ru/archive.php> (дата обращения: 17.12.2021).
29. *Научно-технический журнал «Метеорология и гидрология».* Электронный ресурс: <http://mig-journal.ru/archive> (дата обращения: 17.12.2021).
30. *European Severe Weather Database.* URL: <https://eswd.eu/> (дата обращения: 17.12.2021).
31. Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Setaikina A.V. A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2020. V. 12. P. 3489–3513.
32. Hong S.-Y., Dudhia J. Next-generation numerical weather prediction: Bridging parameterization, explicit clouds, and large eddies // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2012. V. 93. P. ES6–ES9.

33. Arakawa A., Wu C.M. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I // J. Atmos. Sci. 2013. V. 70. P. 1977–1992.
34. Arakawa A., Schubert W.H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 674–701.
35. Lim K.-S., Hong S.-Y., Yoon J.-H., Han J. Simulation of the summer monsoon rainfall over East Asia using the NCEP GFS cumulus parameterization at different horizontal resolutions // Weather Forecast. 2014. V. 29. P. 1143–1154.
36. Kwon Y.C., Hong S.-Y. A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions // Mon. Weather Rev. 2017. V. 145, N 2. P. 583–598.
37. Clark A.J., Gao J., Marsh P.T., Smith T., Kain J.S., Correia Jr., Xue M., Kong F. Tornado pathlength forecasts from 2010 to 2011 using ensemble updraft helicity // Weather Forecast. 2013. V. 28, N 2. P. 387–407.
38. Sobash R.A., Romine G.S., Schwartz G.S. Explicit Forecasts of low-level rotation from convection-allowing models for next-day tornado prediction // Weather Forecast. 2016. V. 31. P. 1591–1614.
39. Кисельникова В.Э. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков WRF // Метеорол. и гидрол. 2013. № 4. С. 5–10.
40. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Бундель А.Ю., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В. Верификация прогнозов метеорологических явлений со значительными воздействиями в районе проведения Олимпиады «Сочи-2014». Часть I. Детерминированные прогнозы в тестовый период // Метеорол. и гидрол. 2015. № 9. С. 31–48.
41. Shikhov A.N., Bykov A.V., Abdullin R.K. Short-range forecast of heavy rainfall over the Kama River basin in 2019 with atmospheric models ICON, GFS and WRF // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2020. V. 611. N 012016.
42. ФГБУ «Уральское УГМС» [Электронный ресурс]. URL: <http://svgimet.ru/?p=47930> (дата обращения: 17.12.2021).

N.A. Kalinin, A.N. Shikhov, A.V. Bykov. **Object-oriented assessment of short-term forecast of convective hazardous weather events with the WRF model in Perm region.**

This study presents an accuracy assessment of the forecasts of hazardous convective weather events made with the WRF v.4.2 atmospheric model for Perm region and adjacent area for the period from May 4 to August 25, 2021. The WRF model forecasts had a 27-h lead time; the model grid step was 5 km. To reduce the probability of false alarms, scale-dependent parameterization of convection was used. The sample of squalls and large hail events was compiled based on the weather station reports, damage reports, and satellite images of forest damage. It includes 56 events. The sample of heavy rainfall events was compiled from the weather stations data only. For the same period, the WRF model predicted 30 squalls events ($\geq 25 \text{ m/s}^{-1}$) and 63 heavy rainfall events ($\geq 30 \text{ mm/h}$). Supercells and tornado events are also considered. For squall events, we performed a cross-validation of the simulated and observed events using the distance (50 km) and time ($\pm 3 \text{ h}$) threshold criteria. The accuracy of heavy precipitation was evaluated using the SCI and EDI indices. Overall, the forecasts accuracy for heavy precipitation was unsatisfactory. For squall events, 36% of them were successfully predicted, including the events that caused most substantial damage. Despite the high proportion of event omission (which prevail over false alarms), the forecasts of squalls with the WRF model in this configuration may be useful in preventing damage.

