

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-65-85>

УДК 551.509.5

Прогноз сильной жары в Красноярске с использованием региональной модели WRF-ARW

А.В.Быков^{1,2}, А.Л.Ветров¹, Н.А.Калинин^{1,2}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия;

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия
vetrov@psu.ru

Изучены причины формирования сильной жары в Красноярске и оценена точность прогнозов региональной модели WRF-ARW. Исследованы четыре случая жаркой погоды в 2020, 2021 и 2023 гг. Жара в июне 2023 г. отличалась особой интенсивностью и достигла критерия опасного явления. Все рассмотренные случаи связаны с интенсивной адвекцией теплого тропического воздуха в передней части высотной ложбины. Изучены условия формирования городского острова тепла, его интенсивность ночью составила 6,5 °С. В дневные часы городской остров тепла проявляется слабее, чем ночью. Определено, что модель WRF-ARW на вторые сутки прогноза воспроизводит городской остров тепла и влияние реки Енисей, однако уменьшает прогнозируемую амплитуду суточного хода температуры. Абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха, на сроки, близкие к наступлению суточного максимума, составила 2,6 °С (33 ч модельного времени).

Ключевые слова: численный прогноз температуры, сильная жара, модель WRF-ARW, городской остров тепла, Красноярск

Severe heat forecasting in Krasnoyarsk using the WRF-ARW regional model

A.B. Bykov^{1,2}, A.L. Vetrov¹, N.A. Kalinin^{1,2}

¹ Perm State University, Perm, Russia;

² Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, Russia
vetrov@psu.ru

The reasons for the occurrence of a severe heatwave in Krasnoyarsk have been studied, and the accuracy of the forecasts of the WRF-ARW regional model has been assessed. Four episodes of hot weather in 2020, 2021, and 2023 have been analyzed. The heatwave in June 2023 was especially intense and met the criteria for a severe weather event. All examined cases were associated with the intense advection of warm tropical air in the leading edge of the upper-air trough. The formation of the urban heat island has been investigated, and its intensity in the nighttime was found to be 6.5°C. During daytime hours, the heat island was weaker than at nighttime. It has been determined that on the second day of forecasting, the WRF-ARW model accurately reproduces the urban heat island and the impact of the Yenisei River, although it underestimates the predicted amplitude of daily temperature variations. The absolute error in air temperature predictions for the time moments close to the time of daily maximum temperatures was 2.6°C (33 hours of model time).

Keywords: numerical prediction of temperature, severe heat, WRF-ARW model, urban heat island, Krasnoyarsk

Введение

Жаркая погода опасна для жизни и здоровья человека, что требует от исследователей разработки надежных способов прогноза максимальной суточной летней температуры воздуха. Особенно от высокой температуры воздуха страдает население крупных городов в глубине континентов [13, 17]. Изучение городских пространственных температурных аномалий (островов тепла) способствует поиску путей решения адаптации городского населения к опасной жаре. Красноярск находится в центре крупнейшего Евразийского континента и имеет среднюю многолетнюю температуру самого теплого месяца года (июль) 19,1 °С. Для города принят порог опасного природного явления «сильная жара» в 35 °С, и с момента начала метеорологических наблюдений в пригороде Красноярска (1914 г.) на станции Опытное поле было зафиксировано 7 случаев, когда максимальная суточная температура превысила обозначенный порог. Абсолютный максимум температуры на станции Опытное поле близок к порогу опасного явления и составляет 36,4 °С (зафиксирован 21 июня 2002 г.), что в целом свидетельствует о редкости появления опасной жары [4].

Исследованию климата, термического и ветрового режима Красноярска посвящены множество работ, поскольку город является важным промышленным, культурным, образовательным и научным центром с численностью населения более 1 млн человек [14, 22]. Особенностью физико-географических условий Красноярска является крупная река Енисей, протекающая среди низкогорий. Город находится в условиях умеренно-континентального климата с теплым летом и морозной зимой [6]. Широкая река создает условия для бризовой циркуляции, а на южных склонах холмов может развиваться горно-долинная циркуляция.

Медицинским последствиям влияния волн жары на смертность жителей Красноярска посвящено значительное число работ. В исследовании [13] изучен рост смертности в крупных городах мира и в Красноярске. По медицинским и метеорологическим данным из-за воздействия волн жары в период с 1999 до 2015 г. в этом городе установлен рост смертности от болезней органов дыхания в возрастной группе от 34 до 60 лет, ишемической болезни сердца в возрастной группе старше 65 лет, болезни системы кровообращения в возрастной группе старше 65 лет. Наибольший прирост смертности во время жары в Красноярске происходит от гипертонической болезни в возрастной группе старше 65 лет.

В работе [18] установлено, что из-за волн жары в период с 2000 по 2004 г. происходит рост смертности в Красноярске от болезней системы кровообращения в возрастной группе старше 34 лет, болезней органов дыхания в возрастной группе от 34 до 65 лет, а также внешних причин в возрастной группе старше 34 лет. К внешним причинам относят транспортные несчастные случаи, случайные отравления, убийства, самоубийства, утопления и т. д. Последнее косвенно свидетельствует, что жаркая погода не только отрицательно воздействует на здоровье человека, но создает условия для изменения поведения людей в негативную сторону.

В приведенных работах неоднократно высказывалась мысль о необходимости разработки метода прогноза максимальной температуры воздуха с соответствующей системой предупреждения при высокой вероятности повышения ее до значений, опасных для здоровья.

Модель WRF-ARW широко применяется для моделирования атмосферных условий в городах [25]. Наиболее интересные примеры таких исследований рассмотрены в следующих работах: в Китае для Нанкина [20], в Греции для Афин [21], в экваториальной Африке для Лагоса. Поскольку наименьшее возможное пространственное разрешение модели не превышает 1 км, в мире результаты моделирования WRF-ARW дополняются блоками параметризации городских условий. Для городов России такие исследования охватывают короткий список и непродолжительный период времени. Прежде всего следует отметить исследование московского мегаполиса с помощью региональной климатической модели COSMO-CLM [2, 5, 16, 24]. Исследование на основе модели WRF-ARW морозной погоды в 2017 г. проведено в [19], а моделирование августовской погоды 2007 г. – в [12]. Полученные результаты уникальны по причине кардинального отличия площади городской застройки в Москве от любого другого города России и не всегда репрезентативны для других городов, расположенных даже в похожих климатических условиях. Обращает на себя внимание также исследование по моделированию погодных условий с помощью WRF в Санкт-Петербурге [8, 9] и Владивостоке [10, 15].

Несмотря на большой задел в области оценки качества модельных прогнозов для крупных городов России, задача оценки точности моделирования городской атмосферы с помощью стандартных инструментов WRF-ARW в Красноярске остается актуальной. При этом последующий переход на специализированные блоки параметризации городских условий позволит оценить увеличение качества прогноза.

