

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-8-31>

УДК 551.509.313+551.509.324.2+551.508.85

Наукастинг порывов ветра с помощью численных прогнозов, данных радиолокации и машинного обучения: определения и термины, инструменты наблюдений и модели

А.В. Муравьев, Д.Б. Киктев, А.В. Смирнов

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

Представлен краткий обзор современных средств и методов наукастинга порывов приземного ветра с использованием выходной продукции численного прогноза погоды, радиолокационных наблюдений и приемов машинного обучения. Приводятся соответствующие определения и термины, описываются наблюдательные инструменты и методы обработки наблюдений, обсуждаются модели ветровых порывов и системы их наукастинга. Обзор составлен с учетом оперативных отечественных технологий, задействованных в проведенных в 2024 году испытаниях версии системы наукастинга порывов.

Ключевые слова: наукастинг порывов ветра, численный прогноз погоды, радиолокационные наблюдения, машинное обучение

Wind gust nowcasting using numerical forecasts, radar data and machine learning: definitions and terms, observational tools and models

A. V. Muravev, D. B. Kiktev, A. V. Smirnov

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

A brief overview of modern tools and methods for nowcasting of surface wind gusts using the output of numerical weather prediction, radar observations, and machine learning techniques is presented. The relevant definitions and terms are given, observational tools and methods for processing observations are described, wind gust models and their nowcasting systems are discussed. The overview is compiled taking into account the domestic operational technologies involved in the tests of a new gust nowcasting version conducted in 2024.

Keywords: wind gust nowcasting, numerical weather prediction, radar observations, machine learning

Введение

В период май–сентябрь 2024 года в ФГБУ «Гидрометцентр России» испытывался вариант технологии *наукастинга порывов приземного ветра* с применением машинного обучения к продукции прогностической модели оптического потока (система ruSTEPS) и системы численного прогноза погоды COSMO-Ru/2.2. Накопленная в испытаниях информация покрывала в основном территорию Центрального федерального округа и была представлена в трех наборах данных: поля наукастинга в зоне сети радиолокаторов ДМРЛ-С, численные прогнозы полей порывов и данные автоматических метеостанций. Обозначим для краткости эти данные условно как *результурующие, обучающие и контрольные*.

При подготовке технологии наукастинга был написан представленный ниже обзор средств и методов наукастинга порывов, ориентированный на отечественные условия испытаний: вначале обсуждаются определения и термины в описании сильных ветровых явлений, затем рассматриваются инструменты наблюдений, методы моделирования и системы наукастинга порывов. Основное внимание уделяется тем технологиям наукастинга, которые базируются на данных радиолокации и численного прогноза погоды в сочетании с приемами машинного обучения. Обзор составлен с учетом особенностей проведенных испытаний и не претендует на научно-историческую полноту.

Основные определения и термины

Специфические проявления ветра (т. е. "движения воздуха относительно земной поверхности" [26]), называются в метеорологии порывами, шквалами, сдвигами, вертикальными потоками и т. д., которые отличаются между собой пространственно-временными масштабами, физическими и статистическими свойствами и используются зачастую в традиционно сложившихся сферах человеческой деятельности. В определениях этих особенностей ветра и в соответствующей научно-технической терминологии (как русскоязычной, так и иностранной) наблюдаются и разнообразие, и большое смысловое пересечение. Так, в Руководстве ВМО по приборам и методам наблюдений [6] отсутствует упоминание о шквалах (squalls), при этом порывом (gust) считается "короткопериодная флуктуация ветра" и вводится понятие "пикового порыва ветра" (peak wind gust), определяемого как "максимальная наблюдаемая скорость ветра за определенный интервал времени". В Руководстве Международной организации гражданской авиации [8] в характерные особенности "сдвига" (shear) включаются все основные свойства и порывов, и шквалов. Порывы и шквалы также описываются и обсуждаются в Наставлении ВМО по морскому метеорологическому обеспечению [5].

Большое разнообразие определений порывов наблюдается, вполне ожидаемо, на национальных уровнях.

В словаре Американского метеорологического общества [47] порывом ветра называется "неожиданный, кратковременный рост скорости ветра", который "более изменчив, чем шквал, и сопровождается ослаблением скорости ветра". В практике американской метеослужбы порыв фиксируется, когда "пиковая скорость достигает 16 узлов (9.77 м/с) и более, а изменение скорости ветра между пиками и затишьем составляет не менее 9 узлов (4.63 м/с). Продолжительность порыва обычно не превышает 20 сек». В свою очередь, шквал определяется как "сильный ветер, характеризующийся неожиданным возникновением, устойчивостью в течение нескольких минут и довольно резким снижением скорости. В практике наблюдений шквал сообщается только тогда, когда скорость ветра достигает 16 или более узлов и удерживается не менее двух минут (этим шквал отличается от порыва)". То есть нижний порог скорости в 16 узлов одинаков и для порыва, и для шквала, а различие только в продолжительности и в отличии от "затишья".

В отечественных публикациях порывы представляются также как более общее явление, чем шквал. Так, в метеорологическом словаре Хромова и Мамонтовой [26] "порыв ветра" определяется как "резкое кратковременное усиление ветра", а если при этом скорость ветра выше 20 м/с и сопровождается "разрушительным действием, порыв называется шквалом". Однако в отдельной статье словаря определение шквала претерпевает уточнение и заметную модификацию. "Шквал – это резкое усиление ветра в течение короткого времени, сопровождающееся изменениями его направления". При этом шквал бывает "внутримассовым" и "фронтальным", но "в обоих случаях имеем вихревое движение воздуха (с горизонтальной осью) в облаках и под облаками", что, кстати, отмечалось Хромовым еще в учебнике 1948 г. [25]. Эти определения шквала и порыва без изменений перенесены в Российский гидрометеорологический словарь 2008–2009 гг. [21].

Заметим, что в Толковом словаре В.И. Даля шквал – это морской термин, определяется он как "набег, налет, удар, полоса, порыв внезапного и сильного ветра, который вскоре пробегает дальше". А в статье «ветер», написанной А.И. Воейковым для словаря Брокгауза и Ефрона, шквал вовсе не упоминается.

В российском Наставлении по краткосрочным прогнозам погоды 2019 г. [20] различаются "максимальная скорость ветра при порывах" и "максимальная средняя скорость ветра... в любой 10-минутный интервал... периода действия прогноза". При прогнозе шквала рекомендуется формулировка "шквалистое усиление ветра до...". В грациях опасного метеорологического явления "очень сильный ветер – ветер при достижении скорости при порывах не менее 25 м/с или средней скорости не менее 20 м/с; ураганный ветер (ураган) – ветер при достижении скорости 33 м/с и более. Шквал уточняется как «резкое кратковременное (в течение нескольких минут, но не менее 1 минуты) усиление ветра до 25 м/с и более». Наставление

допускает изменения территориальными УГМС данного перечня опасных явлений "с учетом местной специфики", включая, возможно, и выставленные пороги ОЯ. Надо сказать, что в метеорологической литературе (в том числе нормативной) нередко отождествляются понятия "скорость" и "сила" ветра.

В методическом пособии [13] порыв и шквал отчетливо отделяются друг от друга как физическая величина и метеорологическое явление: порывы – это характеристики скорости ветра, а шквалы – конвективные явления с определенными пространственными особенностями. Очевидно, что это разделение становится возможным при наличии наблюдательной аппаратуры и гидродинамических моделей такого пространственно-временного разрешения, которое позволяет отделить "серую зону" квазиоднородной турбулентности, заселенную порывами, от зоны конвекции со шквалами, более организованной и тем самым более предсказуемой. Возможно, это разделение и обусловило преимущественное распространение синоптических, статистических и динамико-статистических моделей «прогноза шквалов» в СССР и позже в России. В частности, достаточно подробное изложение внедренных в СССР методов синоптических "прогнозов шквалов" находим во втором издании учебника Зверева 1977 г. [7], в котором определение шквала "по Хромову" уточняется следующим образом. Во-первых, это "кратковременное местное усиление ветра до значений, намного превышающих значение градиентного ветра в этом районе». Во-вторых, если шквал формируется и перемещается в виде «узкой полосы от нескольких сотен до нескольких километров", то "может существовать несколько часов" и в этих условиях он связан с образованием "относительно устойчивых вихрей с горизонтальной осью вращения, захватывающих и приземный слой воздуха... Таким образом, между смерчами и шквалами имеется много общего".

Обстоятельный обзор иностранных и разработанных в России систем прогноза *шквалов* приводится в монографии [27], публикациях и диссертациях разработчиков [1, 3, 17]. Как говорилось выше, рост разрешения моделей ЧПП с расширением и уточнением соответствующих параметризаций позволяет составлять численные прогнозы *порывов* ветра, включая шквалы (например, [23]).

