

УДК 551.589.6

Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов и смерчей на европейской территории России

Н.А. Калинин, А.Н. Шихов, А.В. Быков, И.О. Ажигов*

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

Поступила в редакцию 12.10.2018 г.

Рассматриваются условия возникновения и возможности краткосрочного прогноза сильных шквалов, а также нескольких смерчей (в основном слабых), которые нанесли значительный ущерб европейской территории России 30.05.2018 г. Сведения о шквалах представлены по данным сети метеостанций. Также уточнены данные о случаях смерчей, в том числе на основе анализа вызванных ими ветровалов в лесных массивах. Рассмотрены синоптические и аэрологические предпосылки возникновения шквалов. Проведено моделирование шквалов с помощью модели WRF (версия 3.9.1.1, шаг сетки 3 км). В качестве начальных условий получены прогностические данные глобальных моделей атмосферы GFS и ECMWF (из архива ERA-5). Установлено, что шквалы сравнительно успешно воспроизводятся моделью.

Ключевые слова: шквалы, смерчи, синоптические условия, мезомасштабное моделирование, модель WRF, данные GFS, данные ECMWF; squalls, tornadoes, synoptic-scale environments, mesoscale simulation, WRF model, GFS data, ECMWF data.

Введение

Ежегодно на европейской территории России (ЕТР) наблюдаются случаи возникновения сильных шквалов (с максимальной скоростью ветра ≥ 25 м/с). Чаще всего они имеют локальный характер и фиксируются одновременно на одной-двух метеостанциях либо вообще пропускаются наблюдательной сетью [1–4]. Шквалы, охватывающие одновременно значительную территорию (несколько субъектов РФ), отмечаются редко, но именно они наносят наибольший ущерб. Подобные шквалы регистрировались 13.06.2010 г. в центре ЕТР, 29.07.2010 г. — на северо-западе ЕТР [5–6], 18.07.2012 г. — в Предуралье [7]. Во всех перечисленных случаях они повлекли за собой человеческие жертвы и масштабные разрушения. Повышение точности прогноза подобных явлений (как максимальной скорости ветра, так и траектории прохождения шквала) представляет собой одну из важнейших задач оперативного метеорологического обеспечения.

При прохождении через ЕТР 30.05.2018 г. быстро движущегося холодного фронта второго рода образовались сильные шквалы, которые охватили обширную территорию от Костромской и Ивановской обл. до Среднего Поволжья. На 14 метеостанциях был зафиксирован шквал в градации опасного метеорологического явления (≥ 25 м/с), а еще на 30 наблюдался умеренный шквал (20–24 м/с).

В результате шквалов один человек погиб и 57 получили ранения [8], было нарушено электроснабжение 1500 населенных пунктов с числом жителей более 330 тыс. человек в 18 субъектах РФ. Помимо шквалов, также подтверждено несколько случаев возникновения смерчей интенсивностью $F0$ – $F2$ по шкале Фуджита.

В настоящей работе рассматриваются синоптические и мезомасштабные условия возникновения шквалов на ЕТР 30.05.2018 г.; представлены уточненные данные о случаях смерчей на основе анализа вызванных ими ветровалов в лесных массивах. Также оценена точность краткосрочного численного прогноза шквалов, составленного от 00:00 всемирного координированного времени (BCB) 30.05.2018 г. по мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecasting), в качестве начальных условий для запуска которой использовались прогностические данные глобальных моделей GFS (Global Forecast System, USA) и Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) из архива ERA-5. Рассмотрено влияние выбора начальных условий на успешность прогноза шквалов по модели WRF.

Данные и методы исследования

Для исследования синоптических условий возникновения шквалов использовались карты приземного анализа, кольцевые карты погоды и карты барической топографии, полученные с помощью ГИС «Океан». Данные о максимальной скорости ветра на метеостанциях получены из архива фактической погоды [9]. Кроме того, изучены сведения о нанесенном шквалами ущербе, опубликованные в региональных средствах массовой информации.

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

По разновременным космическим снимкам Sentinel-2 (с пространственным разрешением 10 м), полученным в малооблачные периоды до события (в середине мая) и после него (во второй половине июня), проведен анализ вызванных шквалами и смерчами ветровалов в лесных массивах. Методика обнаружения ветровалов по космическим снимкам и примеры ее применения описаны в [10]. Тип ветровала (шкваловый или смерчевый) был определен по геометрическим признакам, таким как соотношение протяженности и ширины, а также характеру повреждения древостоя в соответствии с методикой, представленной в [11].

Для аэрологического анализа и оценки значений диагностических переменных (индексов), которые могли указывать на высокий риск развития шквалов, использовались данные радиозондирования атмосферы за 00:00 и 12:00 ВСВ 30.05.2018 г., а также проанализированы прогностические поля индексов, полученные по модели GFS с шагом сетки 0,25° (прогноз от 00:00 ВСВ 30.05.2018 г.).

Анализ развития мезомасштабных конвективных систем (МКС), вызвавших шквалы и смерчи, был проведен по спутниковым данным Meteosat-8, полученным с веб-ресурса EUMETSAT [12]. В условиях отсутствия доступа к данным сети доплеровских радиолокаторов космические снимки Meteosat-8, доступные каждые 15 мин с пространственным разрешением около 1,2 км в канале высокого разрешения и 3,5 км в других каналах, являются оптимальным источником данных для анализа эволюции МКС. Они также использовались для валидации результатов мезомасштабного моделирования.