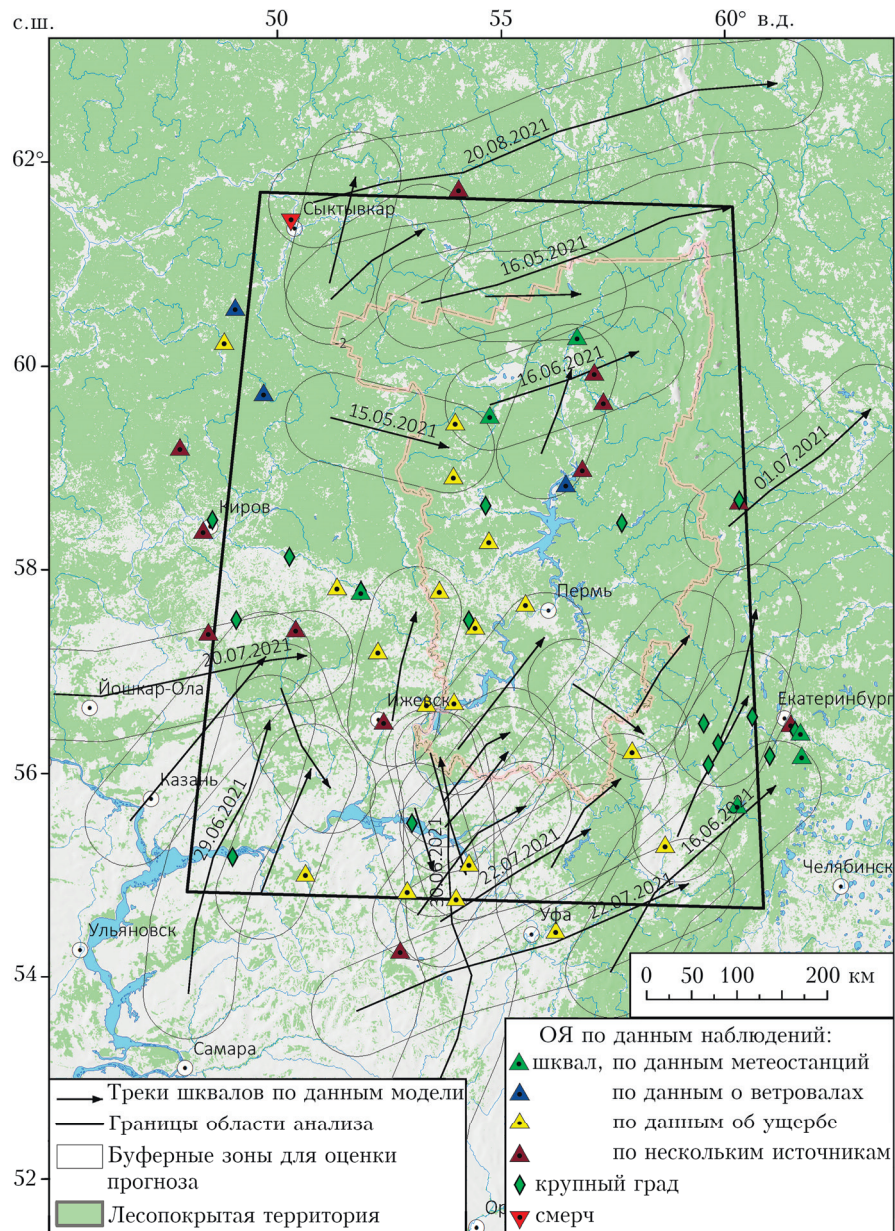


Рис. 1. Область, в которой оценивались прогнозы шквалов по модели WRF в теплый период 2021 г., случаи ОЯ по данным наблюдений и треки шквалов по модели WRF

