

УДК 551.589.6

## Условия формирования и краткосрочный прогноз конвективных опасных явлений погоды в Уральском регионе в теплый период 2020 г.

Н.А. Калинин, А.Н. Шихов, А.В. Быков, А.А. Поморцева,  
Р.К. Абдуллин, И.О. Ажигов\*

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

Поступила в редакцию 14.12.2020 г.

Рассматриваются условия формирования и оценивается точность краткосрочного прогноза шести случаев конвективных опасных явлений погоды или их кластеров (вспышек), зафиксированных в Уральском регионе и в восточной части европейской территории России в теплый период 2020 г.

*Ключевые слова:* конвективные опасные явления погоды, краткосрочный прогноз, модель WRF, глобальные модели атмосферы, ингредиентный подход, прямое моделирование конвекции; convective hazardous weather events, short-term forecast, WRF model, global atmospheric models, ingredient-based approach, explicit simulation of convection.

### Введение

Опасные явления погоды (ОЯ), связанные с развитием глубокой конвекции в атмосфере, характеризуются внезапностью возникновения и представляются собой одну из значимых причин чрезвычайных ситуаций природного характера на территории России [1–3]. Актуальной и до настоящего времени не решенной проблемой их краткосрочного прогноза является определение места и времени возникновения ОЯ с точностью, достаточной для практического применения [4, 5].

Важный инструмент для краткосрочного прогнозирования конвективных ОЯ – глобальные и мезомасштабные численные модели атмосферы [6–8]. Можно выделить два основных подхода к их прогнозу на основе данных моделей численного прогноза погоды (ЧПП): ингредиентный подход и прямое моделирование конвекции. В рамках ингредиентного подхода глубокая конвекция в атмосфере рассматривается как функция нескольких предикторов – так называемых ингредиентов, а именно влажности воздуха в нижней тропосфере, динамического фактора, связанного с влиянием фронтального раздела или с орографией, неустойчивой стратификации (плавучести) и вертикального сдвига ветра [9, 10].

Для оценки предикторов вычисляется ряд диагностических переменных (индексов неустойчивости), которые характеризуют отдельные ингредиенты или их сочетания. В целях краткосрочного прогноза индексы могут рассчитываться на основе выходных данных моделей ЧПП [11, 12]. Опыт применения ингредиентного подхода или его отдельных элементов для прогноза конвективных ОЯ в России рассмотрен во множестве работ (например, [13–16]).

Второй подход предполагает прямое (без использования параметризаций) моделирование конвекции на основе мезомасштабных моделей ЧПП с шагом сетки по горизонтали 3–5 км и менее [7]. Впервые подобные эксперименты были проведены в начале XXI в. для территории США с использованием модели атмосферы ARPS [17]. В настоящее время список публикаций по этой тематике насчитывает сотни наименований, в том числе множество исследований проведено в России [5, 15–16, 18–21]. Однако в большинстве работ рассматривается воспроизводимость отдельных наиболее интенсивных случаев конвективных ОЯ и значительно меньшее внимание уделяется, например, оценке ложных тревог (случаев, когда модель воспроизвела ОЯ, но фактически оно не наблюдалось).

Важной тенденцией последних лет является повышение пространственного разрешения глобальных моделей ЧПП до 9–13 км, произошедшее благодаря росту производительности вычислительных систем [6]. В результате современные глобальные модели ЧПП способны прогнозировать процессы не только масштаба мезо- $\alpha$ , но частично и масштаба мезо- $\beta$  (интервал 20–200 км) [6, 22]. Для России исследования воспроизводимости мезомасштабных конвектив-

\* Николай Александрович Калинин (kalinin@psu.ru); Андрей Николаевич Шихов (shikhovan@gmail.com); Алексей Васильевич Быков (blexx256@yandex.ru); Анна Александровна Поморцева (smirnova@psu.ru); Ринат Камилевич Абдуллин (rinaha-26@mail.ru); Игорь Олегович Ажигов (meteo@psu.ru).

ных систем (МКС) глобальными моделями ЧПП не проводились.

На территории Уральского региона ежегодно отмечается до нескольких десятков случаев сильных ливней, крупного града, шквалов и смерчей [23]. В последние годы благодаря появлению ряда новых источников данных и о самих явлениях, и о вызванном ими ущербе объем информации о конвективных ОЯ существенно увеличился. Проведенные исследования позволили на основе спутниковых данных о нарушениях лесного покрова выявить множество ранее неизвестных случаев шквалов и смерчей [24, 25], уточнить метеорологические условия возникновения наиболее интенсивных явлений [20, 26–28]. Были уточнены характеристики МКС и оценивалась их воспроизводимость с помощью мезомасштабной модели атмосферы WRF [5, 15, 27, 28]. Как и для остальной территории России, для Уральского региона не изучались ложные тревоги при краткосрочном прогнозе конвективных штормов, а также возможность их воспроизведения по данным глобальных моделей ЧПП.

В теплый период (май–август) 2020 г. на Урале и в восточной части европейской территории России наблюдался ряд случаев сильных ливней, крупного града, шквалов и смерчей. В настоящей работе рассматриваются шесть случаев, с которыми был связан наиболее значительный ущерб. Цель исследования – получение оценок успешности краткосрочного прогноза наиболее значимых случаев конвективных ОЯ в теплый период 2020 г. в Уральском регионе с применением ингредиентного подхода по данным глобальных моделей ЧПП и прямого моделирования конвекции по модели WRF версии 4.1.

## Данные и методы

### Данные наблюдений

В рамках настоящей работы выбор случаев конвективных ОЯ для последующего анализа был основан на анализе трех основных источников информации: данных наблюдательной сети Росгидромета, сведений об ущербе, полученных из средств массовой информации и социальных сетей, а также спутниковых снимков Sentinel-2, по которым были выявлены ветровалы в лесных массивах. Данные метеостанций были загружены с открытого сервиса [29]. Процедура поиска и отбора информации о случаях конвективных ОЯ, опубликованной в СМИ и социальных сетях, в общих чертах описана в [3]. Отчеты о явлениях и зафиксированном ущербе были геокодированы по населенным пунктам аналогично алгоритму, используемому в базе данных ESWD [30]. Идентификация ветровалов по снимкам Sentinel-2 (с пространственным разрешением 10 м) и определение типа метеорологического явления, вызвавшего ветровал (шквал или смерч), производились в соответствии с методикой [25]. Интенсивность смерчей оценивалась по схеме, использованной в [3].

Перечисленные данные анализировались в течение всего теплого периода 2020 г., в результате чего была получена максимально подробная информация о случаях конвективных ОЯ в этот период и отобраны наиболее значимые из них – так называемые вспышки (outbreaks), под которыми обычно понимается совокупность явлений, связанных с одним процессом синоптического масштаба [11].

Для анализа синоптических условий возникновения ОЯ использовались карты приземного анализа, кольцевые карты погоды, карты барической топографии и данные реанализа CFSv2 [31]. Вертикальные профили температуры, влажности, скорости и направления ветра анализировались по данным аэрологического зондирования из архива [32]; по этим же данным оценивалась достоверность расчета диагностических переменных по глобальным моделям атмосферы.