Мезомасштабное моделирование развития шквалов производилось с помощью модели WRF версии 3.9.1.1, детальное описание которой приведено в работе [13]. Программный комплекс модели WRF установлен на многопроцессорном вычислительном комплексе с гибридной архитектурой «ПГНИУ-Кеплер», состоящем из 8 вычислительных узлов

iDataPlex DX360 M4 на базе процессоров Intel Xeon E5-2680 и видеокарт NVidia Tesla K20. Принятые настройки модели описаны в табл. 1. В качестве начальных условий для запуска модели WRF использовались прогностические данные моделей GFS (прогноз от 00:00 ВСВ 30.05.2018 г.) и ECMWF из архива ERA-5 (прогноз от 06:00 ВСВ 30.05.2018 г.). Горизонтальный шаг сетки начальных данных GFS и ECMWF составляет 0,25°, а шаг по времени – 1 ч. Для сроков, предвещающих старт прогноза на 6 и 12 ч, использованы поля оперативного анализа GFS и реанализа ERA-5. Данные глобальных моделей были получены с серверов NCEP (National Center for Environmental Prediction, USA) и из архива ERA-5 [14, 15].

Оценка успешности прогноза производилась с использованием трех наборов проверочных данных. Модельные данные о скорости порывов ветра на высоте 10 м (переменная GUST) сравнивались с наблюдениями метеостанций, а характеристики МКС по модели сопоставлялись со спутниковыми данными Meteosat-8. Также проведена оценка соответствия выявленных ветровалов в лесных массивах и модельных данных о шквалах. Аналогичный подход использовался в работе [7] для оценки успешности воспроизведения моделью двух случаев шквалов в Пермском крае.

Синоптические условия возникновения шквалов и смерчей 30.05.2018 г.

В мае 2018 г. в течение продолжительного периода времени погодные условия над ЕТР определяла восточная периферия мощного высотного гребня, ось которого располагалась над Восточной Европой и Скандинавией. В то же время над Западной Сибирью господствовала высотная ложбина.

Таблица 1

Принятые настройки модели WRF

Характеристика модели	Принятая настройка
Шаг сетки	3 км
Число узлов	1000 × 800
Число вертикальных уровней	42
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Максимальная заблаговременность прогноза	15 ч, от 00:00 ВСВ
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	ARW
Шаг интегрирования по времени	18 с
Начальные и граничные условия	Прогноз и оперативный анализ GFS с шагом сетки 0,25°/ прогноз и реанализ ECMWF из архива ERA-5 с шагом сетки 0,25°
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Планетарный пограничный слой	Схема Меллора–Ямады–Янича
Подстилающая поверхность	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Схема GFDL
Приземный слой	Схема Монина–Обухова с вязким подслоем Карлсона–Боланда и стандартными функциями подобия
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации)

В третьей декаде мая ее влияние распространилось и на Урал, а высотная фронтальная зона (ВФЗ) значительно сместилась на запад [16]. После очередного арктического вторжения на Урал и восток ЕТР к 00:00 ВСВ 29 мая ВФЗ расположилась вдоль линии Кольский п-ов – Среднее Поволжье. Скорость ветра в средней тропосфере вблизи оси струйного течения превышала 30 м/с.

Ныряющий циклон, с прохождением которого были связаны сильные шквалы и смерчи 30 мая, начал формироваться 29 мая в 06:00 ВСВ на холодном фронте в районе Кольского п-ва. В 12:00 ВСВ молодой циклон с давлением в центре 1005 гПа располагался над юго-востоком Мурманской обл. Далее он перемещался в соответствии с ведущим потоком в район Сыктывкара. Интенсивная адвекция холода в тылу циклона, а также слабовыраженная расходимость изогипс в средней тропосфере способствовали его резкому углублению. К 00:00 ВСВ 30 мая циклон с давлением в центре 992 гПа сместился к северо-западу от Сыктывкара, а величина барической тенденции перед теплым фронтом составила $-5,7$ гПа/3 ч. Теплый фронт был ориентирован меридионально и располагался над районами Республики Коми, Кировской обл., Удмуртии и Башкортостана. Холодный фронт с температурным контрастом около 8 °С/500 км определял погоду на юге Архангельской обл., Карелии и Финляндии и смещался на юг. Температурный контраст на холодном фронте увеличивался по мере смещения циклона на юго-восток, так как в его тыловую часть поступал все более холодный арктический воздух с северо-востока ЕТР, где еще сохранялся снежный покров. Стоит отметить, что 28 мая на север Республики Коми в тыл предыдущего циклона поступила очень холодная воздушная масса с температурой $-10...-12$ °С на изобарической поверхности 850 гПа.

В первой половине дня 30 мая в широком теплом секторе циклона находились центр ЕТР, Волго-Вятский р-н и Среднее Поволжье. В теплом секторе располагалась воздушная масса с температурой на изобарической поверхности 850 гПа от $+8$ до $+10$ °С. Максимальная температура воздуха днем у поверхности земли достигала $+22...+25$ °С, а дефицит точки росы находился в пределах $11-15$ °С. В течение дня 30 мая, по мере углубления циклона, барический градиент достиг 4 гПа/100 км, что сопровождалось усилением ветра с порывами до 19 м/с.

Во второй половине дня 30 мая циклон достиг стадии максимального развития и начался процесс его окклюзивания. К 12:00 ВСВ центр циклона находился над северо-западом Пермского края с минимальным давлением 985 гПа. Точка окклюзии располагалась в районе Перми, а холодный фронт был ориентирован через Казань и Москву на север Белоруссии. Центр циклона к этому времени оказался на циклонической стороне ВФЗ, что препятствовало его дальнейшему углублению. Ось ВФЗ сместилась на юг и была ориентирована с Карелии через центр ЕТР в район Самары.

Аэрологический анализ

В 00:00 ВСВ 30.05.2018 г. условия, складывавшиеся в теплом секторе циклона, наилучшим образом характеризовались данными радиозондирования на станциях Нижний Новгород (где сильный шквал наблюдался в 10:00 ВСВ) и Вологда (где фронт прошел утром и шквал не наблюдался). По данным радиозондирования в Нижнем Новгороде воздушная масса в теплом секторе была устойчивой, несмотря на значительный контраст температуры между изобарическими поверхностями 850 и 500 гПа ($27,3$ °С), а общее влагосодержание – низким ($15,3$ мм). По вертикали наблюдалось чередование умеренно влажных и сухих слоев. Сухие слои с относительной влажностью менее 20% отмечались на поверхностях 790 и 620 гПа. Сумма скоростей ветра на поверхностях 850, 700 и 500 гПа составляла 53 м/с.