Цель исследования заключается в изучении синоптических и метеорологических условий развития жаркой погоды в Красноярске с оценкой качества прогнозирования такой погоды с помощью модели высокого пространственного разрешения WRF-ARW.

Материалы и методы

В ходе исследования использовались данные с метеорологических станций в Красноярске и его пригороде (табл. 1). Станция Красноярск – городская, находится на улице Дудинской на левом берегу Енисея. Загородные станции: Емельяново (находится на расстоянии 25 км в небольшом поселке), Роев ручей, Опытное поле, Минино.

В работе использовались данные о температуре сухого термометра, относительной влажности воздуха, скорости и направлении ветра, количестве облачности и типе облаков, осадках. Источником данных был специализированный сайт метеорологической информации www.rp5.ru. Синоптические условия оценивались по приземным синоптическим картам и картам барической топографии Гидрометцентра России, доступные на сайте www.meteoinfo.ru.

Таблица 1. Информация о расстояниях между станциями, км
Table 1. Information on distances between stations, km

Метеостанция	Роев ручей	Опытное поле	Минино	Емельяново	Красноярск
Индекс ВМО	29579	29570	29571	29572	29574
Высота станции над уровнем моря, м	270	276	235	287	186
Роев ручей	0	7	13	25,5	12
Опытное поле	7	0	6	18,5	12
Минино	13	6	0	13	13,5
Емельяново	25,5	18,5	13	0	25
Красноярск	12	12	13,5	25	0

По станции Красноярск в открытом доступе есть данные за четыре срока: 0, 6, 12, 18 ч ВСВ. Метеорологические величины для пропущенных сроков восстанавливались с использованием ближайшей метеорологической станции Опытное поле. Информация о типе облаков и степени покрытия небосвода облаками получена со станций Опытное поле и Минино. Для оценки условий стратификации атмосферы и определения направления и скорости ветра в пограничном слое использовались данные на аэрологической станции Емельяново.

Прогноз погоды выполнен региональной численной моделью атмосферы WRF-ARW версии 4.2.1 [26]. Описание модели представлено в табл. 2. Модель настроена на область расчета с вложенными сетками. Заключительная квадратная сетка с длиной стороны на местности в 400 км покрывает территорию Красноярска и окрестностей шагом в 1 км.

Для оценки качества численного прогноза погоды было выполнено сравнение с прогнозами синоптиков из ФГБУ «Среднесибирское УГМС» и со схемами статистического прогноза на основе данных численных моделей атмосферы, применяемых в Гидрометцентре России. Прогностическая статистическая схема «Расчет элементов погоды» включает численную реализацию на основе следующих компонентов: центральное типирование атмосферных процессов, непрерывность прогностических полей по территории, сезонная классификация, оптимизация заблаговременности архивов обучающей выборки [3]. В комплексном прогнозе реализованы методы нелинейной статистической обработки временных рядов глобальных моделей и региональной модели COSMO [1]. На первом этапе вычисляется предварительный вариант прогноза независимо для каждой метеорологической величины и каждой заблаговременности. На втором этапе используется фильтр Калмана независимо для каждой метеорологической величины, но с использованием близких заблаговременностей. На последнем

этапе производится коррекция с применением глубоких нейронных сетей с учетом динамики всех метеорологических величин в данной точке. Прогноз максимальной суточной температуры синоптики составляют с заблаговременностью до трех суток и передают в Гидрометцентр России в специальном коде КП-68.

Таблица 2. Параметры модели WRF для проведения численных экспериментов

Table 2. Parameters of the WRF model for conducting numerical experiments

Характеристика модели	Значение (настройка)
Версия модели	4.2.1
Постобработчик	UPP 2.2
Формат выходных данных	grib
Горизонтальный шаг сетки	9, 3, 1 км
Координаты центра домена	56° с. ш., 92° в. д.
Число узлов сетки	333×333, 400×400 (вложенный), 400×400 (вложенный)
Число вертикальных уровней	51
Рельеф	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Продолжительность моделирования	51 ч
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	Advanced Research WRF (ARW), non-hydrostatic
Временной шаг интегрирования	адаптивный
Начальные и граничные условия	прогнозы GFS/NCEP
Микрофизика облачности	схема Томпсона
Параметризация пограничного слоя	Yonsei University scheme
Параметризация процессов подстилающей поверхности	модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
Приземный слой	схема Монины – Обухова
Конвекция	прямое моделирование (без параметризации)

Поскольку модель WRF-ARW не рассчитывает максимальную суточную температуру, была проведена процедура выборки максимальной температуры из прогностических ежечасных значений.

Анализ и обсуждение

За последние пять лет на станции Опытное поле в Красноярске зафиксировано четыре случая с температурой воздуха выше 30 °С. События 8 июня 2023 г. превысили критерий опасности и интересны для рассмотрения как отдельного случая экстремальной жары редкой повторяемости. Если ориентироваться на данные станции с длинным рядом наблюдений в Красноярске (Опытное поле), то максимальная температура, достигнув 8 июня 2023 г. 35,0 °С, будет восьмой по порядку в ранжированном ряду. Ближайшая сильная жара большей интенсивности наблюдалась 13 июля 2011 г. с максимальной суточной температурой 35,8 °С. За счет влияния городского острова тепла наибольшие значения максимальной суточной температуры 08.06.2023 фиксировались на другой метеорологической станции (индекс 29574) в центральной части Красноярска, поэтому именно эта станция выбрана для анализа (табл. 3).

Таблица 3. Даты случаев жаркой погоды на станции Красноярск (индекс ВМО 29574)

Table 3. Dates of hot weather events at Krasnoyarsk station (WMO Index 29574)

№ п/п	Дата	Максимальная температура, °С
1	2 июля 2020 г.	36,2
2	6 июля 2021 г.	37,0
3	8 июня 2023 г.	37,2
4	25 августа 2023 г.	33,2

Рассмотрим случаи, приведенные в табл. 3. Ниже приведены карты барической топографии на поверхности 500 гПа для случаев 02.07.2020, 06.07.2021, 08.06.2023 – за 12 ч ВСВ предыдущего дня, для случая 25.08.2023 – за 00 ч ВСВ текущего дня, отражающие стадию максимального развития высотного гребня.

Первый из рассмотренных случаев наблюдался на южной периферии антициклона при смещении теплого фронта на Красноярск. В первый день июля 2021 г. циклон развивался южнее Новосибирска, а севернее Красноярска 02.07.2020 расположился высокий антициклон с давлением в центре 1021.5 гПа. Циркуляция антициклона была хорошо выражена на изобарической поверхности 500 гПа (рис. 1). Теплая тропическая воздушная масса по южной периферии антициклона переместилась в район Красноярска с юго-востока из западного Прибайкалья. Ясная, солнечная погода способствовала интенсивному прогреву приземного воздуха. Наиболее высокая температура 2 июля фиксировалась на юго-востоке и востоке от Красноярска. Теплый воздух из южного Прибайкалья получил дополнительный прогрев в условиях ясной погоды. В Красноярске вечером 2 июля облака

теплого фронта уменьшили инсоляцию, и максимальная температура снизилась до 29,8 °С. В последующие дни за счет дальнейшего влияния облаков температура в Красноярске снизилась.

