УДК 551.55, 551.510.522, 551.506.3, 551.515.8

# ДИАГНОСТИКА ШКВАЛОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОТНУЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКУЮ МАЧТУ В г. ОБНИНСК В 2014–2023 гг.

© 2024 г. Н.В. Вазаева<sup>*a,b,\**</sup>, Л.К. Кулижникова<sup>*c,a*</sup>, М.К. Мацкевич<sup>*c,a*</sup>

<sup>а</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Пыжевский пер. 3, 109017 Россия <sup>b</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, 105005 Россия <sup>c</sup>Научно-производственное объединение "Тайфун", Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4, 249038 Россия

\**e-mail: vazaevanv@ifaran.ru* Поступила в редакцию 20.09.2023 г. После доработки 07.05.2024 г. Принята к публикации 29.05.2024 г.

За счет своего локального, внезапного характера, осложняющего прогноз, шквалы зачастую наносят значительный материальный ущерб и относятся к экстремальным погодным явлениям. Диагностика шквалов и увеличение точности моделирования для усовершенствования их оперативного прогнозирования имеет высокую актуальность. Определение основных характеристик шквалов с помощью диагностики частных случаев и анализа таких случаев представляет большой интерес для установления причин возникновения экстремальных явлений, которые до сих пор нелостаточно изучены. Источником получения первичной информации о характеристиках шквалов является обработка большого массива данных наблюдений высотной метеорологической мачты (ВММ) Института экспериментальной метеорологии ФГБУ "НПО "Тайфун", представленных в настоящей статье за 2014-2023 гг. Такие экспериментальные данные по ряду долгосрочных наблюдений на ВММ позволили после обработки и анализа полей скорости зафиксировать интенсивные шквалы, проходящие через полигон. Были получены и проанализированы основные характеристики этих частных случаев шквалов, часть из которых одновременно моделировалась с использованием негидростатической мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW, адаптированной для района наблюдений, а также была проведена верификация с данными натурных экспериментов. Показано хорошее соответствие модельных результатов и данных наблюдений для частного случая шквалов.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, шквалы, диагностика, данные наблюдений, высотная метеорологическая мачта, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0002351524040036 EDN: JHJLBI

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в современном мире, вследствие климатических изменений, ведущих к изменениям общей картины атмосферной циркуляции, наблюдается усиление интенсивности и увеличение частоты шквалов на территории России. Шквалы – резкое усиление ветра в течение короткого времени, сопровождающееся изменениями его направления; скорость ветра при шквале нередко превышает 20-30 м/с (средняя скорость ветра не менее 20 м/с, на побережье морей и в горных районах не менее 25 м/с. Мгновенная скорость ветра (порыв) не менее 25 м/с, на побережье морей и в горных районах не менее 30 м/с) [Хромов, 1974]. Это экстремальное явление представляет особую опасность за счет своего локального, внезапного характера, осложняющего прогноз. Шквал обычно длится несколько минут,

захватывает узкую полосу в несколько сотен метров, но обладает значительной разрушительной силой, наносящей ощутимый ущерб экономике и населению, в частности, страдают линии электропередач и связи, повреждаются сельские постройки, нарушается работа точного оборудования и транспорта, в особенности, авиационного. Скорость ветра при шквале достигает разрушительной силы. Классификация шквалов по скорости ветра [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. Кроме того, шквалы, как правило, сопровождаются осадками в виде ливневого дождя и града, либо пыльными бурями – в зависимости от состояния поверхности почвы и предшествующих метеорологических условий: температуры и влажности. Кроме очевидной разрушительности скоростей ветра в 20-30 м/с более умеренные шквалистые усиления ветра не менее опасны. Так, для авиации опасность представляет встречный шквал в 15 м/с, а боковой шквал «всего» в 8 м/с [Ленская и Абдуллаев, 2005]. Было установлено [Песков и Снитковский, 1968; Васильев и др., 2009], что вероятность возникновения шквалов и скорость ветра тесно связаны с обменом количеством движения между нисходящим потоком воздуха в кучево-дождевом облаке и нижней половины тропосферы, существенное влияние на формирование шквалов оказывает рельеф. Поэтому при моделировании нам будут особенно важны поля скорости ветра, температуры, влажности. Известно [Янькова и др., 2018; Алексеева, 2019], что шквалы связаны с конвективной деятельностью, однако закономерности формирования, развития и прогноз шквалов до сих пор изучены недостаточно, и проблема остается актуальной. Статистическая обработка случаев со шквалами и смерчами (при скоростях ветра 25 м/с и более) позволила выявить некоторые закономерности возникновения этих опасных явлений [Грищенко, 2009], таких, как частота их возникновения и районы, наиболее подверженные угрозе этих опасных явлений. Но точность и заблаговременность прогноза остаются недостаточными и требуют дальнейшего изучения. В [Новицкий и др., 1997], авторы которого имеют большой опыт анализа шквалов, было проведено теоретическое и физическое моделирование мезомасштабных течений (бризы, шквалы, ураганы). Физическое моделирование этих процессов выполнено в лабораторных условиях. Получены данные о полях температуры и скорости фронта гравитационных течений стратифицированных сред при отсутствии и наличии конвекции и конденсационного тепловыделения на фронте, продемонстрирована возможность усиления вертикальных движений при встречном движении фронтов, а также возможность перетекания одного фронта через другой. Шквалы на территории Беларуси изучались, например, в [Волчек, Шпока, 2011]. Проводились исследования шквалов в Архангельской области [Грищенко, 2009] и на Урале [Шихов и др. 2018]. По результатам [Шихов и др, 2018] проведен статистический анализ, всего по спутниковым данным выявлено восемь участков ветровалов на общей площади более 1500 га в Свердловской, Курганской и Тюменской областях. Из них три случая