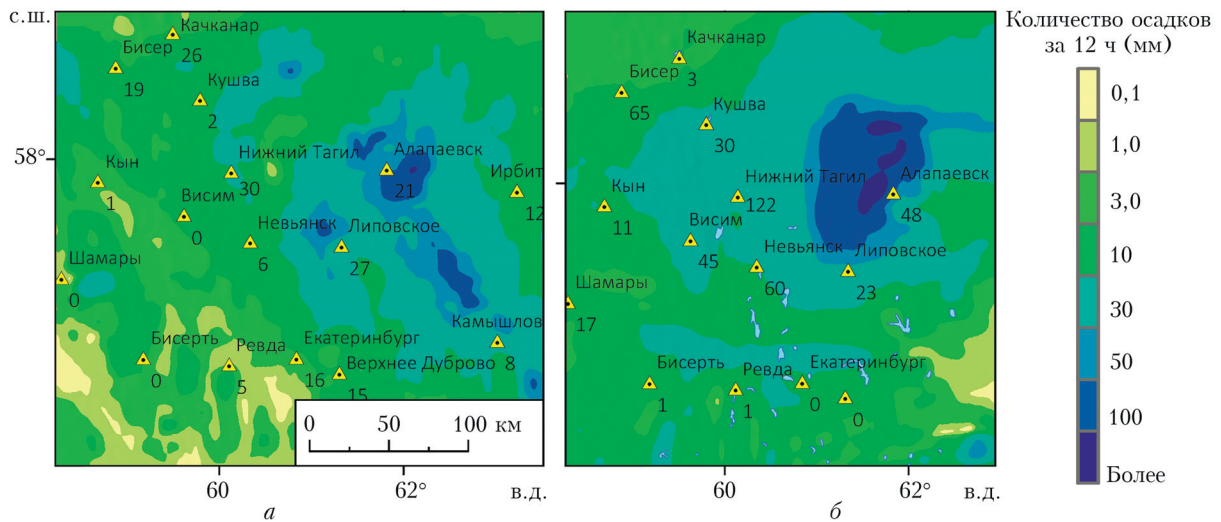


Рис. 2. Прогноз накопленных осадков ночью (а) и днем (б) 4 июля 2021 г. по модели WRF и его сопоставление с данными метеостанций; символами отмечены метеостанции, числа показывают количество осадков на них

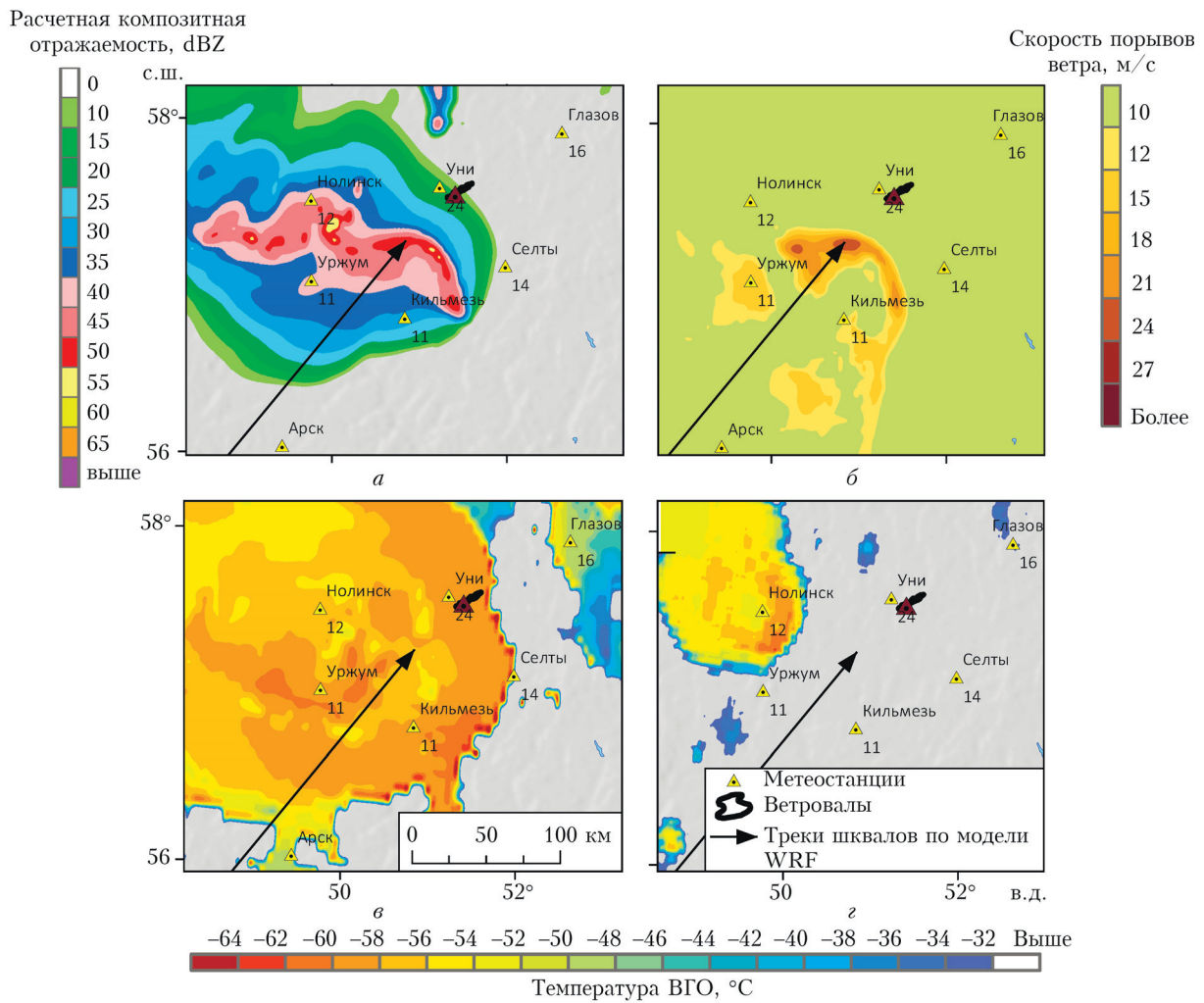
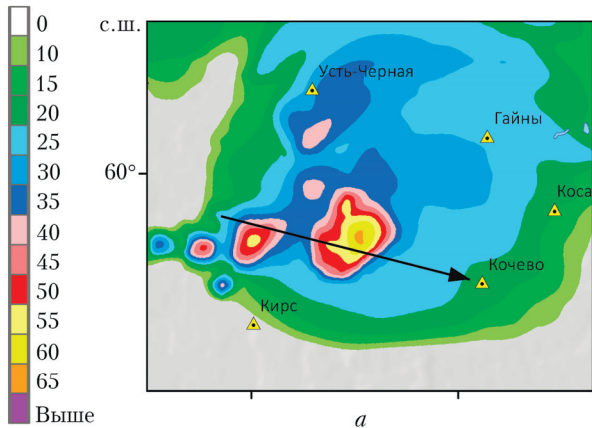
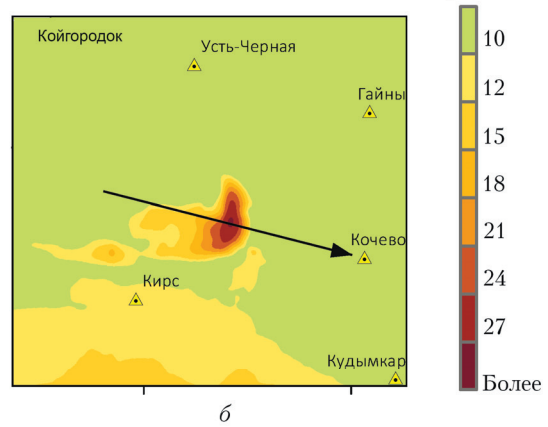