По данным радиозондирования в Вологде температурный контраст между поверхностями 850 и 500 гПа также составил около 27 °С, но влажность была выше (общее влагосодержание достигало 19 мм). Сухой слой с влажностью 23% зафиксирован вблизи поверхности 620 гПа. Основной особенностью, которая указывала на риск сильного шквала, был упорядоченный сдвиг ветра – монотонный рост скорости ветра в слое от земли до поверхности 361 гПа (на котором она достигала 33 м/с). При этом сумма скоростей ветра на поверхностях 850, 700 и 500 гПа составляла 62 м/с, что также благоприятно для развития шквала.

К 12:00 ВСВ холодный фронт прошел через Центральный федеральный округ (ФО) и север Приволжского ФО. По данным радиозондирования на станции Безенчук, которая находилась в теплом секторе циклона перед холодным фронтом (фронт проходил через Самарскую обл. после 15:00 ВСВ), отмечались весьма низкое общее влагосодержание (всего $12,9$ мм) и наличие слоев с относительной влажностью около 10% (между 700 и 647 гПа), что препятствовало развитию конвекции в теплом секторе циклона. В пограничном слое атмосферы (по данным на поверхности 925 гПа) наблюдалось мезоструйное течение со скоростью ветра 20 м/с, что указывало на высокий риск развития сильного шквала при прохождении быстро движущегося холодного фронта. Сумма скоростей ветра на поверхностях 850, 700 и 500 гПа составляла 63 м/с.

Более детальный аэрологический анализ условий возникновения шквалов 30.05.2018 г. можно получить по данным глобальной модели атмосферы GFS (прогноз от 00:00 ВСВ 30.05.2018 г.). По данным модели интегральное влагосодержание воздушной массы в зоне фронта за счет сходимости воздушных потоков повышалось до $22-26$ мм, а над Средним Поволжьем – до $28-30$ мм. Доступная потенциальная энергия неустойчивости (CAPE) увеличивалась по мере движения фронта на юг от $500-700$ Дж/кг в 09:00 ВСВ над Волго-Вятским р-ном до 1500 Дж/кг в период между 13:00 и 15:00 ВСВ над Черноземьем. Над Средним Поволжьем расчетные значения CAPE не превышали $800-1000$ Дж/кг. Значения

других переменных, характеризующих термическую неустойчивость (Lifted index, индекс Вайтинга), также были ниже критических. Модельные значения индекса угрозы опасной погоды SWEAT, учитывающего как термическую неустойчивость, так и сдвиг ветра, превышали критические только над Центральным Черноземьем (где фактически сильных шквалов отмечено не было). В районах, где наблюдались сильные шквалы, индекс SWEAT был ниже критических значений по причине низкой энергии неустойчивости.

Наиболее информативными с точки зрения прогноза шквала были переменные, характеризующие сдвиг ветра: глубокий сдвиг ветра в слое от 1 до 6 км (Deep Level Shear, DLS) и сдвиг ветра в пограничном слое (Low Level Shear, LLS). Зона экстремально высоких значений DLS (до 50–57 м/с) по данной модели в основном совпадала с приземной линией фронта. Абсолютные максимумы DLS прогнозировались над Ивановской обл. в 07:00 ВСВ и над западом Ульяновской обл. в 14:00 ВСВ, где фактически прошли сильные шквалы. Сдвиг ветра в пограничном слое LLS в зоне фронта также превышал критическое значение и достигал 13–17 м/с. Такие значения, однако, нельзя считать экстремально высокими и нехарактерными для данной территории и сезона (в отличие от значений DLS). Максимум LLS по модели (18–19 м/с) ожидался в 14:00–15:00 ВСВ над Средним Поволжьем. Этот параметр имеет большое значение с точки зрения прогноза смерчей. Так, в работах зарубежных авторов [17, 18] отмечалось, что сильный сдвиг ветра в пограничном слое является важнейшим фактором, способствующим возникновению смерчей даже при низких значениях CAPE. Фактически в Ульяновской и Самарской обл. 30 мая зафиксировано не менее четырех случаев смерчей.

Таким образом, на основе анализа данных радиозондирования и расчета ряда диагностических переменных по общедоступным данным глобальных моделей атмосферы сильные шквалы 30.05.2018 г. могли быть спрогнозированы с учетом чрезвычайно высоких значений глубокого сдвига ветра. Сильный сдвиг ветра в пограничном слое указывал также на риск возникновения смерчей в Среднем Поволжье.

Мезомасштабный анализ по спутниковым данным

При прохождении холодного фронта 30.05.2018 г. над ЕТР сформировались две линейные МКС (линии шквалов). Изначально активная конвекция началась на вторичном холодном фронте над восточными областями Центрального ФО. На основном фронте, который проходил в 150 км юго-восточнее, линия шквалов начала формироваться после 08:30 ВСВ.

Первые конвективные ячейки возникли на вторичном фронте в 06:00 ВСВ, а через час над восточном Ярославской и западом Костромской обл. сформировалась линейная МКС протяженностью около

170 км. Линия шквалов достигла максимального развития к 08:30 ВСВ, когда проходила над Ивановской обл. Ее протяженность с запада на восток достигла 300 км, а минимальная температура верхней границы облаков ($T_{ВГО}$) –43 °С. Такая сравнительно высокая $T_{ВГО}$ обусловлена низким положением тропопаузы в тылу основного холодного фронта.