Инструменты и специфика наблюдений

Очевидно, порывистость ветра как экстремальное и опасное метеорологическое явление играет существенную роль во всех временных масштабах прогнозирования и наблюдений, особенно в последние годы бурного развития ветроэнергетики. В статье [73] описаны временные масштабы "полезности" прогнозов и однородных архивов значений ветровых порывов. Так, оценка вероятности резкого изменения скорости и направления ветра в масштабе нескольких минут позволяет оценить риск разрушения

работающей турбины ветродвигателя. Прогнозы порывов ветра в масштабах день – недели полезны для планирования решений в различных оперативных областях (авиация, мореходство, сухопутный транспорт, энергетический сектор). Многолетние, непрерывные, репрезентативные наблюдения ветровых порывов составляют основу для оценок периодов повторяемости (return periods) максимальных порывов в масштабах десятилетий или даже столетий, что требуется при планировании строительства важных хозяйственных объектов и для формирования стратегий страховых компаний.

Ввиду несомненной важности ветровых порывов очевидна потребность их измерений в высоком временном разрешении (секунды-минуты), при этом для потребителей наукастинга и сверхкраткосрочного прогноза порывов вся цепочка данных от анемометра до систем обработки, записи и передачи предупреждений должны соответствовать этому режиму измерений. Несмотря на то, что в настоящее время в развитых странах эта цепочка обеспечена измерительной аппаратурой, автоматизированной обработкой и передачей данных, остаются две важные проблемы. Первая заключается в ограниченной репрезентативности точечных наблюдений [6, 73], вторая относится к калиброванности данных измерений [72]. Решение первой проблемы возможно в добавлении пунктов наблюдений, хотя и для развитых стран столь прямолинейное решение экономически затруднительно. Как полагают многие специалисты, разумное повышение репрезентативности наблюдений порывов состоит не в уплотнении сети станций, а в расширении применения средств дистанционного зондирования и в качественном статистическом и гидродинамическом моделировании [43]. Вторая проблема относится к измерительной аппаратуре и ее использованию в оценке характеристик порывов [31, 72]. Она связана с репрезентативностью характеристик порывов и вызвана тем, что продолжительность и стандартное отклонение порывов зависят от фактического интервала осреднения и фактической дискретности измерений наличной аппаратурой. Эта зависимость была проанализирована Бельярсом [31] на основе подхода Райса в теории флуктуаций случайного шума [62, 63] и была учтена в соответствующих документах ВМО [6].

Сделаем несколько замечаний о специфичности аппаратуры для исследований порывов ветра. Список измерительных приборов скорости ветра внушительен и истории науки его начинают с "висящих досок" Альберти и да Винчи середины 15 века. Анализ всего диапазона скоростей ветра по измерениям флюгера с разновесными досками продолжились до недавнего времени [2, 10].

В последние два десятка лет характеристики порывов ветра и их физическая природа исследуются с помощью самой разной аппаратуры и принципов измерения. Это современные анемометры и анемографы, содары и лидары, наземные радиолокаторы, спутниковые средства зондирования, грозопеленгаторы. Развиваются многосенсорные оценки и средства

корректировки порывов с использованием методов машинного обучения и результатов численного краткосрочного прогнозирования (обзоры в [70, 71, 73]).

Приведем несколько заметных фактов в истории наблюдений порывов ветра. Понимание особенной, турбулентной, вихревой природы порывов пришло в первые десятилетия 20 века при становлении теории турбулентности и при начальном развитии средств ее количественного анализа. В книге Халтинера и Мартина [24] в параграфе о "порывистости ветра" цитируется классификация порывов по масштабам микротурбулентности, составленная Сеттоном в 1953 г. [22]. Сеттон подвел итоги исследований ученых США, начиная с работы Скрейса 1930 г., в которой были выделены три класса турбулентности приземного ветра по временным масштабам от малого (несколько секунд) до большого (порядка часа). Данную классификацию Скрейс обосновал наблюдениями за дымом из-под флюгарки (дымника над трубой) и фотографированием с частотой 16 кадров в секунду. Эти наблюдения "тонкой структуры ветра" подтвердили значительный вклад в вихревую энергию естественного ветра довольно высокой частоты колебаний (10–20 циклов в секунду). В то же время из записей стандартного анемометра следовало, что на другом конце шкалы те колебания, которые продолжаются в течение нескольких минут, являются редкими. Заметим, что уже до середины прошлого века одной из основных характеристик порывистости стал *коэффициент порывистости* (*gust factor*), определяемый как отношение "максимума" в интервале инерции прибора (до 5 секунд) к "средней" скорости в интервале от нескольких минут до одного часа.

В 1951 г. в монографии Американского метеорологического общества были обобщены результаты многочисленных исследований ветра в трех измерениях и предложена микроклиматическая классификация порывистости ветра с учетом направления (цит. по кн. [24]). А в 1954 г. в эпохальной статье Монины и Обухова [14] было показано, что наиболее общей теорией влияния стратификации на турбулентный режим в приземном слое воздуха является теория подобия.

В Руководстве ВМО [6] в Главе 5 "Измерение приземного ветра" основная терминология, связанная с порывами, заимствована из публикации 1972 г. [56], при этом шквалы не определяются и не описываются. Порыв, определенный как "индивидуальная короткопериодная пульсация ветра", характеризуется тремя параметрами: максимальным порывом, средним квадратическим отклонением скорости и направлением ветра. Есть дополнительные характеристики: порыв бывает сглаженный, резкий, пиковый, длительный. Продолжительностью порыва считается "мера длительности максимального наблюдаемого порыва", которая определяется "чувствительностью измерительного устройства". Формулируются подробные инструкции по оценке скоростей порывов, их продолжительности и т. п.

Выделим два, на наш взгляд, очень важных момента в Руководстве [6], касающиеся измерений и оценок порывов. Во-первых, оценку максимальных порывов и средних квадратических отклонений не следует проводить

без "надлежащих приборов и регистрирующих устройств" (п. 5.2.3), при этом утверждается, что "устаревшие флюгеры с качающейся доской ненамного лучше полного отсутствия приборов" (п. 5.6). Во-вторых, оценку порывов следует производить на основе гипотетической "измерительной цепочки" (модели измерения) "по Бельярсу" [31] с привлечением распределения Райса и со скользящей фильтрацией колебаний ветра на интервале в несколько секунд и оценкой "максимального порыва" на этом же интервале осреднения.

В отечественной монографии "Климат России" [10], вышедшей в 2001 г., много места выделено статистическим характеристикам ветра и его порывов, измерениям этих характеристик во всем диапазоне скоростей, расчетным оценкам скорости и порывистости, проблемам построения однородных рядов наблюдений и особенностям климатологических обработок данных о ветре. Здесь также обсуждаются непростые проблемы с измерительными приборами и с их использованием в синоптической практике; с сожалением отмечаются такие явления, как потеря однородности рядов при сменах инструментов, утрата бумажных таблиц с данными и т. д. Например, данные о порывах снимались 4 или 8 раз в сутки с показаний флюгера с доской (легкой для измерений малых скоростей и тяжелой – для измерения больших скоростей). При этом таблицы с записями о порывах хранились ограниченное время, а данные о порывах большой скорости ветра вообще не снимались из-за "особенности методики наблюдений".

Статистические модели порывов

Для надежности статистических характеристик порывов требуется устойчивая в пределах имеющихся выборок модель вероятностного распределения этой величины во времени и пространстве. В статистическом описании порывов как экстремальных величин напрашивается использование трех известных законов притяжения для экстремумов или их двух обобщенных вариантов – распределения экстремумов для выборок независимых величин и распределения Парето для временных рядов [43, 52, 59, 61, 69]. В отечественной метеорологии моделирование ветра с помощью распределения Вейбулла применялось в СССР (правда, без указания автора распределения, в [2]), применяется и в современной отечественной практике [10, 52].

Однако реальные сильные порывы ветра зачастую не укладывались в строгие рамки классической теории экстремальных величин. Заметные расхождения характеристик порывов с законами экстремальных величин привели, во-первых, к резкой критике приложений теории экстремумов, названной в [48] "математическим миражом", во-вторых, к более внимательному анализу условий применимости этой теории [45] и, наконец, к разработке новых или к модификации старых методов статистического описания порывов.

