УДК 551.55, 551.510.522, 551.506.3, 551.515.8 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-108

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШКВАЛОВ, ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ ВЫСОТНУЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКУЮ МАЧТУ В Г. ОБНИНСК В 2014–2023 ГГ.

Н.В. Вазаева[1,2], О.Г. Чхетиани[1], Г.С. Голицын[1], Л.К. Кулижникова[3,1], М.К. Мацкевич[3,1]

[1]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия, vazaevanv@ifaran.ru
[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[3]Научно-производственное объединение “Тайфун”, Калужская область, Обнинск, Россия

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SQUALLS PASSING THROUGH THE OBNINSK'S HIGH-ALTITUDE INSTRUMENTAL TOWER IN 2014–2023

N.V. Vazaeva[1,2], O.G. Chkhetiani[1], G.S. Golitsyn[1], L.K. Kulizhnikova[3,1], M.K. Matskevich[3,1]

[1]A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Moscow, Russia, vazaevanv@ifaran.ru
[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[3]Federal State Budgetary Institution Research and Production Association Typhoon, Obninsk, Kaluzhsky region, Russia

Аннотация. Шквалы — экстремальные погодные явления локального, внезапного характера, вопрос прогнозирования и выяснения причин формирования и развития которых до сих пор остается чрезвычайно актуальным. Шквалы могут обладать большой разрушающей силой и зачастую наносят значительный материальный ущерб, в частности, страдают линии электропередач и связи, повреждаются сельские постройки, нарушается работа точного оборудования и транспорта. Диагностика основных характеристик шквалов, примерная оценка ущерба возможна с использованием большого массива данных по скорости и направлению ветра, полученных с помощью высотной метеорологической мачты (ВММ) Института экспериментальной метеорологии ФГБУ «НПО «Тайфун» за 2014–2024 гг. с достаточной статистической достоверностью. Были получены первые результаты по статистическим распределениям основных диагностических характеристик — скорости, энергии и мощности ветра, — которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов и сопутствующих им когерентных структур; а также оценены масштабы и энергии разрушения экстремальных событий, связанных с резким усилением ветра.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, шквалы, статистические характеристики, данные наблюдений, высотная метеорологическая мачта.

Abstract. Squalls are extreme weather phenomena of a local, sudden nature, the issue of forecasting and elucidating the reasons for the formation and development of which remains extremely relevant. Squalls can have great destructive power and often cause significant material damage, in particular, power and communication lines are defected, rural buildings are damaged, and the operation of precision equipment and transport is disrupted. Diagnostics of the main characteristics of squalls and an approximate assessment of damage is possible using a large array of data on wind speed and direction obtained by the high-altitude instrumental tower of the Institute of Experimental Meteorology of the Federal State Budgetary Institution NPO Typhoon for 2014–2024 with sufficient statistical reliability. The first results were obtained on the statistical distributions of the main diagnostic characteristics - wind velocity, energy and power - which may be associated with the reasons for the formation of squalls and the coherent structures accompanying them; and the scale and destruction energy of such extreme events associated with a sharp increase in wind were assessed.

Keywords: atmospheric boundary layer, squalls, statistical characteristics, observational data, high-altitude meteorological mast.

ВВЕДЕНИЕ

На фоне значительного усиления интенсивности и частоты шквалов на территории России в последние годы чрезвычайно актуальными стали вопросы увеличения точности оперативного прогноза внезапных и локальных шквалов и шквалистых усилений ветра, анализа причин их возникновения и оценке возможного приносимого ими ущерба. Эти вопросы тесно связаны с исследованием основных характеристик шквалов: скорости ветра — резкое усиление которой и являлось, в том числе, критерием выделения шквала, — энергии и мощности, то есть, по сути, третьей и четвертой степени скорости, являющихся индикаторами разрушительной силы, которая, в свою очередь, может привести к ощутимому ущербу экономике и населению. Классификация шквалов по скорости ветра [Хромов и др., 1974; Янькова и др., 2018]: слабые шквалы — 20 м/с, умеренные шквалы — 20–25 м/с, сильные шквалы — 25–30 м/с, особенно сильные шквалы — более 30 м/с. В этой работе мы выделяем и резкие усиления ветра до амплитуды скорости, меньшей 20 м/с.

На основе данных наблюдений, полученных на высотной метеорологической мачте (ВММ) Института экспериментальной метеорологии ФГБУ «НПО «Тайфун» за 2014–2024 гг. с хорошей статистической достоверностью можно выделить три основных группы шквалов [Вазаева и др., 2024]:

1. Шквалы при прохождении нескольких кучево-дождевых облаков днем, внутримассовых или перед холодным фронтом.
2. Шквал на холодном фронте.
3. Резкий шквал, когда скорость увеличивается

от небольшой величины — от 0–6 м/с, — на величину, большую 15 м/с, за время до 5 мин, и с практически вертикальной кривой изменения скорости на части этого промежутка времени.