Скорость движения линии шквалов достигала 80 км/ч, при ее прохождении наблюдались сильные шквалы в Шуе (29 м/с), Иваново (26 м/с) и Коврове (25 м/с). При этом температура воздуха перед прохождением сильных шквалов не превышала +19...+ 21 °С (что не характерно для данного явления), а количество осадков было незначительным – до 5 мм. Шквалистое усиление ветра стало причиной массовых отключений электроэнергии, были повалены сотни деревьев и опоры линий электропередач, повреждены кровли жилых домов и административных зданий. К 10:00 ВСВ линия шквалов на вторичном фронте сместилась на Нижегородскую обл. и начала деградировать, так как в это время глубокая конвекция развивалась на основном холодном фронте. Однако при прохождении деградировавшей линии шквалов через Нижний Новгород (около 10:00 ВСВ) в аэропорту был зафиксирован порыв ветра до 28 м/с. В результате сильного шквала в Нижнем Новгороде пострадало 23 человека, был нанесен значительный материальный ущерб [19].

На основном холодном фронте конвекция начала развиваться с 08:30 ВСВ. Наиболее активная ячейка с $T_{ВГО}$ до –50 °С (что соответствует температуре на границе тропопаузы по данным радиозондирования) возникла вблизи вершины волны над западом Нижегородской обл. К 09:30 ВСВ отдельные ячейки на холодном фронте объединились в линию шквалов, протяженность которой составляла ~600 км. Уже в период формирования линии шквалов порывы ветра достигали градации опасного метеорологического явления, например в Йошкар-Оле сильный шквал (25 м/с) прошел между 09:12 и 09:24 ВСВ [16].

В последующие часы линия шквалов смещалась на юго-восток (в южной части – на юг) со скоростью от 50 (в юго-западной части) до 75 км/ч (над Кировской обл., ближе к центру циклона). При этом ее протяженность увеличивалась за счет возникновения новых конвективных ячеек как на юго-западном фланге в зоне притока, так и на северном (рис. 1, цв. вкладка). Над южной частью Нижегородской обл., Мордовией и Чувашией, где воздушная масса была более неустойчивой, глубокая конвекция началась также перед фронтом. Здесь, по данным очевидцев, отмечались не только шквалы, но и крупный град. К 11:20 ВСВ активный участок фронта вблизи вершины волны проходил через западную часть Чувашии, где на метеостанции Порекко зафиксирован порыв ветра до 31 м/с.

К 12:30 ВСВ протяженность линии шквалов превысила 1000 км, шквалы наблюдались на территории от Мордовии и Пензенской обл. до Кировской обл. и Удмуртии. При этом $T_{ВГО}$ была минимальной (до –53...–55 °С) на юго-западном фланге

линии шквалов, а самые сильные порывы ветра наблюдались в ее центральной части (над Татарстаном), где была выше скорость смещения системы. Как отмечено ранее, в этом же районе прогнозировался наиболее сильный сдвиг ветра в средней тропосфере. На отдельных участках линии шквалов, в частности над севером Удмуртии и Пензенской обл., по снимку Meteosat-8 (см. рис. 1) наблюдались пробои тропопаузы с $T_{\text{ВГО}}$ ниже $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые могли указывать на наличие мезоциклонов. Однако имеющиеся данные (такие как результаты анализа ветровалов) не подтверждают их совпадение с областями, где наблюдались наиболее сильные шквалы и/или смерчи.

К 14:00 ВСВ протяженность линии шквалов достигла 1100 км, в то же время в центральной части (над Удмуртией и Татарстаном) началось ее постепенное разрушение. На наиболее активном участке фронта вблизи вершины волны, которая смещалась на Саратовскую обл., грозы и шквалы продолжались до 18:00 ВСВ. При прохождении линии шквалов на 10 метеостанциях были зафиксированы порывы ветра $\geq 25\text{ м/с}$ (рис. 2, цв. вкладка). Значительный ущерб был отмечен также в населенных пунктах, где метеостанции не зафиксировали сильный шквал, например в Казани, Самаре и Саранске. По результатам проведенного обследования,

скорость ветра в Казани была оценена в $24,5\text{--}28,4\text{ м/с}$ [16]. Количество осадков при прохождении линии шквалов было незначительным (от 3 до 8 мм).

Случаи смерчей, не зафиксированные наблюдательной сетью

Как уже было отмечено выше, при прохождении линии шквалов 30.05.2018 г. в нескольких регионах России наблюдались не только шквалы, но и смерчи. Информация о 5 случаях смерчей в Татарстане, Ульяновской и Самарской обл., а также о произошедших 30 мая ветровалах в лесах Татарстана и Ульяновской обл. была получена от очевидцев в первые дни после события. В связи с этим в последующие месяцы была проведена работа по выявлению свежих ветровалов в лесных массивах пострадавших регионов по снимкам Sentinel-2 (с пространственным разрешением 10 м). В результате были выявлены еще 7 ветровалов линейного характера, вероятно соответствующих трекам прохождения смерчей, в том числе 4 ветровала обнаружены в непосредственной близости от г. Казани (табл. 2). Информация о всех случаях опубликована в Европейской базе данных опасных явлений погоды [20].

Таблица 2

Случаи смерчей, выявленные по результатам анализа сообщений очевидцев, данных о нанесенном ущербе и ветровалах в лесных массивах (по снимкам Sentinel-2)