Рис. 3. Оценка прогноза сильного шквала в Кировской области: расчетная композитная отражаемость (а), скорость порывов ветра (б), температура верхней границы облаков по модели WRF (в) и по спутниковому снимку Meteosat-8 (г) в 11:00 ВСВ 4 августа 2021 г. Числа у метеостанций показывают порывы ветра (м/с) по данным наблюдений

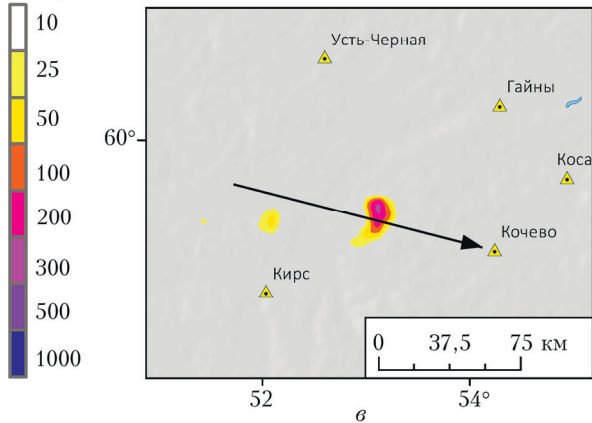
Расчетная композитная
отражаемость, dBz



Скорость порывов
ветра, м/с



Параметр УН, m^2/c^2



Температура ВГО, °С

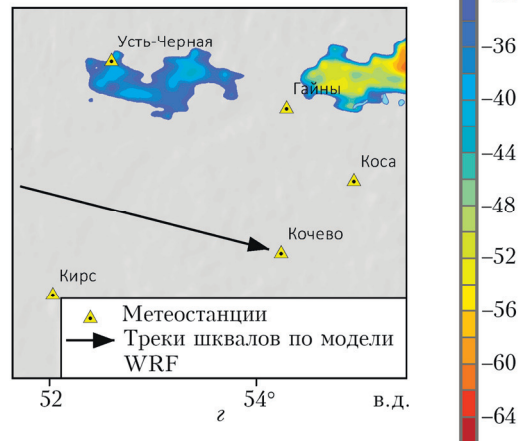


Рис. 4. Пример ложной тревоги при прогнозе ОЯ по модели WRF: расчетная композитная отражаемость (а), скорость порывов ветра (б), параметр УН по модели WRF (в) и температура ВГО по спутниковому снимку Meteosat-8 (г) в 15:00 (ВСВ) 15 мая 2021 г.