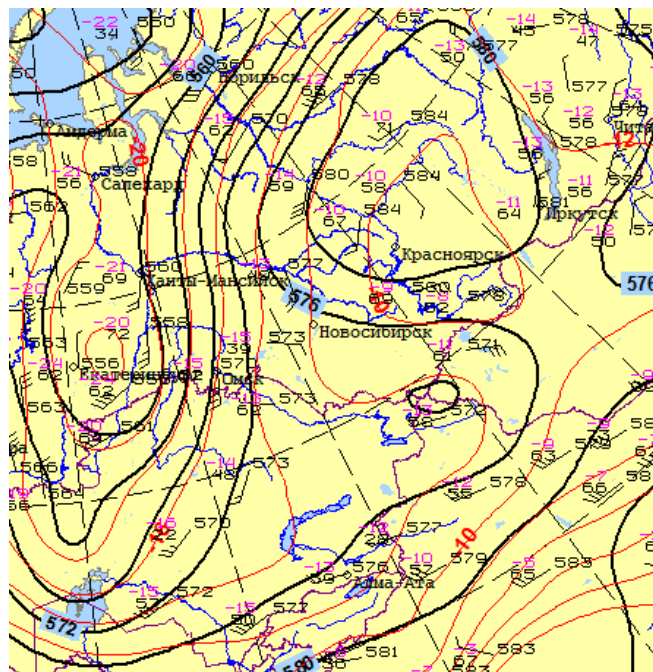


Рис. 1. Карта барической топографии поверхности 500 гПа за 12 ч ВСВ 1 июля 2020 г.

Fig. 1. The map of the baric topography of the 500 hPa surface for 12 hours UTC on July 1st, 2020.

Второй из рассмотренных случаев произошел под влиянием подвижного циклона с центром западнее Красноярска в среднем течении реки Оби. Циклон сформировался в передней части высотной ложбины, в зоне расхожимости воздушных потоков, что обусловило его дальнейшее развитие (рис. 2). С 4 по 6 июля 2021 г. он сместился на северо-восток, и Красноярск попал в его теплый сектор. Температура в центре города поднялась до 37,0 °С. После прохождения теплого фронта в условиях сплошной облачности температура воздуха снизилась.

Третий случай произошел в условиях влияния антициклона над Саянскими горами и барической седловины северо-восточнее Красноярска (рис. 3). По северной периферии антициклона на территорию Красноярска поступал прогретый воздух с предгорий Алтая. За счет развития нисходящих воздушных течений установилась ясная и солнечная погода. В центре города 8 июня температура воздуха поднялась до экстремально опасных значений (37,2 °С). В последующие сутки за счет интенсивного прогрева

и формирования неустойчивой стратификации над Красноярском и в окрестностях прошли грозы в системе линии неустойчивости перед теплым фронтом, и температура снизилась.

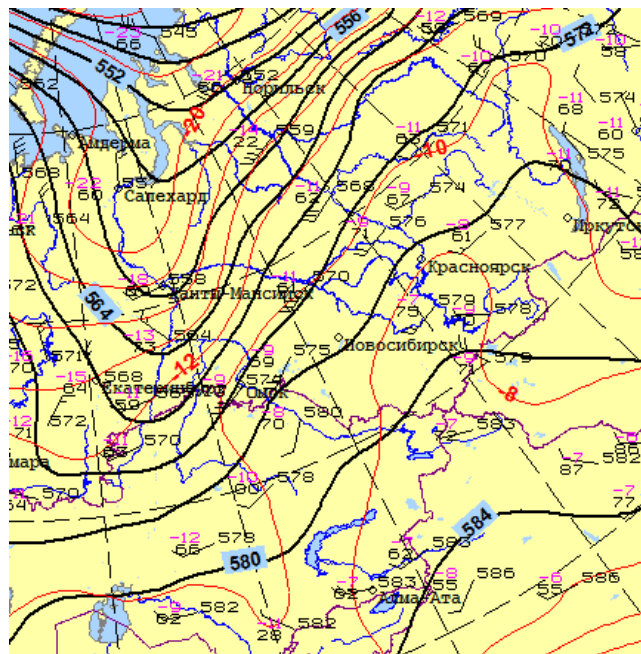


Рис. 2. Карта барической топографии поверхности 500 гПа за 12 ч ВСВ 5 июля 2021 г.

Fig. 2. The map of the barometric pressure distribution at 500 hPa for the period of 12 hours UTC starting on July 5th, 2021.

Четвертый случай сильной жары произошел 25 августа 2023 г. при смещении ложбины глубокого циклона с центром над северной частью Западно-Сибирской равнины. Погода 24 августа в Красноярске формировалась под влиянием антициклона с центром над Якутией. Отрог антициклона распространялся на юго-запад и определял погоду над Забайкальем, Саянами и Монголией. В это время над Западной Сибирью располагался глубокий обширный циклон с центром над нижним течением Оби. В передней части высотного циклона за счет расходимости воздушных потоков создались благоприятные условия для циклогенеза (рис. 4). В течение следующих суток в глубокой ложбине стал развиваться частный циклон и смещаться на восток, формируя воздушные потоки с территории Хакасии. В его теплый сектор поступал прогретый тропический воздух, но в последующие дни из-за влияния облаков максимальная температура быстро снизилась. Высота расположения полуденного Солнца в августе значительно ниже, чем в июне и июле, поэтому в данном случае опасные значения температуры не были достигнуты.

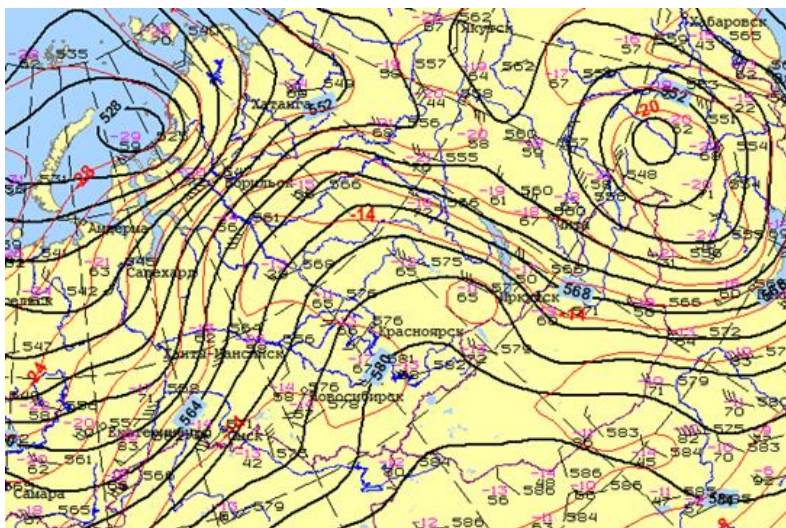


Рис. 3. Карта барической топографии поверхности 500 гПа за 0 ч ВСВ 8 июня 2023 г.