вызваны шквалами и пять — смерчами. На основе анализа синоптического положения, а также параметров неустойчивости по данным глобальных моделей прогноза погоды GFS/NCEP и GEM/ CMC здесь были установлены основные факторы, способствовавшие возникновению смерчей, и регионы Урала, где с наибольшей вероятностью могут возникать шквалы. Фронтальные шквалы изучались, например, в [Omotosho, 1985], тропические шквалы — в [Lo, Orton, 2016; Wijesekera, Gregg, 1996; Omotosho, 1984].

Изучение причин возникновения шквалов, их оперативный прогноз и учет в долгосрочном градостроительном планировании, повышение точности численного моделирования, требуют разработки и развития инструментов и методов экспериментальных исследований, обработки, анализа и практического использования полученных экспериментальных данных. Развитие населенных пунктов и увеличение численности населения в мегаполисах сопровождается возрастанием уязвимости общества к опасным явлениям погоды, что также налагает повышенные требования к системам атмосферного моделирования.

Одним из способов диагностики шквалов и получения первичной информации об их характеристиках является обработка большого массива данных наблюдений высотной метеорологической мачты (ВММ) Института экспериментальной метеорологии ФГБУ "НПО "Тайфун", представленных в настоящей статье за 2014-2023 гг. Такие экспериментальные данные по ряду долгосрочных наблюдений на ВММ позволили после обработки и анализа полей скорости зафиксировать интенсивные шквалы, проходящие через полигон. Были получены и проанализированы основные характеристики этих частных случаев шквалов, часть из которых одновременно моделировалась с использованием негидростатической мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW, адаптированной для района наблюдений, а также была проведена верификация с данными натурных экспериментов.

Полученные результаты обладают высокой практической значимостью, с ними связаны задачи оценки порывистости и экстремальных значений пульсации ветра в строительной метеорологии для расчета динамической составляющей ветрового напора ветра; задачи метеорологического обеспечения авиации и промышленного рыболовства, задачи получения оценок частоты и повторяемости экстремальных погодных явлений.

## ВММ НПО "ТАЙФУН". ОПИСАНИЕ МАЧТЫ И ИЗМЕРЯЕМЫХ ДАННЫХ

Для получения первичной информации использовалась ВММ Института экспериментальной метеорологии ФГБУ "НПО "Тайфун" [Новицкий и др., 2018]. ВММ относится к группе специализированных высотных метеорологических мачт [Иванов, 1970], предназначена для проведения широкого комплекса метеорологических исследований (312 м, 13 уровней). Основное преимущество такой ВММ в возможности фиксировать структуру шквала в 300-метровом слое, в частности, по структуре поля скорости ветра, по форме усиления ветра, и, в особенности, по вертикальной компоненте скорости ветра в 300-метровом слое во время прохождения кучево-дождевых облаков. В этом слое происходит взлет и посадка самолетов, поэтому существенны сведения о восходящих и нисходящих потоках.

В 2014–2023 годах приборы, измеряющие скорость и направление ветра, а также температуру воздуха были установлены вблизи поверхности земли на метеоплощадке и на 5 уровнях высотной мачты: 25, 73, 121, 217 и 301 м. Метеорологические величины регистрировались с частотой 1 раз в секунду. Далее по ним вычислялись средние за 10 секунд значения. Непрерывные ряды этих величин являлись той базой данных, по которой определялись шквалистые усиления скорости ветра в нижнем 300-метровом слое атмосферы и их характеристики. 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.

По каждому случаю шквалов проведен первичный синоптический анализ. Полная синоптическая ситуация для подробного определения характеристик кучево-дождевых облаков, являющихся одним из триггеров образования шквалов, описывается с помощью кольцевых карт погоды, карт барической топографии, и для настоящей темы исследования не является критичной, вследствие чего в данной статье не приводится.

