

УДК 551.509.52

Численное прогнозирование порывов ветра в г. Томске с помощью модели TSUNM3

А.В. Старченко^{✉1,2}, И.В. Дель^{1,2}, С.Л. Одинцов^{2*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 21.07.2023;
после доработки 30.11.2023;
принята к печати 01.12.2023

Для краткосрочного прогнозирования погодных ситуаций в г. Томске с сильным порывистым ветром предлагается использовать результаты расчетов по модели численного прогноза локальной погоды TSUNM3 в сочетании с полуэмпирическими формулами оценки масштабов скорости порывов ветра. Сравнение результатов расчетов и наблюдений метеопараметров, полученных для рассматриваемых в работе условий на метеостанциях ЦКП «Атмосфера» Института оптики атмосферы СО РАН, с помощью аэродромных метеорологических измерительных систем аэропорта г. Томска и метеостанции Томского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, показало перспективность применения модели для численного прогнозирования этого опасного погодного явления. Результаты работы предназначены для разработки информационно-прогностической системы заблаговременного предупреждения об опасных порывах ветра.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, порывы ветра, мезомасштабная модель TSUNM3; numerical weather prediction, wind gust, mesoscale model of numerical weather prediction TSUNM3.

Введение

Изменения климата сопровождаются увеличением количества и интенсивности опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ), которые приводят к нарушению жизнедеятельности в населенных пунктах во всем мире. За прошедшее десятилетие на территории России наибольшее количество ОЯ наблюдалось в Сибирском федеральном округе. Среди них максимальная повторяемость была у сильного ветра и интенсивных осадков [1, 2]. Так, в 2021 г. в Сибирском федеральном округе было зафиксировано 41 ОЯ с сильным ветром (> 30% по РФ) и 26 ОЯ с сильными осадками (> 18% по РФ) [1]. В [2] отмечается, что сильные ветры со скоростью 15 м/с и более — одно из наиболее часто повторяющихся ОЯ на юго-востоке Западной Сибири и, в частности, в южных районах Томской области. Продолжительные периоды с сильным порывистым ветром вызывают дефляцию почвы, пыльные бури, приводят к обрывам ЛЭП, повреждению зданий, осложняют работу авиации [2]. В связи с этим необходимы надежные методы успешного прогнозирования таких опасных метеорологических явлений [3].

Современные методы прогнозирования порывов ветра можно разделить на 1) динамические, использующие измеренные или численно рассчитанные скорость ветра, температуру и турбулентность в пограничном слое, 2) статистические модели и методы машинного обучения, реализующие прогноз с использованием данных наблюдений [4–6].

Одной из наиболее распространенных моделей численного прогноза метеорологических величин в атмосферном пограничном слое с высоким разрешением является моделирующая система Weather Research & Forecasting (WRF) [9]. Результаты численных краткосрочных прогнозов с использованием этой модели [5, 6] показали, что качество прогнозов скорости приземного ветра повышается при увеличении вертикального и горизонтального разрешения вычислительной сетки. Кроме того, в [5, 6] для прогнозирования масштабов скорости порывов ветра рекомендуется привлекать эмпирические соотношения, позволяющие оценить масштаб порывов ветра на основе модельных расчетов вертикального распределения метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы.

В Национальном исследовательском Томском государственном университете и Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН на протяжении нескольких лет развивается собственная мезомасштабная модель численного прогноза погоды TSUNM3 (Tomsk State University Nonhydrostatic

* Александр Васильевич Старченко (starch@math.tsu.ru); Ирина Васильевна Дель (irina.del@mail.tsu.ru); Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

Mesoscale Meteorological Model), которая для условий Западной Сибири показывает вполне адекватные результаты краткосрочного прогнозирования таких локальных опасных погодных явлений, как сильный ветер и интенсивные осадки в виде дождя и снега, а также загрязнение городского воздуха при слабом ветре и т.д. [7].

Цель работы — оценить результаты применения мезомасштабной модели TSUNM3 для прогнозирования и исследования локальной погоды при сильном ветре на юге Томской области с горизонтальным разрешением 1 км. Для оценки достоверности полученных результатов численного моделирования привлекаются измерения метеостанций ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН, АМИС-РФ (аэродромной метеорологической измерительной системы) аэропорта г. Томск и метеостанции Томской ЦГМС (Томского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) за 2022 г.

Материалы и методы

В настоящей работе проводился численный прогноз погоды на двое суток над югом Томской области [7]. Размеры области исследования — 100×100 км; координаты ее центра ($56,5^\circ$ с.ш., 85° в.д.) совпадают с центром города Томска. Для обеспечения таких расчетов начальными и граничными условиями применялись данные численного прогноза погоды, полученные с помощью оперативной глобальной модели ПЛАВ Гидрометцентра РФ [8] с горизонтальным разрешением около $0,25^\circ$. Горизонтальный шаг вычислительной сетки для области исследования составляет 1 км. При построении вычислительной сетки использовалось сгущение узлов вблизи поверхности земли с помощью преобразования координат таким образом, чтобы первый вычислительный уровень находился на высоте 10 м над поверхностью. Рассматривались 2 варианта сетки: с 41 горизонтальным уровнем, из которых нижние 13 находились в приземном километровом слое, и с 51 горизонтальным уровнем, 18 из которых расположены в приземном километровом слое. Значительных отличий в результатах численного прогноза на этих сетках обнаружено не было.

В мезомасштабной модели TSUNM3 для каждой ячейки горизонтальной сетки размером 1×1 км использовались свои характеристики поверхности (высота над уровнем моря, номер категории землепользования) из базы данных Modified IGBP MODIS NOAH [9], в которой вводится 33 категории землепользования для поверхности земного шара. Для каждой категории землепользования — одной для ячейки сетки — используются свои значения альбедо поверхности, доли поверхностной влаги, степени черноты поверхности, высоты динамической шероховатости, теплоемкости и термической инерции. Высота термической шероховатости над поверхностью вычисляется в соответствии с рекомендациями [9, 10]. В работе также рассматривались более сложные зависимости термической

шероховатости от приземной турбулентности [11], однако это не привело к изменению результатов численного прогноза из-за существенной скорости приземного ветра.