Время, ВСВ	Координаты начала и конца трека или местоположение	Интенсивность	Длина трека, км/средняя/максимальная ширина, м	Направление движения	Данные об ущербе	Источник данных
10:00	56.180 N; 47.599 E 56.182 N; 47.651 E	F1	3,2/61/250	ЗЮЗ–ВСВ	Ветровал на площади 13 га	Снимки Sentinel-2
10:40	55.943 N; 48.578 E 55.928 N; 48.635 E	F1	4,2/37/110	СЗ–ЮВ	Ветровал на площади 6 га	Снимки Sentinel-2
10:40	55.870 N; 48.421 E 55.861 N; 48.452 E	F1	2,1/67/123	СЗ–ЮВ	Ветровал на площади 9,5 га	Снимки Sentinel-2
11:00	Вблизи пос. Айша, Зеленодольский р-н Республики Татарстан	F0	Нет данных	СЗ–ЮВ	Смерч частично разрушил приют для собак к югу от пос. Айша	Описание очевидцев
11:00	55.851 N; 48.852 E 55.829 N; 48.914 E	F1	4,5/53/208	СЗ–ЮВ	Ветровал на площади 17 га	Снимки Sentinel-2
11:30	55.663 N; 49.038 E 55.634 N; 49.126 E	F2	6,2/112/526	СЗ–ЮВ	Ветровал на площади 53 га	Снимки Sentinel-2
13:15	54.618 N, 49.165 E 54.571 N, 49.326 E	F2	11,1/187/820	СЗ–ЮВ	Ветровал на площади 156 га	Снимки Sentinel-2
13:30	54.329 N; 48.812 E 54.250 N; 49.022 E	F1	16,8/Нет данных	СЗ–ЮВ	Повалены и сломаны деревья в лесополосах между полями	Описание очевидцев и снимки Sentinel-2
13:30	55.319 N; 52.059 E 55.310 N; 52.080 E	F1	1,6/Нет данных	СЗ–ЮВ	Сорваны крыши частных домов на трех улицах в г. Заинске	Описание очевидцев
15:00	53.433 N; 48.458 E 53.411 N; 48.506 E	F1	4,1/76/210	СЗ–ЮВ	Ветровал на площади 23 га	Снимки Sentinel-2
17:50	Вблизи с. Нижнее Санчелеево, Самарская обл.	F0	Нет данных	СЗ–ЮВ	Ущерба нет	Видеозапись очевидца
18:45	52.334 N; 45.556 E 52.319 N; 45.576 E	F0	2,24/Нет данных	ССЗ–ЮЮВ	Повреждены кровли 18 жилых домов	Описание очевидцев

Таким образом, по числу наблюдавшихся в один день смерчей событие 30.05.2018 г. является выдающимся для территории России. В то же время большинство смерчей были слабыми (интенсивность F_0-F_1), лишь в двух случаях вероятная интенсивность смерча, оцененная по протяженности и ширине ветровала в соответствии с методикой [11], достигает второй категории по шкале Фуджита.

Также установлено, что шквалы, наблюдавшиеся 30 мая, не привели к возникновению крупных сплошных ветровалов. Это, вероятно, объясняется низкой интенсивностью или полным отсутствием осадков при прохождении шквалов. Частичное повреждение лесного покрова шквалистым ветром выявлено по спутниковым снимкам в Ивановской и Нижегородской обл. Оценка общей площади этих ветровалов затруднительна по причине их дисперсного распределения и небольшой площади отдельных участков.

Краткосрочный прогноз шквалов по модели WRF с различными начальными условиями

Для прогноза шквалов использовалась модель WRF, которая запускалась с пространственным разрешением 3 км в режиме прямого моделирования конвекции. В ранее опубликованных работах [1, 3–7, 21] отмечалось, что модель WRF (как и другие мезомасштабные модели прогноза погоды) часто не позволяет воспроизвести с удовлетворительной точностью не только скорость ветра при шквале, но и эволюцию вызывающих шквалы МКС. Прежде всего это относится к шквалам локального характера, развивающимся в масштабе мезо- β (20–200 км). В случае 30.05.2018 г. шквалы на холодном фронте охватили

обширную территорию (протяженностью свыше 1000 км). Модель WRF вне зависимости от использованных для запуска модели начальных условий достаточно успешно воспроизводит формирование и эволюцию основной линии шквалов, которая прошла над Волго-Вятским р-ном и Средним Поволжьем (рис. 3, 4, цв. вкладки). Критерием для оценки успешности прогноза было воспроизведение моделью скорости ветра при шквалах, а также величина ошибок по времени их прохождения. Оценка проведена по 14 метеостанциям, на которых наблюдались порывы ветра ≥ 25 м/с. По данным модели оценивались максимальные порывы ветра в радиусе 50 км от метеостанций (так как временной шаг вывода данных составлял 1 ч). Сравнение с фактическими значениями скорости ветра при шквале приведено в табл. 3.

Некоторую сложность представляет определение ошибки прогноза места прохождения шквала (в табл. 3 – ошибка по положению). Так как частота вывода модельных данных составляла 1 ч, а скорость смещения линии шквалов была свыше 50 км/ч, невозможно было определить прогнозируемую скорость ветра конкретно в точке наблюдений. Учитывая это, ошибка по положению оценивалась только в тех случаях, когда прогнозируемая траектория линии шквалов проходила в стороне от метеостанции, зафиксировавшей шквал. Если же по модели прогнозировалось прохождение сплошной линии шквалов со скоростью ветра ≥ 20 м/с через метеостанцию, то ошибка по положению принималась равной нулю.

Как следует из табл. 3, успешность прогноза шквалов по модели WRF при использовании в качестве начальных условий данных ECMWF из архива ERA-5 оказалась существенно выше, чем по начальным данным GFS. При использовании начальных данных GFS модель занижает на 2–5 м/с

Таблица 3

Оценка успешности прогноза шквалов 30.05.2018 г. по модели WRF с различными начальными условиями

Время, ВСВ	Метеостанция	Скорость шквала, м/с (факт)	Скорость шквала по модели WRF с начальными данными модели GFS/ модели ECMWF, м/с	Ошибка по положению, км	Ошибка по времени возникновения, ч
07:45	Иваново	26	Шквал не прогнозировался	–	–
08:00	Шуя	29	–/21	–/50	–/+1*
08:45	Ковров	25	Шквал не прогнозировался	–	–
10:00	Нижний Новгород	28	21/26	30/0	–1/0
09:15	Йошкар-Ола	25	22/25	0/10	0/+1
09:30	Нолинск	25	20/26	40/0	–1/+1
10:45	Вязовые	25	25/27	0/0	0/+1
11:40	Вятские Поляны	25	23/24	0/0	0/+1
11:45	Кайбицы	25	24/28	0/0	0/+0,5
11:30	Порецкое	31	23/28	0/0	–0,5/0
12:45	Отарка	25	22/23	0/0	0/+0,5
13:30	Набережные Челны	25	23/23	0/0	–1/0
13:30	Инза	26	23/26	0/0	–1/–0,5
15:15	Серноводск	28	23/21	0/0	–1/0

* Знак «+» означает, что шквал по модели прогнозировался позже фактического времени его наблюдения на метеостанции, знак «–» соответствует прохождению шквала по прогнозу раньше фактического времени.