Комплекс метеорологический МК-15 (Разработка НПО "Тайфун") с анемометрами акустическими предназначен для автоматических измерений вертикальной и горизонтальной скорости ветра, направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления. Принцип действия комплекса МК-15 основан на преобразовании выходных параметров датчиков в цифровой код с последующим вычислением физических значений вертикальной и горизонтальной составляюших скорости ветра, направления горизонтальной составляющей скорости ветра, температуры воздуха на двух уровнях, относительной влажности воздуха, атмосферного давления. Все измеренные параметры визуально отображаются на экране монитора в цифровой и графической формах и хранятся в электронной памяти ПК. Метрологические характеристики комплекса МК-15 приведены в табл. 1. Частота регистрации измерений анемометрами МК-15 составляла 6.25 Гц. Новые модификации метеокомплекса позволяют регистрировать измерения с частотой 10 Гц.

Измеряемые метеорологические параметры	Диапазон измерения	Пределы допускаемой погрешности измерений	
Атмосферное давление с изменяемым началом отсчета в диапазоне от 600 до 917, гПа	150	±0.3	
Скорость ветра, м/с: – горизонтальная составляющая V <sub>r</sub> , – вертикальная составляющая V <sub>в</sub> ,	От 0.2 до 60 От минус10 до +10	$\begin{array}{c} \pm \ (0.2 {+} 0.03 \mathrm{V_{r}}) \\ \pm \ (0.2 {+} 0.03 \mathrm{V_{B}}) \end{array}$	
Направление ветра, градусы	От 0 до 360	±2	
Температура воздуха, °С	От минус 60 до +50	±0.2	
Относительная влажность воздуха,%	От 5 до 100	± 3 − в диапазоне температур свыше 0 °С до +50 ± 5 − в диапазоне температур от минус 40 °С до 0 °С в диапазоне температур ниже минус 40 °С измерент проводятся	

Таблица 1. Метрологические характеристики комплекса МК-15

Градация	Высс	ота, м	Градация	Высота, м		Градация	Высота, м	
Vmax, м/с	8	301	ΔV, м/с	8	301	$\Delta t$ , мин	8	301
≥ 5.0–9.9	32		2.0÷4.9	5	1	$\leq 0.9$	17	11
10.0-14.9	27	7	5.0÷7.9	26	15	1.0÷1.9	14	13
15.0-19.9	5	27	8.0÷9.9	19	12	2.0÷2.9	9	10
20.0-24.9	1	15	10.0÷14.9	14	26	3.0÷3.9	8	9
25.0-29.9		13	15.0÷19.9	1	8	4.0÷4.9	10	4
$\geq$ 30		3	> 20		3	$\geq 5.0$	7	18

**Таблица 2**. Характеристики шквалистых усилений скорости и порывов ветра по измерениям на высотной мачте за 2014–2023 гг. Vmax – максимальная скорость ветра во время шквала;  $\Delta V$  – нарастание скорости ветра при шквале;  $\Delta t$  – время, за которое скорость ветра увеличилась до максимального значения

В 2021 и 2022 гг. на ВММ использовался только один акустический анемометр МК-15, установленный на высоте 217 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. ОБЩИЙ АНАЛИЗ И ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ

Всего в 2014—2023 годах по измерениям на ВММ было зарегистрировано 64 шквалистых усиления скорости ветра. В таблице 2 приведены некоторые характеристики этих шквалов и порывов ветра.

Критерием выделения шквала было выбрано резкое усиление скорости ветра за короткое время. Все отобранные случаи были связаны с прохождением через высотную мачту кучево-дождевых облаков. Облака были или внутримассового происхождения, или связанные с холодным фронтом. В последнем случае скорость ветра во время шквала была выше. Отдельно выделена группа с резкими шквалами, со скоростью, увеличивающейся от небольшой величины – имеющими большой негативный потенциал возлействия на результаты хозяйственной деятельности человека, транспортную и сельскохозяйственную отрасли. Из-за сильной затененности уровня 8 м близко расположенным лесом и городской застройкой скорости ветра на этой высоте не достигали значения шквалов.

По результатам анализа шквалы были поделены на 3 группы:

- 1. Шквалы при прохождении нескольких кучево-дождевых облаков днем, внутримассовых или перед холодным фронтом.
- 2. Шквал на холодном фронте.
- 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.

Внутри первых двух групп случаи шквалов подразделялись по скорости ветра на высоте 301 м: меньше или больше 20 м/с.

Так, **15 марта 2014 г.** при прохождении холодного фронта скорость ветра на высоте 301 м резко возросла от 14 м/с до 31.4 м/с.