Анализ развития МКС, вызвавших конвективные ОЯ, был проведен по спутниковым данным Meteosat-8, полученным с веб-ресурса EUMETSAT [33]. Были загружены данные в канале высокого разрешения и в инфракрасном канале с длиной волны 10,8 мкм, на основе которых синтезировались RGB-изображения, определялся тип МКС и оценивалась температура верхней границы облаков (ВГО). Снимки Meteosat-8 тоже использовались для оценки достоверности прогнозов глубокой конвекции по модели WRF.

В трех из шести рассматриваемых случаев были также получены данные метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ), установленных в Ижевске и Кирове; остальные три случая отмечались за пределами радиуса видимости ДМРЛ. Данные ДМРЛ представлены результатами радиолокационных обзоров с интервалом обновления 10 мин. Информация, полученная с веб-ресурса meteorad.ru, позволяет определить радиолокационную отражаемость в столбе  $C_b$  с горизонтальным разрешением 1–4 км с шагом 1 км по вертикали в пределах от поверхности земли до верхней границы облака. Поскольку радиолокационная отражаемость является характеристикой микрофизической структуры облака, ее изменение дает возможность оценить развитие конвективных ячеек с ОЯ.

### Данные моделирования

В настоящей работе рассматриваются условия возникновения конвективных ОЯ и оцениваются их оперативные краткосрочные (на срок до 24 ч) прогнозы, полученные по данным глобальных моделей атмосферы GFS/NCEP (США) и GEM/CMC (Канада), а также мезомасштабной модели WRF версии 4.1, детальное описание которой дано в [34]. Основные характеристики глобальных моделей атмосферы приведены в табл. 1, а сведения о конфигурации оперативной версии модели WRF – в табл. 2. Данные глобальных моделей атмосферы загружались с серверов национальных метеослужб на персональный компьютер ежедневно в течение всего теплого периода 2020 г.

Основные сведения об использованных глобальных моделях ЧПП

Модель ЧПП	Разработчик модели	Шаг сетки, км	Число вертикальных уровней	Шаг сетки выходных данных, град.	Источник
GFS	Национальный центр по прогнозированию окружающей среды (NCEP), США	13	64	0,25	<a href="http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/">http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/</a>
GEM	Метеослужба Канады (CMC)	10	84	0,15	<a href="https://dd.weather.gc.ca/model_gem_global/">https://dd.weather.gc.ca/model_gem_global/</a>

Конфигурация модели WRF для оперативного краткосрочного прогноза конвективных ОЯ по территории Уральского региона

Характеристика модели	Принятая настройка
Начальные и граничные условия	Прогноз GFS с шагом сетки 0,25° и шагом по времени 1 ч
Внешний домен (шаг сетки и число узлов)	9 км/333 × 333
Вложенный домен (шаг сетки и число узлов)	3 км/400 × 400
Координаты центра домена	58° с.ш., 56° в.д.
Число вертикальных уровней	48
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
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 Молина–Обухова с вязким подслоем Карлсона–Боланда и стандартными функциями подобия
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации) на обоих доменах

Программный комплекс модели WRF установлен на высокопроизводительной рабочей станции (продолжительность счета модели для прогноза на 39 ч составляла 6,5–9 ч). Конфигурация модели в течение всего лета оставалась неизменной. Запуск расчетов модели WRF производился ежедневно на начальных данных прогноза GFS/NCEP от 12:00 Всемирного скоординированного времени (BCV), за исключением мая 2020 г., когда расчет запускался на начальных данных от 00:00 ВСВ. Заблаговременность прогноза (время от старта расчета до развития конвективного ОЯ) для разных случаев составила 7–22 ч. Также предварительно усваивались данные объективного анализа за 12 ч, предшествующие запуску модели.

Прогноз конвективных ОЯ по данным глобальных моделей атмосферы основан на ингредиентном подходе [9, 10]. По данным моделей рассчитывались прогностические поля индексов, характеризующих конвективную неустойчивость атмосферы (доступная потенциальная энергия неустойчивости CAPE, энергия противодействия конвенции CIN, K index, TT index), общее влагосодержание атмосферы (precipitable water), сдвиг ветра (DLS, MLS),

завихренность в слое 0–3 км (0–3 km SRH) и ряд композитных параметров (WMAXSHEAR, ENI, SWEAT). Подробное описание индексов, формулы для их расчета, а также критические значения, при достижении которых вероятно развитие ОЯ, приведены в [35, 36]. Важно отметить, что использовались значения энергии неустойчивости, рассчитанной от поверхности земли (SB CAPE), поскольку пять из шести случаев ОЯ отмечались во второй половине дня в период максимального развития конвекции.

Для оценки условий возникновения конвективных ОЯ рассчитывались максимальные значения индексов в радиусе 100 км от места возникновения ОЯ и в срок, ближайший ко времени его возникновения. Предполагалось, что максимальное значение индекса, наблюдаемое в рассматриваемой области, соответствовало возникновению ОЯ.

Если ОЯ продолжалось свыше 1 ч и охватывало значительную территорию (протяженность полосы разрушений свыше 100 км), то в качестве места его возникновения указывалась точка, где явление достигало наибольшей интенсивности или был отмечен наибольший ущерб, а в качестве времени

возникновения — время, когда явление отмечалось в указанной точке. Так, если ОЯ было зафиксировано несколькими метеостанциями, то указывалась станция с наибольшей его интенсивностью. Если ОЯ (шквал или смерч) вызвало ветровалы, то центр самого крупного участка ветровала отмечался как точка с максимальной интенсивностью явления.

Достоверность прогноза по глобальным моделям ЧПП оценивалась путем сопоставления прогнозных и фактических значений индексов (чему, однако, препятствует низкая плотность сети аэрологического зондирования на исследуемой территории). Другие характеристики ОЯ оценивались непосредственно и сопоставлялись с данными наблюдений. Основные из них — интенсивность осадков (мм/ч) и их сумма за 12 ч, расчетная композитная отражаемость (dBZ) и скорость порывов ветра (м/с).

Прогноз по модели WRF основан на прямом моделировании глубокой конвекции и связанных с ней ОЯ. Оценка успешности прогноза производилась с использованием трех наборов проверочных данных. Расчетные значения скорости порывов ветра на высоте 10 м сопоставлялись с наблюдениями

метеостанций, а характеристики конвективных облачных систем по модели — со спутниковыми данными Meteosat-8. Также проведена оценка соответствия выявленных ветровалов в лесных массивах и областей, где прогнозировались шквалы. Аналогичный подход ранее использовался в [5, 16, 28].

### Характеристика случаев конвективных ОЯ и условий их возникновения

В результате проведенного анализа (см. разд. Данные и методы) были выделены шесть наиболее значимых случаев конвективных ОЯ и их вспышек, нанесших существенный ущерб (табл. 3). На рис. 1 показано расположение ветровалов, вызванных шквалами и смерчами и выявленных по спутниковым данным Sentinel-2.