скорость шквалов в Татарстане, Чувашии и Нижегородской обл. Тем не менее даже этот результат можно считать удовлетворительным, так как он представляет ценность для оперативного прогноза шквалов.

Основной недостаток прогноза модели WRF по начальным данным GFS состоит в том, что модель не воспроизводит формирование линии шквалов на вторичном фронте в период с 07:00 до 10:00 ВСВ над Костромской и Ивановской обл. с последующим ее смещением в район Нижнего Новгорода. Сильные шквалы в этих районах также не прогнозировались (см. рис. 3, *а, б*). В то же время при использовании начальных данных ECMWF из архива ERA-5 модель воспроизводит (с существенным смещением к востоку относительно фактической траектории) как саму МКС на вторичном фронте, так и связанные с ней шквалы. Самые сильные порывы ветра (до 26 м/с) прогнозировались в районе Нижнего Новгорода, когда линия шквалов уже разрушалась (см. рис. 3, *в, г*). Фактическая скорость ветра в Нижнем Новгороде при прохождении вторичного фронта достигала 28 м/с. Таким образом, этот случай шквала со значительным ущербом мог быть спрогнозирован по модели WRF с ошибкой по времени менее 1 ч.

Максимальная расчетная скорость ветра по модели WRF при ее запуске на начальных данных GFS и ECMWF составляет соответственно 27 и 30 м/с. По обоим прогнозам самый сильный шквал ожидался в 11:00–12:00 ВСВ на востоке Чувашии и западе Татарстана. Фактически максимальная скорость ветра (31 м/с) была отмечена несколько западнее, на метеостанции Порецкое (Чувашия) в 11:30 ВСВ.

Также стоит отметить, что модель WRF при ее запуске на начальных данных GFS преувеличивает влияние холодной поверхности водохранилищ на развитие конвекции. По этому прогнозу линия шквалов должна была деградировать при прохождении над Куйбышевским и Нижнекамским водохранилищами (см. рис. 4, *а, б*). Однако фактически этого не произошло. При использовании начальных условий ECMWF модель WRF адекватно воспроизводит сильные шквалы в районе водохранилищ (см. рис. 4, *в, г*).

Также стоит отметить, что по модельному прогнозу (вне зависимости от используемых начальных условий) ослабление шквалов в вечерние часы ожидалось несколько раньше, чем это происходило фактически. В частности, модель WRF не воспроизводит сильные шквалы в Самарской обл., где они наблюдались после 15:00 ВСВ.

Что касается случаев смерчей, то модель WRF вне зависимости от используемых начальных условий не позволяла их спрогнозировать. По результатам моделирования формирования мезоциклонов или благоприятных условий для возникновения смерчей на холодном фронте не ожидалось. Расчетные значения относительной завихренности (*storm relative helicity*, SRH) на линии шквалов не превышали $400 \text{ м}^2/\text{с}^2$, в то время как на образование мезоциклонов по

данным модели WRF с пространственным разрешением менее 5 км указывают значения SRH свыше $1000 \text{ м}^2/\text{с}^2$ [22].

Заключение

Сильные шквалы, наблюдавшиеся в Центральном и Приволжском ФО 30.05.2018 г., по сочетанию интенсивности и территориального охвата представляют собой уникальное явление для ЕТР. Формирование долгоживущих линий шквалов протяженностью свыше 1000 км не типично для данной территории. Даже в сходных синоптических ситуациях с прохождением быстро движущегося холодного фронта в системе «ныряющего» циклона (например, 01.06.2007 г.) наблюдалось развитие не сплошной линии шквалов, а отдельных МКС, которые вызвали более сильные и разрушительные шквалы (свыше 30 м/с), но на ограниченной площади [3].

Прогноз сильных шквалов 30 мая по данным глобальной модели GFS был возможен с учетом сильного сдвига ветра как в средней тропосфере, так и в пограничном слое атмосферы. В то же время энергия неустойчивости была намного ниже, чем обычно бывает при развитии сильных шквалов. На северо-востоке Центрального ФО сильный шквал до 29 м/с наблюдался при сочетании условий, нетипичных для данного явления: в первой половине дня при прохождении вторичного холодного фронта на фоне невысокой температуры воздуха (около $+20^\circ\text{C}$) и слабой неустойчивости ($\text{CAPE} \sim 500 \text{ Дж/кг}$).

Шквалы 30.05.2018 г. с разной степенью успешности воспроизводятся по модели WRF с шагом сетки 3 км. Расчетные скорости ветра при шквалах близки к фактическим значениям или ниже их на 2–4 м/с. Успешность прогноза шквалов по модели WRF при использовании в качестве начальных условий данных ECMWF (из архива ERA-5) оказалась существенно выше, чем по начальным данным GFS. В частности, при запуске модели WRF на начальных данных ECMWF воспроизводится линия шквалов (ее протяженность достигала 1100 км, с ней был связан сильный шквал 28 м/с в районе Нижнего Новгорода) не только на основном холодном фронте, но и в его тылу. Это особенно важно, так как сильный шквал не был предсказан синоптиками Нижегородского ЦГМС (прогнозировалось усиление ветра лишь до 20 м/с). Однако модель не воспроизводит сильные шквалы в Ивановской обл., связанные с тем же процессом и также не предсказанные синоптиками.

Проведенное исследование подтверждает эффективность использования модели WRF для краткосрочного прогноза сильных шквалов с большим охватом территории. При этом ключевым фактором, влияющим на успешность прогноза, остается выбор начальных условий для запуска модели. Полученные результаты позволяют предположить, что использование данных глобальной модели атмосферы ECMWF в качестве начальных условий для запуска модели WRF может обеспечить существенное

повышение достоверности мезомасштабного краткосрочного прогноза шквалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-45-590823 p_a, 16-05-00245-а).