**16 апреля 2015 г.** через ВММ проходили последовательно три кучево-дождевых облака. На фоне средней скорости ветра 15–20 м/с скорость на высоте 301 м увеличивалась до 32.1 м/с и 31.0 м/с.

**29 мая 2017 г.** до холодного фронта средняя скорость ветра на 301 м составляла 14—20 м/с. Непосредственно перед шквалом скорость уменьшилась до 12 м/с, а во время шквала в 16:30 ч скорость достигла максимального значения 27 м/с на высоте 217 м.

**21 апреля 2018 г.** максимальная скорость ветраво время шквала на холодном фронте составила 28 м/с на фоне среднем скорости ветра около 14 м/с.

18 октября 2022 г. днем через полигон ВММ проходил холодный атмосферный фронт. С 12:00 до 18:00 часов отмечался умеренно сильный ветер, вызванный большим горизонтальным градиентом давления. На высоте 301 м скорость ветра составляла 15–18 м/с. Скорость ветра во всем 300-метровом слое начала увеличиваться после 8:00 ч и достигла максимума (25.3 м/с на высоте 301 м) в 12:20 ч.

**7 июля 2022 г.** отмечался шквал на холодном участке фронта с кратковременным усилением скорости ветра. На высоте 8 м скорость увеличилась от 0.2 м/с до 9.1 м/с с 16:36 ч до 16:48 ч. На высоте 121 м скорость ветра увеличилась в это же время с 4.6 м/с до 23.2 м/с. Прохождение фронтальной зоны сопровождалось грозой, шквалистым усилением скорости ветра и сильным ливневым дождем. Выпало 18.8 мм осадков.

30 октября 2022 г. район Москвы и Обнинска находился в южной части циклона с центром над



Рис. 1. Анализ синоптической ситуации по приземным картам Гидрометцентра РФ за 04.07.2016, 06:00 ВСВ.

Белым морем. Давление в центре циклона составляло 985 гПа. С 9:00 ч до 15:00 ч через Обнинск проходил холодный фронт этого циклона. По данным метеостанции Малоярославец, расположенной в 12 км к юго-западу от Обнинска, перед фронтом, в 15:00 ч, отмечались ливневые осадки в виде дождя, за фронтом, в 18:00 ч — в виде снега. При прохождении двух кучево-дождевых облаков отмечалось усиление ветра и падение тем-

пературы воздуха. С 17:00 ч до 17:10 ч проходила зона холодного фронта с падением температуры на 3.8°С. Максимальная скорость ветра на первом облаке составила 21.3 м/с на высоте 301 м, а на холодном фронте – 24.2 м/с.

## Случай 2 января 2023 г.

1 и 2 января район Москвы и Обнинска находился под влиянием обширного циклона с центром над Балтийским морем (смещающегося на



Рис. 2. Анализ синоптической ситуации по приземным картам Гидрометцентра РФ за 04.07.2016, 12:00 ВСВ.

#### Н.В. ВАЗАЕВА и др.

Таблица 3. Параметры сетки и выбранные схемы параметризации в модели

Расчетное время	03.07.2016 12:00 BCB-05.07.2016 00:00 BCB				
Количество вложенных сеток	5				
Тип проекции карты	Lambert				
Шаг сетки	1620 м / 540 м / 180 м / 60 м / 20 м				
Количество шагов сетки в направлении север-юг	210 / 211 / 211 / 211 / 211				
Количество шагов сетки в направлении восток-запад	210 / 211 / 211 / 211 / 211				
Количество вертикальных уровней	40 / 40 / 118 / 118 / 118				
Шаг по времени для первой области	9 c				
Длинноволновая и коротковолновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model и Goddard shortwave (Two-stream multi-band scheme)				
Поверхностный слой	Monin-Obukhov (Zilitinkevitch)				
Модель поверхности земли	Noah, (Chen et al., 2001)				
Турбулентности	схема полной диффузии с использованием трехмерного метода Смагоринского и для LES-моделирования – схема простой диффузии с использованием двухмерного метода (коэффициент К определяется только с использованием горизонтальной деформации)				
Микрофизика	Morrison double-Momentum scheme				
Атмосферный пограничный слой	Mellor-Jamada-Janjic scheme (Janjic, 1994, MWR), LES схема				
Эмиссия (сальтационная)	Shao (2011)				
Эмиссия (несальтационная)	Разработанная и внедренная в модель				

юго-восток) и его атмосферных фронтов. 1 января наблюдалось падение давления в течение суток на 8.5 мм рт. ст. (с 742.8 до 734.2 мм рт. ст.) При этом температура росла во всем слое. На 2 м за сутки температура повысилась на 6.5°С (с 0.8°С до 7.3°С). Постепенно ветер усиливался с 13.5 м/с до 20 м/с (на 301 м). 2 января в 02:18 был минимум атмосферного давления - 732.9 мм рт. ст. С 02:25 ч до 02:30 ч наблюдалось увеличение давления на 2 мм. рт. ст. Далее в течение дня давление выросло на 7.9 мм. рт. ст. С 02:24 ч до 02:26 ч скорость на 301 м увеличилась с 16.8 м/с до 31.5 м/с. На 8 м максимум скорости составил 11.3 м/с. В 02:30 ч проходил холодный фронт и далее началась адвекция холода. К 22:00 ч. температура на 2 м опустилась до -3° С.

