

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-25-50>

УДК 551.509

Идентификация порывов ветра при шквале по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования

А.А. Алексеева, В.М. Бухаров

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
alekseeva@mecom.ru*

Рассматриваются экспериментальные методы идентификации шквалов в трех градациях интенсивности по данным сети ДМРЛ-С и уточнения скорости порывов ветра при шквале с применением данных численного моделирования. Особое внимание уделено идентификации шквалов в градации опасных явлений погоды. Проанализирована серия сильных шквалов 29 июля 2023 года в Среднем Поволжье. Приведены результаты верификации шквалов с использованием данных наблюдений метеорологических станций и скорости порывов ветра, фиксируемых автоматическими метеорологическими станциями.

Ключевые слова: радиолокационный мониторинг, шквал, порыв ветра, скорость ветра, опасное явление, данные ДМРЛ-С, верификация

Identification of wind gusts during a squall from the DMRL-C network and numerical modeling data

A.A. Alekseeva, V.M. Bukharov

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
alekseeva@mecom.ru*

Experimental methods are considered for identifying squalls in three intensity gradations according to the DMRL-C network data and refining the speed of gusts during a squall using numerical modeling. Particular attention is paid to the identification of severe squalls. The series of severe squalls on July 29, 2023 in the Middle Volga region was analyzed. The results of the verification of squalls using observational data from weather stations and wind gust speeds recorded by automatic weather stations are presented.

Keywords: radar monitoring, squall, wind gust, wind speed, severe weather event, DMRL-C data, verification

Введение

Шквалы являются опасным конвективным явлением погоды, возникающим практически в любом месте земного шара, способном нанести значительный ущерб и привести к гибели людей. Несмотря на изученность условий возникновения, как правило, шквалы возникают неожиданно.

Это связано не только с неточностью прогнозирования времени и места возникновения таких явлений даже численными моделями высокого пространственного разрешения, но и с проблемой их точной идентификации дистанционными методами наблюдений, не говоря уже о плотности наблюдательной сети, которая во многих странах, включая Россию, не только не соответствует рекомендациям Всемирной метеорологической организации, но и не позволяет в полной мере обеспечивать потребителей метеорологической информацией.

Нельзя сказать, что хорошо фиксируются такие явления даже на обжитой европейской территории. Зарекомендованные на практике методы косвенной идентификации шквалов по данным измерений могут быть полезными при их прогнозировании, начиная от наукастинга и до заблаговременностей краткосрочного прогноза. Методы машинного обучения, последнее время нашедшие широкое применение в прогнозировании погоды, отталкиваются от выбора физически обоснованных предикторов, отражающих возникновение таких опасных явлений, на чем основываются и методы их идентификации, и классические подходы к прогнозированию. Поэтому исследования в данной области являются актуальными и в настоящее время.

В представленном исследовании сосредоточимся на возможности идентификации шквалов на основе информации сети ДМРЛ-С с применением результатов численного моделирования для уточнения скорости ветра при порывах. В России постепенно расширяется сеть ДМРЛ-С. До начала 2024 года функционировали в сети 46 локаторов, с 08.02.2024 сеть пополнилась еще двумя локаторами: ДМРЛ «Великий Новгород» и «Калевала». В рамках данных исследований используются локаторы, расположенные на Европейской территории России.

Согласно [9], в оперативно работающих локаторах реализован алгоритм идентификации грозы со шквалом на основе использования значений отражаемости на уровне H_3 (высота изотермы $-15\text{ }^\circ\text{C}$) и ΔH (превышение верхней границей облачности уровня тропопаузы). Подробнее с алгоритмом можно ознакомиться в [10, 11].

В настоящем исследовании идентификация шквалов осуществляется иными подходами, чем при оперативной работе локаторов.

Первый подход. В точке идентификации по разработанным расчетным уравнениям находятся критерии максимальной отражаемости в случае образования шквала одной из трех градаций интенсивности, соответственно, со скоростью ветра от 15 до 20, от 20 до 25 и ≥ 25 м/с при определенных значениях измеренной высоты радиоэха H_v (км). Далее, сравнивая измеренное локатором максимальное значение отражаемости в зондируемом столбе тропосферы в точке идентификации с рассчитанными критериями, определяется либо градация шквала, либо его отсутствие в точке расчета. Полученные на данном этапе расчетов результаты

идентификации шквалов в трех градациях интенсивности на основе данных ДМРЛ-С являются самостоятельным продуктом идентификации и визуализируются в виде карт. Кроме того, если шквал идентифицирован, то уточняется скорость порывов ветра для трех интервалов значений верхней границы облачности (≤ 10 км, 11–12 км, более 13 км) по расчетным уравнениям, предикторами которых являются максимальная отражаемость в зондируемом слое тропосферы и скорость ветра в слое 700–500 гПа.

Отдельно другим, независимым от первого, подходом идентифицируются шквалы градации ОЯ (≥ 25 м/с). Расчеты производятся при условии, если в точке расчета максимальная конвективная скорость, рассчитанная по данным ДМРЛ-С [3], ≥ 27 м/с и одновременно прогнозируемый лапласиан приземного давления находится в пределах 3.5–7.5 гПа/300 км². Далее рассчитывается дискриминантная функция [1, 2] по вышеуказанным предикторам (максимальная конвективная скорость, лапласиан приземного давления), позволяющая идентифицировать шквал градации ОЯ.

Повышенное внимание уделено шквалам градации ОЯ (два подхода идентификации), так как именно они наносят наибольший социально-экономический ущерб.

Используемые для исследования данные

Представляемые в статье результаты базируются на данных за летние периоды 2022 и 2023 гг. о шквалах, идентифицированных в режиме реального времени с 10-минутной детализацией на сетке 0.05×0.05 градусов предлагаемыми в исследовании подходами и используемыми оперативными локаторами. Принцип занесения первичных радиолокационных данных и данных оперативных локаторов о явлениях (шквалах, цифры кода 16, 17 и 18) в узлы расчетной сетки одинаков. Берется значение «накрывающего» локатора в точке градусной сетки. Если таких локаторов несколько, берется максимальное значение параметров и явлений среди «накрывающих» локаторов.

В виде эталона фактических данных использованы данные метеорологических станций в срок наблюдения (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ), данные автоматических метеорологических станций (АМС) с 10-минутной временной детализацией (за летний период 2022 г.) и краудсорсинга.

Обсуждение результатов исследования

В рамках экспериментальной автоматизированной технологии шквалы идентифицируются в режиме реального времени с записью результатов в базу данных и визуализацией в виде карт в летние периоды уже несколько лет, более подробно остановимся на их идентификации в 2022 и 2023 гг. Чтобы более наглядно представить результаты идентификации, лучше делать это при рассмотрении отдельных случаев с сильными шквалами. В 2023 г. таким запоминающимся случаем является шквал градации ОЯ 29 июля в Среднем Поволжье.

Случай 29 июля 2023 года

Рассмотрим диагностику комплекса опасных и неблагоприятных явлений конвективного характера 29 июля 2023 года. Активный атмосферный фронт, разграничивающий очень теплый воздух, поступающий по периферии антициклона из Средней Азии, и свежий прохладный воздух, который сформировался над арктическими просторами, протянулся узкой полосой от восточных черноземных областей через все западные области Поволжья до северного Предуралья. Поволжский регион находился в теплом секторе циклона. Температура в Поволжье до прохождения атмосферного фронта составляла 33–37 °С, в связи с прохождением холодного атмосферного фронта с волнами понизилась на 9–10 °С. Прохождение фронта сопровождалось комплексом неблагоприятных и опасных конвективных явлений, но больше всего регион пострадал от сильных шквалов, местами с ураганной скоростью ветра 33 м/с и более. Причем фронт проходил во время максимального прогрева, т. е. были все условия для обострения. Также свой вклад внес физико-географический фактор – река Волга. Шквал в градации ОЯ бушевал в Поволжье несколько часов, начался во второй половине дня и продолжался до вечера. Сопровождался грозой, тропическими ливнями, местами отмечался град. В этот день даже метеостанции, что бывает редко при современной сети наблюдений, зафиксировали порывы ветра: в Татарстане – 26–27 м/с (п. Вязовые в период 15.18–15.26 ч ВСВ); Ульяновске – 26 м/с (13.20–13.35 ч ВСВ), по области 25–27 м/с (Сенгилей в 12.58–13.25 ч ВСВ и Димитровград в 13.50–13.55 ч ВСВ); Самарской области – 28–29 м/с (Тольятти-Дамба в 12.10–12.20 ч ВСВ и Новодевичье – в 12.19–13.10 ч ВСВ); Чебоксарах – 26–33 м/с (12.49 ч ВСВ); Н. Новгороде – 24–28 м/с (~10.30 ч ВСВ).

По сообщениям МЧС, пострадали восемь субъектов: Татарстан, Марий Эл, Чувашия, Нижегородская, Пензенская, Ульяновская, Кировская и Самарская области. Упали 550 деревьев, повреждены крыши 41 жилых дома и 7 социальных объектов, 520 населенных пунктов остались без электроснабжения, перевернуты катера на Волге, 76 человек пострадали и 10 (по другим сведениям – 11) погибли. В Марий Эл погибло 8 человек в палаточном лагере на оз. Яльчик и Таир, еще 29 человек пострадали. В Чувашии перевернулся катер на Волге, 1 человек погиб. В Нижегородской области перевернулся парусный катамаран, 1 человек погиб. В Саратовской области перевернулся парусный ял. В Татарстане шторм разнес теплоход, следовавший по маршруту Казань – Свияжск – Казань. Сгорел дом от молнии. Погиб 1 человек (упало дерево на палатку). В Пензенской области повреждены крыши, газопровод, ЛЭП, образовались завалы на дорогах. Усугубилось все еще тем, что 29 июля выпало на субботу, несколько дней была хорошая погода, и люди в выходной день поехали отдыхать на природу. Хотя следует отметить, что синоптики по прогнозу ожидали возникновение комплекса метеорологических явлений: грозы, ливни, град, шквалы со скоростью 25–28 м/с.