Для численного прогноза погоды моделью TSUNM3 использовались следующие параметризации подсеточных (не разрешаемых численно при таком выборе сетки) физических процессов [7, 12]: солнечная и длинноволновая радиация — схема Пиелке—Харли, микрофизика влаги — схема WSM6 Хонга—Лима, приземный слой — схема Монина—Обухова, физика поверхностного слоя почвы — модель с нестационарным уравнением теплопроводности, пограничный слой — схема Меллора—Ямады с уравнением для кинетической энергии турбулентности.

Выбор эпизодов численного моделирования для дней с сильным ветром был сделан по результатам измерений характеристик приземной атмосферы с помощью ультразвуковых метеостанций (УЗМ) «Метео-2» ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН, размещенных в пунктах «База» (Академгородок г. Томск; $85,05^\circ$ в.д. и $56,47^\circ$ с.ш.) на высоте 17 м и БЭК (Базовый экспериментальный комплекс ИОА СО РАН; $85,10^\circ$ в.д. и $56,42^\circ$ с.ш.) на высоте 10 м. Пункты наблюдений расположены на восточной окраине города, где участки растительности (лиственные и хвойные деревья и кустарники) чередуются с открытой поверхностью и малоэтажными строениями. Измерения компонента вектора ветра выполнялись с периодичностью 0,1 с (10 Гц) [13].

Подбор дней с сильным порывистым ветром производился на основе анализа прогнозируемого масштаба порывов ветра G [5, 13]: $G = V_h + 3\sqrt{E}$, где V_h — средняя скорость горизонтального ветра за интервал времени Δt ; E — кинетическая энергия турбулентных пульсаций. Эти значения вычислялись (усреднялись) по интервалу времени $\Delta t = 10$ мин, который был выбран исходя из широко распространенной российской и международной практики измерений. В пункте БЭК выбирались дни с сильными порывами ветра по критерию $G = G_{10} \geq 11,71$ м/с. Этот критерий соответствует уровню 99%-й интегральной функции распределения (ИФР) величины G_{10} за весь период рассмотренных в настоящей работе измерений (01.01–31.10.2022). Аналогичный анализ проведен для пункта «База», где был установлен критерий $G_B \geq 11,3$ м/с. В итоге для пунктов БЭК и «База» были сформированы выборки дней с сильными порывами ветра. Наиболее значимые случаи представлены в таблице. В ней указаны даты и интервалы начала и окончания эпизодов, на протяжении которых наблюдалось превышение уровней 99%-й ИФР величины G . Указано также количество случаев превышения этих уровней в выделенных эпизодах.

Во время эпизода 1 по данным метеостанции Томского ЦГМС [14] минимальная температура составляла 1°C , максимально в течение дня температура воздуха поднималась до $+3^\circ\text{C}$. Относительная влажность менялась от 78 до 96%. Скорость ветра,

Даты, интервалы времени с сильными порывами ветра и число случаев превышения G_{10} и G_B во время этих эпизодов (2022 г., местное время)

№	Дата	Начало	Окончание	Число случаев
<i>БЭК 10 м</i>				
1	07.03	13:40	24:00	21
2	30.03	09:20	16:50	34
3	31.03	09:30	18:50	28
4	07.05	04:00	22:10	99
5	08.09	00:10	16:50	33
6	23.10	09:00	16:10	30
<i>«База»</i>				
1	07.03	13:10	23:20	7
2	30.03	09:10	20:10	29
3	31.03	08:50	18:40	22
4	07.05	03:50	10:40	38
5	08.09	00:10	16:40	37
6	23.10	08:40	18:00	32

осредненная за 10-минутный период, — 1–3 м/с, преобладающее направление — юго-западное или южное. Погода облачная, дождь со снегом.

Эпизод 2: температура в течение суток варьировалась от –1 до +3 °С, влажность 64–94%, скорость ветра 1–3 м/с. В 07:00 и 10:00 наблюдались порывы ветра до 10–12 м/с [14]; направление ветра — юго-западное. Облачно. На поверхности почвы лежал ровный слой слежавшегося снега.

Эпизод 3: температура составляла от –3 до +6 °С, влажность 56–85%, скорость ветра 1–3 м/с, в 16:00

зафиксированы порывы ветра до 13 м/с; преобладающее направление ветра — южное. Облачно.

Эпизод 4: температура за сутки упала с 15 до 4 °С, влажность составляла 16–46%, ветер 1–4 м/с, весь день в городе наблюдались порывы ветра от 10 до 14 м/с. Погода облачная с прояснениями.

Эпизод 5: температура утром снизилась с 15 до 10 °С, а к ночи до 6 °С, влажность менялась от 49 до 91%, скорость ветра до 07:00 была 6 м/с, позже упала до 2 м/с. Погода облачная с прояснениями, без осадков. Порывы ветра на городской метеостанции не отмечались [14].

Эпизод 6: в течение суток температура упала с 9 до 0 °С, влажность менялась в пределах от 83 до 99%. Скорость ветра была максимальной (4 м/с) в 10:00, с 10:00 до 16:00 наблюдались порывы ветра до 10–11 м/с; ветер юго-западный. Погода облачная, небольшой дождь.

Ниже на рис. 1–6 для эпизодов 1–6 представлены результаты численных прогнозов, выполненных с помощью модели TSUNM3, и данные после обработки измерений метеостанций «Метео-2» ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН. Измеренные значения приведены для высоты установки приборов, температура рассчитана на высоте 2 м, скорость, направление ветра и турбулентная кинетическая энергия — на высоте 10 м для пунктов наблюдений «База» и БЭК.