Непрерывные ряды скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха являлись той базой данных, по которой определялись шквалистые усиления скорости ветра в нижнем 300-метровом слое атмосферы и их характеристики. Своей внезапной универсальностью особенно интересен анализ, соответствующий статистическим распределениям основных диагностических характеристик — скорости и энергии, — которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов и сопутствующих им когерентных структур, а также интерес представляет оценка масштабов и энергий разрушения экстремальных событий, связанных с резким усилением ветра. Первые результаты такого анализа показаны в настоящей работе.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБОРНОЙ БАЗЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для экспериментальной регистрации метеорологических параметров в 2014–2024 гг. приборы были установлены вблизи поверхности земли на метеоплощадке и на 5 уровнях высотной мачты: 25, 73, 121, 217 и 301 м. Скорость, направление ветра и температура воздуха регистрировались с частотой 1 раз в секунду, далее по ним вычислялись средние за 10 сек значения. Кроме пропеллерных датчиков ветра на ряде высот ВММ были установлены также акустические анемометры, измеряющие три компоненты скорости ветра, включая вертикальную составляющую скорости. Такими приборами являлись метеорологический комплекс МК-15 разработки ФГБУ «НПО «Тайфун» и акустический анемометр «Модель 81000V» фирмы R. M. YOUNG COMPANY, США. Подробно приборы описаны в [Вазаева и др., 2024].

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ШКВАЛОВ

С использованием описанных выше данных был проведен статистический анализ, оценены размеры и энергия шквалов. Для всех случаев были рассчитаны: время шквала, время усиления ветра, масштаб шквала, максимальная скорость, средняя скорость, коэффициенты масштаба, энергия, мощность и другие сопутствующие параметры. Степени скорости, в том числе для получения энергии и мощности, оценивались как интегральные значения, посчитанные с учетом шага уже усредненных за 10 сек. значений, методом трапеций. Наиболее интересные результаты показаны на рис. 1–4, в которых значения скорости, максимальной и осредненной, энергии, мощности, масштаба для разных и никак не связанных между собой шквалов, даже без учета деления на группы, ложатся на одну кривую с вероятностью примерно 95–98 %. Авторы предполагают здесь связь с турбулентностью и с субмезомасштабными когерентными структурами.

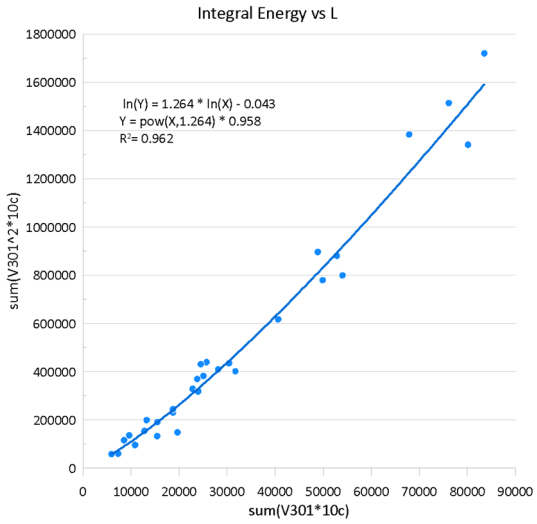

Рис. 1. Зависимость квадрата скорости (энергии) от масштаба шквала

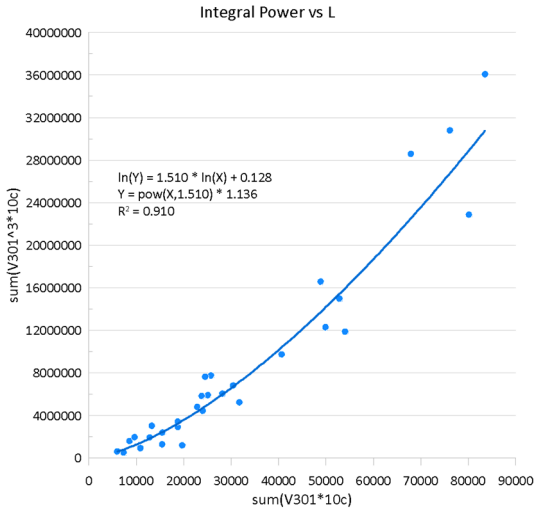

Рис. 2. Зависимость куба скорости от масштаба шквала

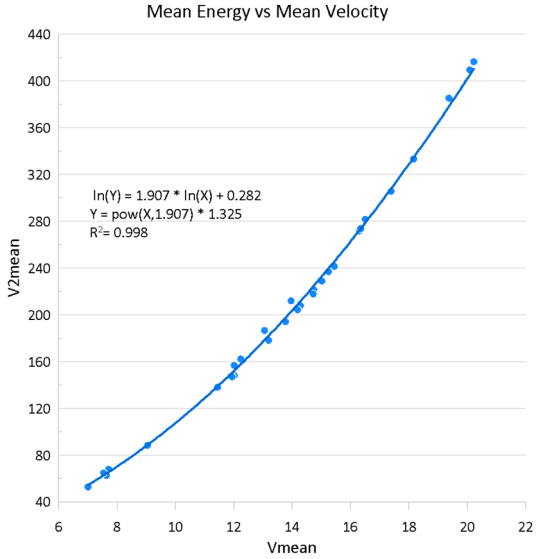

Рис. 3. Зависимость средних значений квадрата скорости (энергии) от осредненной скорости на протяжении всего шквала