На рис. 1 представлен диагностированный комплекс опасных явлений погоды (ливень, шквал) 29.07.2023 в Поволжье по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования.

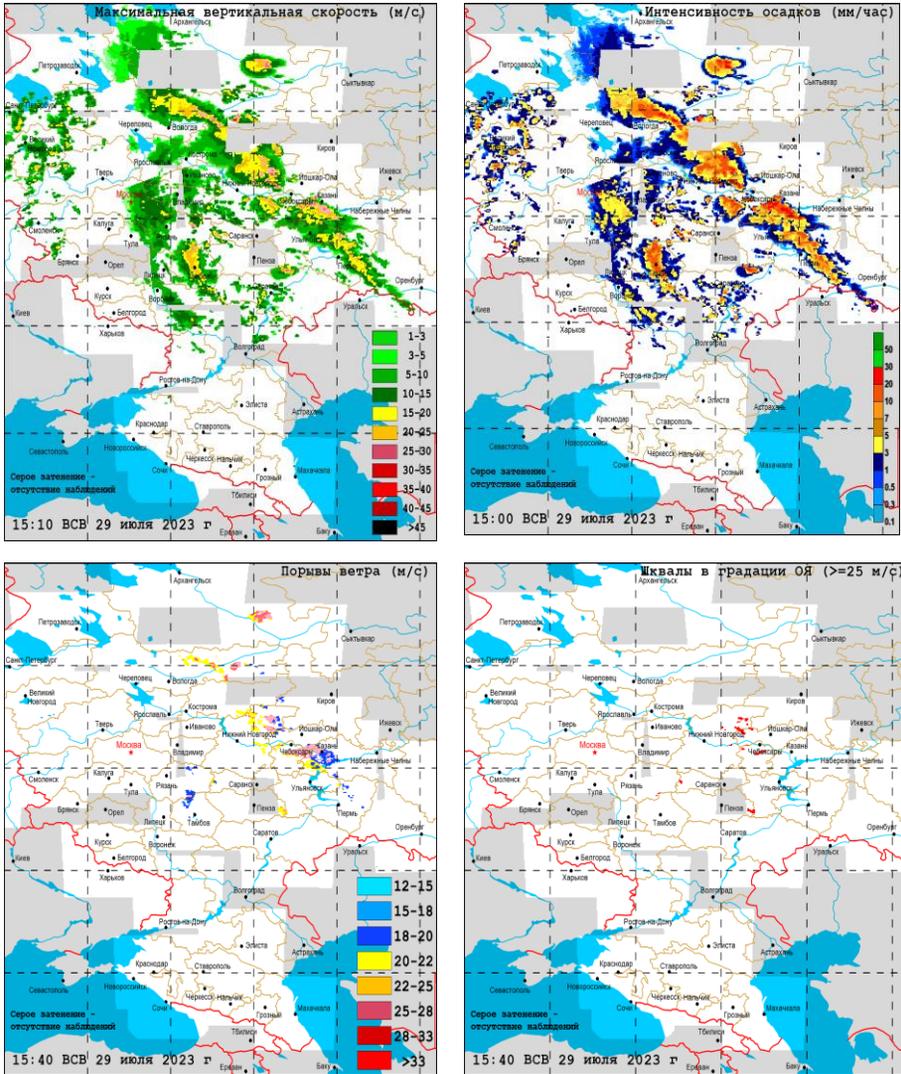


Рис. 1. Диагностированные максимальные конвективные скорости, интенсивность осадков, скорость порывов ветра в шквале и шквалы в градации ОЯ 29.07.2023 в Поволжье по данным сети ДМРЛ-С и численного моделирования.

Fig. 1. The diagnosed maximum convective velocities, precipitation intensity, wind gust velocity in a squall and severe squalls on July 29, 2023 in the Volga region according to the DMRL-C network and numerical modeling.

На рис. 2–6 более подробно, приближенно к моменту осуществления шквала, представлены диагностированные максимальные конвективные скорости, интенсивность осадков, шквалы в трех градациях интенсивности (от 15 до 20, от 20 до 25 и ≥ 25 м/с), скорость порывов ветра при шквале и шквалы в градации ОЯ в Нижегородской области в период 10.20–10.40 ч ВСВ; в Чебоксарах в период 12.40–12.50 ч ВСВ; в Ульяновске и области в период 12.50–14.00 ч ВСВ; в Самарской области (Новодевичье) в 13.00–13.20 ч ВСВ; в Татарстане (п. Вязовые) в период 15.10–15.30 ч ВСВ.

Как видим из рис. 2–6, диагностируемые скорости ветра при шквалах достигали местами 33 м/с, сопровождалась сильными ливнями, интенсивность которых в основном была 20–30 мм/ч, а в Нижегородской области – на небольшой площади 30–50 мм/ч. Максимальные скорости конвективного потока в основном достигали 25–30 м/с с вкраплениями до 30–35 м/с.

Рассмотрим, как сработали оперативные ДМРЛ-С. Нижегородский случай, когда зафиксировали порывы 24–28 м/с, ДМРЛ-С «Н. Новгород» в обоих режимах диагностировал вокруг центра локатора умеренные шквалы, т. е. с порывами от 20 до 25 м/с. Высота верхней границы Сб составляла 14.6–14.8 км.

Случай шквала с порывами 26–33 м/с в Чебоксарах. Ближайший ДМРЛ-С «Йошкар-Ола». Чебоксары находятся на юго-западе обзора локатора на удалении 60–70 км. В 12.40 и 12.50 ч ВСВ локатор в режиме Inv диагностировал сильные шквалы в данном направлении, но на чуть большем удалении. Чебоксары в зоне обзора ДМРЛ-С «Казань» находятся на западе на удалении порядка 160 км от локатора. В 12.40 ч ВСВ умеренные шквалы диагностировались в режиме Inv, но ближе, на удалении порядка 125 км; в 12.50 ч ВСВ на удалении 136 км в этом же направлении в режиме Inr диагностирован слабый шквал. ДМРЛ-С «Н. Новгород» в зоне обзора шквалов не диагностировал, что логично, так как Чебоксары находятся далеко от локатора, на удалении порядка 200 км.

Случай шквалов в Ульяновске и области, порывы ветра 26 м/с. В зоне обзора ДМРЛ-С «Казань» Ульяновск находится на удалении 171 км от локатора, в период 13.20–13.55 ч ВСВ диагностированы слабые шквалы в режиме Inr. На карте ДМРЛ-С «Саратов» (Ульяновск находится на удалении около 170 км) в 13.20 ч ВСВ в режиме Inv диагностированы слабые шквалы, чуть ближе по удалению, чем Ульяновск. Случай порывов ветра 25–27 м/с в Сенгилей в период 12.58–13.25 ч ВСВ идентифицирован на карте ДМРЛ-С «Самара» (удаление от локатора более 120 км) как слабый шквал в 13.00 ч ВСВ (режим Inv), в 13.10 ч ВСВ – как умеренный шквал (режим Inv), в 13.20 ч ВСВ – как умеренный шквал в обоих режимах и в 13.30 ч ВСВ – как умеренный шквал в режиме Inr. В обзоре ДМРЛ-С «Казань» этот случай находится на удалении порядка 200 км от локатора; в сроки 13.00 ч ВСВ (режим Inr), 13.20 и 13.30 ч ВСВ (также режим Inr) зафиксированы слабые шквалы.