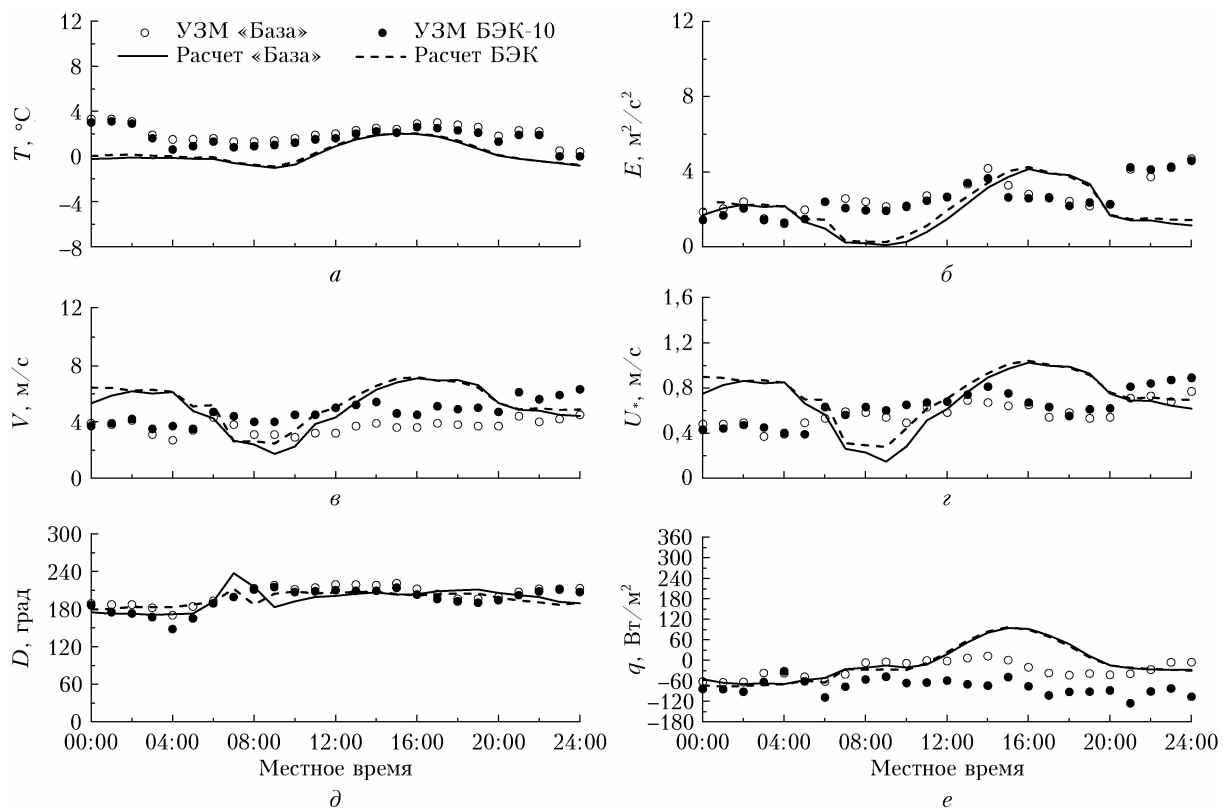


Рис. 1. Рассчитанные и измеренные значения приземной температуры (а), турбулентной кинетической энергии (б), скорости (в) и направления ветра (д), динамической скорости (е) и турбулентного теплового потока (е) в пунктах наблюдения «База» и БЭК, эпизод 1

