

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПО ХАБАРОВСКУ

С. О. Романский^{*1} , Е. М. Вербицкая¹¹Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
г. Владивосток, Россия* **Контакт:** Станислав Олегович Романский, khvrom@ya.ru

Представлена экспериментальная система выпуска краткосрочных численных прогнозов погоды (ЧПП) для Хабаровска на основе модели Weather Research and Forecasting (WRF) на сетке с шагом 1 км. Особенности системы является учет в численной модели городской подстилающей поверхности при использовании параметризации single-layer urban canopy model. Городская застройка представлена тремя типами подстилающей поверхности: промышленные зоны, низко- и высокоэтажная застройка. Рассматривается задача интерпретации численных прогнозов высокого пространственно-временного разрешения в крупном населенном пункте. Расчеты на сетке с шагом 1 км по модели WRF показали более высокое качество краткосрочных прогнозов по городу в сравнении с сеткой с шагом 5 км за июнь – декабрь 2023 г. На этом периоде на сетках с шагами 1 км и 5 км осредненная абсолютная ошибка прогноза скорости и направления приземного ветра выше 10 м/с составляет 2,9 м/с и 3,2 м/с, и 14° и 32° соответственно, для приземной температуры осредненная абсолютная ошибка достигает 1,6° и 3,1°.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, мезомасштабный процесс, сильные осадки, сильный ветер, подстилающая поверхность, WRF-ARW, Хабаровск.

Цитирование: Романский, С. О., Е. М. Вербицкая Краткосрочное прогнозирование метеорологических условий и явлений погоды высокого пространственного разрешения по Хабаровску // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES1009. — DOI: 10.2205/2025es000942 — EDN: MQMDJW

Введение

Производительность современной вычислительной техники позволяет использовать на практике региональные модели численного прогноза погоды (ЧПП) на сетках с высоким пространственным разрешением. Например, система COSMO-Ru Гидрометцентра России [Ривин и др., 2020] вычисляет прогноз по территории РФ, в том числе, на сетке с шагом 6,6 км. В США используется High-Resolution Rapid Refresh (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) [Dowell et al., 2022] с сеткой шагом 3 км. Однако крупные города даже при таком горизонтальном шаге оказываются покрытыми недостаточным количеством узлов сетки модели для детализированного прогноза погодных условий по территории города. Это особенно важно для прогнозирования опасных метеорологических явлений, т. к. их линейные размеры могут быть сопоставимы с размером ячейки сетки. Кроме того, вариации значений метеорологических параметров в пределах территории крупных населенных пунктов достаточно велики. Так, например, одновременные измерения в различных точках Хабаровска показывают пространственные вариации температуры до 6°, а наличие и интенсивность осадков может варьироваться от полного их отсутствия в одном районе города при ясном небе и солнечной погоде до ливневых осадков высокой интенсивности в другом.

<https://elibrary.ru/mqmdjw>

Получено: 6 июня 2024 г.

Принято: 15 октября 2024 г.

Опубликовано: 10 марта 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

С другой стороны, крупные населенные пункты сами оказывают существенное влияние на характеристики окружающей природной среды и формируют местные погодные условия за счет особенностей городской застройки: высот и типов зданий, их размещения относительно друг друга, расположения крупных промышленных предприятий и инфраструктурных строений, лесопарковых зон и водных объектов. Городская застройка изменяет физические характеристики подстилающей поверхности: теплопроводность, теплоемкость, отражательную способность, скорость испарения и другие. Это влияние может приводить к усилению интенсивности опасных явлений погоды, порождению островов тепла, изменению скорости и направления приземного ветра, распределения облачности и осадков в городе и его окрестностях [Masson et al., 2020].

Поэтому для многих крупных городов разрабатываются специализированные системы численного прогноза погоды [Kwok and Ng, 2021]. Например, для Московского региона подготовлена система COSMO-Ru1M с шагом сетки 1 км [Ривин и др., 2020], в Гонконге (Китай) оперативная система Aviation Model рассчитывается на двух вложенных сетках с шагами 600 и 200 м [Hong Kong Observatory, 2022]. На Дальнем Востоке России также имеется опыт расчета численных прогнозов погоды в масштабе города: во время саммита Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества в 2012 г. выпускались прогнозы на сетке с шагом 500 м по Владивостоку [Романский и Вербицкая, 2014]. Более того, Всемирная метеорологическая организация (ВМО) подготовила рекомендации [Mills et al., 2021], в которых на примере большого перечня городов мира рассмотрена концепция и методология интегрированного сервиса для урбанизированной территории с подсистемами: прогнозирование опасных явлений погоды в масштабе города, климат города, опасные гидрологические явления и качество атмосферного воздуха в городе. Таким образом, задача построения системы численного прогноза погоды по территории крупных городов Дальнего Востока России является весьма актуальной.