Fig. 3. The map of the barometric pressure distribution at 500 hPa for the period of 0 hours UTC starting on June 8th, 2023.

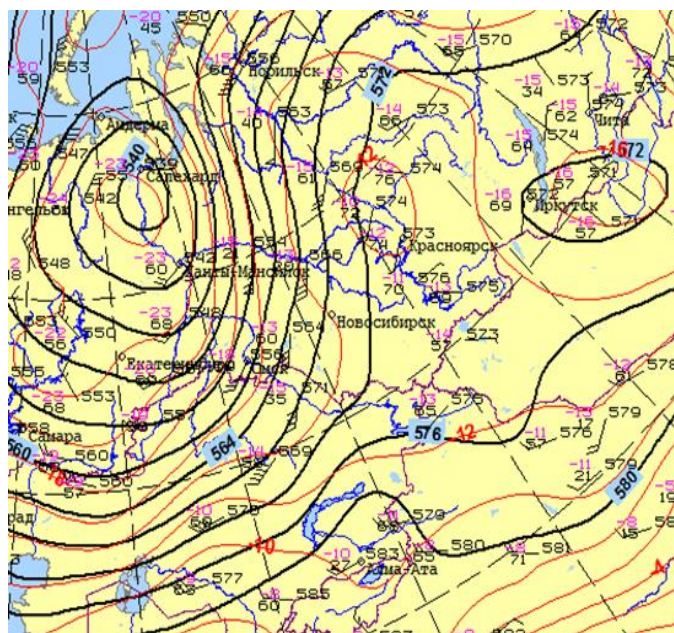


Рис. 4. Карта барической топографии поверхности 500 гПа за 12 ч ВСВ 24 августа 2023 г.

Fig. 4. The map of the barometric pressure distribution at 500 hPa for the period of 12 hours UTC starting on June 24th, 2023.

В трех из четырех случаев повышение температуры воздуха было связано с южными воздушными потоками. Во всех случаях западнее Красноярска находился циклон с влиянием теплого фронта.

Рассмотрим структуру городского острова тепла в Красноярске на примере случая 02.07.2020. На рис. 5 представлен суточный ход температуры воздуха в центре города на улице Дудинской и в пригороде на северном склоне возвышенности севернее Енисея (Опытное поле) 1 и 2 июля 2020 г., а также суточный ход температуры на загородной станции в поселке Емельяново в 25 км от центра Красноярска. За пределами города температура воздуха ниже, кроме двух утренних сроков 2 июля. При этом наибольшие различия в ночные часы отмечались в 1 ч местного времени (6,4 °С). В вечерние часы (16 ч местного времени), когда наблюдается суточный максимум температуры, различия между центром города и сельской местностью 1 и 2 июля составили 2,4 и 2,9 °С соответственно. Следует отметить, что облачность в дневные часы 1 июля была представлена перистыми волокнистыми облаками (*Cirrus fibratus*), которая практически не препятствует солнечному прогреву земной поверхности (табл. 4).

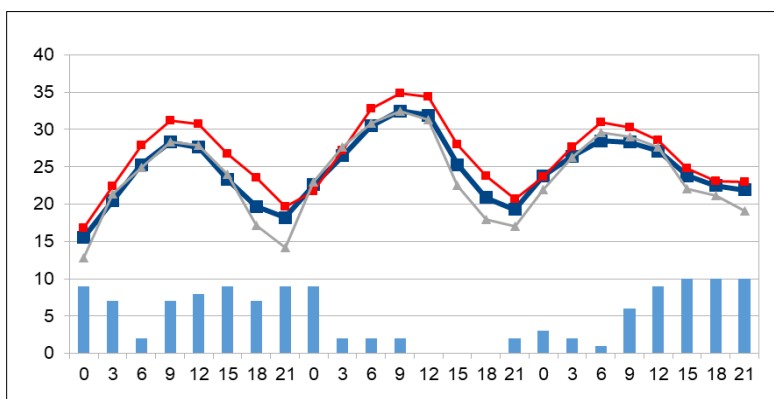


Рис. 5. Суточный ход температуры воздуха (°С) в центре Красноярска (красные точки), в Опытном поле (синие точки) и Емельяново (серые точки), общий бал облачности (столбцы) 1–2 июля 2020 г.

Fig. 5. The daily course of air temperature (°C) in the center of Krasnoyarsk (red dots), at the Experimental field (blue dots), and Yemelyanovo (gray dots), as well as the total cloud cover (bars) for July 1st and 2nd, 2020.

Из табл. 4 видно, что во все рассматриваемые дни (табл. 3), исключая случай за август 2023 г., интенсивность городского острова тепла была практически постоянна и составила в среднем 2,5 °С. В конце августа из-за меньшей высоты Солнца в дневное время городской остров тепла проявлялся лишь в среднем в 1,3 °С. Ночное выхолаживание в городе происходило медленнее, и именно в ночные часы городской остров тепла проявил себя особенно ярко, составив для всех четырех случаев в среднем 6,5 °С.

Над городом 7 июня 2023 г. сформировалась облачность, на отдельных станциях прошла гроза и выпали осадки. Это привело к тому, что температура воздуха в 9 ч ВСВ за городом оказалась выше, чем в центре.

Таблица 4. Интенсивность острова тепла для случаев сильной жары в Красноярске, °С

Table 4. The intensity of the heat island for cases of extreme heat in Krasnoyarsk, degrees Celsius

Срок, ч ВСВ	07.2020		07.2021		06.2023			08.2023		Среднее
	1	2	5	6	7	8	9	24	25	
9	2,9	2,4	2,6	2,6	облака	2,1	2,5	1,1	1,5	2,2
18	6,4	5,9	8,0	6,7	7,5	6,4	3	7,3	7,4	6,5

Влажность воздуха в городе ниже, чем в сельской местности. В изучаемые периоды наименьшее значение относительной влажности зафиксировано в центре Красноярска (22 %), а среднее значение составило 58 %. Мостовые и крыши домов обеспечивают быстрый сток осадков, и вследствие отсутствия источников испарения абсолютная и относительная влажность уменьшаются. Для части города Красноярска абсолютная и относительная влажность бывает выше из-за влияния Енисея. Для оценки интенсивности «острова сухости» (с точки зрения климатологов – место, где влажность устойчиво понижается) лучше использовать данные со станции Минино. Станция Емельяново находится в 150 м от р. Кача, что создает дополнительные условия для поддержания высокой влажности рядом со станцией. Станция Минино находится в 13,5 км северо-западнее центра Красноярска. Наибольшее различие в распределении влажности наблюдается в дневные часы, максимальная разность для наших периодов была 1 июля 2020 г. между станцией Минино и центром Красноярска и составила 20 %.

