

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-3-64-76>

УДК 551.509.5

## Прогноз экстремально морозной погоды в Красноярске с использованием региональной модели WRF-ARW

*А.В. Быков<sup>1,2</sup>, А.Л. Ветров<sup>1</sup>, Н.А. Калинин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия;

<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия  
*vetrov@psu.ru*

Изучены причины формирования экстремально морозной погоды с температурой воздуха ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в Красноярске, оценена точность ее прогноза региональной моделью WRF-ARW для четырех случаев в 2019, 2020 и 2023 гг., которые связаны с формированием мощного антициклона над Западно-Сибирской равниной и адвекцией очень холодного арктического воздуха в передней части высотного гребня, сопровождающегося ясной, безоблачной погодой. Изучены условия формирования городского острова тепла, интенсивность которого меняется от  $4,0$  до  $8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в среднем составила  $6,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Области максимальной температуры находятся на обоих берегах Енисея в местах наиболее плотной застройки. В дневные часы городской остров тепла проявляется слабее, чем ночью. Определено, что модель WRF-ARW на вторые сутки прогноза воспроизводит городской остров тепла, однако завышает прогнозируемую температуру воздуха, особенно сильно в дневные сроки. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на сроки, близкие к наступлению суточного минимума, составила  $2,6$  и  $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  при прогнозе на 24 и 48 ч соответственно.

*Ключевые слова:* численный прогноз погоды, мороз, модель WRF-ARW, городской остров тепла, Красноярск

## Extreme frost forecasting in Krasnoyarsk using the WRF-ARW regional model

*A.V. Bykov<sup>1,2</sup>, A.L. Vetrov<sup>1</sup>, N.A. Kalinin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Perm State University, Perm, Russia;

<sup>2</sup> Institute of Continuous Media Mechanics,  
UB RAS, Perm, Russia  
*vetrov@psu.ru*

The reasons for the occurrence of severe frost in Krasnoyarsk are studied, and the accuracy of its forecasting with the WRF-ARW regional model is assessed. Four episodes of cold weather events in 2019, 2020 and 2023 are analyzed. All the cases are associated with the formation of a strong anticyclone over the West Siberian Plain and advection of very cold Arctic air in front of the high-altitude ridge accompanied by the clear-sky weather. The formation environments of an urban heat island were studied, its intensity was found to vary from  $4.0$  to  $8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with an average of  $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The zones of maximum temperature are situated on the both Yenisei banks in the areas of the densest building. During the daytime, the urban heat island effect is less pronounced than at night. The WRF-ARW model was found

to simulate the urban heat island on the second forecast day, although it overestimated predicted air temperatures, especially in the daytime. An absolute error in air temperature predictions for the time moments close to the time of daily minimum temperatures was 2,6 °C and 3,9°C (24 and 48 hours of model time, respectively).

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

## Введение

Морозная погода создает неблагоприятные условия для комфортной жизни и здоровья человека, что требует от исследователей разработки надежных способов прогноза минимальной суточной температуры воздуха в холодный период года. Жители сельской местности наименее защищены от воздействия холодной погоды, однако население крупных городов в глубине континентов также ежегодно страдает от влияния сильных морозов [8]. Среди городов в глубине континентов особенно интересен Красноярск с населением более миллиона жителей и довольно суровой зимней погодой. Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета установило для территории юга Красноярского края порог опасного метеорологического явления «сильный мороз» в -45,0 °C. Следует отметить, что с 1977 г. по настоящее время в пригороде Красноярска на станции Опытное поле такой низкой температуры воздуха не фиксировали. Можно с уверенностью сказать, что морозы, достигающие критерия опасного явления в Красноярске, ушли в прошлое. Абсолютный минимум температуры Красноярска -52,8 °C был зафиксирован 8 января 1931 г. и является показателем уже изменившегося регионального климата.