Шквалы и шквалистые усиления ветра, проанализированные в статье, категорировались в следующем количественном соотношении: 1 группа — 34, 2 группа — 20, 3 группа — 5, и 5 шквалов мы выделяли в особую категорию, которая объединяет две из предложенных групп, либо которые происходят на двух холодных фронтах (как, например, 14.03.2020 г.), либо, как в случае 1 и 2 января 2023 г. образовывались под влиянием обширного циклона с центром над Балтийским морем (смещающегося на юго-восток) и его атмосферных фронтов. Для получения процентного соотношения эти последние особые случаи внесены в группу 2, по присутствующим в этих случаях холодным фронтам. Таким образом, в процентном соотношении получили: 1 группа – 53.125%, 2 группа – примерно 39.692%, 3 группа – 7.813% от всех проанализированных частных случаев.

Ниже приведено подробное описание погодных условий и измеренных величин скорости ветра, температуры воздуха, других характеристик частных случаев шквалов. Частные случаи использовались для верификации адаптированной модели WRF-ARW, которая способна разрешать шквалистый ветер на выбранной территории и ее влияния на гидродинамические потоки. Подробное описание модели приведено в Главе 4 настоящей статьи.

#### Шквал 4.07.2016

Анализ частного случая начинался с синоптической ситуации по приземным картам Гидрометцентра РФ за 04.07.2016, 06:00 ВСВ. Район Москвы и Обнинска находился на южной периферии обширного циклона с основным центром в районе Шпицбергена (см. рис. 1). Вторичный центр циклона без замкнутой изобары располагался северо-западнее Москвы. Он образовался на волне холодного и теплого фронтов. Примерно в 17:00 ч в Обнинске наблюдался сильный



Рис. 3. Измерения вертикального профиля температуры в нижнем 1-километровом слое в Москве, ФГБУ ЦАО. (а) Время измерений с 15:00 3 июля по 12:00 4 июля; (б) время измерений с 12:00 4 июля по 09:00 5 июля. Температура указана цветом в градусах Цельсия, в зависимости от высоты и времени измерений.

ливень и резкое похолодание: на 8° С на высоте 2 м (см. рис. 2). Прошел холодный атмосферный фронт циклона с вторичным центром в районе Санкт-Петербурга.

За день до описываемого частного случая, 03.07.2016 г., Обнинск находится в малоградиентном барическом поле седловины. Кучево-дождевые облака имели внутримассовый характер, т.е. не были связаны с фронтами, а были вызваны конвекцией, которая развилась днем после полудня из-за прогрева поверхности. В 13:54 ч в Обнинске начался ливень, гроза. В 14:01 ливень уже был слабым, а в 14:10 закончился.

Всего в этот день наблюдалось 2 холодных фронта. На первом фронте резкий одиночный шквал с максимальной скоростью ветра 18.9 м/с.

На втором фронте, в 19:00 ч по местному времени общее резкое повышение скорости ветра, с 7 до 14 м/с на высоте 301 м.

Измерения вертикального профиля температуры в нижнем 1-километровом слое в Москве проведены с помощью оборудования компании НПО АТТЕХ [17] и показаны на рисунке 3. Координаты профилемера: ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3 (55°55′32′′ N, 37°31′23′′ Е). По профилю температуры хорошо заметно резкое ее падение в момент прохождения шквала, что позволяет использовать данные этих измерений для дальнейшей верификации численной модели и четкой фиксации момента начала усиления ветра.

Временной ход средних за 10 секунд значений метеопараметров, измеренных на ВММ ФГБУ "НПО "Тайфун" в г. Обнинске, приведен на рисунках 4–8 для, соответственно, температуры воздуха на шести высотах в течение суток, атмосферного давления на высоте 2 м, относительной влажность воздуха на высоте 2 м, скорости ветра (м/с) на пяти высотах, направления ветра в градусах на четырех высотах. Показано изменение характеристик для всех суток и для времени первого шквала, с 15:00 по 19:00 часов по московскому времени.