В последние два десятка лет распределение Райса, построенное при анализе "дробового эффекта" случайного шума в 1944 г. и возрожденное

Бельярсом в 1987 г., заметно потеснило и классическую теорию экстремумов, и многочисленные другие статистические модели порывов [39, 72]. В противовес наиболее распространенному в описании скорости ветра распределению Вейбулла, авторы работы [39] предложили комбинацию распределений Райса и Рэлея. В ходе исследования ими были протестированы такие распределения, как эллиптические, анизотропные гауссовы, обратные гауссовы, негауссовы, бимодальные, ортогонально-полиномиальные, гамма- и бета-распределения, логнормальные и т. д. Конкретная цель работы [39] заключалась в отыскании распределения, способного охватить суточную и сезонную изменчивость ветра. Любопытна историческая параллель: желание построить аналитическую функцию, способную описать ветер в полном диапазоне изменений, включая максимальное, побудило Анапольскую в 1961 г. использовать формулу, предложенную, по ее словам, Гандиным, и в книге [2] никак не именованную, но которая в точности совпадает с формулой Вейбулла.

Добавим, что в описании ветра довольно распространенными остаются так называемые гетероскедастические модели (ARCH-models и их разнообразные вариации), обобщающие классические "авторегрессионскользящих средних" (ARMA) с помощью добавления авторегрессии для дисперсии [37, 74].

При этом продолжаются поиски аналогов распределению порывов ветра в других областях исследований. Например, в статье [32] по данным ультразвуковых замеров порывов ветра с частотой 4 Гц и по оценкам скорости турбулентного потока за цилиндром в лабораторном воздушном туннеле было показано, что принятие гипотезы развития возмущений в турбулентных каскадах с перемежаемостью приводит к варианту степенного закона, хорошо известного в сейсмологии. Распределение "порывов" во времени оказалось сходным с законом Гутенберга – Рихтера для частоты подземных толчков силы выше некоторого порога, а интервал между максимальными порывами распределился по закону Омори, описывающему изменение частоты и магнитуды афтершоков.

Общие сведения о параметризации в системах ЧПП

Внедрение новейших технологий в прогнозирование погоды все еще не позволяет полностью закрыть проблему "терра инкогнита", или "серой" области между масштабами от 1 метра до 100 метров и от сотни метров до сотни километров, в каждом из которых разработаны эффективные микро- и мезомодели, но еще не эксплуатируются в оперативном режиме модели, покрывающие этот разрыв. Заметим, что указанный масштаб не входит в традиционные классификации мезомасштабных процессов, которая начинается с интервала 200 м – 2 км (табл. 1.1 в [4]). В "серой" области масштаб турбулентной энергии и турбулентного потока меньше разрешаемого масштаба мезомодели и превосходит разрешаемый масштаб микромоделей. Проблема была сформулирована в 2004 г. в статье Вингарда [78], который

предложил некоторые специфические замыкания системы уравнений мезомасштабного ЧПП, способных частично разрешить указанную проблему.

Автор книги [43] связывает физическую сторону проблемы с возникновением и развитием конвекции на масштабах "серой зоны". При ее способности к самоорганизации существует возможность генерирования на микромасштабе таких порывов ветра, которые не относятся к среднему ветру мезомасштаба и которые по этой причине не могут появиться на прогностическом горизонте мезомодели.

Интересующие нас порывы наблюдаются в приземном слое атмосферы, гидродинамическая неустойчивость которого особенно важна для анализа и моделирования порывов. В [77] была подтверждена сильная связь между порывами ветра, скоростью трения, вариацией измерений и вертикальной неустойчивостью. Поэтому, учитывая попадание порывов ветра в "серую" зону, в приземном подслое мезомасштабных моделей следует наряду с параметризацией других величин предусматривать параметризацию порывов. Авторы [77] подчеркивают необходимость отдельной обработки конвективных и неконвективных порывов как явлений с разными пространственно-временными масштабами.

Многообразие условий, порождающих экстремальные проявления ветра, отражается в растущей "многомодульности" систем параметризации порывов в современных моделях ЧПП с автоматизированным или ручным переключением между этими модулями. Различная алгоритмическая сложность, требуемые для конкретных модулей специфические данные и параметры, вычислительные затраты расчетов ставят пользователей и исследователей перед непростым выбором [33]. Какая сложность схемы параметризации требуется для оценки порывов заданной точности? Какая дополнительная продукция используемой модели ЧПП может улучшить оценку порывов? Достаточно ли простого определения подсеточной кинетической энергии для учета стохастической природы порывов?

Наиболее общим образом современные методы параметризации порывов можно разделить на две группы [72]: на основе 1) теории подобия для приземного слоя атмосферы и 2) так называемого "профильного метода" Брассёра. В обзоре Шеридана [70] разделение проведено по конвективным и неконвективным условиям возникновения сильных порывов, при этом параметризации этих порывов "работают взаимно исключительно" по аналогии с противопоставлением "физически – эмпирически". Шеридан перечислил и кратко описал около трех десятков "моделей оценки порывов", используемых до 2011 г. как в параметризациях ЧПП, так и в гибридных системах наукастинга.

Центральной характеристикой в параметризации порывов в приземном слое остается *коэффициент порывистости*. Его оценка представляет собой непростую задачу ввиду неопределенности интервала осреднения и частоты замеров для выделения локального экстремума, поэтому в некоторых случаях рекомендуется преобразовать прямое определение порыва

в формулу, содержащую стандартное отклонение и расчетную интенсивность турбулентности горизонтальной скорости [72]. Стандартное отклонение может оцениваться по значениям турбулентной кинетической энергии (ТКЭ), если таковая рассчитывается в модели, в противном случае параметризация производится с помощью теории подобия Монина – Обухова.

Коэффициент порывистости иногда выделяется в отдельную группу методов параметризации, как, например, при описании модели COSMO поступили авторы [33]:

1. Использование *коэффициента порывистости*, определяемого как отношение порыва к средней скорости ветра и зависящего от неустойчивости атмосферы и от длины шероховатости в области прогнозирования, согласно [40].

2. Интерпретация порыва как *нисходящего переноса* момента движения с более высокого пограничного слоя атмосферы, согласно [34].

3. Интерпретация порыва как *аддитивной добавки к средней скорости* ветра, связанной с турбулентной кинетической энергией. Если ТКЭ не моделируется, то в качестве заменителя турбулентного состояния используют скорость трения [68], индексы неустойчивости атмосферы и направление ветра, описывающие адвекцию ТКЭ из соседних областей с разными характеристиками шероховатости [29].

Параметризация порывов в версиях модели COSMO

В консорциуме COSMO имеются разнообразные модификации блоков данной модели на национальном уровне, приспособленные к конкретным физико-географическим условиям. Однако общие принципы параметризации порывов разрабатывались совместно с ЕЦСПП, и оценки порывов с учетом турбулентного переноса в приземном слое отличаются от параметризаций ЕЦСПП лишь в деталях [29, 30, 41, 42].

Блоки (модули) параметризации порывов ветра в базовой оперативной модели COSMO-Eu Немецкой службы погоды описаны в руководстве [66]. Шаг расчетной сетки в 2016 г. равнялся 2.8 км, поэтому методологические аспекты, отмеченные в этом руководстве, актуальны и в настоящее время для отечественной версии модели COSMO-Ru с разрешением 2.2 км. Перечислим несколько важных аспектов, подчеркнутых в [66]. Во-первых, порыв приземного ветра определяется как максимальная скорость ветра на высоте 10 м, оцениваемая ежечасно по часовому и шестичасовому интервалам. Во-вторых, по утверждению разработчиков, расчетная сетка 2.8 км обеспечивает прямое моделирование экстремальных явлений, порождаемых глубокой влажной конвекцией, таких как грозы с суперячейками, интенсивные мезомасштабные конвективные комплексы, предфронтальные грозы с линиями шквалов и сильным снегопадом в зимних мезомасштабных циклонах. В-третьих, для достижения заявленных целей требуется учащенный анализ высокого разрешения с использованием несиноптических и высокочастотных данных, таких как авиационные наблюдения по программе АМДАР (включая дополнительные показатели турбулентности

и влажности) и результаты дистанционного зондирования. Добавим, что в блоке ассимиляции данной версии модели использован метод подталкивания (nudging). Наконец, в-четвертых, в списке источников данных для усвоения характеристик ветра (с максимальной скоростью и направлением при порывах) перечисляются радиозонды, самолетные датчики, ветровые профилемеры, приземные и морские сенсоры (SYNOP, SHIP, BUOY), радиолокаторы (данные о так называемом "ветре VAD").

В системе параметризации порывов в модели COSMO-Ru/2.2 в настоящее время предусмотрено пять модулей оценки ([66]):

1. Динамический порыв с нижнего модельного слоя.
2. Динамический порыв с уровня 30 м.
3. Динамический порыв по методу Брассёра.
4. Динамический порыв с нижнего уровня с учетом зависимости коэффициента порывистости от средней скорости ветра на уровне 10 м.
5. Эмпирическая статистическая линейная модель (внедрена в Version 5.06, 2019).