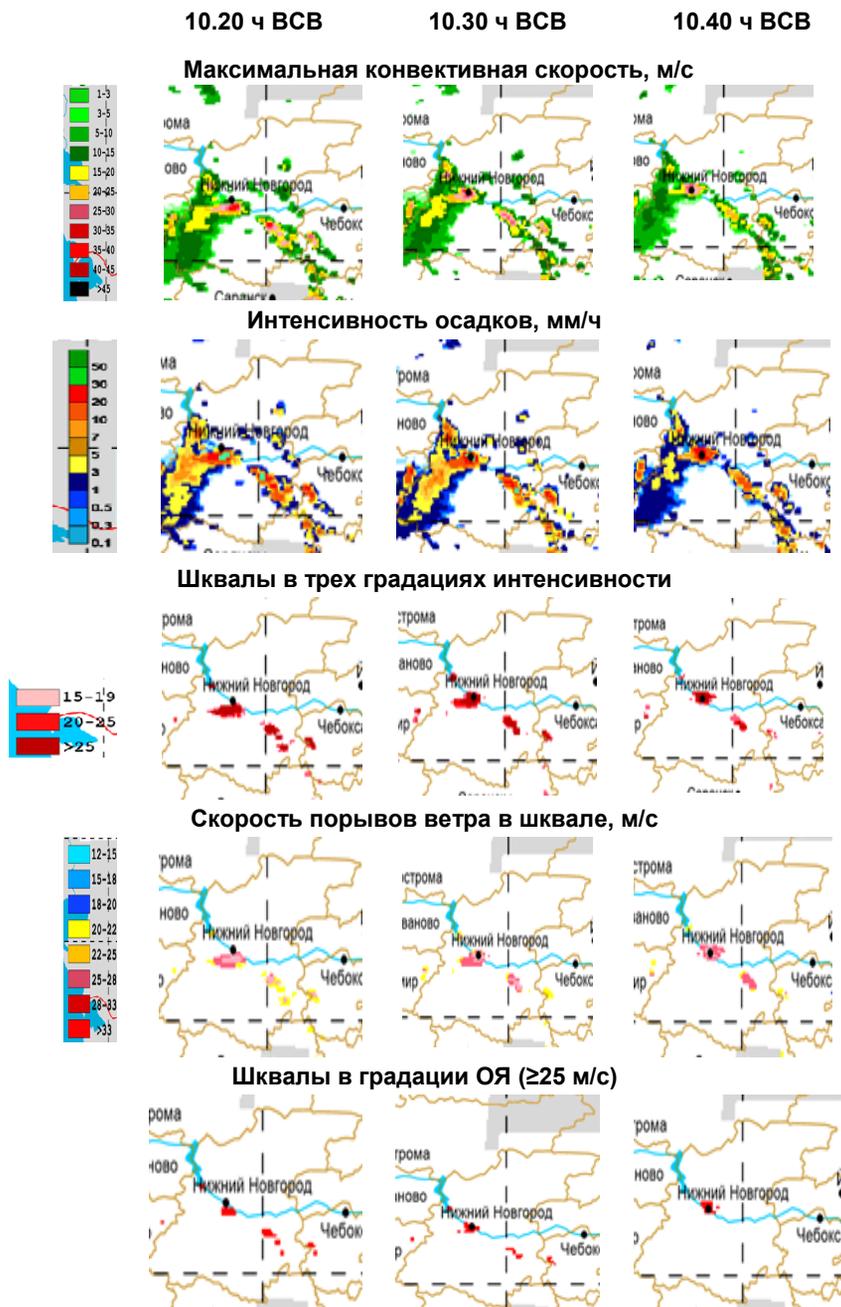


Рис. 2. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами, в Нижегородской области 29 июля 2023 г. в 10.20-10.40 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Н. Новгороде – 24-28 м/с (~10.30 ч ВСВ).

Fig. 2. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls in the Nizhny Novgorod region on July 29, 2023 during 10.20-10.40 UTC. The actual wind gusts in Nizhny Novgorod were 24-28 m/s (~10.30 UTC).

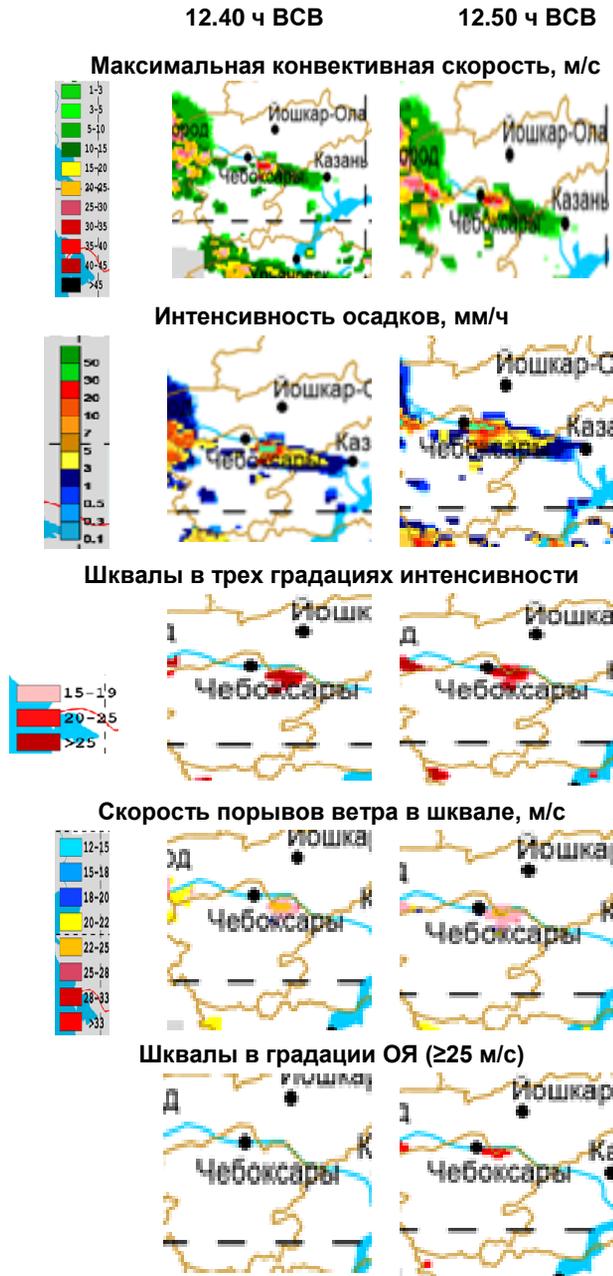


Рис. 3. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами, в Чебоксарах 29 июля 2023 г. в 12.40 и 12.50 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Чебоксарах – 26-33 м/с (12.49 ч ВСВ).

Fig. 3. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls in Cheboksary on July 29, 2023 at 12.40 and 12.50 UTC. The actual wind gusts in Cheboksary were 26-33 m/s (12.49 UTC).

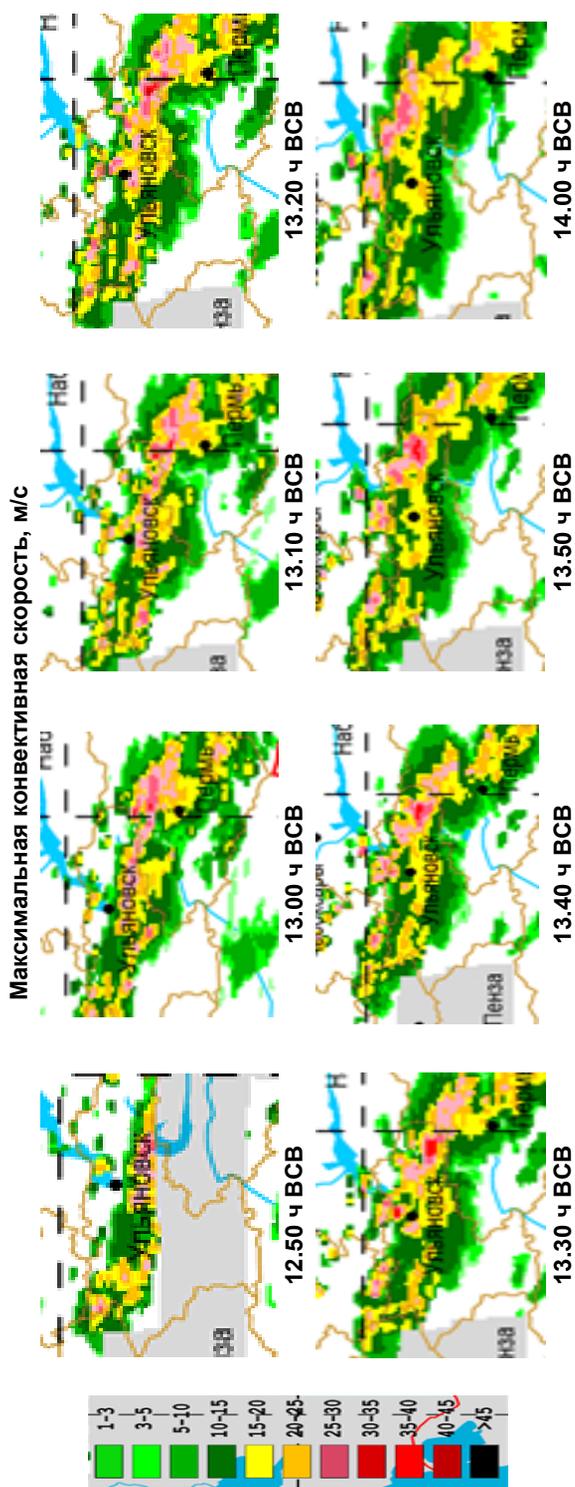


Рис. 4а. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами: максимальная конвективная скорость, м/с, в Ульяновской области 29 июля 2023 г. в 12.50-14.00 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Ульяновске – 26 м/с (13.20-13.35 ч ВСВ), по области 25-27 м/с (Сенгилей в 12.58-13.25 ч ВСВ и Дмитровград в 13.50-13.55 ч ВСВ).

Fig. 4a. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls: maximum convective velocity, m/s, in the Ulyanovsk region on July 29, 2023 during 12.50-14.00 UTC. The actual wind gusts were 26 m/s in Ulyanovsk (13.20–13.35 UTC), 25–27 m/s in the region (Sengiley at 12.58–13.25 UTC and Dimitrovgrad at 13.50–13.55 UTC).