Осадки по данным наблюдателя на полигоне ВММ: ливневой дождь сильный 16:25–16:31; ливневой дождь умеренный 16:23–16:25, 16:31–16:33, 16:42–16:48; ливневой дождь слабый 16:33–16:42, 16:48-М (продолжался после срока наблюдений); гроза с 16:15 до 17:05; 16:42–16:50 над нами. Сумма осадков с 16:00 до 17:00 ч составила 6.9 мм.

Временной ход средних за 10 секунд значений метеопараметров, измеренных акустическими анемометрами 81000 фирмы Young, США на ВММ ФГБУ "НПО "Тайфун" в г. Обнинске 4 июля 2016 г. показан на рис. 9–12. Показаны значения скорости ветра по компонентам, такая развертка особенно интересна для определения структуры потока и оценки вертикальных размеров шквалов. Данные скорости, замеренные этим прибором, показывают значения, близкие к измеренным с помощью комплекса МК-15.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ WRF-ARW

Для численного моделирования синоптической ситуации и частного случая шквала была

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА



**Рис.** 4. Температура воздуха (°С) на шести высотах в течение суток. По оси X – час суток<br/>t2 – температура на высоте 2 м;<br/>t3 – температура на высоте 73 м;<br/>t9 – температура на высоте 217 м;t1 – температура на высоте 25 м;<br/>t5 – температура на высоте 121 м;<br/>t13 – температура на высоте 301 м.

выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF — Weather Research and Forecasting [Skamarock et al, 2019; Вельтищев и Жупанов, 2010], версия 4.3.3. В частности, модуль WRF-LES для воспроизведения шквалов на сетке с шагом 60 и 20 м. В настоящее время открытая модель WRF является одной из наиболее универсальных и отлаженных открытых систем моделирования атмосферы. На основе этой модели были подобраны граничные и начальные условия, а также выбраны соответствующие параметризации. В дальнейшем предполагается использовать дополнительный химический блок модели WRF-Chem — версии модели WRF, которая позволяет воспроизводить характеристики газовых примесей, аэрозолей и других химических веществ совместно с метеорологическими полями в атмосферном пограничном слое (АПС) [Grell et al, 2005].

Основные параметры модели приведены в таблице 3. Время «разгона» модели – сутки. При расчетах использовались вложенные сетки. По вертикали все области имеют сгущение в пограничном слое. В качестве начальных и граничных данных использованы поля реанализа CFSR второй версии (CFSv2). Начальные данные основных метеорологических характеристик даны на сетке с разрешением: 0,5° x 0,5° для уровней дав-



Рис. 6. Относительная влажность воздуха (%) на высоте 2 м.

hi

15

19



**Рис.** 7. Скорость ветра (м/с) на пяти высотах. v8 – скорость ветра на высоте 8 м. Остальные высоты те же, что для температуры воздуха (см. рис. 4).



**Рис.** 9. Модуль скорости ветра (м/с) на четырех высотах (25, 73, 121 и 265 м).

ления и 0,2° х 0,2° для значений на поверхности по широте и долготе. Временной интервал между начальными полями метеопараметров равен 6 часам. Координаты центра расчетной области соответствуют положению ВММ в Обнинске.

Отметим, что шквалы начинают неплохо воспроизводиться уже на сетках с горизонтальным масштабом около 500 м. Более детальное воспроизведение подобных движений в пограничном слое требует разрешения на порядок больше — хотя бы 60 м по горизонтали. Это возможно сделать в рамках WRF-LES модуля. В этой модели увеличение пространственного разрешения по горизонтальным координатам является более выгодным, чем увеличение вертикального пространственного разрешения.

2024











**Рис.** 11. Модуль скорости (а), вертикальная компонента (б) и 3 компоненты скорости (в) на разных высотах (25, 73, 121 и 265 м) с 15:36 до 16:36.



нента скорости ветра (м/с) на высоте 265 м.

В настоящей работе горизонтальная сетка с пространственным разрешением 60 м уже позволяет получить результаты с достаточной степенью точности, сетка с шагом 20 м детализирует рассчитанные поля метеорологических параметров.

Первый шквал наблюдался в 12:00—14:00 ВСВ. Приведем рассчитанные характеристики шквалов для этого промежутка времени и сравним эти значения с наблюдаемыми на ВММ. Для наглядной визуализации шквалов результаты моделирования приведем в виде полей метеорологических величин для моментов времени: 12:00, 13:00, 14:00 ВСВ для части высот, а также более подробный вывод результатов с 10-минутным шагом для времени 13:00—14:00 ВСВ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШКВАЛОВ 4.07.2016. ВЕРИФИКАЦИЯ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