В используемой терминологии порывы разделяются на динамические и конвективные. Как обычно, в расчетах участвуют характеристики турбулентных переносов момента количества движения, температуры и влажности. В выходную продукцию записывается "максимальная скорость ветра на 10 м", определенная как максимум из динамического и конвективного порывов. Конвективный порыв рассчитывается по разности средних горизонтальных скоростей ветра на высотах 850 и 950 гПа, умноженной на эмпирически рассчитанный коэффициент [30].

В прогнозах, по умолчанию, динамический порыв рассчитывается в первом модуле как аддитивная добавка к средней скорости ветра на 10 м, зависящая от этой же скорости и от коэффициента турбулентного переноса момента движения на подстилающей поверхности.

Методика Брассёра (модуль 3) [34] основана на том, что масса воздуха на определенной высоте может достигать подстилающей поверхности только если средняя турбулентная кинетическая энергия превышает энергию плавучести между земной поверхностью и высотой расположения этой массы воздуха. Расчеты производятся интегрально по выделенному столбу воздуха и включают с одной стороны неравенства среднюю по высоте турбулентную кинетическую энергию, а с другой – относительное изменение виртуальной потенциальной температуры, помноженное на ускорение силы тяжести.

Эмпирическая модель (модуль 5), заявленная как "настройка порывов ветра" (wind gust tuning) и внедренная в 2019 г. специалистами Швейцарской метеослужбы. Настройка производится по четырем предикторам: средний модельный ветер на 10 м и три разных оценки порыва из параметризации Брассёра (основная оценка, оценки на нижней и верхней границе слоя). Коэффициенты настроены для модели COSMO с шагом сетки 1.1 км и валидированы по стационарным наблюдениям в Центральной Европе.

Модуль 5 разрабатывался для устранения систематической недооценки сильных порывов по схеме первого модуля. В комментариях к программному коду перечисляются две ситуации, которые данная модель не способна удовлетворительно отразить, так как не была на них обучена – очень высокая скорость порыва (при средней скорости более 25 м/с) и порывы над озером или морем.

Прогноз на основе радиолокационного зондирования

Радиолокатор является единственным оперативным средством, способным поставлять наблюдения в трехмерном пространстве каждые пять-десять минут в сетке разрешения один километр и менее. Обзорная область локатора достаточно велика, чтобы идентифицировать структуру мезомасштабного конвективного комплекса (МКК), оценить его гидрометеорологические особенности и этапы эволюции для своевременной передачи штормового предупреждения. Очевидно, напрямую возможности радиолокации можно использовать в прогностическом смысле лишь на сроки инерции МКК, которые не выходят за пределы сроков наукастинга и которые обязательно должны уточняться иными наблюдениями и соответствующими статистическими и физическими прогностическими системами [11, 12, 18, 50].

Современные радиолокаторы поставляют достаточно информации, чтобы идентифицировать нисходящие порывы ветра, фронты порывов и линии шквалов в условиях опасного шторма. Как было известно уже в первой половине прошлого века, знание физических причин и особенностей грозовых процессов позволяет предвидеть и отчасти предугадывать сопутствующие порывы и шквалы (например, [25]). В синоптической практике западных стран до сих пор используется разработанная в конце 1970-х гг. "методика Лемона" идентификации опасной грозы по морфологическим признакам на радарных изображениях. Это, в частности, наклон восходящего потока и расположение области слабого эха, сдвиг верхней границы отражаемости по отношению к ядру, сильные градиенты отражаемости, сдвиг ядра отражаемости в сторону восходящего потока, выраженность bow-эха (в виде лука для стрельбы), вращение и некоторые другие особенности, зависящие от стадии развития грозы [50].

Для идентификации порывов и шквалов применяются разнообразные радиолокационные сигнатуры, т. е. специально разрабатываемые функции характеристик отражаемости, двойной поляризации и доплеровских оценок потоков в определенных диапазонах изменения. Оценки таких диапазонов производятся статистическими методами, включая методы машинного обучения. Например, для выделения нисходящих грозовых порывов на мысе Канаверал используется восемь сигнатур, среди которых наиболее важными оказались функции максимального вертикально интегрированного льда и максимальной отражаемости, при этом пороговые значения выделяются алгоритмом машинного обучения "случайный лес" [57]. По

данным испытаний методики на двух сотнях гроз в теплые сезоны (май–сентябрь) 2015–2016 гг. показано, что идентификация и сверхкраткосрочный прогноз порывов по комбинации сигнатур оказались лучше таких же операций по отдельным сигнатурам.

В презентации [76] приводится список пяти методов наукастинга нисходящих порывов на основе радиолокационных переменных, которые тестировались и внедрялись, начиная с 1990-х гг. Определение нисходящих потоков (downdraft winds) и разделение порывов на микро- и макропорывы (micro - и macrobursts), а также на влажные и сухие, даны по Фуджите [46]. Сроки всех описанных методов прогноза не превышают 30 минут.

Перечислим параметры радиолокации и сигнатуры порывов, использованные в этих моделях, не упоминая физических обоснований разработчиков:

- вертикально интегрированная водность;
- максимальная отражаемость;
- высота максимальной отражаемости;
- высота максимальной отражаемости выше изотермы 0 °С;
- максимальная отражаемость выше изотермы 0 °С;
- максимальная отражаемость в грозовой ячейке;
- высота верхней границы радиоэха;
- максимальная высота столба дифференциальной отражаемости;
- высота столба дифференциальной отражаемости выше изотермы 0 °С;
- вертикальный градиент дифференциальной отражаемости;
- высота слоя ледяного дождя выше изотермы 0 °С;
- максимальная высота сигнатуры мокрого снега;
- ядро удельного [дифференциального] фазового сдвига.

Среди сигнатур радиолокации в последнее время выделилось "ядро удельного дифференциального фазового сдвига" (K_{DP} core), способное указать таяние и состав осадков, которые увеличивают отрицательную плавучесть и могут инициировать развитие нисходящего порыва воздуха. В [54] формулируются рекомендации синоптикам об использовании ядра в качестве сигнатуры предвестников нисходящего порыва:

1) ядра K_{DP} в окрестности слоя таяния являются надежным сигналом развития нисходящего порыва;

2) более высокие значения K_{DP} около слоя таяния и более высокие значения вертикальных градиентов K_{DP} чаще всего связаны с сильными нисходящими порывами;

3) ядра K_{DP} развиваются относительно медленно (обычно не менее 15 мин), что позволяет их наблюдать в условиях оперативного цикла обзора в 5 мин.

В кратком обзоре радарных сигнатур как предвестников нисходящих порывов указаны также снижающиеся "ядра отражаемости", радиальная конвергенция на среднем уровне, топологические "дыры – ложбины –

столбы" дифференциальной отражаемости, сильная положительная удельная дифференциальная фаза около и ниже слоя таяния (ядро К_{ДР}).

Несмотря на возросшие знания о роли сигнатур как предвестников нисходящих потоков, прогнозирование этих потоков остается сложной задачей, особенно при слабом сдвиге ветра в грозовых условиях. Причина проблемы заключается в том, что нисходящие потоки и их предвестники – это маломасштабные события, которые развиваются быстро и которые поэтому трудно обнаружить метеорологическими радарными с периодом сканирования около 10 минут. Как свидетельствуют быстро обновляемые наблюдения локаторов с фазированной решеткой, ядро высокой отражаемости развивается и опускается в течение лишь около семи минут во время грозы, порождающей нисходящие порывы.

Наукастинг с помощью машинного обучения

Технологии прогноза порывов по [71] основаны 1) на параметризациях моделей ЧПП с использованием физических принципов (physically based), 2) на статистических средствах (включая машинное обучение), пользующихся наблюдениями в больших объемах (data driven) и 3) на их всевозможных комбинациях (hybrids). Хорошо известны как достоинства, так и недостатки первых двух подходов по отдельности.

Примерно до 2015 г. основным средством получения добавленной стоимости в прогнозе порывов от использования результатов ЧПП служили разнообразные схемы регрессии [60, 75, 80], в последнее десятилетиекратно увеличилось количество предложенных схем и приемов машинного обучения.

В первом обзоре Шеридана (2011 г.) [70] приводятся лишь два примера приложения машинного обучения к прогнозу порывов в первом десятилетии этого века: в Европе (ЕЦСПП) – нейросети [53] и в США – различные приемы искусственного интеллекта, среди которых наиболее успешными оказались деревья классификации и регрессии [65].