Известно, что отрицательная температура воздуха, даже превышающая официально утвержденный критерий, также наносит вред здоровью человека. Так, в [8] установлено, что при понижении температуры воздуха в Красноярске до -27,3 °C обнаруживается статистически значимый рост смертности населения. В этой же работе отмечено, что периоды морозной погоды с устойчивыми значениями ниже обозначенного порога приводят к росту смертности в возрастной группе старше 65 лет от гипертонической болезни на 54 %, от новообразований на 12 %, а от инсультов на 11 %.

Исследованию климата, в частности термического и ветрового режима Красноярска, посвящен ряд научных работ [7, 8, 11]. Город находится в условиях умеренно-континентального климата с теплым летом и морозной зимой [5]. Особенностью физико-географических условий Красноярска является крупная река Енисей, протекающая среди низкогорий. В зимний период в результате поступления относительно теплой воды из глубоководного Красноярского водохранилища, которое находится выше по течению от города, в нижнем бьефе образуется полынья. В результате нарастания суммы отрицательных температур воздуха в течение зимы длина полыньи сокращается и в середине февраля становится

минимальной. По мере ослабления морозов кромка ледостава начинает удаляться от плотины, а длина полыньи увеличивается. В наиболее суровые зимы минимальная длина полыньи составляет 60 км, тогда как в самые теплые зимы она достигает 300 км [1]. Перепад между температурой воды в Енисее и температурой морозного воздуха способствует испарению и увлажняет воздух в долине реки, в результате чего относительная влажность в прибрежной части города увеличивается, что усиливает суровость погоды.

Модель WRF-ARW широко применяется для моделирования атмосферных условий в городах [13]. Авторы данной работы уже использовали ее для изучения случаев сильной жары в Красноярске [2]. Следует отметить, что по точности синоптический и комплексный численный методы прогноза максимальной суточной температуры воздуха в Красноярске превосходят соответствующие прогнозы, рассчитанные с помощью региональной модели WRF-ARW. Однако модель WRF позволяет прогнозировать мезометеорологические процессы и получать поля метеорологических величин с большей детализацией.

Среди других исследований на территории России можно отметить работу [10], где установлено, что отклонения между модельными и наблюдаемыми полями температуры в московской агломерации зимой 2017 года достигали 5 °С. Московский мегаполис давно и плодотворно исследуется также с помощью региональной модели COSMO-CLM [3, 4, 9, 12].

Цель исследования заключается в изучении синоптических и метеорологических условий развития морозной 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 р. Енисей. Загородная авиационная метеорологическая станция Емельяново находится на расстоянии 25 км в небольшом поселке.

В работе использовались данные о температуре сухого термометра, относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, облачности и типе облаков. Источником данных был сайт метеорологической информации [www.gr5.ru]. Синоптические условия оценивались по приземным синоптическим картам и картам барической топографии Гидрометцентра России, доступные на сайте [www.meteoinfo.ru]. Информация о типе облаков и степени покрытия небосвода облаками получена со станции Опытное поле и Минино. Для оценки условий стратификации атмосферы и определения направления и скорости ветра в пограничном слое использовались данные на аэрологической станции Емельяново.

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

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

Прогноз погодных условий выполнен региональной численной моделью атмосферы WRF-ARW версии 4.2.1 [14]. 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 города Красноярск и окрестностей шагом в 1 км.

**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	60
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	Оперативный анализ CFSv2/NCEP
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Параметризация пограничного слоя	Yonsei University scheme

Характеристика модели	Значение (настройка)
Параметризация процессов подстилающей поверхности	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
Приземный слой	Схема Монины – Обухова
Конвекция	Аракавы – Шуберта KIAPS SAS

### Анализ и обсуждение

За последние шесть лет на метеорологической станции Опытное поле в Красноярске зафиксировано четыре случая мороза с температурой воздуха ниже  $-40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (табл. 3).