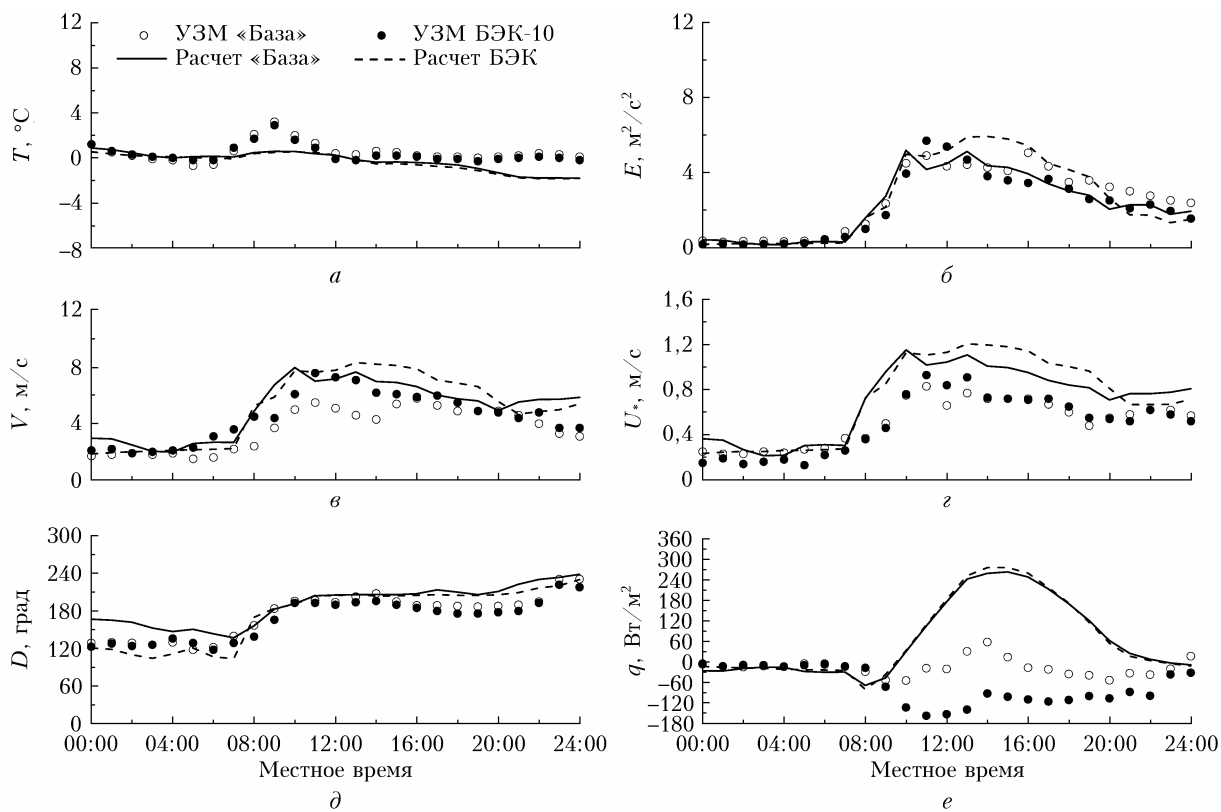


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для эпизода 2

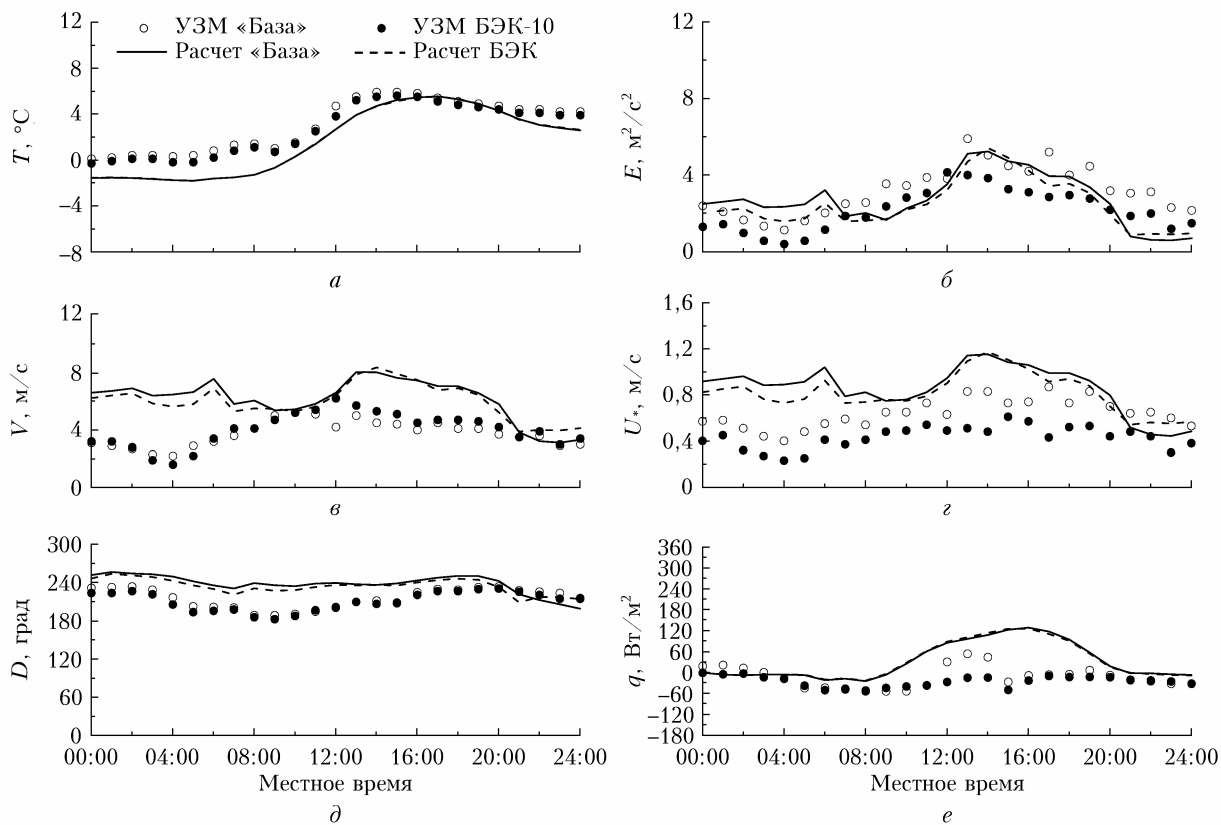


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для эпизода 3

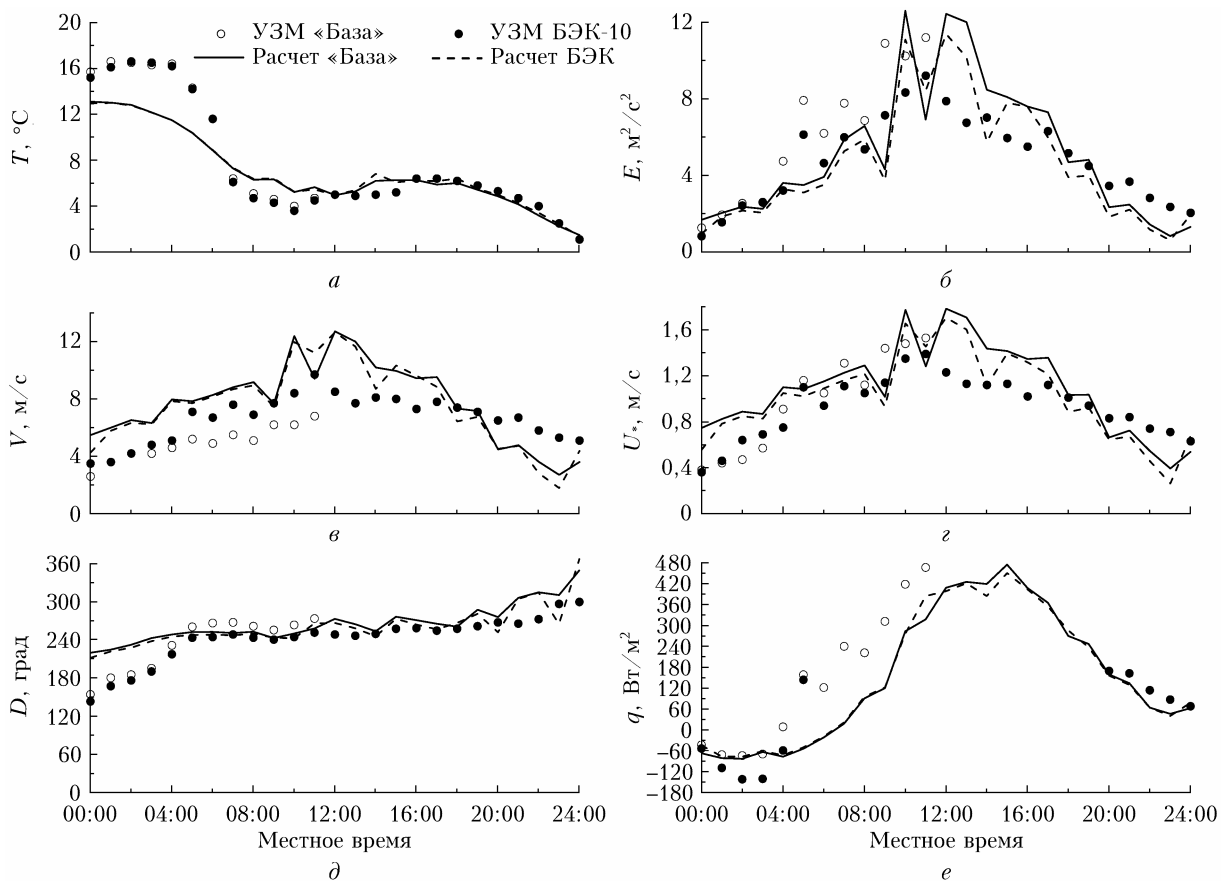


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для эпизода 4

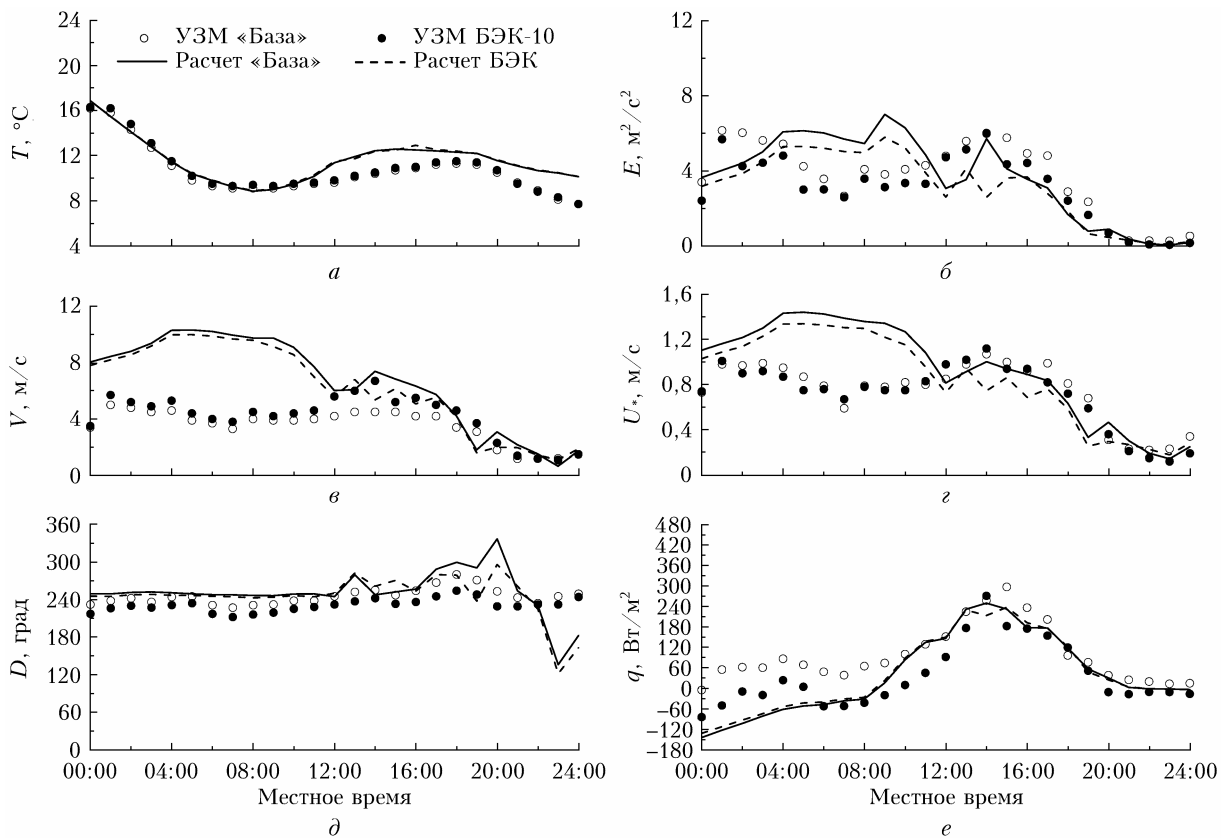