Целью представленных в данной работе исследований является оценка эффективности выпуска краткосрочных численных прогнозов погоды по крупным населенным пунктам Дальнего Востока России с учетом характеристик подстилающей поверхности городской среды. Для этого подготовлена и апробирована на примере Хабаровска сборка модели Weather Research and Forecasting (WRF) [Skamarock and Klemp, 2007] на вычислительной сетке с горизонтальным шагом 1 км.

В данной работе приводится анализ качества прогнозов основных элементов погоды (приземной температуры воздуха, осадков, скорости и направления приземного ветра), рассчитанных по модели WRF на сетке с шагом 1 км, выполненный по данным экспериментальных расчетов за достаточно продолжительный период времени (июнь – декабрь 2023 г.).

Материалы и методы исследования

Объект исследования. Хабаровск – крупный промышленный город Дальнего Востока России, расположенный на юге Среднеамурской низменности, вблизи места слияния Усури и Амура. Город протянулся вдоль правого берега Амура на 45 км, ширина города от 3–5 до 20 км, площадь составляет около 372 км². Город находится на возвышенном правом берегу рельеф которого разнообразен и сложен. Центр расположен на пологих возвышенностях с абсолютными отметками 70–90 м над уровнем моря и относительными превышениями местности 20–30 м. Южная часть простирается вдоль правого берега Амурской протоки, занимая в большей мере прибрежный низменный участок со средними отметками высот порядка 40 м, и ограничивается на юге-востоке и юге хребтами Малый и Большой Хехцир (максимальная высота около 950 м), удаленными от центра города на 20–30 км. Северная часть простирается на протяжении 10–15 км вдоль правого берега Амура преимущественно на возвышенной равнинной местности с отметками высот 80–100 м, оканчивающейся Воронежскими высотами (максимальная высота до 200 м).

Крупные промышленные предприятия (ТЭЦ, заводы и фабрики) построены преимущественно у берега и вдоль железной дороги, которая пересекает город с юга на север. В южном округе расположен отдельный промышленный узел. В городе имеются крупные парковые зоны: парк им. Н. Н. Муравьева-Амурского и прилегающий к нему стадион им. В. И. Ленина в прибрежной зоне исторической части города; парк Динамо в центре; городской дендрарий и парк им. Ю. А. Гагарина на юге; Северный парк в северной части города. Имеются и другие лесопарковые зоны.

Конфигурация модели и области расчета. В качестве инструмента исследований использована негидростатическая модель гидротермодинамики атмосферы Weather Research and Forecasting с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [Skamarock and Klemp, 2007]. К достоинствам модели относится открытый исходный код, возможность использования, как для оперативных расчетов, так и для научных исследований и большое количество параметризаций подсеточных процессов, которые, как правило, поддерживаются авторами и продолжают развиваться.

В используемой сборке модели WRF-ARW заданы рекомендуемые и широко применяемые параметризации. Баланс коротко- и длинноволновой радиации рассчитывается схемой Rapid radiative transfer model (RRTM). Характеристики пограничного и приземного слоев атмосферы вычисляются параметризациями Yonsei University и Mesoscale Model 5, которые позволяют достаточно точно воспроизводить вертикальное распределение поля ветра на сетке высокого пространственного разрешения [Shin and Dudhia, 2016]. Характеристики микрофизических процессов вычисляются схемой Single moment 6-class с шестью гидрометеорами. Схема Noah land-surface model обеспечивает моделирование процессов в верхней части почвенного слоя.

Для учета воздействия городской застройки в сборке модели используется однуровневая параметризация single-layer urban canopy model (SLUCM) [Chen et al., 2011; Kusaka et al., 2001]. Схема SLUCM широко применяется в экспериментальных расчетах, поскольку позволяет в упрощенной форме оценить характеристики теплового баланса, зная тип и геометрические размеры массивов городской застройки [Тарасова и др., 2023; Garuma, 2018; Kim et al., 2021]. Для таких массивов в модели введены специальные обозначения при описании подстилающей поверхности, учитывающие плотность застройки, высотность зданий и сооружений в ячейке сетки. Для каждого типа подстилающей поверхности заданы значения альбедо, параметра шероховатости, теплоемкости и другие характеристики.