**Таблица 3.** Даты случаев морозной погоды на станции Опытное поле (индекс ВМО 29570)

**Table 3.** Dates of frost events at Opytnoe pole (WMO Index 29570)

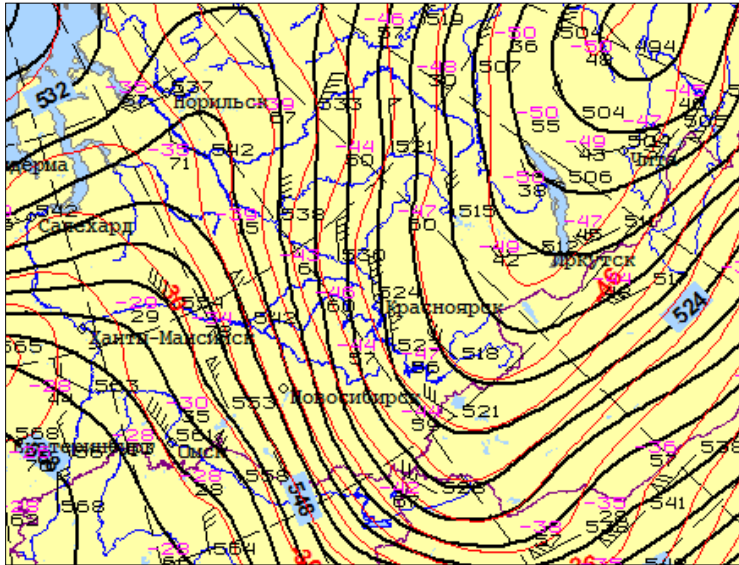
№ п/п	Дата	Минимальная температура, $^{\circ}\text{C}$
1	22 января 2023 г.	-41,6
2	4 февраля 2019 г.	-41,3
3	28 декабря 2020 г.	-40,8
4	12 декабря 2023 г.	-40,1

В первом случае с 20 по 22 января 2023 г. Красноярск находился под воздействием мощного антициклона, центр которого медленно смещался с плато Путорано на Среднесибирское плоскогорье. Антициклон был связан с высотным гребнем, который перемещался с Уральских гор в восточном направлении в сторону высотного обширного малоподвижного циклона над Алданским нагорьем (рис. 1). За счет адвекции холода по восточной периферии антициклона в Красноярск поступал очень холодный воздух из Среднесибирского плоскогорья. Влияние антициклона способствовало ясной погоде и дополнительному ночному выхолаживанию воздуха.

Второй случай произошел под влиянием антициклона с центром над Западно-Сибирской равниной. Красноярск 04.02.2019 оказался на пути воздушных потоков со Среднесибирского плоскогорья, а наступающие морозы внесли коррективы в график всероссийских спортивных мероприятий. Точный прогноз предстоящей морозной погоды вынудил организаторов завершить раньше спортивные соревнования тестового мероприятия Зимней универсиады – Чемпионата России по биатлону (IV этап Кубка России).

Третий случай произошел в условиях влияния антициклона, центр которого, смещаясь с севера Западно-Сибирской равнины, 28.12.2020

достиг Красноярска. По восточной периферии антициклона поступал холодный воздух с Среднесибирского плоскогорья. За счет развития нисходящих воздушных течений установилась ясная и морозная погода.



**Рис. 1.** Карта барической топографии поверхности 500 гПа за 12 ч ВСВ 21 января 2023 г.

**Fig. 1.** The map of the baric topography of the 500 hPa surface for 12 hours UTC on January 21st, 2023.

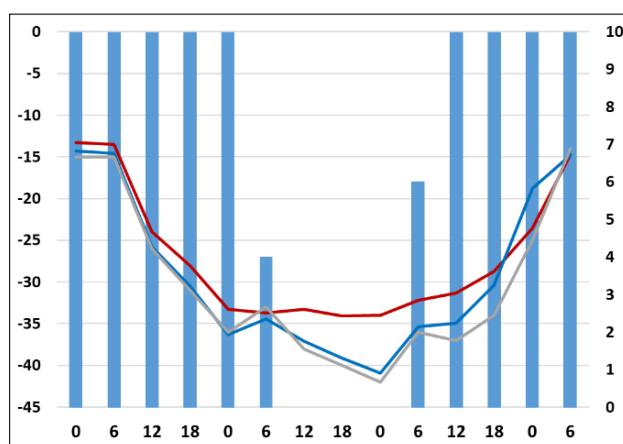
Четвертый случай морозной погоды был зафиксирован 12.12.2023 под влиянием обширного антициклона, протянувшегося от Западно-Сибирской равнины до Приморского края. Красноярск находился на восточной периферии барического образования, где воздушные потоки были направлены со Среднесибирского плоскогорья.