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но для эпизода 5

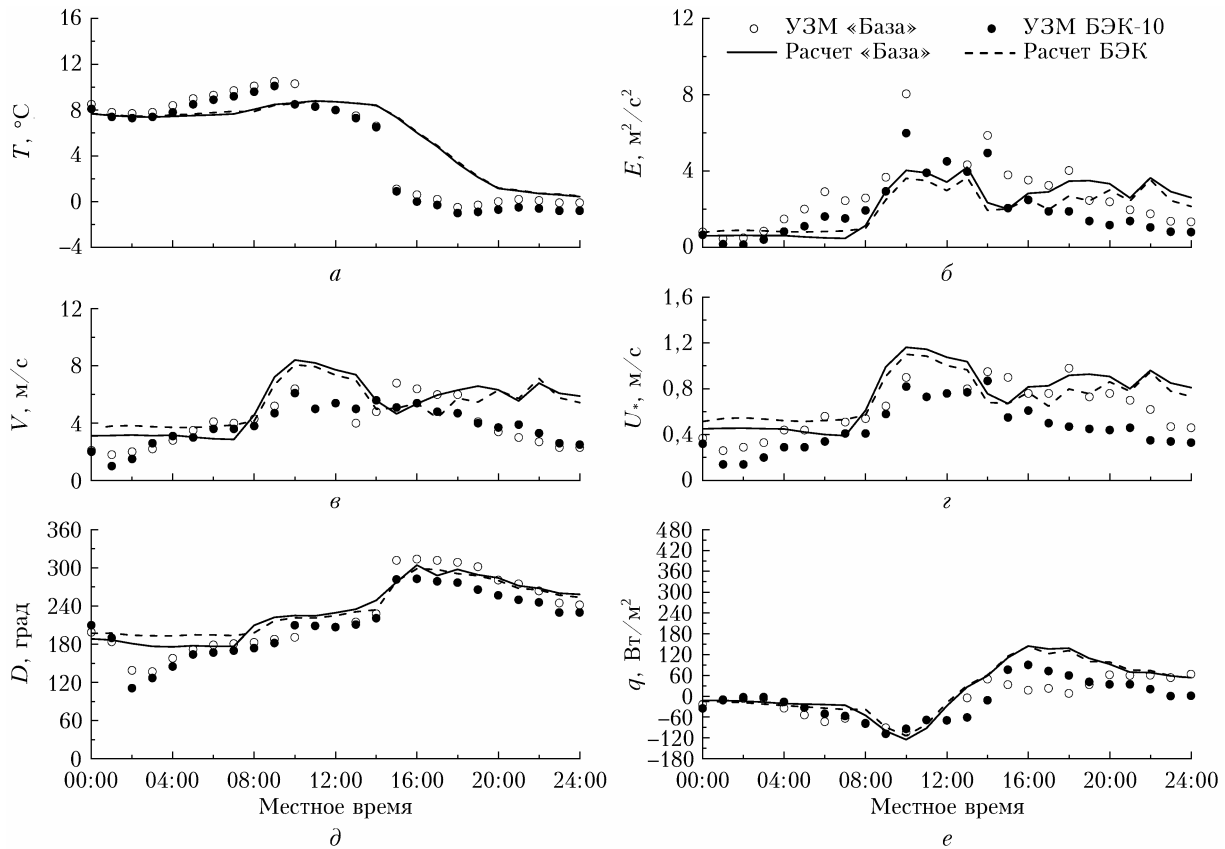


Рис. 6. То же, что на рис. 1, но для эпизода 6

Для оценки достоверности вычисленных с помощью TSUNM3 значений метеорологических параметров использованы следующие статистические характеристики: средняя абсолютная ошибка, которая характеризует собственно точность прогнозирования,