На метеорологических станциях Роев ручей, Опытное поле, Минино осредненные значения относительной влажности достигли 64 %. В Емельяново наблюдалась самая высокая относительная влажность – 70 %. Суше всего оказался воздух в центре города (58 %). Интенсивность «острова сухости» при сравнении средней влажности на станциях Митино и Красноярск составила 5 %. Разность между пригородом и центром 8 июня была минимальна: в этот день в большей степени сказывалась близость Енисея к метеорологической станции в центре города на улице Дудинской. В остальные дни такое влияние не проявлялось.

Скорости ветра в городской застройке ниже. Средняя скорость на открытой местности в Емельяново за весь период исследования составила 3 м/с, а в центре города – 1 м/с. Расположение города в глубокой долине способствует дополнительному уменьшению скорости ветра.

При численном моделировании высокого разрешения модель WRF-ARW воспроизвела особенности метеорологических процессов в Красноярске и окрестностях. Оценка точности прогнозирования максимальных суточных температур была центральной при проведении исследования. На станции Опытное поле максимальное значение температуры фиксировалось в 16 ч местного времени (9 ч ВСВ) для всех случаев жаркой погоды. Этому сроку соответствуют 9 ч и 33 ч заблаговременности модельного прогноза от времени начала счета в 0 ч ВСВ первых суток прогноза. Результаты оценки качества прогноза представлены в табл. 5. Качество прогноза на вторые сутки по температуре значительно хуже: для пригорода (Опытное поле, Миино, Роев ручей) ошибка меньше, чем в сельской местности (Емельяново). Для относительной влажности и скорости ветра прогноз первых суток успешнее. Скорость ветра в сельской местности прогнозируется лучше, чем в пригороде.

Таблица 5. Абсолютные ошибки прогнозов температуры воздуха δt , относительной влажности δf и скорости ветра δv модели WRF-ARW

Table 5. Absolute errors in the forecast of air temperature, relative humidity and wind speed of the WRF-ARW model

Метеостанция	δt , °C		δf , %		δv , м/с	
	9 ч	33 ч	9 ч	33 ч	9 ч	33 ч
Опытное поле	0,9	2,0	7	8	2	3
Миино	0,4	2,0	5	11	1	2
Роев Ручей	0,9	2,9	3	9	1	2
Емельяново	0,7	3,6	5	17	1	1
Средняя	0,7	2,6	5	11	1	2

Сопоставление максимальной суточной температуры по разным видам прогнозов представлено для трех станций (табл. 6), приведенные результаты свидетельствуют о высокой точности комплексного прогноза и расчета элементов погоды (РЭП).

Таблица 6. Абсолютные ошибки прогноза температуры воздуха δt , °C для разных видов прогноза на 48 ч

Table 6. Absolute errors in the forecast of air temperature δt , °C for different types of forecast for 48 hours

Метеостанция	КП-68	РЭП	Комплексный прогноз	WRF-ARW
Опытное поле	1,0	0,8	0,4	1,6
Миино	–	–	0,6	0,9
Красноярск	–	–	1,0	2,5
Средняя	1,0	0,8	0,7	1,7

Прогноз синоптиков также оказался точнее прогноза модели WRF-ARW. Точность прогноза максимальной суточной температуры оказалась выше прогноза срочной температуры воздуха. Следует отметить, что точность комплексного прогноза максимальной суточной температуры также хуже в центре города по отношению к прогнозу для сельской местности. Все прогностические схемы занижают максимальную суточную температуру.

Для оценки качества прогнозов на рис. 6–8 приведены карты прогнозов температуры воздуха, влажности и скорости ветра для случая 8 июня 2023 года.

На рис. 6 прослеживается цепь замкнутых областей с температурой значительно ниже температуры окружающего воздуха. Такое распределение температуры определяется влиянием Енисея: по соседству представлены области с максимальными значениями температуры в городской застройке и более холодные участки воздуха над рекой.

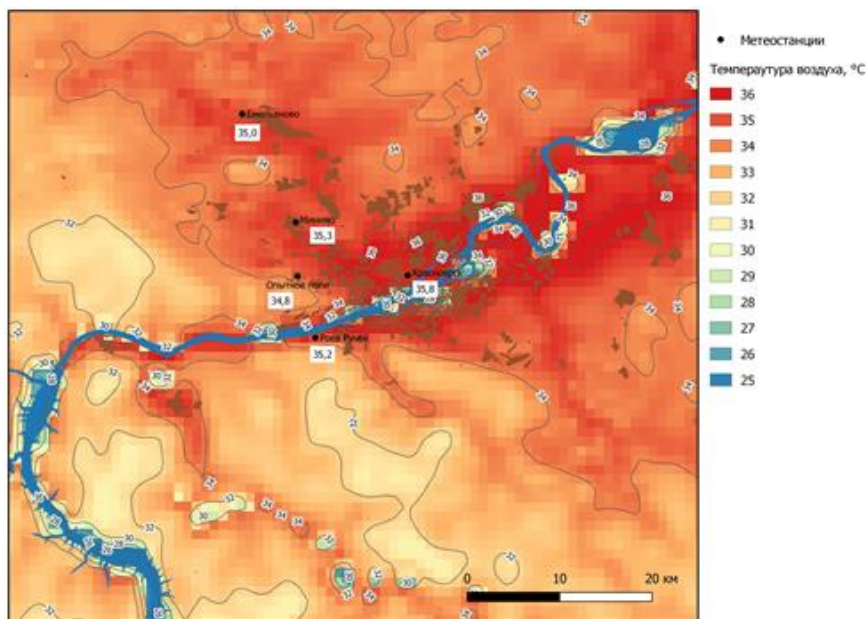


Рис. 6. Температура воздуха у земной поверхности в 9 ч ВСВ 8 июня 2023 г.
Fig. 6. The air temperature at the Earth's surface at 9 hours UTC on June 8th, 2023.

По городской застройке можно выделить районы, где прогнозируемая температура достигает 36,0 °С, фактические значения оказались выше, но в целом дневной городской остров тепла достоверно воспроизводится моделью WRF-ARW в Красноярске.

Прогностические значения относительной влажности (рис. 7) над Енисеем выше, чем в районе городской застройки, составляя, соответственно,

50 и 30 %. «Остров сухости» в центре Красноярска точно воспроизводится моделью WRF-ARW. Повышенная влажность прогнозируется и на вершинах холмов южнее Красноярска, что соответствует теории.