1. *Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров М.В.* Прогноз сильных шквалов на европейской территории России и их идентификация доплеровскими радиолокаторами // Тр. Гидромет. России. 2017. № 363. С. 47–64.
2. *Васильев Е.В.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов на европейской территории России: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Гидрометцентр России, 2009. 25 с.
3. *Дмитриева Т.Г., Песков Б.Е.* Синоптические условия, наукастинг и модельные прогнозы сильных шквалов и смерчей в Башкирии 1 июня 2007 г. и 29 августа 2014 г. // Метеорол. и гидрол. 2016. № 10. С. 16–29.
4. *Калинин Н.А., Быков А.В., Пищальникова Е.В., Шихов А.Н.* Анализ условий возникновения сильных шквалов в Пермском крае по данным наблюдений и результатам численного моделирования // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 7–27.
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. *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.
7. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В.* Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорол. и гидрол. 2017. № 1. С. 16–28.
8. URL: <http://www.tvc.ru/news/show/id/138798> (дата обращения: 8.09.2018).
9. URL: <https://gp5.ru/> (дата обращения: 08.09.2018).
10. *Шихов А.Н.* Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 21–30.
11. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V.* A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Remote Sens. Environ. 2018. V. 204. P. 553–567.
12. URL: <https://eoportal.eumetsat.int/userMgmt/login.faces> (дата обращения: 8.09.2018).
13. *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., Wei Wang, Schwartz C.S., Romine G.S., Zhiqian Liu, Snyder C., Fei Chen, Barlage M.J., Wei Yu, 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.
14. ERA5 data documentation. URL: <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation> (дата обращения: 8.09.2018).
15. URL: <http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/> (дата обращения: 08.09.2018).
16. *Бережная Т.В., Голубев А.В., Паршина Л.Н.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в мае 2018 г. // Метеорол. и гидрол. 2018. № 9. С. 126–137.
17. *Brooks H.E.* Proximity soundings for severe convection for Europe and the United States from reanalysis data // Atmos. Res. 2009. V. 93. P. 546–553.
18. *Groenemeijer P., van Delden A.* Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands // Atmos. Res. 2007. V. 83. P. 473–487.
19. URL: <http://interfax.ru/russia/615068> (дата обращения: 08.09.2018).
20. *European Severe Weather Database.* URL: <http://www.eswd.eu> (дата обращения: 8.09.2018).
21. *Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г.* Гибридный метод прогноза порывов ветра // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 523–529.
22. *Das M.K., Das S., Chowdhury M.A.M., Karmakar S.* Simulation of tornado over Brahmanbaria on 22 March 2013 using Doppler weather radar and WRF model // Geomat., Nat. Haz. Risk. 2016. V. 7(5). P. 1577–1599.

N.A. Kalinin, A.N. Shikhov, A.V. Bykov, I.O. Azhigov. **Conditions of occurrence and short-term forecast of strong squalls and tornadoes in European Russia.**

Strong squalls and several tornadoes occurred in European Russia on May 30, 2018, and caused significant damage. The data on the squalls were received from weather stations. The data on tornado events were updated from the analysis of satellite information about tornado-induced forest damage. We describe synoptic-scale and mesoscale environments and possibilities of short-term forecast of severe weather outbreaks. The mesoscale simulation is carried out in the WRF model version 3.9.1.1 (3 km resolution) with data of GFS/NCEP and ECMWF ERA-5 global atmospheric models as initial conditions. The strong squalls are simulated with a satisfactory reliability. It is found that the reliability of the WRF model forecast is significantly higher when using ECMWF ERA-5 data.