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |o_i - p_i|$$

и коэффициент корреляции, показывающий, насколько для рассматриваемых условий характер изменения прогнозируемых величин соответствует характеру изменения наблюдений,

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}}.$$

Здесь o_i — измеренные значения; p_i — предсказанные значения; $\bar{o}$, $\bar{p}$ — их средние значения; n — количество сравниваемых значений.

Анализируя рис. 1–6, можно отметить следующее.

1. TSUNM3 достаточно хорошо моделирует направление приземного ветра ($MAE_{\text{База}} = 20^\circ$; $MAE_{\text{БЭК}} = 22^\circ$; $R = 0,81$ и $0,83$ соответственно). Еще лучше прогнозируется приземная температура ($MAE_{\text{База}} = 1,5$; $MAE_{\text{БЭК}} = 1,3$; $R = 0,93$ и $0,94$ соответственно).

2. Направление приземного ветра, судя по расчетам и наблюдениям на «Метео-2», меняется в течение суток весьма незначительно, за исключением эпизодов 5 и 6.

3. Рассчитанные для двух рассматриваемых пунктов наблюдений значения приземных параметров в каждом эпизоде слабо зависят от положения пункта наблюдения, за исключением приземной скорости ветра.

4. Что касается скорости приземного ветра, то модель TSUNM3 удовлетворительно численно прогнозирует изменение и абсолютные значения скорости ветра для пунктов «База» и БЭК ($MAE_{\text{База}} = 2,2$ м/с; $MAE_{\text{БЭК}} = 1,7$ м/с; $R = 0,59$ и $0,65$ соответственно), подтверждая в большинстве случаев фиксируемые метеостанциями «Метео-2» локальные максимумы и минимумы скорости приземного ветра.

5. Сопоставление результатов расчетов и наблюдений за турбулентными характеристиками показывает, что модель TSUNM3 достаточно неплохо прогнозирует изменение в течение суток кинетической энергии турбулентности ($MAE_{\text{База}} = 1,2$ м²/с²; $MAE_{\text{БЭК}} = 1,0$ м²/с²; $R = 0,73$ и $0,78$) и динамической скорости ($MAE_{\text{База}} = 0,23$ м/с; $MAE_{\text{БЭК}} = 0,27$ м/с; $R = 0,69$ и $0,68$) с экстремумами в период усиления скорости ветра.

Несколько хуже модель TSUNM3 предсказывает величину турбулентного теплового потока, превышая ее в отдельных эпизодах по сравнению с наблюдаемыми значениями. Это может быть связано, во-первых, с тем, что модель TSUNM3 дает средние значения рассчитанных в каждой ячейке

размером 1×1 км параметров, а измерения производятся в точке над поверхностью. Теплофизические характеристики и шероховатость поверхности при моделировании и наблюдениях могут отличаться. Во-вторых, наибольшие расхождения рассчитанных и измеренных значений турбулентного теплового потока наблюдаются в марте 2022 г., когда в Томске еще лежал слежавшийся тающий снег [14], что затрудняло качественное численное прогнозирование тепло- и массообмена с земной поверхностью в используемых здесь моделях.

Результаты и обсуждение

Заметим, что модель TSUNM3, как и другие мезомасштабные модели такого же уровня [7], напрямую не предсказывает масштаб скорости порывов ветра G . Для его оценки используются некоторые полуэмпирические формулы, выражающие зависимость G от средней скорости ветра, турбулентной кинетической энергии на высоте 10 м, вертикального распределения потенциальной температуры, горизонтальной скорости ветра и кинетической энергии турбулентности в пограничном слое и т.д.

В настоящей работе рассматриваются три метода оценки масштаба порывов ветра:

- TKE (Turbulent Kinetic Energy) [5];
- гибридный [5];
- RUC20 (Rapid Update Cycle) [15, 6].

Метод TKE предполагает оценку G по величине модуля горизонтальной средней скорости на высоте 10 м W_{10} и модулю турбулентных пульсаций скорости ветра на этой же высоте:

$$G = W_{10} + 3\sqrt{E_{10}}. \quad (1)$$

Предложенный в [5] гибридный метод прогноза порывов ветра представляет собой комбинацию двух подходов: метода TKE [5] и формулы О. Brasseur [16] в зависимости от стратификации в атмосферном пограничном слое:

$$G = \begin{cases} W_{10} + 3\sqrt{E_{10}}, & \text{Ri} > 0; \\ \max[W(z_p)], & \text{Ri} \leq 0; \end{cases} \quad (2)$$

где $W(z)$ – вертикальный профиль модуля горизон-

тальной средней скорости; $\text{Ri} = \frac{g}{\Theta} \frac{\frac{\partial \Theta}{\partial z}}{\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]}$ –

число Ричардсона, рассчитанное по значениям потенциальной температуры Θ и компонент вектора горизонтальной скорости ветра u и v в приземном слое; g – ускорение свободного падения; $z_p > 0$ – высотный уровень в некоторой точке P в фиксированный момент времени, удовлетворяющий неравенству [16]:

$$\frac{1}{z_p} \int_0^{z_p} E(z) dz \geq \int_0^{z_p} g \frac{\Delta \Theta_v(z)}{\Theta_v(z)} dz, \quad (3)$$

где Θ_v – виртуальная потенциальная температура; $\Delta \Theta_v(z)$ – разность значений Θ_v на двух соседних вычислительных уровнях, один из которых z . Как отмечается в [5], метод TKE имеет преимущество в переходные периоды (зима – лето, лето – зима), а формула О. Brasseur [16] – в летний.