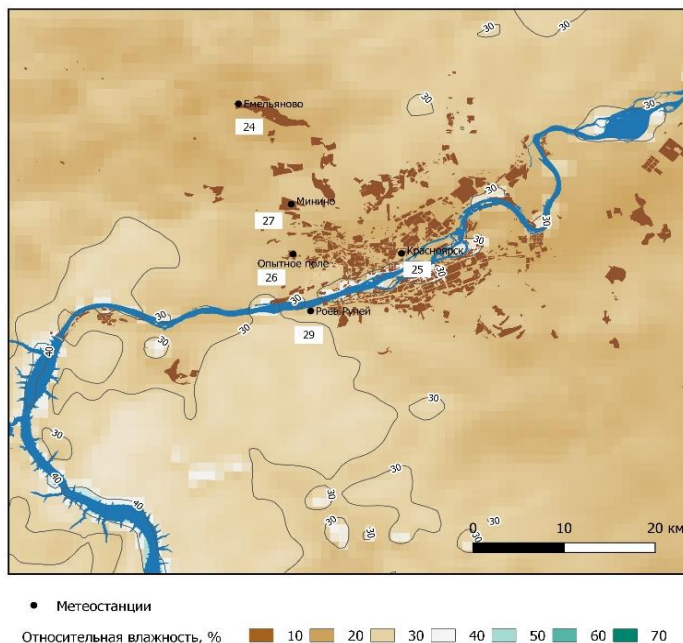


Рис. 7. Относительная влажность (%) у земной поверхности в 9 ч ВСВ 8 июня 2023 г. Числа в белых прямоугольниках – фактические значения температуры.
Fig. 7. Relative humidity (%) at the Earth's surface at 9 hours UTC on June 8th, 2023. The numbers in the white rectangles are the actual relative humidity.

Минимальная приземная скорость ветра (рис. 8) прогнозируется в долине р. Качи, а максимальные скорости – ветра на склонах холмов, что также соответствует теоретическим представлениям и фактическим наблюдениям.

Из динамики изменения температуры (см. рис. 5) следует, что наиболее ярко остров тепла проявляется в утренние часы (4 ч местного времени). Для оценки воспроизведения моделью WRF-ARW ночного выхолаживания приведены рис. 9 и 10 с результатами прогноза температуры и влажности для утренних сроков.

Модель хорошо воспроизводит городской остров тепла и выхолаживание воздуха в сельской местности в утренние сроки. В ночной период времени формируется инверсионное распределение температуры. В 0 ч ВСВ 9 июня 2023 г. по данным радиозондирования в Емельяново величина

инверсии в нижнем слое (108 м) составила 4,4 °С. В связи с этим достоверным выглядит прогностическое поле температуры с высокими значениями южнее и западнее Красноярска, где наибольшая высота вершин холмов.



Рис. 8. Скорость ветра у земной поверхности (м/с) в 9 ч ВСВ 8 июня 2023 г.
Fig. 8. Wind speed at the Earth's surface at 9 hours UTC on June 8th, 2023, in m/s.

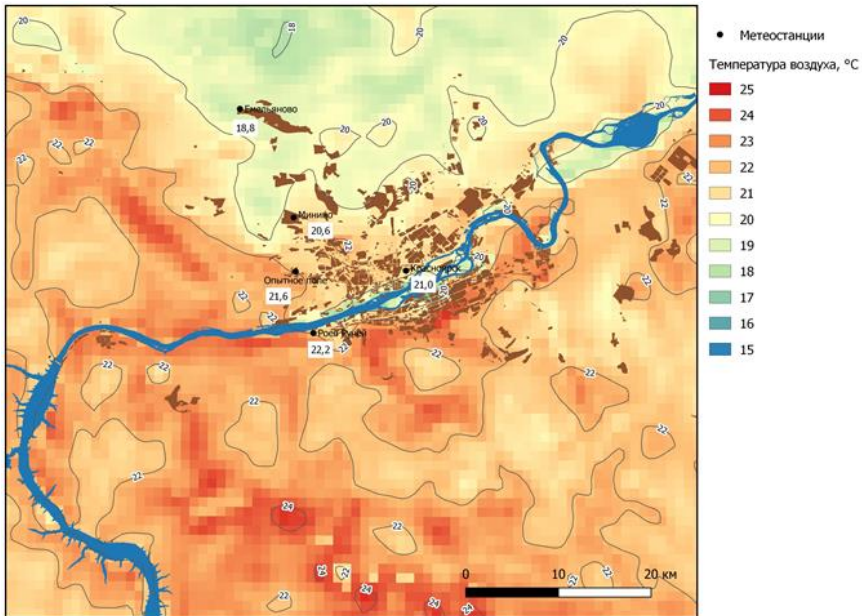


Рис. 9. Температура воздуха у земной поверхности в 21 ч ВСВ 8 июня 2023 г. (21 ч счета модели). Числа в белых прямоугольниках – фактические значения температуры.
Fig. 9. The air temperature at the Earth's surface at 21 hours UTC on June 8th, 2023 (21 hours UTC of the model account). The numbers in the white rectangles are the actual temperature values.

Прогноз относительной влажности в ночные сроки хорошо воспроизводится моделью WRF-ARW. Повышенные значения относительной влажности в пойме р. Енисей можно видеть на рис. 10. Относительная влажность выше за городом – здесь воздух охлаждается сильнее всего. В пригороде Красноярска влажность воздуха меньше, так как Енисей далеко, а городской остров тепла продолжает оказывать влияние. Наименьшие значения относительной влажности отмечаются на склонах окружающих холмов из-за влияния инверсии температуры.

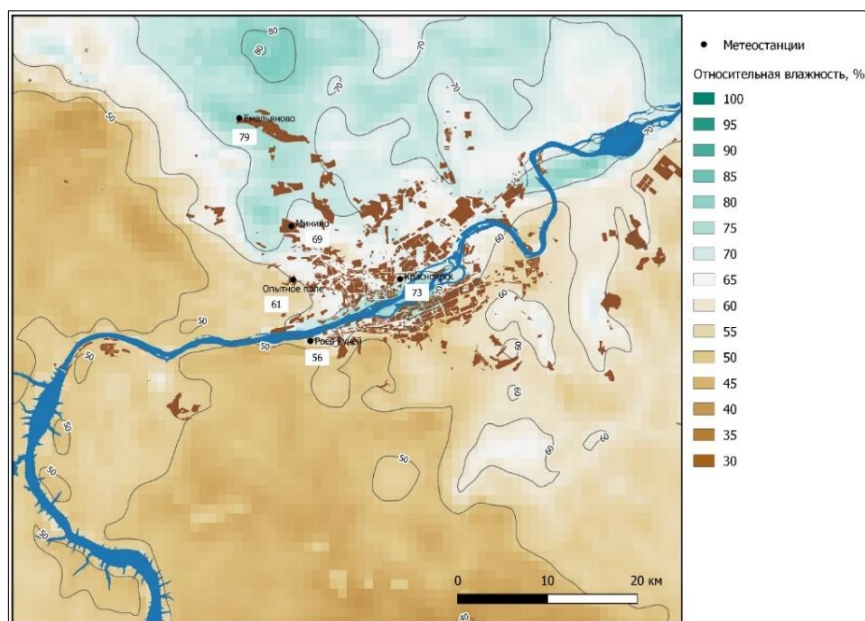


Рис. 10. Относительная влажность воздуха у земной поверхности в 21 ч ВСВ 8 июня 2023 г. Числа в белых прямоугольниках – фактические значения относительной влажности.