Карта основных приземных метеорологических параметров: температуры и ветра на высоте 2 м, атмосферного давления на уровне моря, показана на рис. 13. По результатам моделирования восстановлено поле скорости, направление ветра показано на рис. 13, 14, по амплитуде скорости (отслеживалось в точке расположения мачты) зафиксировано усиление ветра в районе ВММ в период времени с 13:00 до 14:00 ВСВ. Максимальное значение скорости составляет 19 м/с на высоте 2 м, что близко к наблюдаемой величине (по данным наблюдений 18.9 м/с, см. рис. 7). Температура на высоте 2 м в точке расположения ВММ по расчетам изменялась от 23 до 18 °С за указанный промежуток времени от 12:00 до 14:00 ВСВ, и хорошо коррелирует с измеренными значениями, однако начальное значение температуры на 2 м несколько занижено по расчетам (по данным

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА





том 60 № 4 2024



наблюдений от 26 до 18 °C, см. рис. 4). Хорошее соответствие отмечено также и для атмосферного давления, и для влажности (см. рис. 13, 14 для результатов расчета модели и рис. 5, 6 для измеренных значений метеопараметров).

55°5'30''

10 20

Распределение влажности и температуры по высоте показано на рисунке 15. Влажность повышается к моменту первого шквала. Видно, что рисунки 14, с влажностью и скоростью ветра на двух уровнях давления, и 15, с влажностью и температурой по всей высоте, позволяют восстановить полную картину геометрических характеристик шквалов и облачности. Последняя влияет на осадки, которые показаны на рисунке 16 для данных моделирования и, как и в случае с наблюдениями, показывают высокие значения для 4.07.2023.

5505/30



В настоящей статье представлены результаты моделирования только промежутка времени с первым шквалом.

30 40 50 60 70 80 90

Большой интерес представляет моделирование вертикальной скорости, являющейся показателем конвективных движений, связанных с образованием шквалов. Результаты расчета показаны на рисунке 17, где полученные значения интерполированы по всей высоте. Видно соответствие с данными BMM (см. рис. 10, 11). Отчетливо наблюдаются интенсивные конвективные движения в рассматриваемый промежуток времени образования первого шквала, что совместно с измеренными данными BMM, позволяет подтвердить участие конвективных механизмов, наблюдаемых в 300-метровом слое, в формировании сильных шквалов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детально проанализированы случаи шквалов, зафиксированных на ВММ НПО "Тайфун" в 2014—2023 гг. По результатам анализа шквалы были поделены на 3 группы:

 – Группа 1. Шквалы при прохождении нескольких кучево-дождевых облаков днем, внутримассовых или перед холодным фронтом. Сюда входят подгруппы:

1.1. Максимальная скорость ветра при шквалах меньше 20 м/с на общем фоне слабого или умеренного среднего ветра

1.2. Максимальная скорость ветра во время одного или нескольких шквалов больше или равна 20 м/с. Средняя скорость ветра умеренная, не превышающая 10–12 м/с

Н.В. ВАЗАЕВА и др.



**Рис.** 16. Осадки – для 13:00(а), 13:10(б), 13:20(в), 13:30(г), 13:40(д), 13:50 (е), 14:00(ж) ВСВ; над районом измерений, вид сверху. ВММ располагается в центре области, координаты 55°06'42" с.ш. 36°35'54" в.д. Модифицированная модель WRF, 4 июля 2016 г. Шаг сетки 20 м.

1.3. На общем фоне сильного ветра, превышающего 10—12 м/с, несколько усилений ветра днем при прохождении кучево-дождевых облаков.

 – Группа 2. Шквал на холодном фронте. Сюда входят подгруппы:

2.1. Максимальная скорость ветра во время шквала меньше 20 м/с на высоте 301 м

2.2. Максимальная скорость ветра во время шквала больше или равна 20 м/с на высоте 301 м

 – Группа 3. Резкий шквал, когда скорость увеличивается от небольшой величины.

Рассмотрена подробная диагностика частного случая шквала 4 июля 2016 г. по результатам наблюдений на ВММ и численного моделирования на модифицированной для данной местности и синоптической ситуации модели WRF. Моделировалась температуры воздуха на разных высотах в течение суток, атмосферное давления, относительной влажность воздуха, компоненты скорости ветра. Результаты моделирования с хорошей точностью согласуются с данными наблюдений для описанного частного случая. Максимальное значение скорости ветра в шквале на первом одиночном холодном фронте составило 18.9 м/с по наблюдениям и 19 м/с по результатам моделирования. Успешное воспроизведение выбранного частного случая показывает перспективность используемой модели для воспроизведения случаев сильных шквалов, что, при увеличении в дальнейшей работе статистической достоверности результатов путем анализа других из приведенных и зафиксированных средствами ВММ частных случаев шквалов, позволит достичь увеличения точности оперативного прогноза шквалов.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ (проект № 22–77–00098).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева А.А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2. С. 41–58.
- Васильев Е. В., Алексеева А.А., Песков Б. Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5–15.
- Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM. М.: ТРИ-АДА ЛТД, 2010. С. 94–135.
- Волчек А.А., Шпока И.Н. Шквалы на территории Беларуси. 2011.
- Грищенко И. В. Шквалы и смерчи на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Arctic Environmental Research. 2009. № 4.
- Иванов В. Н. Использование высотной метеорологической мачты ИЭМ для изучения пограничного слоя атмосферы // Труды ИЭМ. 1970. № 12. С. 144.
- Ленская О. Ю., Абдуллаев С. М. Метод реконструкции типа мезомасштабных систем осадков, генерирующих шквалы, по особенностям изменения приземного давления // Вестник Челябинского государственного университета. 2005. Т. 12. № 1.