Метод RUC20 [6, 15] использует для оценки масштаба порывов ветра дополнительное значение горизонтальной средней скорости ветра на высоте пограничного слоя:

$$G = W_{10} + (W_{\text{PBL}} - W_{10}) \left(1 - \min \left(\frac{h_{\text{PBL}}, 1000 \text{ м}}{2000 \text{ м}} \right) \right), \quad (4)$$

где W_{10} , W_{PBL} – численно предсказанные моделью TSUNM3 значения горизонтальной скорости ветра на высоте 10 м и высоте пограничного слоя h_{PBL} , которая также прогнозируется при расчетах по этой модели. Высота h_{PBL} оценивается как вертикальный уровень, на котором турбулентная кинетическая энергия становится ниже $0,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$ [9]. В соответствии с документацией RUC20 [6, 15] h_{PBL} в (4) ограничивается сверху величиной 1 км, если $h_{\text{PBL}} > 1 \text{ км}$.

На рис. 7 представлены измеренные в пункте БЭК значения порывов ветра $(V_h)_{\text{max}}$ для рассматриваемых эпизодов 2022 г. (таблица) и ежечасной оценки G по формулам (1), (2) и (4). Также для сравнения и анализа приведены измеренные на метеостанциях Томского ЦГМС и АМИС-РФ аэропорта Томска [14] порывы ветра (максимальное значение порывов ветра на высоте 10–12 м между сроками наблюдений). АМИС-РФ предназначен для автоматических измерений различных метеорологических параметров, в том числе скорости и направления воздушного потока.

Из рис. 7 можно сделать вывод, что прогноз по формуле (1) с привлечением рассчитанных по модели значений метеопараметров лучше соответствует значениям порывов ветра, измеренным ультразвуковой метеостанцией «Метео-2» на БЭК и метеостанцией Томского ЦГМС ($\text{MAE}_{\text{БЭК}} = 2,4 \text{ м/с}$ и $R = 0,75$). Расчеты по методикам (2) и (4) дают завышенные значения G , хотя, если рассматривать измерения порывов ветра на аэродромной метеостанции АМИС-РФ, формула (4) с помощью TSUNM3 достаточно неплохо прогнозирует G для большинства из эпизодов.

Подобные результаты были получены в [5, 6] при применении данных численного прогноза модели WRF для оценки G . Так, предложенный в [5] гибридный метод оценки этой величины на основе численных расчетов для условий Томска не показал успешности прогноза, поскольку в рассматриваемых условиях в 2022 г. наиболее значимые G фиксировались осенью и весной, когда основной причиной возникновения порывов ветра является турбулентность механического происхождения, а не конвективные явления [16].

В [6] сравнение прогнозируемых по формуле (4) и модели WRF масштабов порывов ветра с наблюдениями этой величины на нескольких

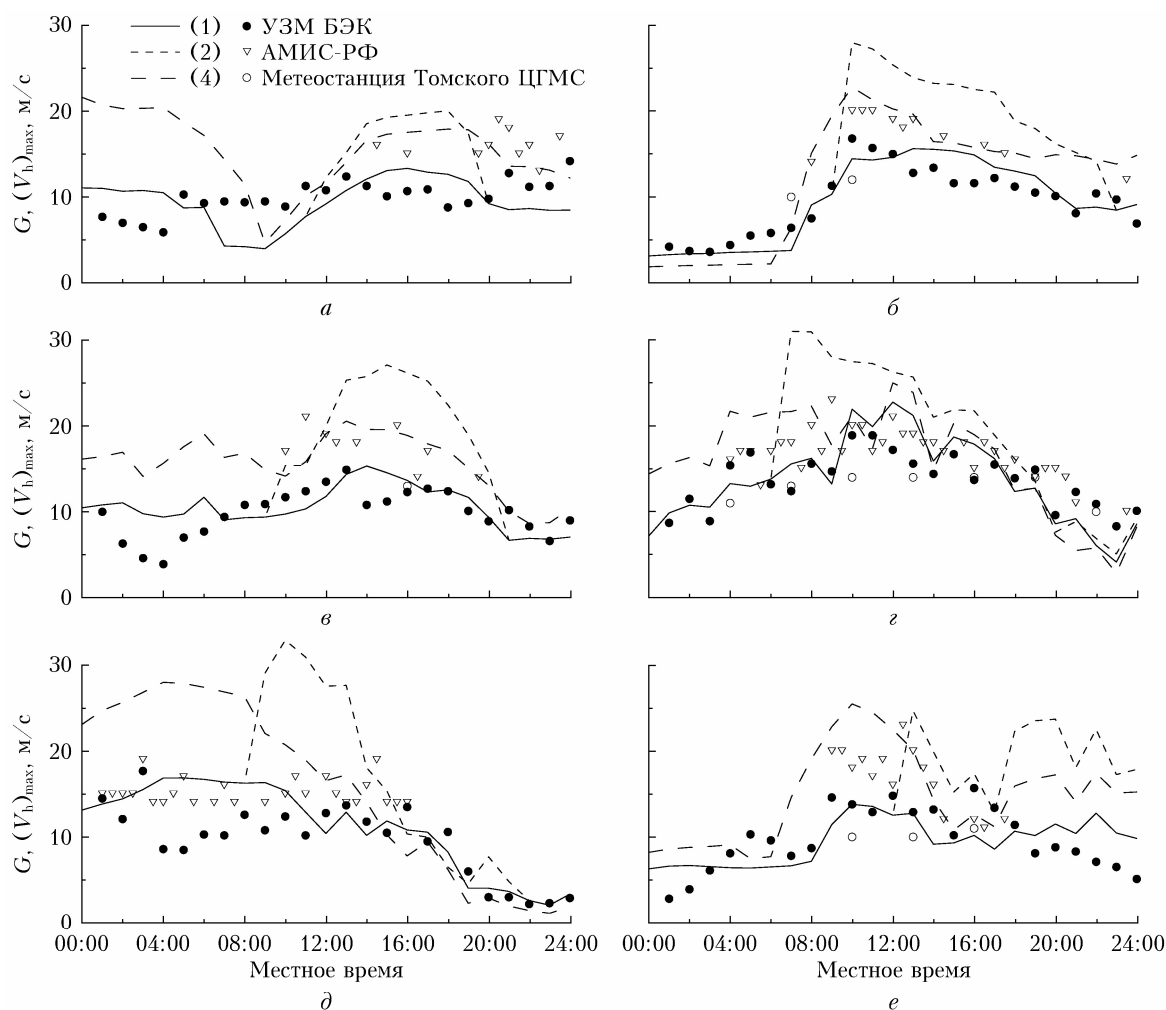


Рис. 7. Рассчитанные по формулам (1), (2), (4) значения масштаба скорости порывов ветра для пункта БЭК и значения $(V_h)_{\max}$, измеренные с помощью разных метеостанций, для эпизодов 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), 6 (е) [14]

метеостанциях на территории Аргентины показало среднеквадратичное отклонение $RMSE = 3-5$ м/с и $R = 0,3-0,6$. Оценки точности прогноза G в Томске на основе расчетов TSUNM3 и формулы (4) в сравнении с наблюдениями на БЭК – $RMSE = 7$ м/с, $R = 0,57$, а при использовании формулы (1) $RMSE = 2,9$ м/с и $R = 0,75$.