Fig. 10. Relative humidity of the air at the Earth's surface at 21 hours UTC on June 8th, 2023. The numbers in the white rectangles are the actual values of relative humidity.

Модель систематически занижает температуру воздуха в дневные сроки. В 9 ч ВСВ среднее занижение по всем станциям составило 1,4 °С. Для ночных сроков модель, напротив, завышает прогнозируемые температуры. Для сельской местности (станция Емельяново) в срок 9 ч ВСВ (33 ч счета модели, прогноз на следующие сутки) модель занижает прогноз в среднем на 0,5 °С для всех рассмотренных случаев жаркой погоды. На пригородных станциях Опытное поле и Минино модель занижает температуру на 2,0 °С. Таким образом, модельный городской остров тепла слабее

и днем, и ночью. Факт занижения максимальной температуры воздуха в городской застройке необходимо учитывать при использовании модели WRF-ARW для целей прогнозирования условий комфортности в городах.

Заключение

Выполнено исследование синоптических и метеорологических условий возникновения сильной жары в Красноярске. Обнаружена типичная синоптическая ситуация для формирования аномально высоких значений температуры воздуха: адвекция теплого тропического воздуха в условиях передней части высотной ложбины или глубокого циклона над Западной Сибирью. Подтверждена важность влияния солнечной радиации на формирование абсолютных годовых максимумов температуры. Все рассмотренные случаи в первые дни развития жары сопровождались ясной безоблачной погодой, что обуславливало дополнительный прогрев.

Установлены особенности городского острова тепла в Красноярске. В условиях жаркой погоды городской остров тепла ночью выражен ярче, чем днем. Наряду с городским островом тепла, в Красноярске во время жаркой погоды прослеживается формирование острова сухости, когда относительная влажность уменьшается по сравнению с загородными территориями на 20 %.

Численная модель атмосферы WRF-ARW достоверно воспроизводит на первые 51 ч счета распределение полей температуры, влажности и скорости ветра. Абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на вторые сутки не превышает 2,6 °С. Модель занижает прогностические значения максимальной суточной температуры воздуха и завышает ночную минимальную температуру.

Использование модели WRF-ARW для прогнозирования погодных условий, вызывающих рост случаев обострения заболеваний и количества смертей от жаркой погоды, можно признать целесообразным. Однако синоптический и статистический методы прогноза максимальной суточной температуры превосходят этот подход по точности, и если нет необходимости в детализации пространственно-временного распределения температуры воздуха, то системы прогнозирования смертности от жаркой погоды можно реализовать на этих методах.

Дальнейшие усилия по улучшению точности прогноза температуры в городской застройке могут быть направлены на подбор оптимальной параметризации пограничного слоя в стандартных настройках модели WRF-ARW или использования специализированных параметризаций городского пограничного слоя Building Energy Parameterization и Building Energy Model. Пример применения таких параметризаций изложен в [7] для Москвы. Третий путь решения задачи для ограниченной территории исследования лежит в области интеграции региональной модели WRF-ARW с микромасштабной моделью с шагом менее 10 м, в которой

процесс обтекания отдельных зданий реализуется явно [11]. Возможность подобного создания иерархии из моделей на примере климатической микромасштабной модели ENVI-MET для московского мегаполиса иллюстрируется в [5].

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-61-00098.

Список литературы

1. Багров А.Н., Быков Ф.Л., Гордин В.А. Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза приземной температуры воздуха и влажности // Метеорология и гидрология. 2018. № 8. С. 5-18.
2. Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестник МГУ. 2017 Т. 5, № 6. С. 25-37.
3. Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Васильева Е.Л., Веселова Г.К., Горлач И.А. Среднесрочный прогноз температуры воздуха и возникновения некоторых опасных явлений по технологии Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 5-14.
4. Калинин Н.А., Ветров А.Л. Индексы комфортности климата в Перми и городах-миллионниках Сибири за 1991–2020 гг. // Геосферные исследования. 2023. № 4. С. 132-142.
5. Кислов А.В., Алексеева Л.И., Варенцов М.И., Константинов П.И. Изменения климата и экстремальные явления погоды в Московской агломерации // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 64-76.
6. Климат Красноярска. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 231 с.
7. Коспанов А.А., Константинов П.И. Применение многоуровневой параметризации городских ландшафтов в климатической модели WRF-ARW для создания базы данных о климате мегаполиса и его пригородов: первые результаты на примере московского региона // Географический вестник=Geographical bulletin. 2023. № 4(67). С. 99-109.
8. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Кулюшина А.В. Чувствительность численного прогноза метеорологических полей к изменению параметров, характеризующих урбанизированную поверхность Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 11(406). С. 932-943. DOI 10.15372/AOO20221109.
9. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Целев В.Ю. Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 109-125.
10. Леонов И.И., Соколичина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 69-83.
11. Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А., Гаврилов А.А. Роль городской застройки в формировании "острова тепла" // Вычислительные технологии. 2021. № 26(5). С. 4-14. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.5.002.
12. Набокова Е.В. Опыт применения модели WRF с учетом двух методов параметризации городского подسоя для прогноза температуры воздуха и скорости ветра // Труды Гидрометцентра России. 2010. Вып. 344. С. 180-195.
13. Ревич Б.А. Волны жары в мегаполисах и пороги их воздействия на смертность населения // Гигиена и санитария. 2017 № 96(11) С. 1073-1078.
14. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Особенности воздействия волн холода и жары на смертность в городах с резко-континентальным климатом // Сибирское медицинское обозрение. 2017. № 2. С. 84-90.

15. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Краткосрочный численный прогноз погоды высокого пространственного разрешения по Владивостоку на базе модели WRF-ARW // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2014. № 5(177). С. 48-57.

16. Самсонов Т.Е., Варенцов М.И. Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 112-119.

17. Шапошников Д.А., Ревич Б.А. О некоторых подходах к вычислению рисков температурных волн для здоровья // Анализ риска здоровью. 2018. № 1. С. 22-31.

18. Черных Д.А., Тасейко О.В. Оценка риска повышения смертности от температурных волн для населения города Красноярск // Экология человека. 2018. № 2. С. 3-8.

19. Юшков В.П., Курбатов М.М., Варенцов М.И., Лезина Е.А., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Калистратова М.А. Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. // Известия Российской академии наук. ФАО. 2019. Т. 55, № 5. С. 13-31.

20. Chen L., Zhang M., Wang Y. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: A case study of Nanjing, China // Theor. Appl. Climatol. 2016. Vol. 125, no 3. P. 713-728.

21. Giannaros T.M., Melas D., Daglis I.A., Keramitsoglou I., Kourtidis K. Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model // Atmos. Environ. 2013. No. 73. P. 103-111.

22. Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A., Pitt A., Taseiko O.V. Urban wind fields: Phenomena in transformation // Urban Climate. 2016. Vol. 9. P. 122-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.005>

23. Obe O.B., Morakinyo T.E., Mills G. An assessment of WRF-urban schemes in simulating local meteorology for heat stress analysis in a tropical sub-Saharan African city, Lagos, Nigeria // Int. J. Biometeorol. 2024. Vol. 68. P. 811-828. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02627-3>

24. Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M. Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment // Atmosphere. 2020. Vol. 11, no. 12. P. 1349.