Синоптические условия возникновения ОЯ были весьма разнообразными (табл. 4). Три случая были связаны с активными углубляющимися циклонами (в том числе 25 мая 2020 г. имел место взрывной циклогенез), остальные три случая отмечались

Таблица 3

Основные сведения о рассматриваемых случаях конвективных ОЯ и их вспышек

Дата, время (BCB)	Регион	Тип явления	Максимальная интенсивность (место наблюдения)	Количество отчетов об ОЯ и ущербе по всем источникам данных	Характеристика ущерба
25.05.2020, 11:00–14:00	Свердловская обл. (южная часть)	Шквал	30 м/с (Липовское) 27 м/с (Невьянск) 27 м/с (Сысерть)	57	4 человека погибли, повреждены кровли домов, повалены деревья, нарушено электроснабжение 100 тыс. потребителей
		Крупный град	20 мм (Невьянск)	1	Ущерба нет
27.06.2020, 08:00–17:00	Кировская обл., Удмуртия, Татарстан	Шквал	25 м/с (Вятские Поляны) 24 м/с (Кирс)	62	Повреждены кровли зданий, автомобили, нарушено электроснабжение, сплошные ветровалы в лесах на площади ~1570 га
		Смерч	≥ EF2 (Кильмезский, Уржумский р-ны)	9	Сплошные ветровалы в лесах на площади ~420 га
		Крупный град	40 мм (Оричевский р-н)	19	Уничтожен урожай, повреждены автомобили, кровли домов
16.07.2020, 16:00–23:00	Удмуртия, Кировская обл. (юго-восток), Пермский край (северо-запад)	Шквал	25 м/с (Дебесы) 22 м/с (Гайны)	8	Нарушено электроснабжение в нескольких районах, сплошные ветровалы в лесах на общей площади 590 га
20.07.2020, 12:00–20:00	Свердловская обл. (юго-запад), Пермский край (юго-восток)	Очень сильный дождь	82 мм/2 ч (Бисерть), 62 мм/12 ч (Октябрьский)	3	Ливневый паводок в г. Нижние Серги, разрушены и повреждены десятки жилых домов, ущерб 150 млн руб.
30.07.2020, 15:45	Кировская обл.	Смерч	EF2 (пос. Лойно)	1	Повреждены жилые дома, автомобили, сплошной ветровал в лесном массиве (132 га)
31.07.2020, 12:45	г. Челябинск	Шквал	30 м/с (аэропорт Челябинск)	12	Пострадали 3 человека, поврежден газопровод, десятки домов и социальных объектов, повалены сотни деревьев, нарушено электроснабжение



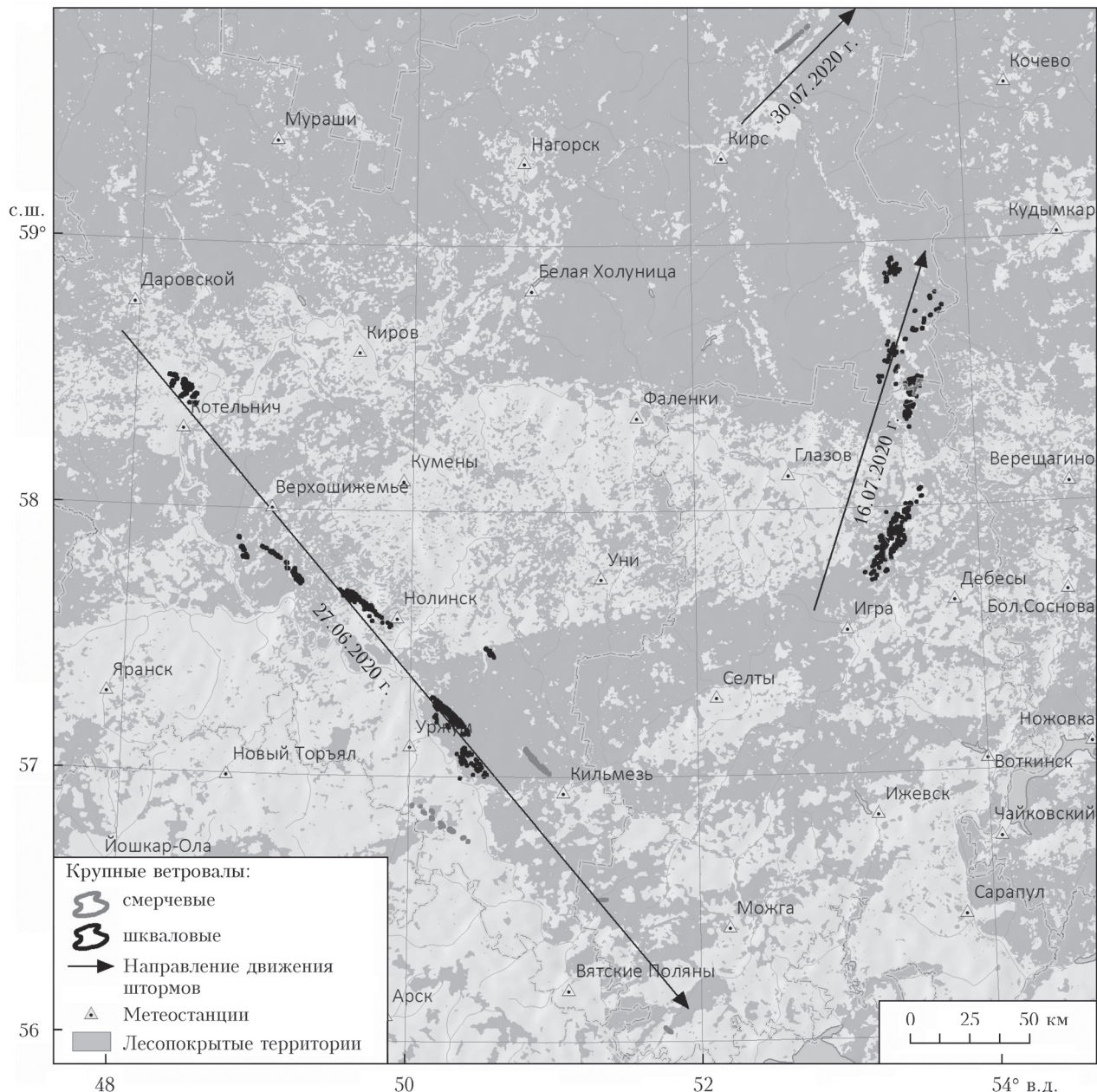


Рис. 1. Ветровалы, вызванные рассматриваемыми конвективными явлениями (шквалы и смерчи)

на малоподвижных фронтах. В двух случаях явления развивались на холодном фронте вблизи точки окклюзии, что в целом характерно для сильных шквалов и смерчей [4, 16, 19].

В трех случаях (25 мая, 27 июня и 16 июля 2020 г.) ОЯ сформировались под влиянием контрастных фронтальных зон ( $\Delta T_{850} \geq 9^\circ\text{C}/500\text{ км}$ ), в трех остальных случаях градиент температуры на фронте был незначительным. В четырех случаях (когда наблюдались шквалы, смерчи и крупный град) скорость ветра на изобарической поверхности 850 гПа достигала 15 м/с и более. Важно также отметить, что только один из рассматриваемых случаев ОЯ был связан с интенсивной волной тепла, наблюдавшейся в Уральском регионе с 7 по 19 июля.

Радиолокационные данные позволяют оценить динамику развития конвективного процесса, выявить стадии развития МКС и зафиксировать периоды обострения метеорологической ситуации (формирования ОЯ) [37, 38]. В табл. 5 представлены радиолокационные характеристики конвективных ОЯ, отмечавшихся на территории Кировской обл., республик Удмуртия и Татарстан, Пермского края.

Обращает на себя внимание тот факт, что радиолокационные характеристики суперячейкового облака, в котором сформировался смерч, ниже аналогичных значений для других рассмотренных ОЯ. Возможно, это связано с тем, что к моменту формирования этих явлений суперячейка приблизилась к границе обзора ДМРЛ.