Все четыре случая морозной погоды были связаны с мощными обширными антициклонами, когда Красноярск оказался на восточной периферии барического образования с северными воздушными потоками. Во всех случаях при антициклоническом типе погоды большую роль в понижении температуры играло радиационное выхолаживание, обусловленное прояснениями погоды.

Полученные результаты согласуются с исследованием, изложенным в книге «Климат Красноярска» [5]: наибольшая повторяемость (33 %) морозной погоды наблюдается при северо-западных потоках в антициклонах и при вторжении холодных воздушных масс с северо-запада в тылу проходящих циклонов (26 %). При северных и северо-восточных потоках в антициклонах (по их восточной или южной периферии) наблюдается вторжение арктического воздуха с очень низкими температурами. Такие

ультраполярные вторжения бывают не очень часто (13 %), но продолжительность морозной погоды при этом наибольшая (14–20 дней). Еще реже сильные морозы наблюдаются при западных и юго-западных потоках в антициклонах (12 %) и циклонах (11 %). Примерно в 5 % случаев морозная погода устанавливается при малоградиентном барическом поле повышенного давления.

Рассмотрим структуру городского острова тепла в Красноярске. На рис. 2 представлен ход температуры воздуха на трех станциях: в центре города на улице Дудинской, в пригороде на северном склоне возвышенности севернее Енисея (Опытное поле) и на загородной станции в поселке Емельяново в 25 км от центра Красноярска.



**Рис. 2.** Температуры воздуха (°C) в центре Красноярска (красный), в Опытном поле (синий) и Емельяново (серый), общий бал облачности (столбцы) 20–23 января 2020 г.

**Fig. 2.** The daily course of air temperature (°C) in the center of Krasnoyarsk (red), at the Opytnoye pole (blue), and Yemelyanovo (gray), as well as the total cloud cover (bars) for January 20th – 23th, 2020.

Адвекция холода на фоне сплошной облачности 20.01.2023 приводит к резкому понижению температуры на всех станциях Красноярска с -15 до -35 °C. Утром 21 января прояснение небосвода не приводит к прогреву воздуха, температура продолжает понижаться, и быстрее всего охлаждение происходит в сельской местности. К утру 22 января в условиях ясной ночи температура достигает минимума, радиационное воздействие города создает градиент температуры между станциями в 8,0 °C, что является максимальным значением разницы температуры из всех рассмотренных случаев, приведенных в табл. 4.

Сравнивая эти величины с интенсивностью острова тепла в Красноярске в условиях жаркой погоды [2], можно отметить, что они оказались почти равны. Для сравнения также можно привести результаты оценки

интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге, полученные в [6], где в зимний сезон наибольшие значения интенсивности приходятся на февраль: максимальное значение достигало 6,4 °С, а среднее составило 3,0 °С.

**Таблица 4.** Интенсивность острова тепла для случаев мороза в Красноярске, °С. Срок 0 ч ВСВ

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

Дата	Интенсивность острова тепла, °С
04.02.2019	6,8
27.12.2020	5,7
28.12.2020	6,7
29.12.2020	7,6
22.01.2023	8,0
11.12.2023	6,0
12.12.2023	4,0
Среднее	6,4