Во втором обзоре Шеридана (2018 г.) [71] достойных упоминания ссылок оказалось около полутора десятков, в которых применяются деревья классификации и регрессии, нейронные сети, метод опорных векторов, алгоритм AdaBoost и т. д. Все методы машинного обучения требуют больших объемов данных, что делает необходимым снижение размерности задачи с неизбежной потерей информации. Серьезной остается опасность переобучений на принципиально ограниченных выборках. Наиболее полезными считаются гибридные методы, в первую очередь комбинированные с выходной продукцией ЧПП в схемах постпроцессинга.

В статье 2018 г. Шеридан также выделяет "интересное направление", в котором делаются попытки связать физические законы с технологиями, построенными исключительно на данных (data driven) – это так называемое "физически обоснованное" машинное обучение, учитывающее или претендующее на учет законов физики.

К настоящему времени пока немного исследований проведено в области постпроцессинга порывов ветра в ансамблевых прогнозах. В [67] сравниваются восемь статистических методов и методов машинного обучения в вероятностном прогнозе порывов ветра. Эти методы разделены на три стандартные группы (классическая статистика, поверхностное и глубокое обучение) с некоторой спецификацией на основе имеющихся архивов данных:

1. Современные статистические методы: статистические характеристики выходной ансамблевой продукции (EMOS) и регрессия по отдельным членам ансамбля.

2. Методы машинного обучения: градиентный бустинг и квантильные леса регрессий.

3. Нейросетевой подход: регрессионная сеть, квантильная сеть Бернштейна и сеть гистограммной оценки.

Информационная основа статьи [67] состояла из данные за семь лет (2010–2016 гг.) эксплуатации оперативной модели COSMO-DE и часовые приземные наблюдения метеостанций в Германии. Показано, что несмотря на исходную калиброванность сырых ансамблевых прогнозов, подключение корректировки на основе дополнительных метеорологических предикторов существенно увеличивает качество прогноза порывов. Авторы [67] предложили гибкую схему локально адаптивных нейросетей с набором выходных прогностических ансамблей, которые не только значительно превышают качество всех методов постпроцессинга, но также обучаются физическим связям, зависящим от суточного хода, в особенности в вечерних перестройках пограничного планетарного слоя.

Обстоятельный и критический обзор методов машинного обучения в прогнозе порывов ветра дается в [36]. Проверяются способности нейронных сетей прогнозировать факт и силу порыва ветра. Используются геофизические предикторы реанализа ERA5, регрессия и различные варианты нейросетей с разнообразными предикторами. Данные наблюдений собраны с метеостанций трех аэродромов США в теплый (апрель–сентябрь) и холодный (октябрь–март) периоды. Использовано около 70 % данных для обучения и 30 % для тестирования. По независимым выборкам показано, что качество прогноза сильно зависит от включения авторегрессии, т. е. от учета памяти во временном ряде. Вероятность появления порыва, оцениваемая с помощью пятислойной нейросети, прогнозируется намного лучше регрессионной схемы и схемы нейросетей с меньшим количеством слоев. Авторы признают, что обучение нейросетей до двадцати слоев создает опасность переобучения. Но даже при наилучшем прогнозе наступления порыва в двадцатислойной нейросети сила порыва недооценивается примерно наполовину. Заметим, что при количестве слоев в несколько десятков и более речь идет уже о "глубоком машинном обучении", требующем компьютерных систем на графических процессорах с опцией распараллеливания [28].

Обнародованная в 2020 г. нейромодель PhyDNet [55], ориентированная на прогнозирование по последовательности образов, является одной из самых современных схем машинного обучения, используемых для моделирования и прогнозирования погоды, гидродинамических и других физических явлений. В отличие от традиционных нейросетей, PhyDNet "направляет" процесс обучения на идентификацию физически согласованных решений путем включения "предварительных знаний", удовлетворяющих определенным физическим законам [51]. В PhyDNet физическое знание представлено системой уравнений в частных производных, которые способны сохранять физические ограничения для будущего прогноза образа.

Авторы [79] утверждают, что большинство предыдущих исследований конвективных порывов ветра фокусировались на моделировании и прогнозировании опасной конвективной погоды и ее отдельных фаз, являющихся непосредственными физическими причинами этих порывов. В статье предлагается новая нейросетевая модель наукастинга конвективных порывов на 0–2 часа, построенная на принципах глубокого обучения и позволяющая строить количественные прогнозы в масштабах минута-километр. Эта модель построена по сходной технологии с вышеописанной моделью PhyDNet, учитывающей физические ограничения, и обучается на наблюдениях приземного ветра и на радарной информации. По утверждению авторов [79], многочисленные современные системы прогноза порывов ветра даже на сетках с малым шагом обладают низким качеством в интервале 0–2 часа, зачастую предоставляя прогнозы в часовом обобщении (дается ссылка на австрийскую систему наукастинга INCA). Пропагандируя широкое внедрение методов машинного обучения, авторы указывают на большую роль рекуррентных и сверточных нейросетей в "получении новых знаний" о метеорологических полях.

Методы верификации

Оценка качества прогноза порывов производится с учетом физических и статистических особенностей такой метеорологической величины, как скорость порыва ветра. Традиционно предполагается, что порывы в области средних скоростей (примерно до 10 м/с) могут удовлетворительно моделироваться стандартным гамма-распределением, а порывы выше порога 15 м/с разумнее приближать либо распределением Вейбулла, либо распределением Райса [39, 52, 61].

Максимальность и редкость высоких скоростей ветра заставляет прибегать к соответствующим оценкам качества наукастинга порывов. Например, при категорийном определении порывов и оценки качества с помощью двумерной таблицы сопряженностей не рекомендуется применять такие известные метрики, как показатель Пирса – Обухова (Peirce Skill Score, PSS) [19] или "равноправную оценку угроз" (Equitable Threat Score, ETS), которые критично зависят от выборочной климатологии и вырождаются при стремлении "базовой доли" к нулю [44, 49]. В частности, критерий Пирса – Обухова стремится к доле попаданий, а оценка угроз

стремится к нулю. Как показано в [44], не вырождаются "индексы экстремальной зависимости" EDI и SEDI, построенные на логарифмах повторностей, содержащихся в ячейках таблиц сопряженностей.

Очевидно, поточечная верификация прогнозов прогностических полей позволяет строить довольно подробную информативную карту распределения оценки качества в реальной географии. Обобщения таких оценок можно производить простым осреднением по всей области испытаний, по каким-либо внутренним регионам этой области или же квантильным распределением по всему пространству (например, [15, 16]).

Для более компактной верификации прибегают к мере качества "по пространственным долям" FSS (Fractions Skill Score), которая принадлежит группе "окрестных методов оценки прогнозов полей" [35, 64] и, обладая удобными свойствами квадратичной метрики, оценивает сходство не значений, а вероятностных распределений "единиц" дихотомического представления категорий порывов [9, 15]. Иногда этот метод включается в более широкую группу методов объектно-ориентированной верификации [38].

Популярность показателя FSS объясняется возможностью выделения "полезных" пространственных масштабов, обеспечиваемых предлагаемой технологией прогнозирования. Справедливости ради отметим, что "полезный масштаб", определяемый или значением $FSS=0.5$ или с добавкой половины пространственной доли события, считается слишком строгим и применяемым "по инерции" вслед за рекомендациями авторов [64]. Имеются специфические особенности в поведении данного показателя, описанные, например, в статье [58]. В некоторых ситуациях, в частности при уменьшении пространственной доли прогнозируемого явления, показатель может вырождаться (в 0 или 1) в зависимости от приграничного расположения областей осадков или же устремиться к оценке доли попаданий ("предупрежденности"), как и упомянутый выше критерий Пирса – Обухова. Такого рода ситуации критичны при принятии решений, цена которых для конкретного пользователя зависит не столько от успеха попадания, сколько от серьезности "пропуска цели".

Заключение

В силу влияния на самые разные сферы человеческой деятельности порывы ветра наряду с осадками относятся к наиболее широко востребованным объектам погодного наукастинга. Особый интерес при этом представляют явления, связанные с процессами активной конвекции, к числу которых относятся шквалистые усиления ветра.

Проблематика наукастинга порывов ветра весьма обширна и многоаспектна. В настоящем обзоре затрагиваются вопросы терминологии, наблюдательной базы, статистического описания, моделирования и прогнозирования, а также особенностей верификации порывов ветра.