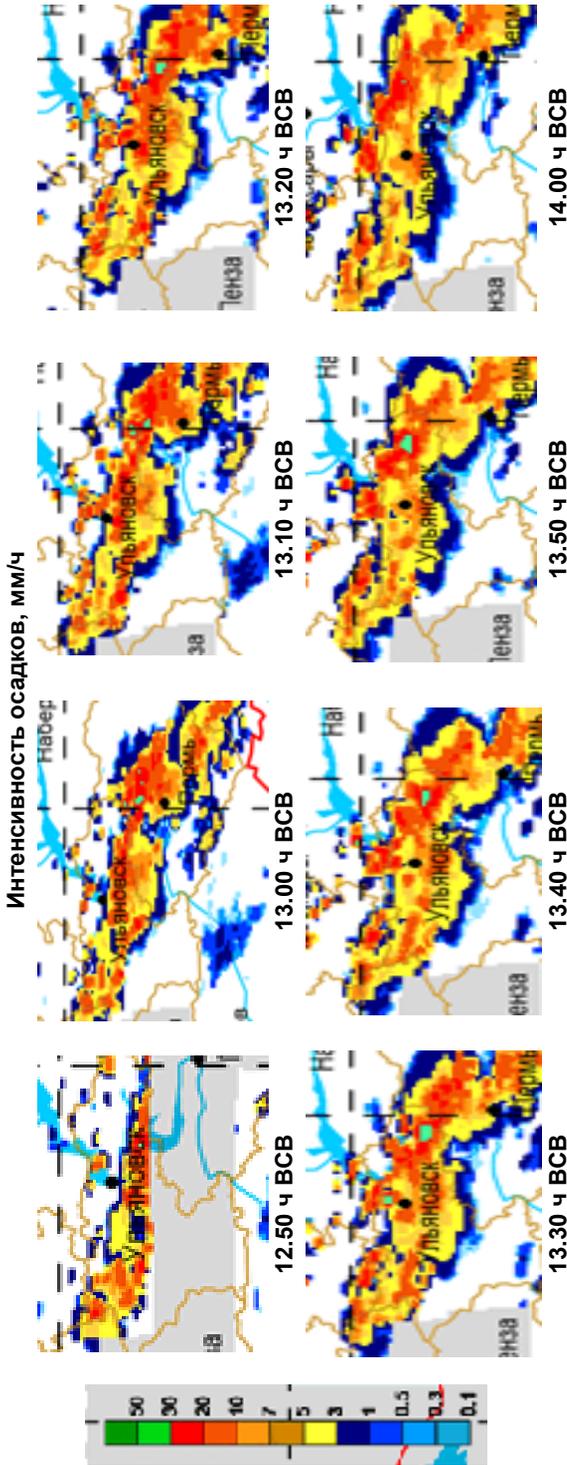


Рис. 46. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами: интенсивность осадков, мм/ч, в Ульяновской области 29 июля 2023 г. в 12.50-14.00 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Ульяновске – 26 м/с (13.20-13.35 ч ВСВ), по области 25-27 м/с (Сенгилей в 12.58-13.25 ч ВСВ и Димитровград в 13.50-13.55 ч ВСВ).

Fig. 46. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls: precipitation intensity, mm/hour, in the Ulyanovsk region on July 29, 2023 during 12.50-14.00 UTC. The actual wind gusts were 26 m/s in Ulyanovsk (13.20–13.35 UTC), 25-27 m/s in the region (Sengiley at 12.58-13.25 UTC and Dimitrovgrad at 13.50-13.55 UTC).

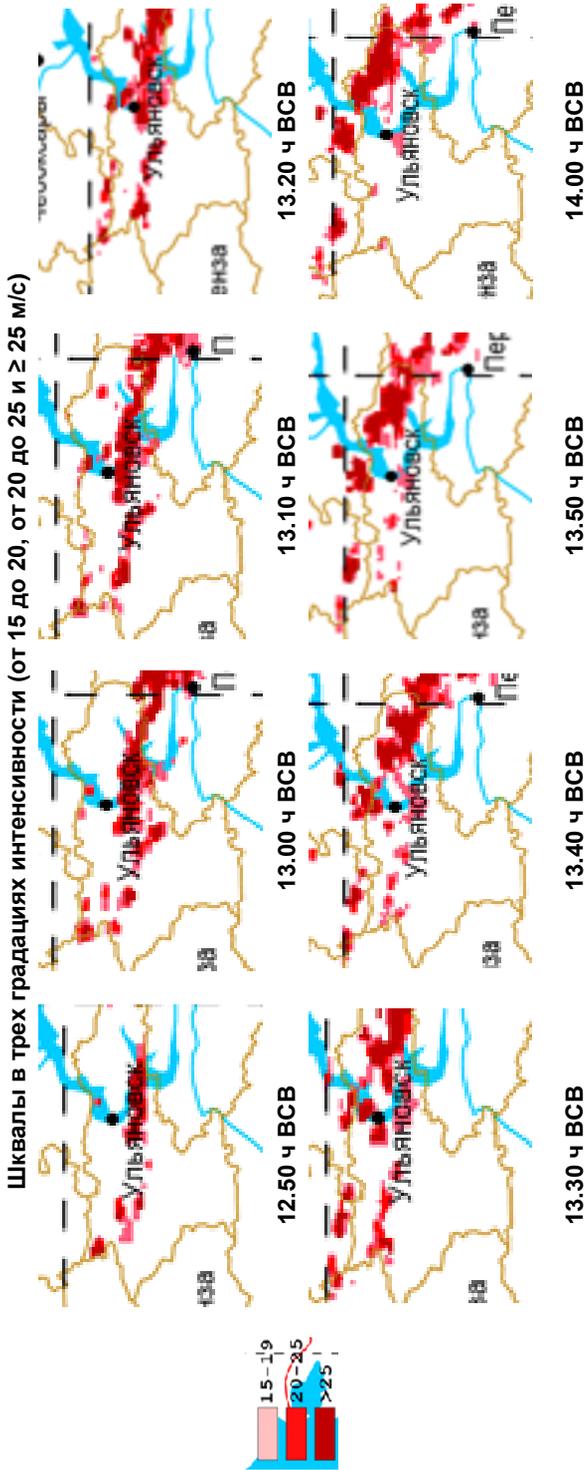


Рис. 4в. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами: шквалы в трех градациях интенсивности (от 15 до 20, от 20 до 25 и ≥ 25 м/с), в Ульяновской области 29 июля 2023 г. в 12.50-14.00 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Ульяновске – 26 м/с (13.20-13.35 ч ВСВ), по области 25-27 м/с (Сенгилей в 12.58-13.25 ч ВСВ и Димитровград в 13.50-13.55 ч ВСВ).

Fig. 4b. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls: squalls in three degrees of intensity (15-20, 20-25, and ≥ 25 m/s) in the Ulyanovsk region on July 29, 2023 during 12.50-14.00 UTC. The actual wind gusts were 26 m/s in Ulyanovsk (13.20-13.35 UTC), 25-27 m/s in the region (Sengiley at 12.58-13.25 UTC and Dimitrovgrad at 13.50-13.55 UTC).

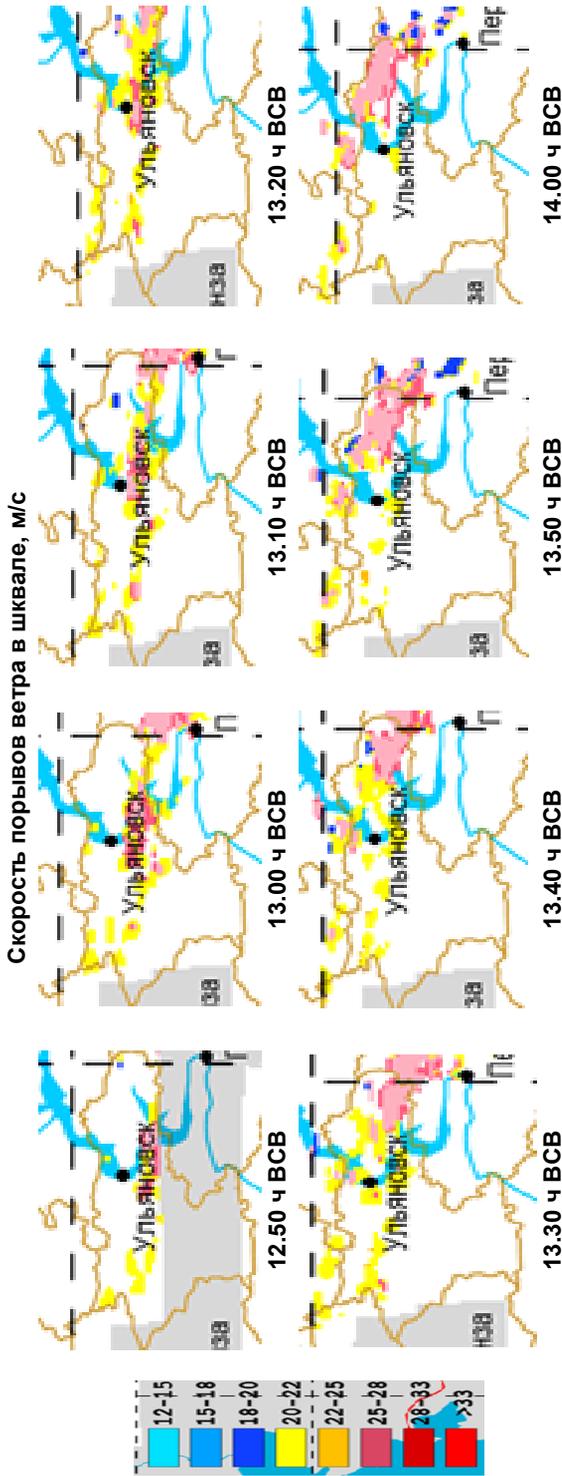


Рис. 4г. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами: скорость порывов ветра в шквале, м/с, в Ульяновской области 29 июля 2023 г. в 12.50-14.00 ч ВСВ. фактические порывы ветра в Ульяновске – 26 м/с (13.20-13.35 ч ВСВ), по области 25-27 м/с (Сенгилей в 12.58-13.25 ч ВСВ и Димитровград в 13.50-13.55 ч ВСВ).

Fig. 4г. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls: the speed of wind gusts in a squall, m/s, in the Ulyanovsk region on July 29, 2023 during 12.50-14.00 UTC. The actual wind gusts were 26 m/s in Ulyanovsk (13.20–13.35 UTC), 25-27 m/s in the region (Sengiley at 12.58-13.25 UTC and Dimitrovgrad at 13.50-13.55 UTC).