Рассмотрим результаты численного моделирования морозной погоды. Модель WRF-ARW воспроизвела принципиальные особенности метеорологических процессов в Красноярске и его окрестностях. На станции Опытное поле минимальные значения температуры воздуха фиксировались в 7 ч местного времени (0 ч ВСВ) для всех случаев морозной погоды. Этому сроку соответствует 24 ч и 48 ч модельного времени от начала счета в 0 ч ВСВ первых суток прогноза. Результаты оценки качества прогноза представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Абсолютные ошибки анализа и прогноза температуры воздуха  $|\delta t|$

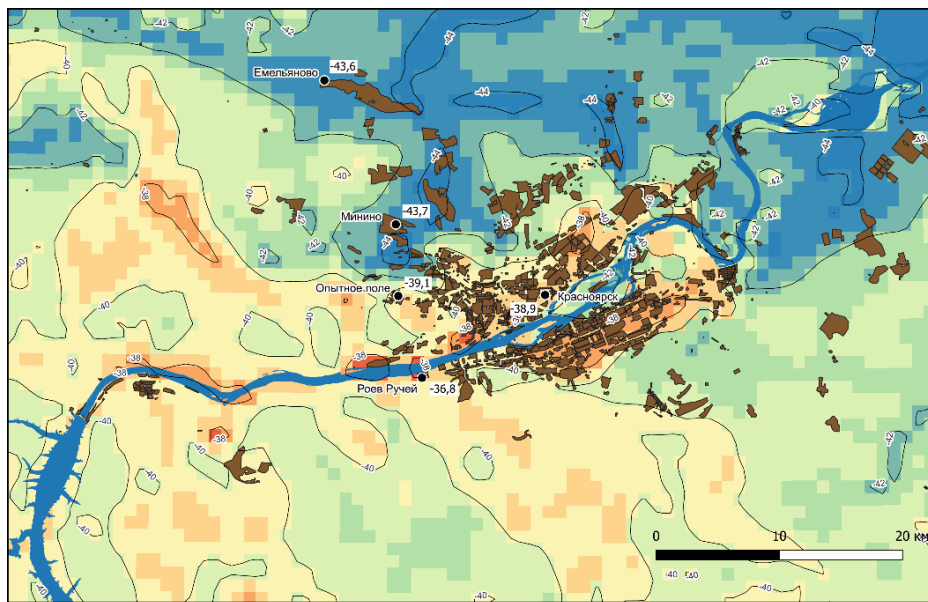
**Table 5.** Absolute errors in the forecast of air temperature

Метеостанция	$ \delta t , ^\circ\text{C}$		
	0 ч	24 ч	48 ч
Опытное поле	3,8	2,8	2,8
Минино	5,1	2,9	3,3
Емельяново	4,7	3,1	6,4
Красноярск	1,7	1,5	3,2
Средняя	4,9	2,6	3,9

Точность прогноза для городской станции Красноярск наивысшая, для пригорода (Опытное поле, Минино) ошибка больше, в сельской местности (Емельяново) ошибки максимальные. Ранее авторами в работе [2] было

проведено исследование качества прогноза сильной жары в Красноярске этой же моделью WRF-ARW. Сравнивая точность прогноза летних и зимних экстремумов можно сделать вывод, что летние экстремумы прогнозируются несколько лучше и для них средняя абсолютная ошибка прогноза на 33 ч составила 2,6 °С.

Для иллюстрации качества прогноза приведены модельные карты температуры воздуха. На рис. 3 отражены события 04.02.2019. В этот день модель спрогнозировала наиболее низкую температуру воздуха на станции Милино -43,7 °С, а фактическая температура в этот срок на этой станции составила -42,1 °С. Модель хорошо воспроизводит остров тепла на правом и левом берегу Енисея, где в наиболее плотной застройке температура не опускается ниже -39 °С. Инверсионное распределение температуры воздуха с высотой приводит к формированию теплых пятен на горных вершинах, окружающих Красноярск. Модель достоверно воспроизводит присутствие инверсий для всех рассмотренных случаев.