Список литературы

1. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
2. Анапольская Л.Е. Режим скоростей ветра на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 200 с.
3. Васильев Е.В. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов на Европейской территории России: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 186 с.
4. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М.: Изд-во МГУ, 2006. 101 с.
5. ВМО-№ 471. Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию. 2024. 92 с.
6. ВМО-№ 8. Руководство по приборам и методам наблюдений. Том 1. Измерения метеорологических переменных. 2021. 675 с.
7. Зверев А.С. Синоптическая метеорология: Издание 2-е. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 711 с.
8. ИКАО-2018. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение международной авиации. ИКАО, 2018. 230 с.
9. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: Гидрометцентр России, 2021. 90 с.
10. Климат России / Под ред. Н.В. Кобышева. СПб.: Гидрометиздат, 2001. 656 с.
11. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: Третья редакция. М.: Росгидромет; ЦАО, 2019. 129 с. Available at: <https://method.meteorf.ru>
12. Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормоповещения и метеобеспечения авиации. СПб.: Главная геофизическая обсерватория, 2013. 137 с.
13. Методическое пособие. Разработка прогнозов текущей погоды и сверхкраткосрочных прогнозов с использованием современных систем наблюдения за атмосферой и продукции численных моделей. 2018. 96 с. Available at: <https://method.meteorf.ru>
14. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды Геофизического института АН СССР. 1954. № 24 (151). С. 163-187.
15. Муравьев А.В., Киктев Д.Б. Качество, предсказуемость и полезность в задачах радиолокационного наукастинга осадков // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 93-107.
16. Муравьев А.В., Киктев Д.Б., Смирнов А.В. Оценка радиолокационного наукастинга полей осадков // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 3 (389). С. 6-58.
17. Переходцева Э.В. Гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации опасных явлений в летний период с заблаговременностью 12–36 ч по выходным данным региональной модели для ЕТР // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2013. Информационный сборник № 40. С. 170-181.
18. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С («ГИМЕТ-2010»): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Правообладатель: ФГБУ «ЦАО», номер регистрации: 2018665447, дата регистрации: 05.12.2018.
19. РД 52.27.284–1991 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Госгидромет СССР, 1991. 151 с.
20. РД 52.27.724–2019 Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: Гидрометцентр России, 2019. 66 с.
21. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. В 3 т. СПб.: Летний сад, 2008–2009. 336, 312, 216 с.
22. Сеттон О.Г. Микрометеорология: исследование физических процессов в нижних слоях атмосферы: Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1958. 355 с.

23. *Смирнова М.М.* Влияние данных измерений содаров и температурных профилеметров на качество численного прогноза характеристик атмосферного пограничного слоя: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2014. 111 с.
24. *Халтинер Д., Мартин Ф.* Динамическая и физическая метеорология. М.: ИЛ, 1960. 434 с.
25. *Хромов С.П.* Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 690 с.
26. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 570 с.
27. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
28. *Шолле Ф.* Глубокое обучение на R. СПб.: Питер, 2018. 400 с.
29. *Agustsson H., Olafsson H.* Mean gust factors over complex terrain // *Meteorol. Z.* 2004. Vol. 13. P. 149-155.
30. *Bechthold P., Bidlot J.* Parameterization of convective gusts // *ECMWF Newsletter.* 2009. No. 119. P. 15-18.
31. *Beljaars A.C.M.* The influence of sampling and filtering on measured wind gusts // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1987. Vol. 4. P. 613-626.
32. *Boetcher F., Renner C., Waldl H.-P., Peinke J.* On the statistics of wind gusts. arXiv:physics/0112063v2 [physics.ao-ph] 20 Dec 2001.
33. *Born K., Ludwig P., Pinto J.G.* Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view // *Tellus A: Dynamic Meteor. Oceanogr.* 2012. Vol. 64, no. 1. P. 17471. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17471.
34. *Brasseur O.* Development and application of a physical approach to estimating wind gusts // *Mon. Wea. Rev.* 2001. Vol. 129. P. 5-25.
35. *Brown B.G., Gilleland E., Ebert E.E.* Forecasts of spatial fields / I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds) // *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, 2nd ed. Wiley, 2012. P. 95-117.
36. *Coburn J., Pryor S.C.* Do Machine Learning Approaches Offer Skill Improvement for Short-Term Forecasting of Wind Gust Occurrence and Magnitude? // *Wea. Forecasting.* 2022. Vol. 37. P. 525-543.
37. *Cripps E., Dunsmuir W.T.M.* Modeling the Variability of Sydney Harbor Wind Measurements // *Jour. Appl. Meteor.* 2003. Vol. 42. P. 1131-1138.
38. *Davis C.A., Brown B.G., Bullock R.G.* Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas // *Mon. Wea. Rev.* 2006. Vol. 134. P. 1772-1784.
39. *Drobinski P., Coulais C., Jourdiere B.* Surface Wind-Speed Statistics Modelling: Alternatives to the Weibull Distribution and Performance Evaluation // *Boundary-Layer Meteorology.* 2015. Vol. 157. P. 97-123.
40. *Durst C.D.* Wind speeds over short periods of time // *Meteorol. Mag.* 1960. Vol. 89. P. 181-186.
41. ECMWF. IFS Documentation – Cy47r3. Part IV. Physical processes. 2021.
42. ECMWF. IFS Documentation – Cy48r1. Part IV. Physical processes. 2023.
43. *Emeis S.* Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Springer. 2018. 276 p.
44. *Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed.* / I. Jolliffe, D. Stephenson (Eds.). John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.
45. *Franklin T., Lombardo F.T., Main J.A., Simiu E.* Automated extraction and classification of thunder storm and non-thunder storm wind data for extreme-value analysis // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 2009. Vol. 97. P. 120-131.
46. *Fujita T.T.* Manual of downburst identification for project NIMROD // *SMRP Research Paper* 156. May 1978. 111 p.
47. Glossary of meteorology (USA). 2024. <https://glossary.ametsoc.org>
48. *Harris I.* Generalised Pareto methods for wind extremes. Useful tool or mathematical mirage? // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2005. Vol. 93. P. 341-360.

49. Hogan R.J., Ferro C.A.T., Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Equitability revisited: why the “equitable threat score” is not equitable // *Wea. Forecasting*. 2010. No. 25. P. 710-726.
50. Joe P., Dance S., Lakshmanan V. et al. Automated Processing of Doppler Radar Data for Severe Weather Warnings / *Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar and Other Advanced Applications*. 2012. P. 33-75. DOI: 10.5772/39058.
51. Karniadakis G.E., Kevrekidis I.G., Lu L. et al. Physics-informed machine learning // *Nat. Rev. Phys.* 2021. Vol. 3. P. 422-440. DOI: 10.1038/s42254-021-00314-5.
52. Kislov A., Matveeva T. An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2016. Vol. 6. P. 205-223.
53. Kretzschmar R., Eckert P., Cattani D., Eggimann F. Neural network classifiers for local wind prediction // *J. Appl. Meteor.* 2004. Vol. 43. P.727-738.
54. Kuster C.M., Bowers B.R., Carlin J.T., Schuur T.J., Brogden J.W., Toomey R., Dean A. Using KDP Cores as a Downburst Precursor Signature // *Wea. Forecasting*. 2021. Vol. 36. P. 1183-1198.
55. Le Guen V., Thome N. Disentangling Physical Dynamics From Unknown Factors for Unsupervised Video Prediction / 2020 IEEE-CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). P. 11471-11481. DOI: 10.1109/cvpr42600.2020.01149.
56. Mazzarella D.A. An inventory of specifications for wind-measuring instruments // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1972. Vol 53. P. 860-871.
57. Medina B.L., Carey L.D., Amiot C.G., Mecikalski R.M., Roeder W.M., McNamara T.M., Blakeslee R.J. A Random Forest Method to Forecast Downbursts Based on Dual-Polarization Radar Signatures // *Remote Sens.* 2019. Vol. 11, no. 826. P. 1-17.
58. Mittermaier M.A. “Meta” Analysis of the Fractions Skill Score: The Limiting Case and Implications for Aggregation // *Mon. Wea. Rev.* 2021. Vol. 149. P. 3491-3504.
59. Mohr S., Kunz K., Richter A., Ruck B. Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2017. Vol. 17. P. 957-969.
60. Nielsen N.W., Petersen C. Calculation of wind gusts in DMI-HIRLAM. Danish Meteorological Institute. Copenhagen // *Scientific Report 01-03*. 2001. 38 p.
61. Palutikof J.P., Brabson B.B., Lister D.H., Adcock S.T. A review of methods to calculate extreme wind speeds // *Meteorol. Appl.* 1999. Vol. 6. P. 119-132
62. Rice S.O. Mathematical analysis of random noise // *Bell Sys. Tech. J.* 1944. Vol. 23. P. 282-332.
63. Rice S.O. Mathematical analysis of random noise // *Bell Sys. Tech. J.* 1945. Vol. 24. P. 46-156.
64. Roberts N., Lean H. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high resolution forecasts of convective events // *Mon. Wea. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 78-97.
65. Sallis P.J., Cluster W., Hernandez S. A machine learning algorithm for wind gust prediction // *Comput. Geosci.* 2011. Vol. 37. P. 1337-1344.
66. Schättler U., Doms G., Schraf C. Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part VII. User’s Guide. COSMO 6.00. 2016. 194 p.
67. Schulz B., Lerch S. Machine learning methods for postprocessing ensemble forecasts of wind gusts: A systematic comparison. Karlsruhe Institute of Technology. Heidelberg Institute for Theoretical Studies. arXiv:2106.09512v1 [stat.ML] 17 Jun 2021.
68. Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts // *COSMO Newslett.* 2003. Vol. 3. P. 221-225.
69. Seregina L., Haas R., Born K., Pinto J. Development of a wind gust model to estimate gust speeds and their return periods // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2014. Vol. 66. P. 1-15.
70. Sheridan P. Review of techniques and research for gust forecasting and parameterisation // *Forecasting Research Technical Report 570*. April 2011. 22 p.
71. Sheridan P. Current gust forecasting techniques, developments and challenges // *Adv. Sci. Res.* 2018. Vol. 15. P. 159-172.
72. Suomi I., Gryning S.-E., Floors R., Vihmaa T., Fortelius C. On the vertical structure of wind gusts // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141. P.1658-1670.