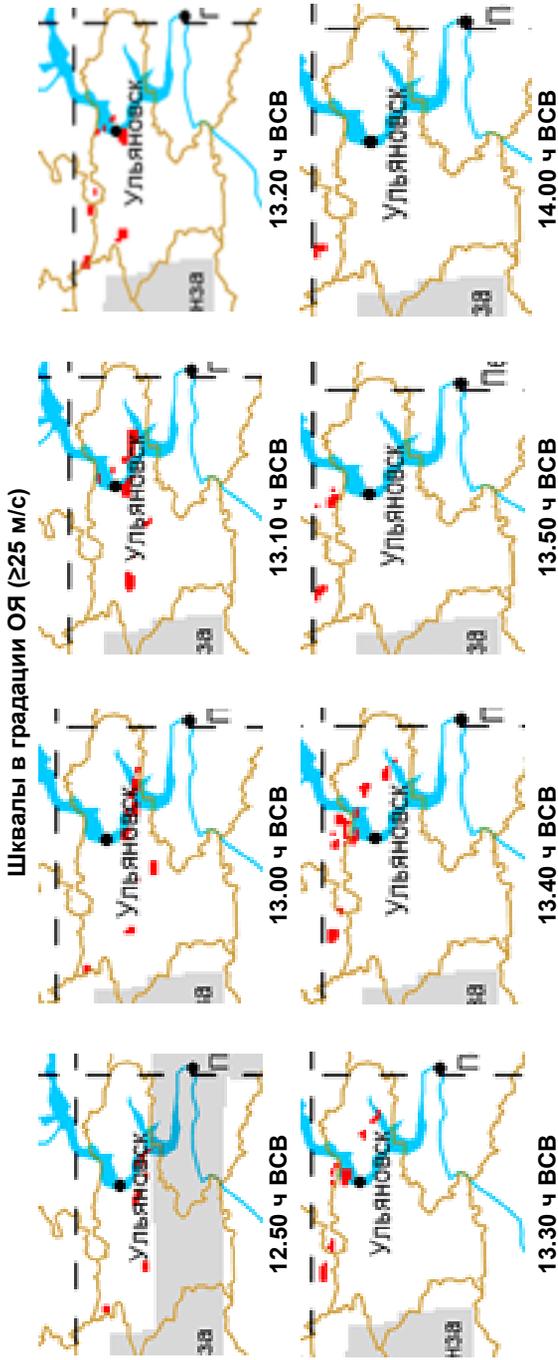


Рис. 4д. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами: шквалы в градации ОЯ (≥ 25 м/с), в Ульяновской области 29 июля 2023 г. в 12.50-14.00 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Ульяновске – 26 м/с (13.20-13.35 ч ВСВ), по области 25-27 м/с (Сенгилей в 12.58-13.25 ч ВСВ и Дмитровград в 13.50-13.55 ч ВСВ).

Fig. 4d. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls: severe squalls (≥ 25 m/s) in the Ulyanovsk region on July 29, 2023 during 12.50-14.00 UTC. The actual wind gusts were 26 m/s in Ulyanovsk (13.20-13.35 UTC), 25-27 m/s in the region (Sengiley at 12.58-13.25 UTC and Dimitrovgrad at 13.50-13.55 UTC).

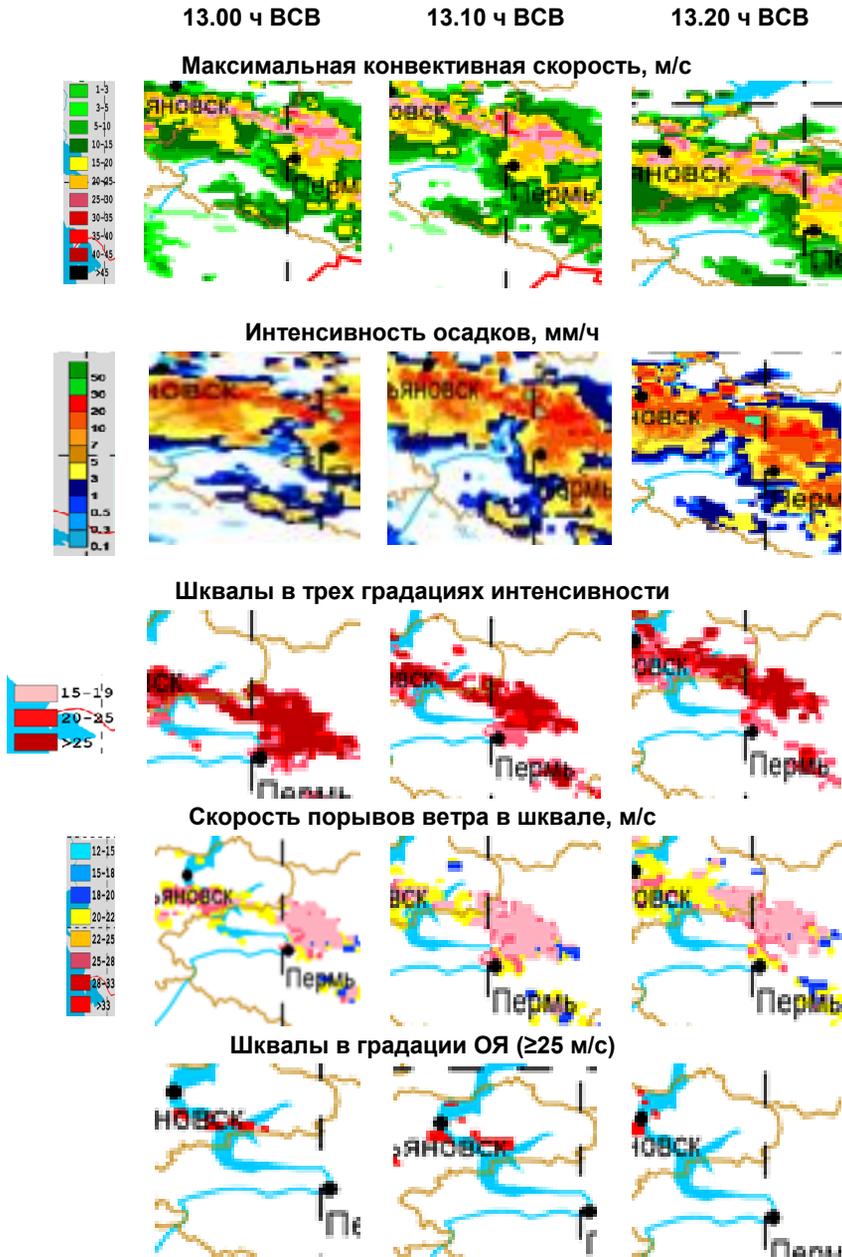


Рис. 5. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами в Самарской области 29 июля 2023 г. в 13.00-13.20 ч ВСВ. Фактические порывы ветра в Новодевичье – 28-29 м/с в 12.19-13.10 ч ВСВ.

Fig. 5. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls in the Samara region on July 29, 2023 during 13.00-13.20 UTC. The actual wind gusts in Novodevich'e were 28-29 m/s at 12.19-13.10 UTC.

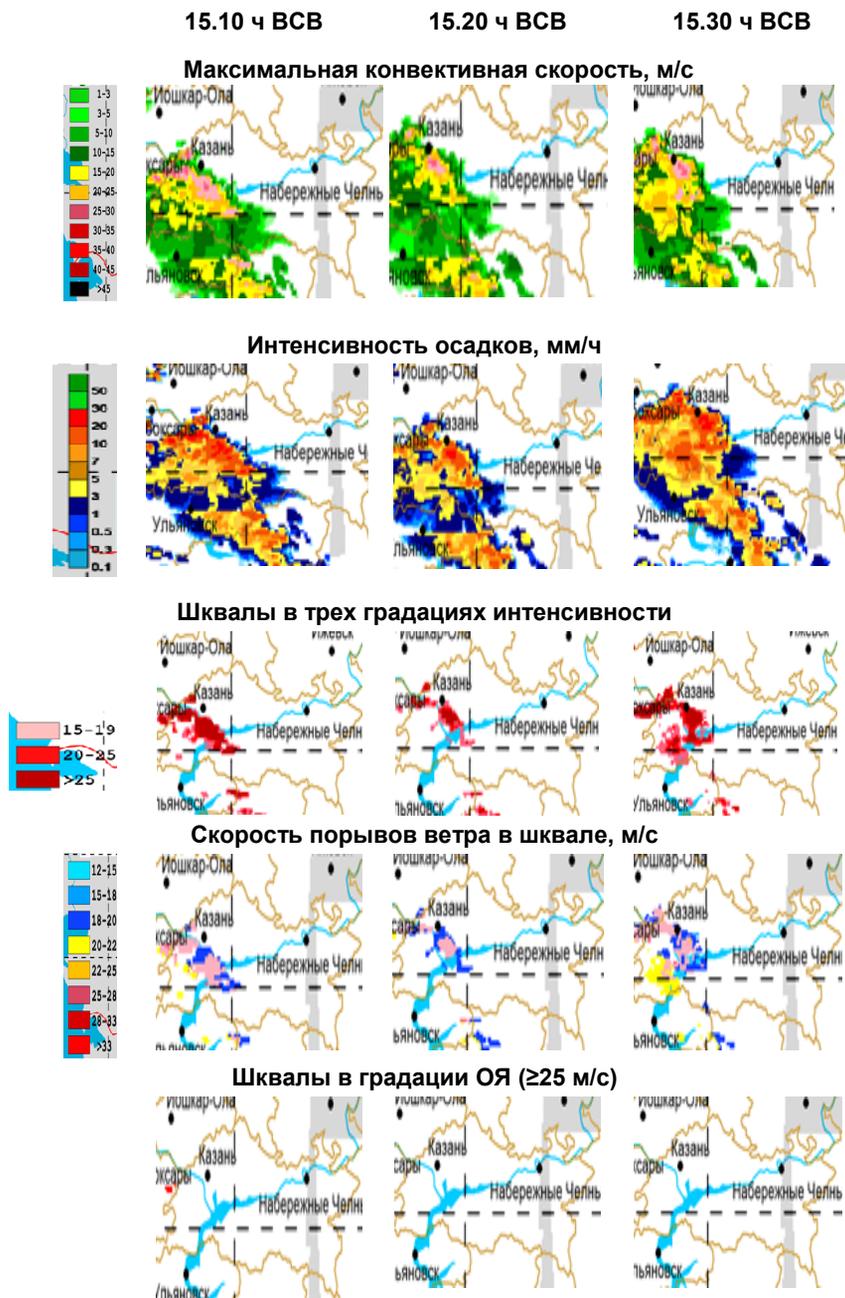


Рис. 6. Диагностированные зоны активной конвекции, сопровождающиеся шквалами в Татарстане в 15.10-15.30 ч ВСВ 29 июля 2023 г. Фактические порывы ветра в п. Вязовые – 26-27 м/с в 15.18-15.26 ч ВСВ.