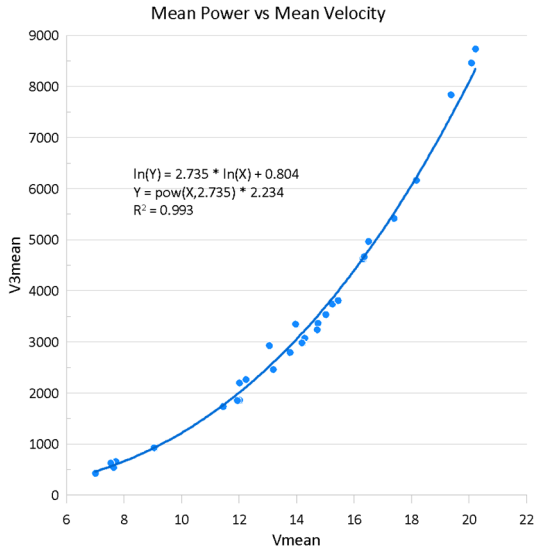

Рис. 4. Зависимость средних значений куба скорости (мощности) от осредненной скорости на протяжении всего шквала

Согласно теории Колмогорова А.Н. [Kolmogorov, 1934], квадрат скорости может быть получен $v^2 = c_1*eps*t_1$, где $c_1<1$, откуда $eps = v^2 / c_1*t_1$, где используется осредненная скорость, а площадь может быть выражена $s = c_3*eps*t^3$, где c_3 находится в диапазоне 10–14, откуда можем получить оценку поперечного масштаба, который мы не можем померить с помощью лишь одной мачты, $l = (c_3/c_1)^{1/2} * v * t$, а отношение $(c_3/c_1)^{1/2} = ((10\text{-}14) / 1)^{1/2}$ примерно равно 3–4. То есть поперечные размеры шквалов в среднем могут быть больше в 3–4 раза. Для выводов окончательного соотношения можно воспользоваться результатами численного моделирования, например, сделанного Вазаевой и др. [2024] — где пространственные размеры в самом деле отличаются в несколько раз, для получения же более статистически обоснованной информации предполагается использовать большее количество частных случаев. По размерам шквалов можно оценить энергию разрушений через их характерные времена и форсинги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирован большой массив данных, полученных по шквалам и шквалистым усилениям ветра, проходящим через высотную метеорологическую мачту в Обнинске. Детально проведена статистическая обработка случаев всех трех выделенных авторами ранее групп шквалов, зафиксированных на ВММ НПО «Тайфун» в 2014–2024 гг.

Статистическая обработка случаев со шквалами и смерчами (при скоростях ветра 25 м/с и более) ранее позволила выявить некоторые закономерности их возникновения [Грищенко, 2009], таких, как частота возникновения и районы, наиболее подверженные угрозе этих опасных явлений. Но точность и заблаговременность прогноза оставались недостаточными и до сих пор требуют дальнейшего изучения.

В настоящей работе показаны первые результаты анализа статистических распределений скорости, энергии и мощности, которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов. Показано, что для разных и не связанных между собой событий усиления ветра, значения скорости, максимальной скорости и осредненной, энергии, мощности, масштаба, ложатся на одну кривую с вероятностью 95–98 %. Получена оценка масштабов и энергий разрушения исследуемых экстремальных событий. Используя теорию Колмогорова А.Н. [Kolmogorov, 1934], оценка поперечного масштаба шквала, который мы не можем померить с помощью лишь одной мачты, в среднем больше продольного в 3–4 раза.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ (проект № 23-17-00273).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вазаева Н.В., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Диагностика шквалов при прохождении через высотную метеорологическую мачту в г. Обнинск в 2014–2023 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. (в печати).

Грищенко И.В. Шквалы и смерчи на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Вестник поморского университета. Сер: Естественные науки. 2009. № 4. С. 5–10.

Хромов С.П. Метеорологический словарь / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. 3-е издание переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеоиздат. 1974. 568 с.

Янькова Ю.С. и др. Шквалы на территории Иркутской области // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития. 2018. С. 54–61.

Kolmogorov A.N. Zufallige Bewegungen // Annals of Mathematics. 1934. V. 35. P. 116–117.