73. *Suomi I., Vihma T.* Wind Gust Measurement Techniques – From Traditional Anemometry to New Possibilities // *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 1-27.
74. *Taylor J.W., McSharry P.E., Buizza R.* Wind Power Density Forecasting Using Ensemble Predictions and Time Series Models // *ECMWF Technical Memorandum 553*. February 2008. 17 p.
75. *Thorarinsdottir T.L., Johnson M.S.* Probabilistic Wind Gust Forecasting Using Nonhomogeneous Gaussian Regression // *Mon. Wea. Rev.* 2012. Vol. 140. P. 889-897.
76. *Tüchler L.* Nowcasting of thunderstorm downdraft winds using weather radar data in ZAMG. 2022. 16 p. https://resources.eumetrain.org/data/6/668/wind_ew_2022_s2b.pdf
77. *Wieringa J.* Gust factors over open water and built up country // *Bound. Layer Meteor.* 1973. Vol. 3. P. 24-441.
78. *Wyngaard J.C.* Toward Numerical Modeling in the “Terra Incognita” // *Jour. Atm. Sci.* 2004. Vol. 61. P. 1816-1826.
79. *Xiao H., Wang Y., Zheng Y., Zheng Y., Zhuang X., Wang H., Gao M.* Convective-gust nowcasting based on radar reflectivity and a deep learning algorithm // *Geosci. Model Dev.* 2023. Vol. 16. P. 3611-3628.
80. *Yamaguchi A., Ishihara T.* Short term gust forecasting by using numerical weather prediction and multi timescale nonparametric regression model // *The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, December 10–14, 2013, Chennai, India. DOI: 10.3850/978-981-07-8012-8_207.

References

1. *Alekseeva A.A.* A method of forecasting severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2014, vol. 39, no. 9, pp. 569-576. DOI: 10.3103/S1068373914090015.
2. *Anapol'skaja L.E.* Rezhim skorostej vetra na territorii SSSR. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1961, 200 p. [in Russ.].
3. *Vasil'ev E.V.* Usloviya vozniknoveniya i kratkosrochnyj prognoz sil'nyh shkalvalov na Evropejskoj territorii Rossii: Dis. ... kand. geogr. nauk. Moscow, 2009, 186 p. [in Russ.].
4. *Vel'tishhev N.F., Stepanenko V.M.* Mezometeorologicheskie processy. Moscow, MSU publ., 2006, 101 p. [in Russ.].
5. *WMO-No. 471.* Guide to Marine Meteorological Services. 3-d edition. WMO, Geneva, 2001, 156 p.
6. *WMO-No. 8.* Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Volume I – Measurement of Meteorological Variables, 2021, 584 p.
7. *Zverev A.S.* Sinopticheskaja meteorologija: Izdanie vtoroe. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1977, 711 p. [in Russ.].
8. *IKAO-2005.* Manual on Low-level Wind Shear. International Civil Aviation Organization. Doc 9817. AN/449, 2005, 213 p.
9. *Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Yu.* Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov. Moscow, Gidrometcentr Rossii publ., 2021, 94 p. [in Russ.].
10. *Klimat Rossii [The climate of Russia].* Red. N.V. Kobysheva. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2001, 656 p. [in Russ.].
11. *Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniju informacii dopplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S v sinopticheskoy praktike: Tret'ja redakcija.* Moscow, Rosgidromet, CAO, 2019, 129 p. Available at: method.meteorf.ru/norma/document/dop_3red [in Russ.].
12. *Metodicheskie ukazaniya po proizvodstvu meteorologicheskikh radiolokacionnyh nablyudenij na DMRL-S na seti Rosgidrometa v celyah shtormoopoveshcheniya i meteobespecheniya aviacii.* Saint Petersburg, Glavnaya geofizicheskaya observatoriya publ., 2013, 137 p. [in Russ.].
13. *Metodicheskoe posobie. Razrabotka prognozov tekushchey pogody i sverhkratkosrochnnyh prognozov s ispol'zovaniem sovremennyh sistem nablyudeniya za atmosferoy i produkcii chislennyh modeley.* Moscow, Rosgidromet, 2018, 96 p. [in Russ.].
14. *Monin A.S., Obuhov A.M.* Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery. *Trudy Geofizicheskogo Institutata AN SSSR*, 1954, vol. 151, no. 24, pp.163-187 [in Russ.].

15. Muravev A.V., Kiktev D.B. Quality, Predictability, and Utility in Radar Precipitation Nowcasting Applications. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2024, vol. 49, no. 7, pp. 627-637. DOI: 10.3103/S1068373924070070.
16. Muravev A.V., Kiktev D.B., Smirnov A.V. Verification of the radar precipitation nowcasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2023, vol. 389, no. 3, pp. 6-58 [in Russ.].
17. Perekhodceva E.V. Gidrodinamiko-statisticheskiy metod prognoza shkvalov i ochen' sil'nogo vetra v gradacii opasnyh yavleniy v letniy period s zablagovremennost'yu 12-36 ch po vyhodnym dannym regional'noy modeli dlya ETR. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Informatsionnyy sbornik, 2013, vol. 40, pp. 170-181 [in Russ.].
18. Programmnyy kompleks vtorichnoy obrabotki informatsii doplerovskogo meteorologicheskogo radiolokatora DMRL-S («GIMET-2010»): Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Pravoobladatel': FGBU «CAO», nomer registratsii: 2018665447, data registratsii: 05.12.2018 [in Russ.].
19. RD 52.27.284–91. Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov. Moscow, Gosgidromet SSSR publ., 1991, 151 p. [in Russ.].
20. RD 52.27.724-2019 Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshhego naznacheniya. Moscow, Gidrometcentr Rossii publ., 2019, 66 p. [in Russ.].
21. Rossiyskiy gidrometeorologicheskii enciklopedicheskiy slovar'. V 3 t. Saint Petersburg, Letniy sad publ., 2008–2009, 336, 312, 216 p. [in Russ.].
22. Sutton O.G. *Micrometeorology*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.
23. Smirnova M.M. Vliyanie dannykh izmereniy sodarov i temperaturnykh profilemerov na kachestvo chislenogo prognoza karakteristik atmosfernogo pogranichnogo sloja: Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Moscow, 2014, 111 p. [in Russ.].
24. Haltiner D., Martin F. *Dynamical and physical meteorology*. New York, Toronto, London, 1957.
25. Hromov S.P. *Osnovy sinopticheskoy meteorologii*. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1948, 690 p. [in Russ.].
26. Hromov S.P., Mamontova L.I. *Meteorologicheskij slovar'*: Izdanie tret'e. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1974, 570 p. [in Russ.].
27. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh usloviy dlja aviatsii. Moscow, Triada ltd publ., 2016, 312 p. [in Russ.].
28. Shollet F. *Deep learning with R*. Manning Publications, 2017, 341 p.
29. Agustsson H., Olafsson H. Mean gust factors over complex terrain. *Meteorol. Z.*, 2004, vol. 13, pp. 149-155.
30. Bechthold P., Bidlot J. Parameterization of convective gusts. ECMWF Newsletter, 2009, no. 11, pp. 15-18.
31. Beljaars A.C.M. The influence of sampling and filtering on measured wind gusts, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1987, vol. 4, pp. 613-626.
32. Boetcher F., Renner C., Waldl H.-P., Peinke J. On the statistics of wind gusts. arXiv:physics/0112063v2 [physics.ao-ph] 20 Dec 2001.
33. Born K., Ludwig P., Pinto J.G. Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view. *Tellus A: Dynamic Meteor. Oceanogr.*, 2012, vol. 64, no. 1, pp. 17471. DOI: 10.3402/tellusa.v64i0.17471.
34. Brasseur O. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, vol. 129, pp. 5-25.
35. Brown B.G., Gilleland E., Ebert E.E. Forecasts of spatial fields / I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds). *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, 2nd ed. Wiley, 2012, pp. 95-117.
36. Coburn J., Pryor S.C. Do Machine Learning Approaches Offer Skill Improvement for Short-Term Forecasting of Wind Gust Occurrence and Magnitude? *Wea. Forecasting*, 2022, vol. 37, pp. 525-543.