Характеристика условий возникновения конвективных ОЯ и их вспышек

Дата, время (ВСВ)	Характеристики циклона			Характеристики атмосферного фронта		Количественные характеристики			Тип конвективного шторма
	Происхождение	Стадия развития	Направление смещения	Тип	Ориентация	$\Delta T_{850}$ , °С/500 км	$Td_{2m}$ , °С	$V_{850}$ , м/с	
25.05.2020, 11:00–14:00	местный	молодой	ЮЗ–СВ	холодный	Ю–С	17	16	23	Линия шквалов
27.06.2020, 08:00–17:00	ныряющий	молодой	СЗ–ЮВ	холодный у точки окклюзии	З–В	9	13	22	Линия шквалов
16.07.2020, 16:00–23:00	южный	заполняющийся	ЮЗ–СВ	мало-подвижный с волнами	ЮЮЗ–ССВ	9	16	13	Мезомасштабный конвективный комплекс
20.07.2020, 12:00–20:00	местный	заполняющийся	В–З	мало-подвижный с волнами	ВЮВ–ЗСЗ	3	18	6	Скопление штормов масштаба мезо-β
30.07.2020, 15:45	западный	молодой	ЗСЗ–ВЮВ	холодный у точки окклюзии	ЮЮЗ–ССВ	3	19	15	Суперячейка
31.07.2020, 12:45	западный	максимальное развитие	ЗЮЗ–ВСВ	мало-подвижный	ЗЮЗ–ВСВ	6	13	11	Суперячейка

Примечание.  $Td_{2m}$  – температура точки росы на высоте 2 м над поверхностью земли, оценивалась по данным метеостанций;  $T_{850}$  – градиент температуры на изобарической поверхности 850 гПа;  $V_{850}$  – скорость ветра на изобарической поверхности 850 гПа по данным реанализа.

Таблица 5

Радиолокационные характеристики опасных конвективных явлений

Дата, время (ВСВ)	Вид явления	Максимальная отражаемость в ядре радиоэха, dBZ	Средняя отражаемость в ядре радиоэха, dBZ	Средняя высота зоны максимальной отражаемости, км	Средняя максимальная высота $C_b$ с ОЯ, км
27.06.2020, 08:00–16:00	Шквал, смерч, крупный град	65	53	7,6	13,5
16.07.2020, 16:00–22:00	Шквал	60	52	10,8	14,4
30.07.2020, 13:00–16:00	Смерч	60	48	4,9	12,7

## Результаты и обсуждение

### Прогноз условий возникновения конвективных ОЯ по данным глобальных моделей атмосферы GFS и GEM

По данным глобальных моделей атмосферы оценивались как некоторые характеристики самих конвективных ОЯ (интенсивность осадков, расчетная композитная отражаемость и скорость порывов ветра), так и термодинамические и кинематические переменные (индексы), характеризующие риск их возникновения.

Результаты расчета индексов приведены в табл. 6, из которой следует, что их значения во всех шести случаях позволяли спрогнозировать высокий риск возникновения ОЯ по данным обеих моделей ЧПП.

Все случаи произошли на фоне умеренной или сильной конвективной неустойчивости ( $CAPE \geq 1000$  Дж/кг по данным одной или обеих моделей ЧПП), высокого влагосодержания атмосферы (34–46 мм). Высокие значения  $K$  (35–41) указывали на вероятность гроз, близкую к 100%. При этом четыре случая (25 мая, 27 июня, 30 и 31 июля 2020 г.) характеризуются сочетанием умеренной или сильной конвективной неустойчивости и сильного сдвига ветра ( $DLS > 20$  м/с). Такие условия считаются наиболее благоприятными для развития организованных МКС и суперячейковых штормов, вызывающих крупный град, шквалы и смерчи [4, 9–12, 19–20]. В этих случаях наблюдались шквалы с максимальной зафиксированной скоростью ветра 30 м/с или смерчи.

Отдельно стоит отметить, что 25 мая и 27 июня 2020 г. прогнозировался экстремально сильный сдвиг

Диагностические переменные, рассчитанные по данным глобальных моделей атмосферы GFS/GEM

Дата, время (BCB)	SB CAPE, Дж/кг	К, °C	Precipitable water, мм	SWEAT	DLS, м/с	MLS, м/с	0–3 km SRH, м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	SCP	EHI	WMAX-SHEAR
25.05.2020, 11:00	3372/2691	41/41	45/43	563/556	30/30	31/20	1127/1031	20,9/26,1	5,8/7,5	1587/1782
27.06.2020, 12:00	2122/2262	36/39	34/36	286/396	31/29	22/21	172/300	3,2/7,0	1,5/2,6	1310/1210
16.07.2020, 19:00	2148/2849	41/39	46/37	344/345	10/5	11/7	209/382	1,2/1,5	0,9/2,9	370/271
20.07.2020, 12:00	1386/2062	36/40	44/43	240/303	9/10	7/9	215/196	0,6/0,6	0,7/1,1	377/451
30.07.2020, 15:00	582/1683	35/37	41/40	337/370	21/19	22/24	201/510	0,2/4,4	0,2/2,6	407/895
31.07.2020, 12:00	1830/2758	36/38	42/34	274/277	21/22	19/13	182/123	1,2/1,7	1,3/1,5	694/1036

ветра (DLS ~ 30 м/с), что обусловило появление сильных шквалов с большим охватом территории (протяженность полосы разрушений превысила 200 км), а 27 июня также отмечались смерчи. Эти случаи отличаются наиболее высокими значениями композитного параметра WMAXSHEAR.

В двух остальных случаях (16 и 20 июля 2020 г.) сдвиг ветра был существенно ниже критических значений (DLS ≤ 11 м/с), однако 16 июля также возник сильный шквал, который вызвал значительный ущерб и повреждение лесного покрова (см. табл. 3, рис. 1). Вероятно, это обусловлено экстремальной конвективной неустойчивостью (CAPE превышала 2000 Дж/кг даже в 19:00 BCB) и большим температурным контрастом на фронте (см. табл. 4). В случае 20 июля 2020 г. значения CAPE и контраст температуры были существенно ниже, но отмечалось экстремально высокое влагосодержание атмосферы, что обусловило формирование медленно движущихся скоплений кучево-дождевых облаков на малоподвижном фронте и выпадение осадков экстремальной интенсивности.

В плане прогноза вероятности смерчей особый интерес представляют параметры, учитывающие завихренность (0–3 km SRH, SCP и EHI). Экстремально высокие значения всех трех параметров, в несколько раз выше критических [35, 36], прогнозировались 25 мая 2020 г. на фоне взрывного циклогенеза. Но при этом ни одного факта возник-

новения смерчей подтверждено не было, в том числе по результатам поиска повреждений лесного покрова по спутниковым снимкам Sentinel-2. В остальных случаях значения параметра 0–3 km SRH были в несколько раз ниже, однако SCP и EHI превышали критические значения 27 июня и 30 июля 2020 г. по данным хотя бы одной модели. В обоих случаях было подтверждено смерчи (см. рис. 1).

При сравнении значений индексов по данным моделей GFS и GEM можно отметить, что вторая модель несколько завышает энергию неустойчивости. Вследствие этого значения композитных параметров, при расчете которых учитывается SB CAPE (SCP, EHI, WMAXSHEAR), по модели GEM также оказались выше, чем по данным GFS. Для других индексов (в том числе для сдвига ветра) существенных расхождений не отмечено.