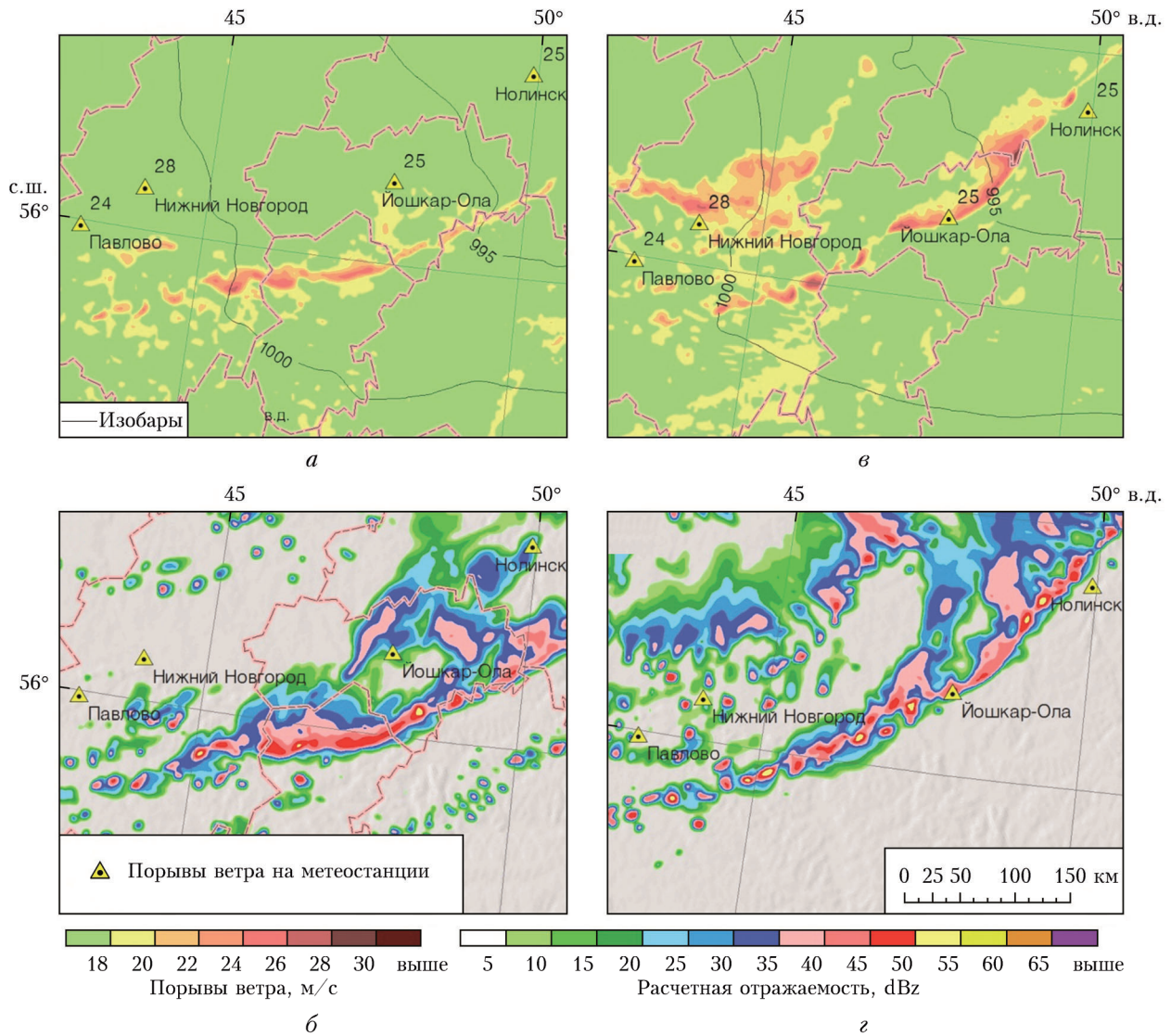


Рис. 3. Скорость порывов ветра и максимальная отражаемость в 10:00 ВСВ 30.05.2018 г., полученные по модели WRF с начальными данными моделей GFS (*a*, *б*) и ECMWF из архива ERA-5 (*в*, *г*)

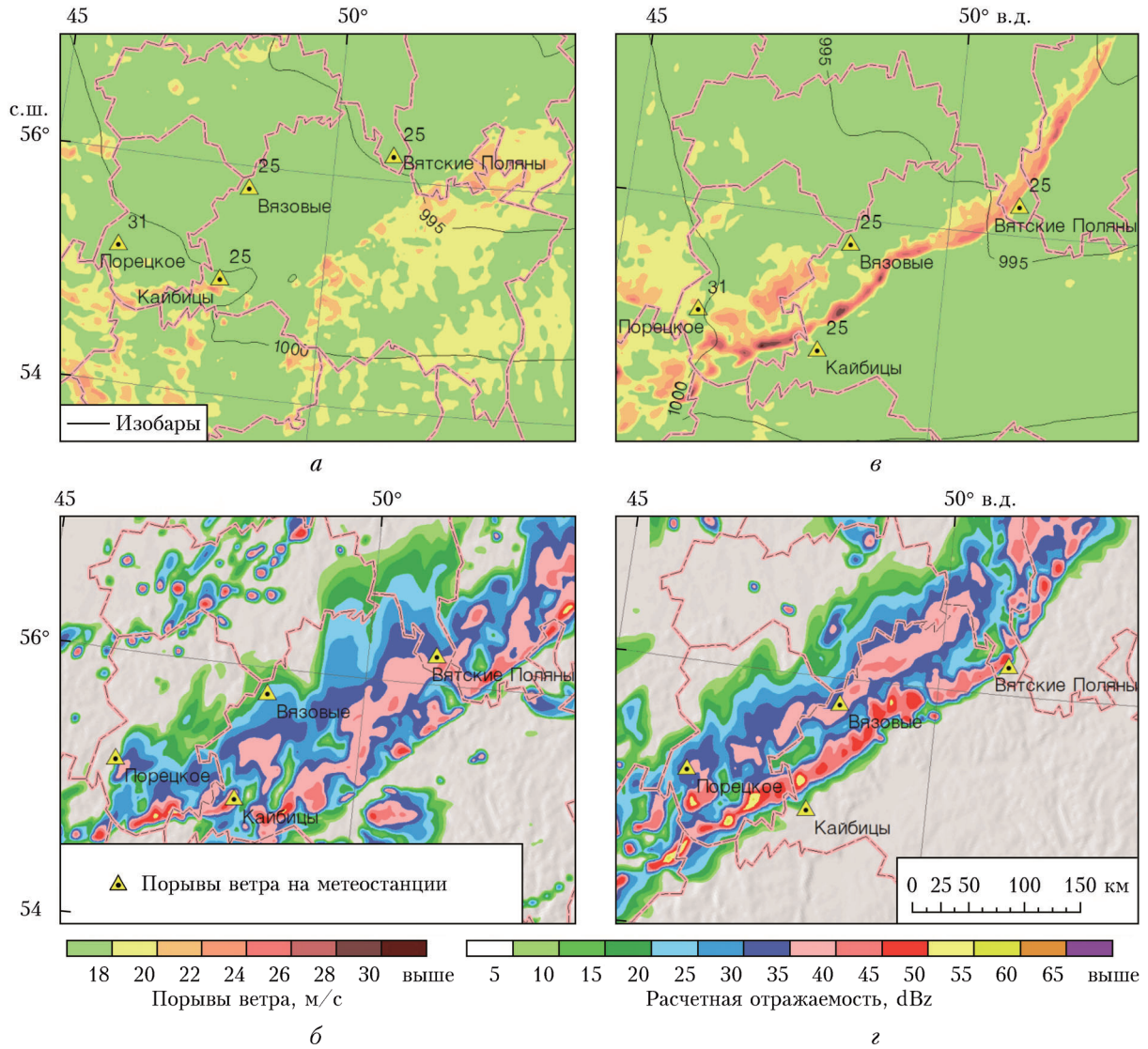


Рис. 4. Скорость порывов ветра и максимальная отражаемость в 12:00 ВСВ 30.05.2018 г., полученные по модели WRF с начальными данными моделей GFS (*a*, *b*) и ECMWF из архива ERA-5 (*v*, *z*)