Fig. 6. The diagnosed zones of active convection accompanied by squalls in Tatarstan during 15.10-15.30 UTC on July 29, 2023. The actual wind gusts in Vязовые were 26-27 m/s at 15.18-15.26 UTC.

Случай порывов ветра 25–27 м/с в Димитровграде на карте ДМРЛ-С «Самара» (расстояние до локатора порядка 120 км) идентифицирован в 13.50 ч ВСВ как умеренный шквал (режим Inr). Случай порывов ветра в Новодевичье 28–29 м/с на карте ДМРЛ-С «Самара» (расстояние до локатора порядка 90–100 км) в режиме Inr идентифицирован как слабый шквал и в 13.10 ч ВСВ (режим Inv) – умеренный шквал. Случай порывов ветра 26–27 м/с в Вязовые входит в регион обзора ДМРЛ-С «Йошкар-Ола» (в южном направлении на удалении порядка 100 км от локатора). В 15.10 ч ВСВ в режиме Inr на удалении 84–101 км в юго-восточном секторе и в южном направлении на удалении 116–156 км диагностирован сильный шквал (при верхней границе Сб 14.7 км). В это же время в режиме Inv сильный шквал идентифицирован в том же направлении на удалении 81–98 и 99–126 км (при верхней границе Сб 18.3 и 15.9 км). В срок 15.20 ч ВСВ в режиме Inr сильный шквал идентифицирован в азимутах 152–168 и 142–203, соответственно, на удалении 77–94 и 96–180 км (при верхней границе Сб 17.0 и 14.3 км) и в режиме Inv приблизительно в тех же районах (удаление 74–125 км при верхней границе Сб 16.9 км). В 15.30 ч ВСВ диагностирован сильный шквал в азимуте 136–210 на расстоянии 70–164 км от локатора (при верхней границе Сб 18.2 км) и 67–126 км (при верхней границе Сб 18.0 км), соответственно, в режимах Inr и Inv.

Как видно, оперативные локаторы также диагностировали в регионе шквалы, но в большинстве случаев меньшей силы и не во всех случаях точно идентифицировано место возникновения. Поэтому карты диагностирования шквалов экспериментальными подходами могут быть дополнительной информацией для более точного штормового предупреждения о их возникновении и штормового оповещения. Кроме того, могут быть использованы при оценке прогнозов шквалов, являясь также подтверждением данных краудсорсинга, в случаях сомнения компетенции обывателей в их фиксировании.

Верификация диагностированных шквалов

Современные возможности выбора набора фактических данных в качестве эталона для проверки

Известно, что проверка суровых погодных явлений затруднена из-за плохого представления этих явлений большинством современных систем наблюдений. Наблюдения сильных конвективных порывов редки (из-за малого числа событий и особенно из-за относительно небольшого числа станций наблюдений). При анализе данных об ОЯ из разных источников получаются разнонаправленные тренды за один и тот же период времени [14]. Базы данных, например, Европейская база данных о суровых явлениях погоды (ESWD), представляют очень полезные данные, но надо учитывать, что отсутствие информации в базе данных или отсутствие наблюдений за явлением на станции не означает, что не было суровых погодных явлений.

Таким образом, для работы с такими данными необходимо разработать стратегию наилучшей работы с ними, используя их полезность, но помня об ограничениях в количественном отношении. Упомянутая БД разработана Европейской лабораторией по исследованию сильных конвективных штормов (ESSL). В ней представлены сведения об ОЯ, полученные наблюдательной сетью, очевидцами и средствами массовой информации. БД опубликована в свободном доступе в Интернете [5]. Она доступна и в России, в ней частично собраны данные по России о суровых погодных явлениях. Обновление информации по России ведется нерегулярно. Кроме того, критерии для занесения в БД не соответствуют критериям ОЯ, установленным в России.

В России есть региональный аналог Европейской БД для Пермского края. Web-картографическая версия БД была разработана, наполнена и опубликована в 2014 году. Созданная БД является улучшенным региональным аналогом ESWD. Пользователю предоставляется ряд дополнительных материалов по каждому случаю ОЯ и некоторые функциональные возможности web-приложения, отсутствующие в Европейской БД. Для всей России, к сожалению, такой БД нет. Источниками информации для данной БД являются: данные сети метеостанций и постов; данные об ОЯ, не зафиксированных наблюдательной сетью, но нанесших материальный ущерб; данные очевидцев и СМИ; данные метеорологических локаторов; данные космического мониторинга (данные дистанционного зондирования Земли). Также использованы данные, опубликованные в Метеорологических ежемесячниках [7], на открытых интернет-ресурсах. Постанционный массив данных об ОЯ не является полным и репрезентативным по причине пропусков явлений. Прежде всего это касается локальных конвективных явлений (крупный град, шквал, смерч, сильный ливень). Но часто именно эти незафиксированные сетью метеонаблюдений явления наносят наиболее значительный ущерб. Данные об ОЯ, не зафиксированных наблюдательной сетью, но нанесших социально-экономический ущерб, получены для БД из двух источников: БД ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», а также ежемесячных обзоров, опубликованных в журнале «Метеорология и гидрология». С 2012 г. вышеупомянутая база данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» не обновляется и не поддерживается. Ежемесячные обзоры составляются специалистами Гидрометцентра России. Как отмечают создатели БД для Пермского края, ни один из перечисленных источников данных не отражает полностью фактическую повторяемость ОЯ.

Данные непосредственных наблюдений очевидцев ОЯ являются наименее надежным источником информации об ОЯ. Однако роль данного источника в последнее время выросла благодаря видеофиксации фактов наблюдения ОЯ и/или нанесенного ущерба. Часть ОЯ выявлены на основе данных о ветровалах в лесных массивах [13], в том числе по космическим снимкам среднего и высокого разрешения со спутников серий LANDSAT и SPOT (ветровалы от шквалов и смерчей). БД создана с использованием

технологии ArcSDE, предоставляющей возможности многопользовательского редактирования информации. Более подробную информацию о БД можно получить в [13]. Созданная БД для Пермского края может быть примером создания аналогичной БД для всей России. Поэтому проблема систематизации данных об ОЯ актуальна в настоящее время и для России, и для зарубежных стран. Вот в такой ситуации о фактически зафиксированных шквалах приходится проводить их верификацию как в диагностике, так и при прогнозировании.

Данные о зафиксированных ОЯ также передаются по различным кодам, например, KN-01 SYNOP, WAREP, METAR, а также в виде донесений. В донесениях нередко приблизительно сообщаются районы с ОЯ, иногда они охватывают несколько областей и пунктов, часто не указывается интенсивность явления и дано приблизительное время его осуществления (утро, день, вечер, вторая половина дня, ночь).

Другой тип наблюдений, как уже указывалось при рассмотрении БД для Пермского края, который появился и в России, и может стать более актуальным в будущем, это данные краудсорсинга. Например, данные, собранные широкой общественностью с использованием технологии сотовой связи, особенно для проверки традиционных и основанных на воздействии предупреждений об возникновении ОЯ. Данные о воздействии, например, упавшие деревья, поврежденные дома и т. д. могут помочь в процессе проверки, верификации. С активным внедрением машинного обучения эти данные могут быть собраны и обработаны.

Выбор набора данных в качестве эталона для проверки – важный аспект в процессе верификации. Знание характерных ошибок используемого набора данных и плотность метеорологических станций (пунктов наблюдения) имеют решающее значение при интерпретации качества продуктов наблюдения и прогнозов.

Верификация скорости порывов ветра при шквале при использовании в качестве эталона данных метеорологических станций в срок наблюдения

Фактические данные о скорости ветра при порывах выбирались из баз данных SYNOPMAK и SYNOPDOP для станций, где фиксировались скорости ветра 15 м/с и более в срок или между сроками наблюдений за летний период 2022 г. (153 дня). Такие скорости ветра фиксировались на 794 станциях области диагностирования шквалов (географические координаты от 40° с. ш. до 65° с. ш., от 30° в. д. до 56° в. д.). Выбрано 921355 сводок. В срок наблюдения такой ветер фиксировался в 2326 случаях, между сроками – в 9412 случаях. После фильтрации на предмет принадлежности выбранных станций к данной области России выборка составила 638 станций, из которых 315 станций не фиксировали порывов ветра 15 м/с и более в срок наблюдения. Ветер фиксировался в сроки 00, 06, 12 и 18 ч ВСВ. В эти случаи входили как случаи со шквалами, так и ветры за счет больших

градиентов приземного давления. Поэтому разграничение скоростей ветра производилось с использованием рассчитанных на основе радиолокационной информации максимальных значений конвективной скорости, критерий отнесения к шквалам принят равным ≥ 15 м/с. Для этих сроков выбирались и диагностированные скорости ветра при шквале. Итого проанализировано первоначально 2552 сроков (638 станций \times 4 срока). После фильтрации на предмет принадлежности к шквалам в 2159 сроков шквалов не оказалось (конвективные скорости были менее 15 м/с). В 393 срока выявлены скорости порывов 15 м/с и более либо по факту, либо были диагностированы представляемым в статье методом в контрольном круге в трех радиусах (ближайшая точка к станции, на удалении 10 км и 28 км). Из 393 случаев это шквалы: 42 случая в 00 ч ВСВ, 39 случаев – в 06 ч ВСВ, 221 случай – в 12 ч ВСВ и 91 случай в 18 ч ВСВ.