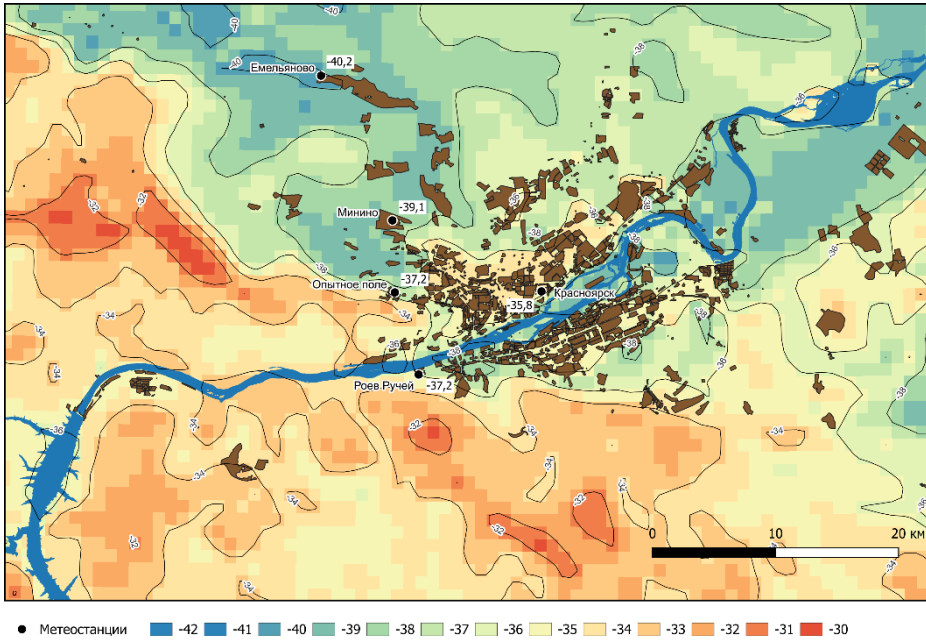


**Рис. 3.** Температура воздуха у земной поверхности в 0 ч ВСВ 4 февраля 2019 г.

**Fig. 3.** The air temperature at the Earth's surface at 0 hours UTC on February 4th, 2019.

Рассмотрим случай за 22.01.2023 (рис. 4). В эти сутки минимальная температура среди станций Красноярска была в Емельяново -42,0 °С, модель прогнозирует в этом месте -40,2 °С. В целом по городской застройке можно выделить районы, где прогнозируется температура выше -36 °С. Фактические значения оказались еще выше, в частности, на ул. Дудинской

температура опустилась до  $-34,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако в целом ночной городской остров тепла в Красноярске моделью WRF-ARW воспроизводится достоверно. Воздействие тепляющего эффекта от полыньи на р. Енисей модель ни в одном из расчетов не воспроизвела. Скорее всего в модель заложено условие наличие зимнего ледостава на реке.



**Рис. 4.** Температура воздуха у земной поверхности в 0 ч ВСВ 22 января 2023 г.  
**Fig. 4.** The air temperature at the Earth's surface at 0 hours UTC on January 22th, 2023.

В ходе исследования установлено, что модель систематически завышает температуру воздуха. Максимальный сдвиг приходится на дневное время 6 ч ВСВ (13 ч местного времени), а среднее завышение по всем станциям составляет  $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что для двух случаев 27.12.2020 и 11.12.2023 начальные поля модели WRF-ARW имели существенные ошибки, поскольку выходные поля глобальной модели CFSv2 содержали ошибки в поле температур. В ближайшем узле глобального анализа с координатами  $56,0^{\circ}$  с. ш.,  $92,5^{\circ}$  в. д. рассчитанная температура составила  $-28,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Фактические температуры в окрестностях этого узла в это же время в Митино опустились до  $-40,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в Опытном поле до  $-37,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В результате интерполирования ошибочных значений на сетку региональной модели в начальный срок ошибка на станции Опытное поле составила  $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Митино –  $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Емельяново –  $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 27.12.2020 ошибки имели меньшее абсолютное значение: на станции Опытное поле –  $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , станции Митино –  $5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , станции Емельяново –  $7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По мере счета региональной