37. Cripps E., Dunsmuir W.T.M. Modeling the Variability of Sydney Harbor Wind Measurements. *Jour. Appl. Meteor.*, 2003, vol. 42, pp. 1131-1138.
38. Davis C.A., Brown B.G., Bullock R.G. Object-based verification of precipitation forecasts, Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, vol. 134, pp. 1772-1784.
39. Drobinski P., Coulais C., Jourdir B. Surface Wind-Speed Statistics Modelling: Alternatives to the Weibull Distribution and Performance Evaluation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, vol.157, pp. 97-123.
40. Durst C.D. Wind speeds over short periods of time. *Meteorol. Mag.*, 1960, vol. 89, pp. 181-186.
41. ECMWF. IFS Documentation – Cy47r3. Part IV. Physical processes. 2021.
42. ECMWF. IFS Documentation – Cy48r1. Part IV. Physical processes. 2023.
43. Emeis S. Atmospheric Physics for Wind Power Generation. Springer, 2018, 276 p.
44. Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide: Second Ed. / I. Jolliffe, D. Stephenson (Eds.). John Wiley & Sons Ltd, 2012, 274 p.
45. Franklin T., Lombardo F.T., Main J.A., Simiu E. Automated extraction and classification of thunder storm and non-thunder storm wind data for extreme-value analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, vol. 97, pp. 120-131.
46. Fujita T.T. Manual of downburst identification for project NIMROD. SMRP Research Paper 156. May 1978, 111 p.
47. Glossary of meteorology (USA). 2024. Available at: <https://glossary.ametsoc.org>.
48. Harris I. Generalised Pareto methods for wind extremes. Useful tool or mathematical mirage? *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2005, vol. 93, pp. 341-360.
49. Hogan R.J., Ferro C.A.T., Jolliffe I.T., Stephenson D.B. Equitability revisited: why the “equitable threat score” is not equitable. *Weather Forecast*, 2010, no. 25, pp. 710-726.
50. Joe P., Dance S., Lakshmanan V. et al. Automated Processing of Doppler Radar Data for Severe Weather Warnings / Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar and Other Advanced Applications, 2012, pp. 33-75. DOI: 10.5772/39058.
51. Karniadakis G.E., Kevrekidis I.G., Lu L. et al. Physics-informed machine learning. *Nat. Rev. Phys.*, 2021, vol. 3, pp. 422-440. DOI: 10.1038/s42254-021-00314-5.
52. Kislov A., Matveeva T. An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2016, vol. 6, pp. 205-223.
53. Kretschmar R., Eckert P., Cattani D., Eggmann F. Neural network classifiers for local wind prediction. *J. Appl. Meteor.*, 2004, vol. 43, pp. 727-738.
54. Kuster C.M., Bowers B.R., Carlin J.T., Schuur T.J., Brogden J.W., Toomey R., Dean A. Using KDP Cores as a Downburst Precursor Signature. *Wea. Forecasting*, 2021, vol. 36, pp. 1183-1198.
55. Le Guen V., Thome N. Disentangling Physical Dynamics From Unknown Factors for Unsupervised Video Prediction /2020 IEEE-CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 11471-11481. DOI: 10.1109/cvpr42600.2020.01149.
56. Mazzarella D.A. An inventory of specifications for wind-measuring instruments. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1972, vol 53, pp. 860-871.
57. Medina B.L., Carey L.D., Amiot C.G., Mecikalski R.M., Roeder W.M., McNamara T.M., Blakeslee R.J. A Random Forest Method to Forecast Downbursts Based on Dual-Polarization Radar Signatures. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 826, pp. 1-17.
58. Mittermaier M.A. “Meta” Analysis of the Fractions Skill Score: The Limiting Case and Implications for Aggregation. *Mon. Wea. Rev.*, 2021, vol. 149, pp. 3491-3504.
59. Mohr S., Kunz K., Richter A., Ruck B. Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 17, pp.957-969.
60. Nielsen N.W., Petersen C. Calculation of wind gusts in DMI-HIRLAM. Danish Meteorological Institute. Copenhagen. Scientific Report 01-03, 2001, 38 p.
61. Palutikof J.P., Brabson B.B., Lister D.H., Adcock S.T. A review of methods to calculate extreme wind speeds. *Meteorol. Appl.*, 1999, vol. 6, pp. 119-132
62. Rice S.O. Mathematical analysis of random noise. *Bell Sys. Tech. J.*, 1944, vol. 23, pp. 282-332.

63. Rice S.O. Mathematical analysis of random noise. *Bell Sys. Tech. J.*, 1945, vol. 24, pp. 46-156.
64. Roberts N., Lean H. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, pp. 78-97.
65. Sallis P.J., Cluster W., Hernandez S. A machine learning algorithm for wind gust prediction. *Comput. Geosci.*, 2011, vol. 37, pp. 1337-1344.
66. Schättler U., Doms G., Schraf C. Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part VII. User's Guide. COSMO 6.00. 2016, 194 p.
67. Schulz B., Lerch S. Machine learning methods for postprocessing ensemble forecasts of wind gusts: A systematic comparison. Karlsruhe Institute of Technology. Heidelberg Institute for Theoretical Studies. arXiv:2106.09512v1 [stat.ML] 17 Jun 2021.
68. Schulz J.-P., Heise E. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts. *COSMO Newslett*, 2003, vol. 3, pp. 221-225. Available at: www.cosmo-model.org
69. Seregina L., Haas R., Born K., Pinto J. Development of a wind gust model to estimate gust speeds and their return periods. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014, vol. 66, pp. 1-15.
70. Sheridan P. Review of techniques and research for gust forecasting and parameterization. *Forecasting Research Technical Report 570*, April 2011, 22 p.
71. Sheridan P. Current gust forecasting techniques, developments and challenges. *Adv. Sci. Res.*, 2018, vol. 15, pp. 159-172.
72. Suomi I., Gryning S.-E., Floors R., Vihmaa T., Fortelius C. On the vertical structure of wind gusts. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 141, pp. 1658-1670.
73. Suomi I., Vihma T. Wind Gust Measurement Techniques – From Traditional Anemometry to New Possibilities. *Sensors*. 2018, vol. 18, pp. 1-27.
74. Taylor J.W., McSharry P.E., Buizza R. Wind Power Density Forecasting Using Ensemble Predictions and Time Series Models. ECMWF Technical Memorandum 553. February 2008. 17 p.
75. Thorarinsdottir T.L., Johnson M.S. Probabilistic Wind Gust Forecasting Using Nonhomogeneous Gaussian Regression. *Mon. Wea. Rev.*, 2012, vol. 140, pp. 889-897.
76. Tüchler L. Nowcasting of thunderstorm downdraft winds using weather radar data in ZAMG, 2022, 16 p. Available at: https://resources.eumetrain.org/data/6/668/wind_ew_2022_s2b.pdf
77. Wieringa J. Gust factors over open water and built up country. *Bound. Layer Meteor.*, 1973, vol. 3, pp. 24-441.
78. Wyngaard J.C. Toward Numerical Modeling in the "Terra Incognita". *Jour. Atm. Sci.*, 2004, vol. 61, pp. 1816-1826.
79. Xiao H., Wang Y., Zheng Y., Zheng Y., Zhuang X., Wang H., Gao M. Convective-gust nowcasting based on radar reflectivity and a deep learning algorithm. *Geosci. Model Dev.*, 2023, vol. 16, pp. 3611-3628.
80. Yamaguchi A., Ishihara T. Short term gust forecasting by using numerical weather prediction and multi timescale nonparametric regression model // The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, December 10–14, 2013, Chennai, India. DOI: 10.3850/978-981-07-8012-8 207.

Поступила 27.08.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;
принята в печать 15.10.2025.

Submitted 27.08.2025; approved after reviewing 01.10.2025;
accepted for publication 15.10.2025.