Заключение

Для численного исследования порывов ветра в Томске с помощью УЗМ «Метео-2» ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН были выбраны даты 2022 г., когда наблюдалось это опасное погодное явление. Краткосрочный прогноз параметров атмосферного пограничного слоя для этих дат был выполнен с помощью мезомасштабной модели TSUNM3 с высоким разрешением. Тестирование результатов расчетов по данной модели на экспериментальных данных показало, что она хорошо прогнозирует в рассматриваемых условиях слабо меняющиеся по территории метеопараметры: приземную температуру, скорость и направление ветра. Для предсказания масштаба порывов ветра на основе модельных

расчетов использовались три методики: ТКЕ, гибридная и RUC20. Из результатов сравнения расчетов по этим методикам с измерениями порывов ветра на метеостанции Базового экспериментального комплекса лучшие результаты прогноза для урбанизированных территорий дает метод ТКЕ. Для прогнозирования максимальных порывов ветра в области большого масштаба (до 100 км) лучше подходит методика RUC20 NOAA. Результаты проведенных исследований говорят о необходимости дальнейшего изучения условий возникновения и методов прогнозирования порывов ветра.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ИОА СО РАН. Экспериментальные данные, использованные для сравнения с модельными расчетами, были получены при поддержке РНФ (проект № 19-71-20042).

Список литературы

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.

2. *Евсеева Н.С., Ромашова Т.В.* Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга Томской области) // Вестн. Том. гос. ун-та. 2011. № 353. С. 199–204.
3. *Юшков В.П.* Асимптотика максимальных ветровых порывов в московском мегаполисе: цели, принципы расчетов и статистика наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 3. С. 298–311.
4. *Sheridan P.* Current gust forecasting techniques, developments and challenges // Adv. Sci. Res. 2018. V. 15. P. 159–172.
5. *Курбатова М.М., Рубинштейн К.Г.* Гибридный метод прогноза порывов ветра // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 523–529.
6. *Suarez M., Poffo D., Pierobon E., Martina A., Safefe J., Rodriguez A.* Wind and gust forecasts assesment of Weather Research and Forecast (WRF) model in Cordoba, Argentina // AJAE. 2021. V. 16, N 1. P. 2021133.
7. *Численное моделирование погоды и качества атмосферного воздуха в городах* / А.В. Старченко, Л.И. Кижнер, Е.А. Данилкин, Е.А. Шельмина и др. Томск: Изд-во ТГУ, 2022. 140 с.
8. *Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза* / М.А. Толстых, В.В. Пашкин, Р.Ю. Фадеев, А.В. Шляева и др. М.: Трида лтд, 2017. 166 с.
9. *Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Dudhia J., Gill D.O., Coen J.L., Gochis D.J., Ahmadov R., Peckham S.E., Grell G.A., Michalakes J., Trahan S., Benjamin S.G., Alexander C.R., Dimego G.J., Wang W., Schwartz C.S., Romine G.S., Liu Z., Snyder C., Chen F., Barlage M.J., Yu W., Duda M.G.* The weather research and forecasting model: Overview, system efforts and future directions // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2017. V. 98. P. 1717–1737.
10. *Jiménez P.A., Dudhia J., González-Rouco J.F., Navarro J., Montávez J.P., García-Bustamante E.* A revised scheme for the WRF surface layer formulation // Mon. Weather Rev. 2012. V. 140. P. 898–918. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00056.1.
11. *Chen F., Zhang Y.* On the coupling strength between the land surface and the atmosphere // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L10404. DOI: 10.1029/2009GL037980.
12. *Starchenko A.V., Kizhner L.I., Svarovsky A.I., Prokhanov S.A.* Sensitivity analysis of the physical parameterizations in the WRF model on the prediction accuracy of meteorological parameters // Proc. SPIE. 2021. V. 11916. DOI: 10.1117/12.2603387.
13. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Структура порывов ветра в приземном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 2, № 4. С. 304–308.
14. *Расписание погоды.* Архив погоды в Томске [Электронный ресурс]. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 16.07.2023).
15. *Benjamin S.G., Brown J.M., Brundage K.J., Dévényi D., Grell G.A., Kim D., Schwartz B.E., Smirnova T.G., Smith T.L., Weygandt S.S., Manikin G.S.* NWS Technical Procedures. Bulletin. No. 490. RUC20 – The 20 km Version of the Rapid Update Cycle. Boulder: NOAA/OAR Forecast Systems Laboratory, 2002. URL: https://ruc.noaa.gov/ruc/ppt_pres/RUC20-tpb.pdf (last access: 21.06.2023).
16. *Brasseur O.* Development and application of a physical approach to estimating wind gusts // Mon. Weather Rev. 2001. V. 129. P. 5–25.

A.V. Starchenko, I.V. Del, S.L. Odintsov. Wind and gust forecasting in Tomsk with TSUNM3 model.

For short-term forecasting of weather periods characterized by strong winds with gusts in Tomsk, it is proposed to use the results of calculations based on the local weather numerical prediction model TSUNM3 (Tomsk State University Mesoscale Meteorological Model) in combination with semi-empirical formulas for estimating the scale of wind gusts. The comparison of the calculations and observations of meteorological parameters obtained for the conditions under consideration at the meteorological stations of the Common Use Center "Atmosphere" of IAO SB RAS, the AMIS-RF airport, and the Tomsk meteorological stations showed the prospects of using the model for numerical forecasting of this dangerous weather phenomenon. The results of the work are to be used for the development of an information and predictive system for early warning of dangerous wind gusts.