Сопоставление фактических и прогностических значений индексов проведено для случаев, когда аэрологические данные были репрезентативными для условий возникновения конвективных ОЯ (табл. 7). Данные моделей ЧПП получены из ячейки расчетной сетки, совпадающей с местоположением станции аэрологического зондирования. Полученные результаты нужно рассматривать с осторожностью, учитывая наблюдавшееся смещение времени прохождения зон неустойчивости и атмосферных фронтов относительно прогнозируемого. Так, в случае 25 мая 2020 г. холодный фронт прошел позже

Диагностические переменные, рассчитанные по фактическим данным аэрологического зондирования атмосферы (АЗ) и по данным глобальных моделей атмосферы GFS и GEM (АЗ/GFS/GEM)

WMO ID станции, дата, время (BCB)	SB CAPE, Дж/кг	SB CIN, Дж/кг	К, °C	Precipitable water, мм	SWEAT	DLS, м/с	MLS, м/с
28445 25.05.2020, 12:00	366/22/1132	-156/-104/-1	25/28/35	28/31/32	258/280/90	39/12/11	25/3/2
28225 16.07.2020, 12:00	1213/2895/2249	-156/-32/-57	25/29/21	24/27/22	237/242/165	12/6/5	4/4/3
28225 20.07.2020, 12:00	170/11/529	-85/-1/0	35/32/37	35/38/42	235/207/217	5/4/8	4/1/4
27199 30.07.2020, 12:00	17/190/740	-88/0/-22	27/32/35	30/40/35	232/218/188	15/8/11	11/9/7



прогнозируемого времени, что влияет на значения индексов (особенно на сдвиг ветра). Проведенное сопоставление тоже подтверждает завышение энергии неустойчивости по данным модели GEM.

Рассмотрена также точность прогноза характеристик самих ОЯ (интенсивности осадков, максимальной отражаемости и скорости порывов ветра) по данным глобальных моделей ЧПП. Результаты приведены в табл. 8 в сравнении с результатами прямого моделирования конвекции с помощью модели WRF и обсуждаются в следующем разделе.

### **Прогноз характеристик конвективных ОЯ по данным мезомасштабной модели атмосферы WRF и глобальных моделей GFS и GEM**

Поскольку модель WRF запускалась в режиме прямого моделирования конвекции, наибольший интерес представляет воспроизведение моделью характеристик ОЯ и конвективных облачных систем, с которыми были связаны эти явления. Отдельно рассмотрено воспроизведение моделью мезоциклонов. Оценка точности прогноза выполнена с элементами объектно-ориентированного подхода [18]. Основные характеристики ОЯ по прогнозу модели WRF приведены в табл. 8; здесь же представлены значения, полученные по данным глобальных моделей ЧПП. Максимальные значения интенсивности явлений определялись в радиусе 100 км от места их фактического наблюдения. Для прогнозов по модели WRF рассчитаны также ошибки по положению и по времени прохождения явления. Ошибка по положению представляет собой расстояние между фактической и прогностической траекторией прохождения конвективной ячейки, вызвавшей ОЯ, а ошибка по времени – соответствующую разницу во времени наблюдения явления (положительную – если явление прогнозировалось раньше, чем наблюдалось,

и отрицательную – в обратном случае). Если явление вообще не воспроизводилось моделью, то в соответствующей графе указан прочерк.

Как следует из табл. 8, в двух случаях (30 и 31 июля 2020 г.) по модели WRF конвективные ОЯ не прогнозировались. Модель не воспроизводит развитие суперячейковых штормов (см. табл. 4), с которыми были связаны смерч (в первом случае) и сильный шквал (во втором). В остальных четырех случаях качество прогноза можно считать удовлетворительным, поскольку модель воспроизводит как сами МКС, так и вызванные ими опасные явления (с определенными смещениями по интенсивности, траектории и времени прохождения).

Наибольшая интенсивность явлений прогнозировалась 25 мая 2020 г. Согласно прогнозу модели WRF, при прохождении холодного фронта с 10:00 до 14:00 ВСВ в Зауралье ожидалось формирование линии шквалов с порывами ветра 25–30 м/с (локально до 35 м/с) на обширной территории. Максимальная скорость ветра прогнозировалась на востоке Свердловской обл. в 130 км восточнее метеостанции Липовское, где был отмечен самый сильный шквал. В целом модель завышает скорость порывов ветра. Случай 25 мая интересен тем, что шквалы хорошо воспроизводятся даже глобальными моделями GFS и GEM (рис. 2, цв. вкладка; табл. 8). Количество осадков по всем трем моделям превышает зафиксированный максимум.

Также модель WRF воспроизводит формирование двух суперячейковых штормов перед линией шквалов, хорошо выраженных в поле приземного давления (как мезомасштабные циклоны глубиной до 10 гПа) и ветра (порывы до 33 м/с). Они характеризуются очень высокими показателями комбинированной отражаемости (до 63 dBZ). Фактически возникновение этих суперячейковых штормов не подтверждается данными наблюдений (рис. 3, цв. вкладка).

В случае 27 июня 2020 г. модель WRF успешно воспроизводит развитие линии шквалов, однако

Таблица 8

**Оценка воспроизводимости конвективных ОЯ по данным региональной модели WRF и глобальных моделей атмосферы GFS и GEM**

Дата, время (BCB)	Дата, время старта моделей ЧПП (BCB)	Максимальная отражаемость, dBZ (WRF/GFS)	Максимальная скорость порывов ветра, м/с (WRF/GFS/GEM)	Максимальное количество осадков, мм/12 ч (WRF/GFS/GEM/метеостанции)	Ошибка по положению, км	Ошибка по времени, ч
25.05.2020, 11:00–14:00	25.05.2020, 00:00	63/50	35/24/29	59/61/63/43	30	0,5
27.06.2020, 08:00–17:00	26.06.2020, 12:00	58/43	22/15/19	51/15/25/16	50	1,5
16.07.2020, 16:00–23:00	16.07.2020, 12:00	60/42	30/14/10	40/32/21/33	10	–2,5
20.07.2020, 12:00–20:00	19.07.2020, 12:00	51/32	–	105/34/58/102	60	0
30.07.2020, 15:45	29.07.2020, 12:00	51/33	15/10/14	34/17/26/21	–	–
31.07.2020, 12:45	30.07.2020, 12:00	48/37	16/10/11	7/9/2/12	–	–



затем зона шквалов смещается несколько южнее своего фактического положения. Модель существенно занижает скорость порывов ветра, особенно на участке холодного фронта вблизи точки окклюзии, где фактически и наблюдались наиболее сильные шквалы и смерчи, вызвавшие ветровалы в лесных массивах. В данном случае модель не воспроизводит формирование мезоциклонов, с которыми обычно связаны смерчи, хотя последние фактически наблюдались. Глобальные модели атмосферы GFS и GEM также прогнозируют развитие конвекции и усиление ветра до 19 м/с (по модели GEM). Однако количество осадков по их данным значительно меньше, чем по данным WRF.