моделью ошибки прогноза в течении первых суток уменьшались, а потом за счет накопления других ошибок и роста неопределённости начинали расти. Использование оперативных данных для начальных граничных условий от других глобальных прогностических систем (GFS или ПЛАВ) возможно улучшило бы качество прогноза минимальной температуры на отмеченные даты. Два других случая показали абсолютную ошибку для начальных полей по всем станциям  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Пользователям численных моделей следует учитывать эту особенность при диагнозе и оценке качества моделей на основе данных CFSv2 CDAS для зимних условий Сибири.

### Заключение

Выполнено исследование синоптических и метеорологических условий возникновения морозов в Красноярске. Выявлена типичная синоптическая ситуация для формирования аномально низких значений температуры воздуха: адвекция холодного арктического воздуха в условиях передней части высотного гребня над Западной Сибирью. Все рассмотренные случаи сопровождались ясной безоблачной погодой, что обуславливало дополнительное выхолаживание ночью.

Установлены особенности городского острова тепла в Красноярске. Интенсивность острова тепла меняется от  $4,0$  до  $8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Области максимальных температур находятся на обоих берегах Енисея в местах наиболее плотной застройки, в створе островов Молокова и Татышева.

Численная модель атмосферы WRF-ARW достоверно воспроизводит распределение полей температуры в первые 51 ч счета. Средняя абсолютная ошибка прогноза температуры воздуха на вторые сутки не превышает  $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Причем точность прогноза в городской застройке выше, чем в пригороде, здесь ошибка составляет  $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это можно объяснить тем, что модель в целом завышает прогноз температуры воздуха. За счет эффекта городского острова тепла, прогнозы для центральной части города более точные. Максимальная величина завышения прогностической температуры приходится на дневное время.

Дальнейшее повышение точности прогноза температуры воздуха зимой для Красноярска на основе модели WRF-ARF связано с необходимостью использования глобальных полей объективного анализа с меньшей интерполяционной ошибкой. Возможно, что учет моделью WRF-ARW полыни на Енисее, которая оказывает тепляющее воздействие на распределение температуры в городе, также сможет привести к улучшению точности прогноза температуры воздуха, но этот вопрос требует специального рассмотрения.

### Благодарность

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

## Список литературы

1. Бураков Д.А., Ковшова Е.П., Ромаско В.Ю. Прогноз элементов ледового режима р. Енисей в осенне-зимний период в нижних бьефах высоконапорных ГЭС // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 5. С. 93-102.
2. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз сильной жары в Красноярске с использованием региональной модели WRF-ARW // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2024. № 2 (392). С. 65-85.
3. 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. Серия 5. География*. 2017. № 6. С. 25-37.
4. 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.
5. Климат Красноярска. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 231 с.
6. 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.
7. Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Филлимонов 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.
8. 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.
9. 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.
10. Юшков В.П., Курбатова М.М., Варенцов М.И., Лезина Е.А., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Каллистратова М.А. Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 5. С. 13-31.
11. 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>.
12. 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.
13. 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>
14. 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. Burakov D.A., Kovshova E.P., Romasko V.Yu. Forecast of the ice regime elements of the Yenisei River in the autumn-winter period in the lower reaches of high-pressure hydroelectric power plants. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2008, no. 5, pp. 93-102 [in Russ.].
2. Bykov A.B., Kalinin N.A., Vetrov A.L. Severe heat forecasting in Krasnoyarsk using the WRF-ARW regional model. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2024, vol. 392, no. 2, pp. 65-85. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-2-65-85 [in Russ.].

3. 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. 20-37 [in Russ.].

4. 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.

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

6. 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.].

7. 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.].

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

9. 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.

10. 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/S0002-351555513-31 [in Russ.].

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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>.

Поступила 26.06.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025;  
принята в печать 15.10.2025.

Submitted 26.06.2025; approved after reviewing 01.10.2025;  
accepted for publication 15.10.2025.