**Рис. 17.** Распределение вертикальной скорости по высоте в нижнем слое АПС – для 12:00 (а),12:30 (б), 13:00 (в), 13:30 (г), 14:00 (д) ВСВ; над районом измерений, вид сбоку. Координаты ВММ 55°06′42″ с.ш. 36°35′54″ в.д. Модифицированная модель WRF, 4 июля 2016 г. Шаг сетки 60 м.

- Новицкий М.А. и др. Теоретическое и физическое моделирование мезомасштабных атмосферных течений (бризы, шквалы, ураганы). Российский фонд фундаментальных исследований, 1997. № 97–05–65676.
- Новицкий М.А., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К. Анализ прохождения интенсивного шквала через полигон высотной метеорологической мачты в г. Обнинск // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 102–107.
- *Песков Б. Е., Снитковский А. И.* К прогнозу сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 1968. С. 52–57.
- *Хромов С. П.* Метеорологический словарь // Хромов С. П., Мамонтова Л. И. 3-е издание переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с.
- Шихов А. Н., Ажигов И. О., Быков А. В. Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 272–281.
- Янькова Ю. С. и др. Шквалы на территории Иркутской области // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития. 2018. С. 54–61.
- *Bayo Omotosho J.* The separate contributions of line squalls, thunderstorms and the monsoon to the total

rainfall in Nigeria // Journal of climatology. 1985. T. 5. № 5. C. 543–552.

- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., & Eder, B. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model // Atmospheric Environment, 2005. V. 39. № 37. P. 6957–6975.
- Lo J. C.F., Orton T. The general features of tropical Sumatra squalls // Weather. 2016. T. 71. № 7. C. 175–178.
- Omotosho J. B. Spatial and seasonal variation of line squalls over West Africa // Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology. Series A. 1984. T. 33. № 2. C. 143–150.
- Skamarock, W.C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., and Huang X.-Y., 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR. 145 pp. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Wijesekera H. W., Gregg M. C. Surface layer response to weak winds, westerly bursts, and rain squalls in the western Pacific Warm Pool // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1996. Т. 101. № С1. С. 977–997. http://attex.net/RU/index.php (дата обращения 12.05.2023)

# DIAGNOSTICS OF SQUEALS PASSING THROUGH THE OBNINSK'S HIGH-ALTITUDE INSTRUMENTAL TOWER IN2014–2023 N. V. Vazaeva<sup>1,2,\*</sup>, L. K. Kulizhnikova<sup>3,1</sup>, M. K. Matskevich<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Pyzhyovskiy pereulok, 3, Moscow, 109017 Russia <sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Baumanskaya 2-ya, 5, Moscow, 105005 Russia <sup>3</sup>Federal State Budgetary Institution Research and Production Association Typhoon, 4, Pobedy str., Obninsk, Kaluzhsky region, 249038 Russia

#### \*e-mail: vazaevanv@ifaran.ru

Due to their local, sudden nature, which complicates the forecast, squalls often cause significant material damage and are classified as extreme weather events. Squall diagnostics and increasing the accuracy of modeling to improve their operational forecasting is of high relevance. Determining the main characteristics of squalls by diagnosing particular cases and analyzing such cases is of great interest in order to establish the causes of extreme events, which are still insufficiently studied. The source of obtaining primary information on the characteristics of squalls is the processing of a large array of observational data from a high-altitude meteorological mast (HMM) of the Institute of Experimental Meteorology of the Federal State Budgetary Institution NPO Typhoon, presented in this article for 2014–2023. Such experimental data on a number of long-term observations on the VMM made it possible, after processing and analyzing the velocity fields, to fix intense squalls passing through the polygon. The main characteristics of these special cases of squalls were obtained and analyzed, some of which were simultaneously simulated using the non-hydrostatic mesoscale atmospheric model WRF-ARW, adapted for the observation area, and verification was also carried out with data from field experiments. A good agreement between the model results and observational data for the particular case of squalls is shown.

**Keywords:** atmospheric boundary layer, squalls, diagnostics, observational data, high-rise meteorological mast, numerical modeling