В случае 16 июля 2020 г. модель WRF воспроизводит прохождение сильного шквала через территорию Удмуртии с небольшим смещением к востоку относительно фактической траектории и максимальной скоростью ветра 30 м/с (рис. 4, цв. вкладка). На метеостанциях были отмечены порывы ветра до 25 м/с, однако наличие крупных ветровалов позволяет предположить, что максимальная скорость ветра была выше. В прогнозе такого случая по модели WRF две неточности. Во-первых, отмечается значительная ошибка по времени (шквал прогнозировался на 2,5 ч позже, чем наблюдался), во-вторых, модель воспроизводит развитие еще одной линии шквалов вечером 16 июля над северо-востоком Кировской обл. и северо-западом Пермского края, которой фактически не было. Шквалы в этом районе действительно наблюдались, но были связаны с прохождением основной МКС со стороны Удмуртии ночью 17 июля. Глобальные модели GFS и GEM в этом случае воспроизвели развитие конвекции, но не прогнозировали усиление ветра.

В случае с выпадением очень сильных осадков 20 июля 2020 г. модель WRF успешно воспроизводит их максимальную интенсивность (свыше 100 мм), однако ширина зоны осадков оказалась больше фактической, а сама зона по прогнозу была смещена на 50 км севернее (рис. 5, цв. вкладка). Второй максимум осадков (> 100 мм) прогнозировался юго-западнее Перми, но фактически здесь было зафиксировано не более 29 мм осадков, сообщения о паводках также не поступали. В целом данные модели WRF были полезны для прогноза ОЯ, в отличие от данных GFS и GEM, которые занизили количество осадков.

### Заключение

В настоящей работе проведено комплексное исследование шести случаев конвективных ОЯ в Уральском регионе и на востоке европейской территории России, отмечавшихся в теплый период 2020 г. Собраны все доступные данные наблюдений и оценена точность прогнозов этих явлений по мезомасштабной модели атмосферы WRF и глобальным моделям GFS и GEM.

Во всех шести случаях по данным глобальных моделей атмосферы GFS и GEM отмечались условия, благоприятные для развития ОЯ: умеренная

и сильная конвективная неустойчивость и наличие динамического фактора (атмосферного фронта). В четырех случаях сдвиг ветра также превышал критические значения. Таким образом, с использованием ингредиентного подхода умеренный или высокий риск возникновения конвективных ОЯ мог быть спрогнозирован во всех рассматриваемых случаях. Подобный прогноз имеет практическую значимость, однако требует дополнительной интерпретации специалистом с целью выявления зон наибольшего риска. При сопоставлении данных глобальных моделей GEM и GFS стоит выделить систематическое завышение энергии неустойчивости GEM.

Рассматривая прогноз характеристик ОЯ по модели WRF, можно отметить, что чем большую территорию охватывало явление, тем выше было качество прогноза. Случаи ОЯ, связанные с конвективными системами масштаба мезо- $\alpha$  (мезомасштабными конвективными комплексами, линиями шквалов), хорошо воспроизводятся моделью WRF. Глобальные модели GFS и GEM также воспроизводят такие МКС, а в некоторых случаях и сами явления (сильные ливневые осадки или шквалы с большим охватом территории). В то же время локальные явления, связанные с конвективными штормами масштаба мезо- $\beta$  или суперячейками, могут вообще не воспроизводиться моделью. Эта закономерность была известна и ранее [5, 15]. Таким образом, качество прогноза по модели WRF можно считать удовлетворительным для тех случаев, когда прогнозировалось развитие мезомасштабного конвективного комплекса или линии шквалов, и неудовлетворительным для случаев ОЯ, связанных с конвективными штормами масштаба мезо- $\beta$  или суперячейками. Эти выводы можно учитывать в практике краткосрочного прогноза ОЯ в исследуемом регионе. Также важно отметить факт успешного воспроизведения конвективных систем масштаба мезо- $\alpha$  глобальными моделями атмосферы, которые еще несколько лет назад имели недостаточное для этого пространственное разрешение.

Существенной и пока малоизученной проблемой остаются ложные тревоги при прогнозе конвективных ОЯ по модели WRF. Они могут быть связаны с неопределенностями при прогнозе процессов синоптического масштаба либо непосредственно с воспроизведением конвекции в модели. Так, в случае 25 мая 2020 г. модель завысила скорость ветра при шквале, поскольку прогнозировалось более резкое углубление циклона, чем отмечалось фактически. Возможно, по этой же причине модель прогнозировала формирование двух мезоциклонов. В случае 16 июля 2020 г. модель воспроизвела формирование двух МКС с сильными шквалами вместо одной. Минимизация ложных тревог возможна при выборе другой конфигурации модели WRF, а для выявления закономерностей их возникновения необходимо рассмотреть более обширную выборку случаев ОЯ.

Исследование проведено при поддержке гранта Президента РФ № МК 313.2020.5. Данные о ветровалах получены в рамках проекта РФФИ № 19-05-00046 а.

1. *Природные опасности России. Т. 5. Гидрометеорологические опасности* / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. М.: Крук, 2001. 296 с.
2. *Кориунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З., Шамин С.И.* Повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, нанесших социально-экономический ущерб в 1998–2017 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 11. С. 13–19.
3. *Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in Northern Eurasia: From the Middle Age to the Information Era // *Mon. Weather Rev.* 2020. V. 148. P. 3081–3110.
4. *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.
5. *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.
6. *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.
7. *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. P. 407–437.
8. *Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г.* Гибридный метод прогноза порывов ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 7. С. 523–529.
9. *Rasmussen E.N., Blanchard D.O.* A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // *Weather Forecast.* 1998. V. 13. P. 1148–1164.
10. *Brooks H.E., Doswell III C.A., Zhang X., Chernokulsky A., Tochimoto E., Hanstrum B., Nascimento E., Sills D., Antonescu B., Barrett B.* A century of progress in severe convective storm research and forecasting // *A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial.* 2019. Chapter 18. P. 18.1–18.41.
11. *Shafer C.M., Mercer A.E., Doswell III C.A., Richman M.B., Leslie L.M.* Evaluation of WRF forecasts of tornadic and nontornadic outbreaks when initialized with synoptic-scale input // *Mon. Weather Rev.* 2010. V. 137. P. 1250–1271.
12. *Taszarek M., Czernecki B., Walczakiewicz S., Mazur A., Kolendowicz L.* An isolated tornadic supercell of 14 July 2012 in Poland – A prediction technique within the use of coarse-grid WRF simulation // *Atmos. Res.* 2016. V. 178–179. P. 367–379.
13. *Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я., Махнорылова С.В., Серебряник Н.И., Петриченко С.А., Терёб Л.А., Калмыкова О.В.* Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 10. С. 30–40.
14. *Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терёб 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.
15. *Быков А.В., Шихов А.Н.* Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15, № 2. С. 213–224.
16. *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.
17. *Xue M., Wang D., Gao J., Brewster K., Droege-meier 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.
18. *Вельтищев Н.Ф., Жуванов 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.
19. *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.
20. *Романский С.О., Вербицкая Е.М., Азеева С.В., Истомин Д.П.* Условия возникновения смерча в Благовещенске 31 июля 2011 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 9. С. 26–35.
21. *Рубинштейн К.Г., Губенко И.М., Игнатов Р.Ю., Тухоненко Н.Д., Юсупов Ю.И.* Эксперименты по усвоению данных сети грозопеленгации // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 11. С. 936–941; *Rubinsteyn K.G., Gubenko I.M., Ignatov R.Yu., Tikhonenko N.D., Yusupov Yu.I.* Experiments on lightning detection network data assimilation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 2. P. 219–228.
22. *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 // *Atmosphere.* 2018. V. 9. P. 50.
23. *Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала.* Справочник специалиста. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. Ч. 3. 200 с.
24. *Shikhov A.N., Perminova E.S., Perminov S.I.* Satellite-based analysis of the spatial patterns of fire and storm-related forest disturbances in the Ural region, Russia // *Natural Hazards.* 2019. V. 97. P. 283–308.
25. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrows in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 // *Earth Syst. Sci.* DOI: 10.5194/essd-2020-91, in review, 2020.
26. *Чернокульский А.В., Курганский М.В., Захарченко Д.И., Мохов И.И.* Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2015. № 12. С. 29–38.
27. *Шихов А.Н., Ажигов И.О., Быков А.В.* Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса.* 2018. № 1. С. 272–281.
28. *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.
29. *Архив фактической погоды по метеостанциям* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (дата обращения: 12.10.2020).