Ниже представлена таблица верификации порывов ветра ≥ 15 м/с при шквалах, диагностированных на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования (методический диагноз), а также оперативной сетью ДМРЛ-С Росгидромета (оперативный диагноз) за летний период 2022 г. по данным метеостанций в срок наблюдения (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ) (табл. 1).

Таблица 1. Таблица верификации порывов ветра ≥ 15 м/с при шквалах, диагностированных на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования (методический диагноз), а также оперативной сетью ДМРЛ-С Росгидромета (оперативный диагноз), за летний период 2022 г. по данным метеостанций в срок наблюдения (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ)

Table 1. The verification table of wind gusts ≥ 15 m/s for the squalls diagnosed from the DMRL-C network and numerical prediction data (methodical diagnosis), as well as from the Roshydromet operational DMRL-C network data (operational diagnosis) for the summer of 2022 according to weather stations at the observation moment (00, 06, 12 and 18 UTC)

Диагноз	Факт					
	≥ 15 м/с		< 15 м/с		Всего	
	Метод. диагноз	Оператив. диагноз	Метод. диагноз	Оператив. диагноз	Метод. диагноз	Оператив. диагноз
≥ 15	9	1	381	3	390	4
< 15	3 (2)	11 (10)				
Всего	12 (11)	12 (11)				

Примечание. *Красным цветом показано количество случаев с учетом дополнительно проведенного анализа.

Представляет интерес анализ трех случаев, пропущенных экспериментальным подходом (методический диагноз): 12.05.2022, срок 18 ч ВСВ (51.7° с. ш., 35.7° в. д.); 20.05.2022, срок 12 ч ВСВ (44.6° с. ш., 42.0° в. д.); 04.09.2022, срок 06 ч ВСВ (43.7° с. ш., 42.7° в. д.).

Анализ показал, что один случай относится к Грузии, поэтому с учетом дополнительно проведенного анализа исключим его (в табл. 1 красным цветом). Случай 12 мая в Курской области не диагностирован в данной точке, но в координатах 52.1° с. ш., 35.5° в. д. диагностирована зона шквалов со скоростями 24–25 м/с. Случай 20 мая в Ставропольском крае не диагностирован.

9 совпавших случаев – это 5 случаев совпадения в ближайшей точке, 3 случая добавилось при рассмотрении в радиусе до 10 км и 1 случай – при рассмотрении в радиусе до 28 км. В 2 случаях (ближняя точка) из 9 диагностированные скорости ветра при шквале завышены на градацию, т. е. фактически зафиксированы порывы 15 м/с (градация от 15 до 25 м/с), а диагностированные – 27 м/с. В остальных 7 случаях градация (от 15 до 25 м/с) диагностированных порывов ветра при шквале совпадает с фактическими.

Оправдываемость [8]/предупрежденность [12] методического диагноза без учета анализа случаев пропуска – 75 %, с учетом анализа случаев пропуска – 81,8 %; достоверность [8]/оправдываемость [12] – 2,3 %. Индекс экстремальной зависимости [6] EDI = 0.71 без учета анализа случаев пропуска и 0.79 – с учетом, симметричный индекс экстремальной зависимости [6] SEDI = 0.73 без учета анализа случаев пропуска и 0.79 – с учетом.

По идентичному, представленному выше подходу к верификации были оценены шквалы, идентифицированные в 2022 г. работающими в сети Росгидромета ДМРЛ-С. Следует заметить, что данные идентификации шквалов оперативными локаторами записываются в базу данных Гидрометцентра России (DW22) в режиме реального времени в той же, что и методический диагноз, сетке (0.05×0.05 градусов). Результаты верификации также представлены в табл. 1.

Представляет интерес факт, что те же 3 случая шквалов, пропущенные методическим диагнозом, входят в пропущенные 11 случаев при оперативной работе локаторов. Можно предположить, что пропуск этих случаев не результат неточности алгоритмов идентификации, а неточность первичных данных, возможно, использование данных из дальних зон локаторов, перекрывающих точку идентификации, так как ближайшая зона может быть закрыта местниками. Как уже указывалось выше, один пропущенный случай относится к территории Грузии.

По сравнению с методическим диагнозом, при оперативной работе локаторов практически нет ложных тревог в таблице сопряженности. Следует также заметить, что один правильно диагностированный случай был идентифицирован в радиусе 10 км вокруг узла сетки, в ближайшей к узлу сетки точке (радиус ~ 4 км) – не идентифицирован. Скорость ветра, фактически зафиксированная, – 19 м/с, диагностированная – в градации от 20 до 25 м/с. Из трех случаев, диагностированных как ложные тревоги, в двух – скорости от 15 до 20 м/с в радиусе до 10 км и переходят в градацию от 20 до 25 м/с при увеличении радиуса до 28 км; в третьем случае идентифицированы скорости от 20 до 25 м/с как в ближайшей точке, так и до радиуса 28 км.

Два случая из трех диагностированы на краю области идентификации, поэтому сложно сказать, что радиолокационные параметры объективно отражают ситуацию, в третьем случае рассчитанная максимальная конвективная скорость составляет 32,7 м/с. Можно предположить, что в этих случаях по факту были другие конвективные явления, т. е. используемый предиктор – превышение верхней границей кучево-дождевого облака высоты тропопаузы – может быть репрезентативным и для идентификации других конвективных явлений и не является определяющим при идентификации шквалов при достаточной энергии неустойчивости.

Оправдываемость [8]/предупрежденность [12] верификации шквалов оперативным диагнозом без учета анализа случаев пропуска – 8,3 %, с учетом анализа случаев пропуска – 9,1 %; достоверность [8]/оправдываемость [12] – 25 %.

Верификация скорости порывов ветра при шквале при использовании в качестве эталона данных автоматических метеорологических станций

Верифицируется скорость ветра при шквале, рассчитываемая с целью уточнения скорости порывов ветра в случаях диагностирования шквалов ≥ 15 м/с методом с детализацией интенсивности в трех градациях, т. е. косвенно верифицируется и этот способ, поскольку разделение шквалов по интенсивности статистически не обеспечено достаточным количеством шквалов в каждой градации. Поэтому оценивается градация скорости ветра ≥ 15 м/с. При этом скорости ветра по данным 250 АМС (заметим, что данные о скорости ветра по данным АМС более полные против 163 станций с данными по осадкам) проверяются на принадлежность к конвекции. Считается, как и выше, что скорость ветра ≥ 15 м/с, зафиксированная АМС, относится к шквалам, если скорость конвективного потока в точке с данной скоростью ≥ 15 м/с. Анализируются скорости ветра с детализацией 10 минут, т. е. все 144 срока в сутках.

Подход к верификации скорости порывов ветра при шквалах такой: рассчитывается таблица сопряженности, показатели качества диагностирования, контрольный радиус задается 4, 10 и 28 км. Достоверность [8]/оправдываемость [12] оценивается только для первого контрольного радиуса, как требует Методика [8] (оценка ведется в радиусе 5 км, так как явление может фиксироваться наблюдателем только на станции). Результаты верификации (методический диагноз) представлены в табл. 2. В ней же представлены результаты верификации шквалов ≥ 15 м/с, идентифицированных оперативной сетью ДМРЛ-С (оперативный диагноз) на этой же территории за тот же период времени в сравнении с теми же АМС.

Оправдываемость [8]/предупрежденность [12] методического диагноза, соответственно, по радиусам: 72,2 %, 74,2 %, 83,9 %. Достоверность [8]/оправдываемость [12] для первого радиуса – 2,3 %. Оправдываемость

[8]/предупрежденность [12] оперативного диагноза, соответственно, по радиусам: 2,9 %; 5,4 %; 11,4 %. Достоверность [8]/оправдываемость [12] для первого радиуса – 10,9 %.

Таблица 2. Таблица верификации порывов ветра ≥ 15 м/с при шквалах, диагностированных на основе данных сети ДМРЛ-С и численного моделирования (методический диагноз), а также оперативной сетью ДМРЛ-С Росгидромета (оперативный диагноз), за летний период 2022 г. по данным АМС

Table 2. The verification table of wind gusts ≥ 15 m/s for the squalls diagnosed from the DMRL-C network and numerical prediction data (methodical diagnosis), as well as from the Roshydromet operational DMRL-C network data (operational diagnosis) for the summer of 2022 according to automatic weather stations

Диагноз	Факт									
	≥ 15 м/с						< 15 м/с при первом радиусе ~4 км		Всего при первом радиусе ~4 км	
	Контрольный радиус, км									
	4		10		28					
	Метод. диагноз	Опер. диагноз	Метод. диагноз	Опер. диагноз	Метод. диагноз	Опер. диагноз	Метод. диагноз	Опер. диагноз	Метод. диагноз	Опер. диагноз
≥ 15 м/с	104	5	141	11	183	24	4362	41	4466	46
< 15 м/с	40	169	49	191	35	186				
Всего	144	174	190	202	218	210				

Таким образом, можно сделать вывод, что оправдываемость [8]/предупрежденность [12] растет с увеличением радиуса и является удовлетворительной для первых двух радиусов (4 и 10 км) и хорошего качества для радиуса 28 км для метода, представленного в статье. Показатель достоверности [8]/оправдываемости [12] для этого метода низкий – всего 2,3 % для контрольного круга радиусом ~4 км, как требует [8]. Ложные тревоги, на первый взгляд, составляют большое число. А вот доля ложных тревог F от всех случаев, когда фактически не было шквалов, составляет 0.000792 (4362 случая разделить на количество случаев, когда фактически не зафиксировали станции шквалов, т. е. на количество 10-минутных наблюдений, подлежащих верификации: 250 станций \times 153 суток \times 144 срока в сутки = 5507856 случаев), доля попаданий $H = 0.722$. Индекс экстремальной зависимости достаточно высок, $EDI = 0.93$, симметричный индекс экстремальной зависимости $SEDI = 0.92$.