25. Salamanca F., Zhang Y., Barlage M., Chen F., Mahalov A., Miao S. Evaluation of the WRF-urban modeling system coupled to Noah and Noah-MP land surface models over a semiarid urban environment // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. Vol. 123. P. 2387-2408. <https://doi.org/10.1002/2018JD028377>

26. 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., Huang, X. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 // No. NCAR/TN-556+STR. 2021. <https://doi:10.5065/1dfh-6p97>

References

1. Bagrov A.N., Bykov P.L., Gordin V.A. Operative Scheme for the Short-range Complex Forecasting of Surface Air Temperature and Humidity. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 8, pp. 495-505. DOI: 10.3103/S1068373918080010.

2. Varentsov M.I., Samsonov T.E., Kislov A.V., Konstantinov P.I. Reproduction of the heat island of the Moscow agglomeration with the COSMO-CLM regional climate model *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2017, no. 6, pp. 25-37. [in Russ.].

3. Vil'fand R.M., Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L., Veselova G.K., Gorlach I.A. Medium-range forecast of air temperature and of some dangerous phenomena using the technique of the hydrometeor center of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 651-658. DOI 10.3103/S1068373910100018.

4. Kalinin N.A., Vetrov A.L. Climate comfort indices in Perm and Siberian millionaire cities since 1991–2020. *Geosphere Research*, 2023, no. 4, pp. 132-142. DOI: 10.17223/25421379/29/9 [in Russ.].

5. Kislov A.V., Alekseeva L.I., Varentsov M.I., Konstantinov P.I. Climate change and extreme weather events in the Moscow agglomeration. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 7, pp. 498-507. DOI: 10.3103/S1068373920070055.

6. Klimat Krasnoyarska [Climate of Krasnoyarsk]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1982, 231 p. [in Russ.].

7. Kospanov A.A., Konstantinov P.I. Application of multi-layer parameterization of urban landscapes in WRF-ARW regional model to create a database on the climate of a megacity and its suburbs: first results for the Moscow region. *Geographical Bulletin*, 2023, vol. 67, no. 4, pp. 99-109. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-4-99-109 [in Russ.].

8. Ladohina E.M., Rubinshtein K.G., Kulyushina A.V. Sensitivity of the numerical weather forecast fields to the variations in St. Petersburg surface parameters. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2022, vol. 35, no. 11, pp. 932-943. DOI: 10.15372/AOO20221109 [in Russ.].

9. Ladohina E.M., Rubinshtein K.G., Tsepelev V.Y. Identification of periods with maximum heat island intensity in St. Petersburg for the validation of numerical weather forecasts. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no. 2, pp. 109-125. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-2-109-125 [in Russ.].

10. Ladohina E. M., Rubinshtein K. G., Tsepelev V.Y. Identification of periods with maximum heat island intensity in St. Petersburg for the validation of numerical weather forecasts // *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no. 2, pp. 109-125. DOI: 10.37162/2618-9631-2020-2-109-125 [in Russ.].

11. Meshkova V.D., Dekterev A.A., Litvintsev K.Y., Filimonov S.A., Gavrilov A.A. The role of urban development in the formation of a heat island. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]*, 2021, vol. 26, no 5, pp.4-14. DOI: 10.25743/ICT.2021.26.5.002 [in Russ.].

12. Nabokova E.V. The experience of using the WRF model in respect 2 parameterization methods of urban sub-layer for wind velocity and temperature prediction. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometeorology Center of Russia]*, 2010, vol. 344, pp. 180-195 [in Russ.].

13. Revich B.A. Heat-waves in metropolises and thresholds of their impact on public health. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]*, 2017, vol. 96, no. 11, pp.1073-1078. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2017-96-11-1073-1078> [in Russ.].

14. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. Osobennosti vozdeistviya voln kholoda i zhary na smertnost' v gorodakh s rezko-kontinental'nym klima-tom. *Sibirskoe meditsinskoe obozrenie*. 2017, no. 2, pp. 84-90 [in Russ.].

15. Romanskiy S.O., Verbitskaya E.M. Short-term high-resolution numerical weather prediction based on WRF-ARW model on the territory of Vladivostok City. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk [Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences]*, 2014, vol. 177, no. 5, pp. 48-57 [in Russ.].

16. Samsonov T.E., Varentsov M.I. Computation of City-descriptive Parameters for High-resolution Numerical Weather Prediction in Moscow Megacity in the Framework of the COSMO Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, no. 45, pp. 515-521. DOI: 10.3103/S1068373920070079.

17. Shaposhnikov D.A., Revich B.A. On some approaches to calculation of health risks caused by temperature waves. *Health Risk Analysis*, 2018, no. 1, pp. 22-31. DOI: 10.21668/health.risk/2018.1.03.eng

18. Chernykh D.A., Taseiko O.V. Assessment of the Risk Mortality from Thermal Waves in Krasnoyarsk City. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*, 2018, vol. 2, pp. 3-8 [in Russ.].

19. Yushkov V.P., Kurbatova M.M., Varentsov M.I., Lezina E.A., Kurbatov G.A., Miller E.A., Repina I.A., Artamonov A.Y., Kallistratova M.A. Modeling of the heat island in the period of extreme frost in Moscow in January 2017. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 13-31. DOI: 10.31857/S0002-35155513-31 [in Russ.].

20. Chen L., Zhang M., Wang Y. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: A case study of Nanjing, China. *Theor. Appl. Climatol.*, 2016, vol. 125, no 3, pp. 713-728.

21. Giannaros T.M., Melas D., Daglis I.A., Keramitsoglou I., Kourtidis K. Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmos. Environ.*, 2013, no. 73, pp. 103-111.

22. Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A., Pitt A., Taseiko O.V. Urban wind fields: Phenomena in transformation. *Urban Climate*, 2016, vol. 9, pp. 122-140. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.12.005.

23. Obe O.B., Morakinyo T.E., Mills G. An assessment of WRF-urban schemes in simulating local meteorology for heat stress analysis in a tropical sub-Saharan African city, Lagos, Nigeria. *Int. J. Biometeorol.*, 2024, vol. 68, pp. 811-828. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02627-3>.

24. Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M. Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no 12, pp. 1349.

25. Salamanca F., Zhang Y., Barlage M., Chen F., Mahalov A., Miao S. Evaluation of the WRF-urban modeling system coupled to Noah and Noah-MP land surface models over a semiarid urban environment. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 2018, vol. 123, pp. 2387-2408. DOI: 10.1002/2018JD028377.

26. 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., Huang X. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR) 2021. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

*Поступила 16.05.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024;
принята в печать 17.06.2024.*

*Submitted 16.05.2024; approved after reviewing 06.06.2024;
accepted for publication 17.06.2024.*