30. *Sounding Data Archive* [Electronic resource]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/np.html> (last access: 12.10.2020).
31. *European Severe Weather Database* [Electronic resource]. URL: <https://eswd.eu/> (last access: 12.10.2020).
32. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grubine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang S., Van Den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP climate forecast system reanalysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. P. 1015–1057.
33. *Eumetsat Earth Observation Portal* [Electronic resource]. URL: <https://eoportal.eumetsat.int/userMgmt/login.faces> (last access: 12.10.2020).
34. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Duhia 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.
35. *Grieser J.* Convection parameters [Electronic resource]. URL: <http://www.juergen-grieser.de/CovectioParameters/ConvectionParameters.pdf> (last access: 12.10.2020).
36. Doswell C.A., Schultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // *Electron. Severe Storms Meteorology*. V. 1, N 3. URL: <http://www.ejssm.org/ojs/index.php/ejssm/article/viewArticle/11/12> (last access: 12.09.2020).
37. Силькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Старых Д.С., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Структура грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 9. С. 705–709.
38. Силькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над ладожским озером по данным дистанционных измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 2. С. 153–158; Sin'kevich A.A., Popov V.B., Mikhailovskii Yu.P., Toropova M.L., Dv-galyuk Yu.A., Veremei N.E., Starykh D.S. Characteristics of cumulonimbus with waterspout over ladoga lake from remote measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 4. P. 387–392.

*N.A. Kalinin, A.N. Shikhov, A.V. Bykov, A.A. Pomortseva, R.K. Abdullin, I.O. Azhigov.* **Conditions for the formation and short-term forecasting of hazardous weather events in the Ural region in the warm period of 2020.**

The conditions for the formation are considered and the short-term forecast accuracy is estimated for six convective hazardous weather events or outbreaks occurred in the Urals and eastern part of European Russia in the warm period of 2020. Information on large hail, heavy rainfall, squalls, and tornadoes has been compiled from several data sources; it includes data from weather stations, damage reports, and analysis of forest cover disturbances based on Sentinel-2 satellite images. The short-term forecasts were derived by the ingredient-based approach based on GFS and GEM global atmospheric models and explicit simulation of convection using the WRF mesoscale atmospheric model.



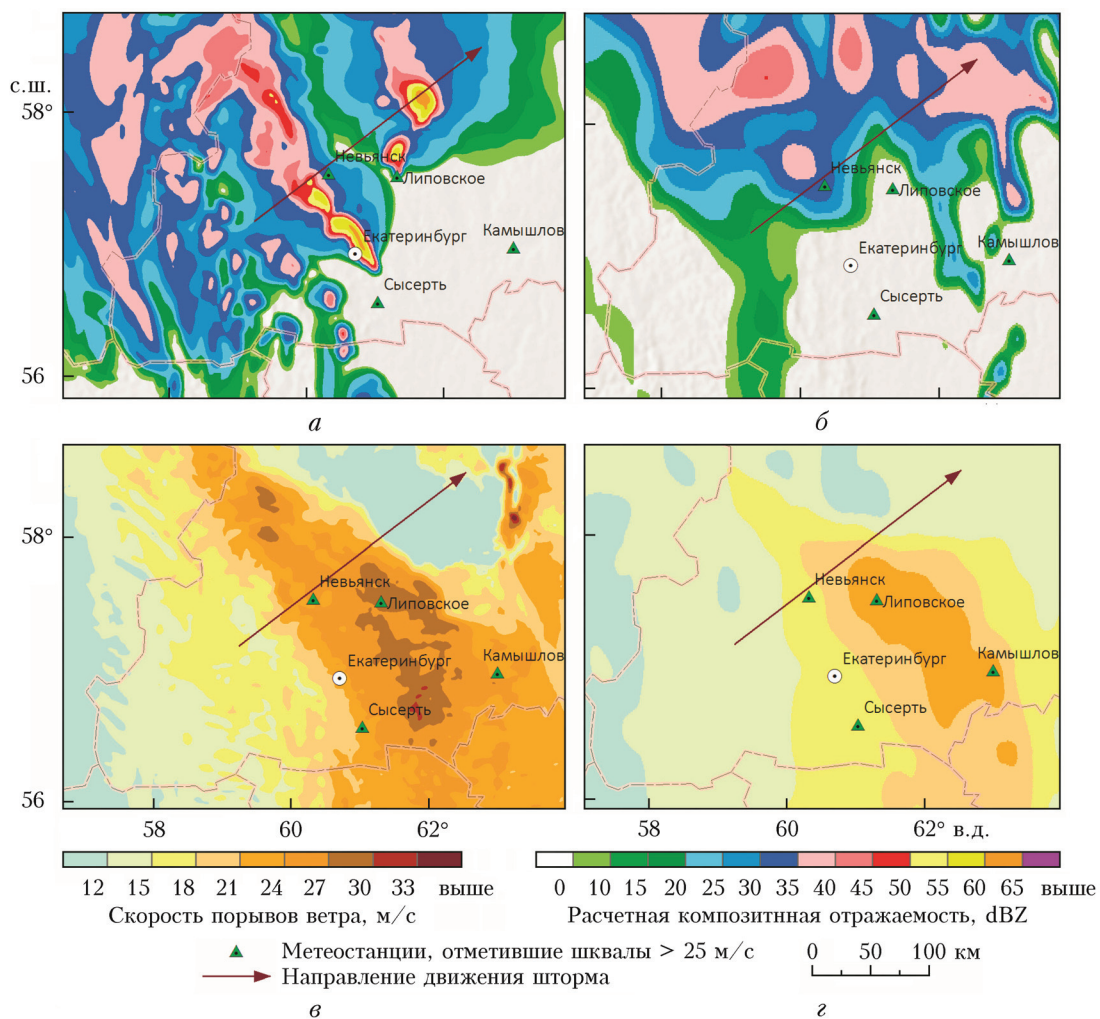


Рис. 2. Прогноз вспышки ОЯ 25 мая 2020 г.: расчетная композитная отражаемость и скорость порывов ветра по модели WRF (а, в) и GFS (б, г) в 13:00 ВСВ