Оправдываемость [8]/ предупрежденность [12] оперативного метода также растет с увеличением радиуса, но в сравнении с методическим подходом низкая и не достаточная для точной диагностики шквалов. Показатель достоверности [8]/оправдываемости [12] для этого метода выше экспериментального, но также не достаточный для точной диагностики шквалов.

***Верификация скорости порывов ветра при шквале
экспериментальным подходом при использовании в качестве
эталона данных краудсорсинга***

База данных краудсорсинга за период верификации включала данные непосредственных наблюдений очевидцев ОЯ на открытых интернет-ресурсах, данные сети метеостанций и постов, переданные в донесениях, включая данные об ОЯ, не зафиксированные наблюдательной сетью, но нанесшие материальный ущерб. Итого зафиксированных случаев со шквалами (≥ 15 м/с) оказалось 215, из них 185 случаев были диагностированы. Данные позволяют оценить оправдываемость [8]/предупрежденность [12] диагностированных данных о скорости ветра при порывах в шквалах, которая составляет 86 %.

Основной причиной трудности получения объективных оценок для шквалов, особенно градации ОЯ, является редкая сеть наблюдений, как метеостанций, так и АМС. И закономерно будет низкой оправдываемость явления (достоверность) при имеющихся сведениях о шквалах при их автоматизированной оценке. На наш взгляд, наиболее важным показателем для таких явлений при недостаточной сети наблюдений является показатель предупрежденности явления, так как в этом случае повышается внимание синоптика к анализу синоптической ситуации, использованию дополнительной информации для уточнения прогноза. Поэтому напрашивается вывод, что о пользе представляемых диагностированных опасных конвективных явлений, таких как сильный ливень, шквал и град, можно судить только по отзывам синоптиков, использующих данную информацию при анализе конкретных случаев для цели превентивного предупреждения о возникновении таких явлений и составления штормовых предупреждений. Кроме того, планируется провести дополнительную верификацию шквалов по показателю Brier, который принимает значение от 0 до 1, поскольку рассматривается окрестность (квадрат) максимально возможной разницы между прогнозируемой (диагностируемой) вероятностью (которая должна быть от нуля до единицы) и фактическим результатом (который может принимать значение только 0 или 1). Эта оценка подходит и для бинарных, и для категориальных результатов, которые могут быть структурированы как true или false.

Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что экспериментальная технология идентификации конвективных явлений погоды, в том числе шквалов, скоростью порывов ≥ 15 м/с, включая шквалы градации опасных явлений погоды, дает возможность в режиме реального времени с пространственным разрешением порядка 4 км каждые 10 мин для ЕТР получать дополнительную к оперативной продукции сети локаторов ДМРЛ-С информацию о шквалах. Данная информация базируется на

расчете конвективных явлений и их интенсивности с применением алгоритмов, отличающихся от используемых в оперативной работе сети ДМРЛ-С. Каждое диагностируемое конвективное явление (ливень, град, шквал) визуализируется на отдельной карте, в отличие от карты явлений оперативных локаторов, на которой для точки представлены конвективные явления большей опасности. Если на карте оперативного локатора идентифицирован шквал (цифры кода от 16 до 18), то, возможно, что в точке идентификации был град либо сильный дождь, цифры кода которых ниже 16.

В рамках экспериментальной технологии шквалам уделено особое внимание, они представляются на трех картах: диагностированных шквалов в трех градациях интенсивности, скорости порывов ветра при шквалах и шквалов градации ОЯ, что позволяет с разных сторон рассмотреть вопрос возникновения шквалов (несколько независимых алгоритмов) и уточнить его интенсивность как явления, наиболее, кроме смерчей, опасного и причиняющего наибольший ущерб. Продукция идентифицируемых шквалов в рамках экспериментальной технологии, согласно приведенным данным о их верификации, по разным видам фактических данных имеет высокую предупредительность, ее использование позволит синоптикам принять более взвешенное решение о подаче штормовых предупреждений о их возникновении, пример этого приведен в [4].

Исследования выполнены в рамках темы 1.1.5 НИТР Росгидромета на 2020–2024 годы.

Список литературы

1. *Алексеева А.А.* Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
2. *Алексеева А.А., Бухаров В.М., Лосев В.М.* Диагноз сильных шквалов на основе данных ДМРЛ-С и результатов численного моделирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3 (381). С. 6-23.
3. *Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 135-148.
4. *Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Алексеева А.А., Васильев Е.В.* Опыт тестирования экспериментальных методов Гидрометцентра России при составлении штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 4 (390). С. 6-32.
5. Европейская база данных о суровых погодных условиях. Версия 4.5 (август 2023). – URL: eswd.eu (дата обращения 8.11.2023).
6. *Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю.* Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
7. Метеорологический ежемесячник. Вып. 1-12. Свердловск: Уральское упр. гидрометеорол. службы. Свердловская гидрометеорол. Обсерватория, 1981-2012.
8. Методика валидации наблюдений доплеровских метеорологических радиолокаторов, установленных на наземной наблюдательной сети. Долгопрудный. 2019. 50 с. <http://www.method.meteorf.ru> (дата обращения 8.11.2023).
9. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М., 2019. 129 с.

10. Методические указания по использованию радиолокационных данных в синоптическом анализе и краткосрочном прогнозе погоды // Под ред. Г.К. Веселовой, Ю.К. Федорова. М.: Гидрометеиздат, 1981. 24 с.

11. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С ("ГИМЕТ-2010"). М, 2011. 108 с. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (шифр «ГИМЕТ-2010») версия 02: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: ФГБУ «ЦАО», номер регистрации: 2018665447, дата регистрации: 05.12.2018.

12. РД 52.27.284–91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и геолигеофизических прогнозов. 150 с.

13. 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.

14. Шихов А.Н., Быков А.В. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD // Географический вестник. Картография и геоинформатика. 2014. № 4 (31). С. 102-109.

References

1. Alekseeva A.A. A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.

2. Alekseeva A.A., Bukharov V.M., Losev V.M. Diagnosis of severe squalls based on the data of DMRL-C Doppler weather radars and numerical modeling. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, vol. 381, no.3, pp. 6-23 [in Russ.].

3. Alekseeva A.A., Peskov B.E. Assessment of the maximum speed of convective flow, characteristics of heavy rain and hail using radar information. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 135-148 [in Russ.].

4. Dmitrieva T.G., Smirnov A.V., Alekseeva A.A., Vasil'ev E.V. Experimental Methods of Hydrometcentre of Russia for Producing Storm Warnings about Adverse and Severe Weather Events. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 390, no.4, pp. 6-32 [in Russ.].

5. European Severe Weather Database (ESWD) Version 4.5 (Aug 2023). Available at: eswd.eu.

6. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Yu. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].

7. Meteorologicheskij ezheimesyachnik. Vyp. 1-12. Sverdlovsk: Ural'skoe upr. gidrometeorol. sluzhby. Sverdlovskaya gidrometeorol. Observatoriya, 1981-2012 [in Russ.].

8. Metodika validacii nablyudenij doplerovskih meteorologicheskikh radiolokatorov, ustanovlennyh na nazemnoj nablyudatel'noj seti. Dolgoprudnyj. 2019, 50 p. Available at: <http://www.method.meteorf.ru> [in Russ.].

9. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu informacii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike: Tret'ya redakciya, Moscow, 2019, 129 p. [in Russ.].

10. Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu radiolokacionnyh dannyh v sinopticheskom analize i kratkosrochnom prognoze pogody. Pod red. G.K. Veselovoj, Yu.K. Fedorova. M.: Gidrometeizdat publ., 1981, 24 p. [in Russ.].

11. Программное обеспечение вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора DMRL-S ("ГИМЕТ-2010"). Moscow, 2011. 108 p. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора DMRL-S (шифр «ГИМЕТ-2010») версия 02: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: ФГБУ «ЦАО», номер регистрации: 2018665447, дата регистрации: 05.12.2018 [in Russ.].

12. RD 52.27.284–91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. 150 p. [in Russ.].

13. *Shikhov A.N.* Estimation of forest damage from natural disasters in Perm region using the long-term series of space imagery. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2014, vol. 11, no. 1, pp. 21-29 [in Russ.].

14. *Shikhov A.N., Bykov A.V.* Baza dannyh ob opasnyh i neblagopriyatnyh yavleniyah pogody v Permskom krae kak regional'nyj analog ESWD. *Geograficheskij vestnik. Kartografiya i geoinformatika*, 2014, vol. 31, no. 4, pp. 102-109 [in Russ.].

*Поступила 07.05.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024;
принята в печать 17.06.2024.*

*Submitted 07.05.2024; approved after reviewing 06.06.2024;
accepted for publication 17.06.2024.*