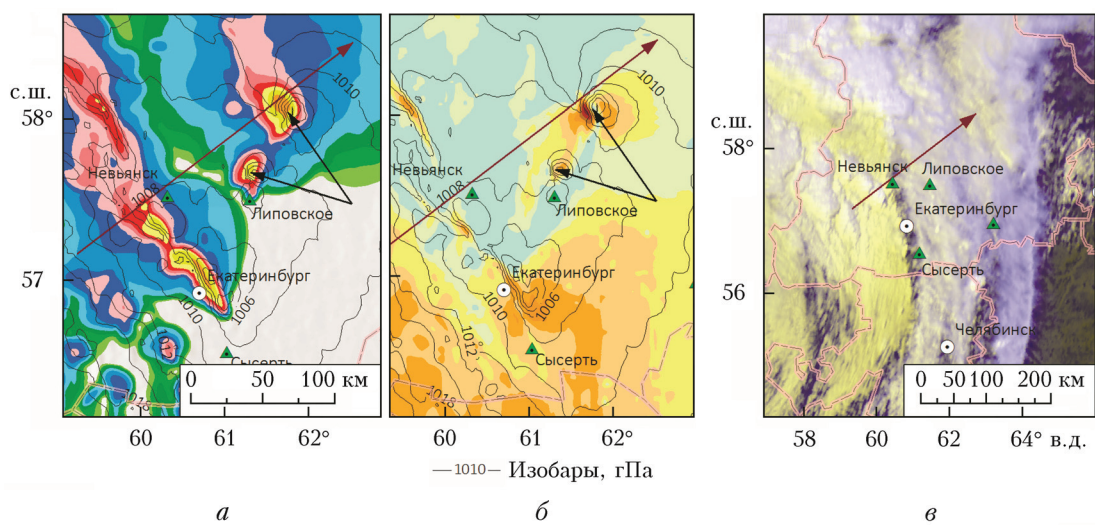


Рис. 3. Прогноз вспышки ОЯ 25 мая 2020 г.: расчетная композитная отражаемость (а); скорость порывов ветра (б) по модели WRF в 11:00 ВСВ; снимок Meteosat-8 в синтезе каналов HRV-HRV-IR в это же время (в). Черными стрелками (а, б) показаны мезоциклоны, которые прогнозировались по модели WRF



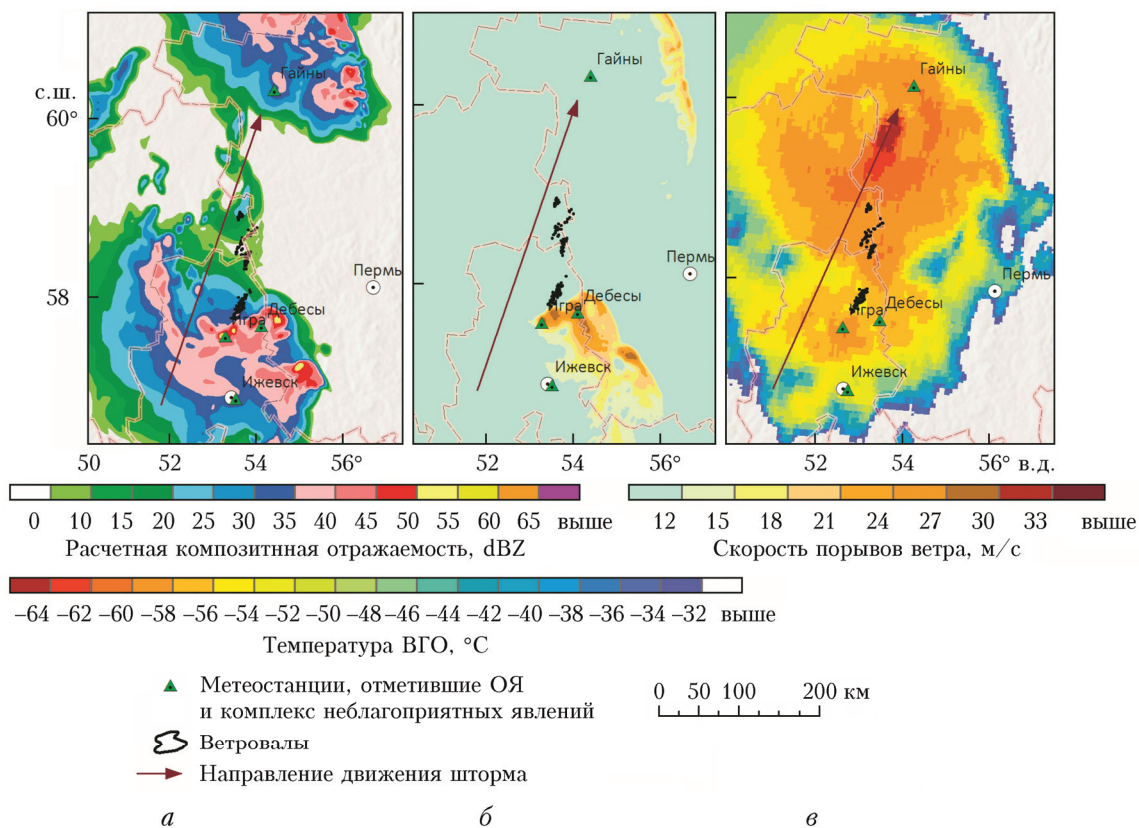


Рис. 4. Прогноз вспышки ОЯ 16 июля 2020 г.: расчетная композитная отражаемость (а), скорость порывов ветра (б) по модели WRF в 22:00 ВСВ и температура ВГО по снимку Meteosat-8 в это же время (в)

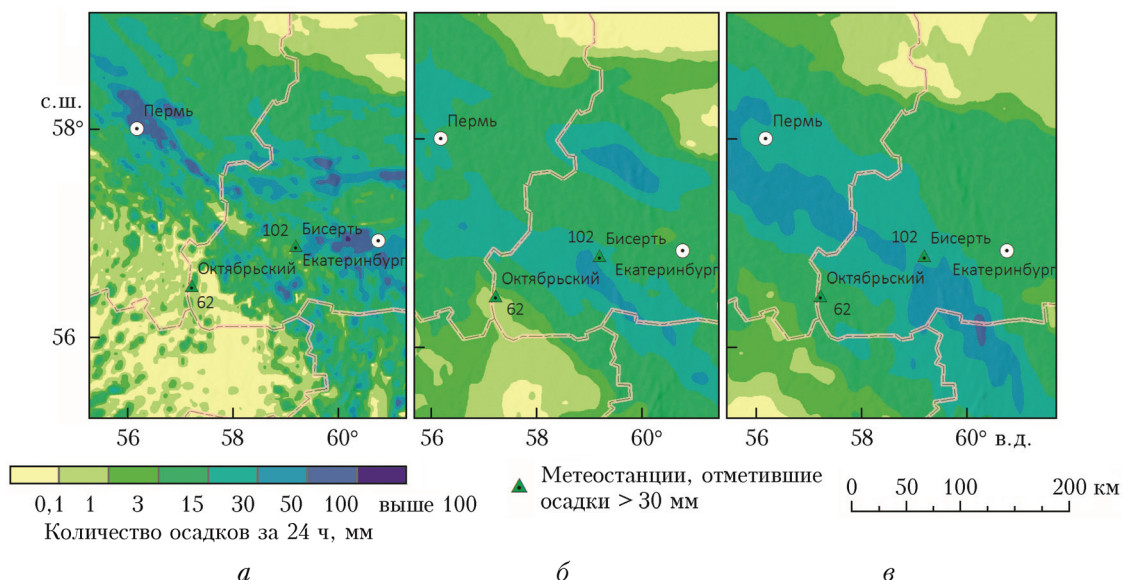


Рис. 5. Прогноз очень сильного дождя 20 июля 2020 г.: количество осадков за период с 3:00 ВСВ 20 июля по 3:00 ВСВ 21 июля по моделям WRF (а), GFS (б) и GEM (в)