Экспериментальные расчеты по Хабаровску и его окрестностям проводятся на вложенной сетке размером 340 на 340 км с горизонтальным шагом 1 км (Хаб-1, рис. 1а), центр сетки расположен в центральной части города. В качестве внешней области используется сетка модели, предназначенной для выпуска краткосрочных прогнозов общего пользования в дальневосточном регионе России: она охватывает часть Евразии и Тихого океана примерно между 38° и 68° с. ш. и от 100° до 180° в. д. и покрыта узлами с горизонтальным шагом 5 км (Хаб-5). В расчетах по вертикали от поверхности земли до изобарической поверхности 50 гПа задан 51 уровень с наиболее подробным разрешением в нижнем двухкилометровом слое.

В качестве начальных и граничных данных для внешней области расчета использованы прогнозы системы Global Forecast System (NCEP, США) разрешением $0,5^\circ$ и дискретностью 6 ч., для внутренней сетки граничные данные выбираются из внешней.

В составе модели WRF-ARW имеется два набора данных о подстилающей поверхности. Один из них основан на информации Геологической службы США, второй – на данных космических наблюдений спектрорадиометрами MODIS (НАСА, США). Информация по указанным наборам данных представлена в WRF-ARW с максимальным разрешением $30''$ и $15''$ соответственно. Вблизи Хабаровска эти данные недостаточно адекватны фактическому состоянию, поэтому поле подстилающей поверхности в городе и его окрестностях откорректировано вручную. В частности, для области сетки с шагом 1 км с рис. 1б у Хабаровска вручную уточнено положение русла Амура,

распадающегося на отдельные протоки, разделенные островами: задан крупнейший из островов – Большой Уссурийский. При моделировании городская застройка Хабаровска представлена тремя типами: низко-, высокоэтажная и промышленные зоны (рис. 1б), что согласовано с параметризацией SLUCM. Классификация этих зон в городе также выполнена вручную в наборе данных, подготовленном препроцессингом модели. Для уточнения описания подстилающей поверхности привлекались крупномасштабные карты и данные европейской службы Copernicus Global Land Service [Buchhorn et al., 2020].

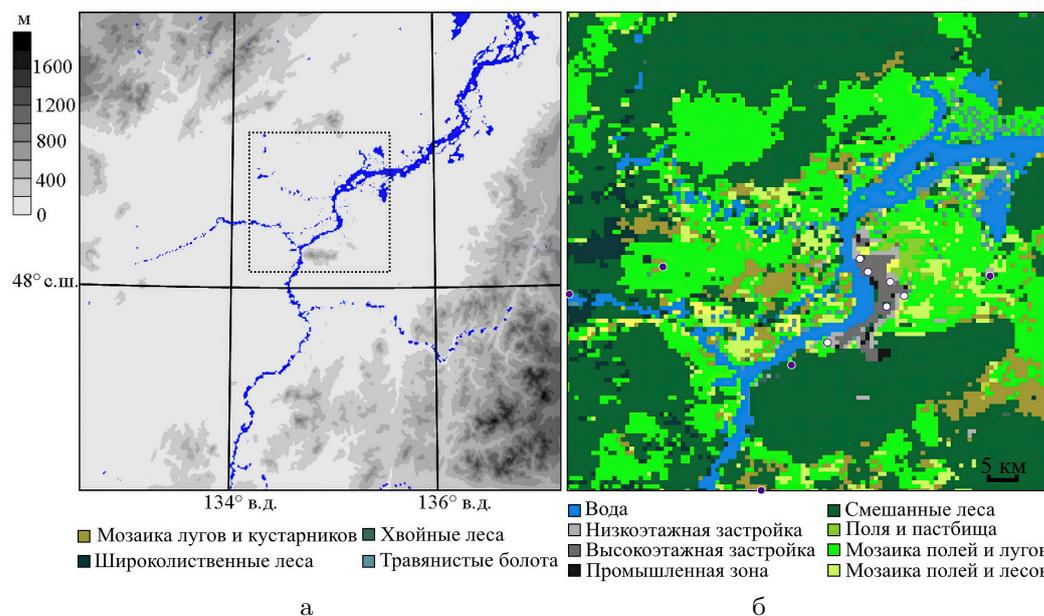


Рис. 1. Модельные данные с горизонтальным шагом 1 км: (а) рельеф с указанием водных объектов, (б) основные типы подстилающей поверхности вблизи Хабаровска (белыми кружками указано примерное положение пунктов наблюдений в черте города, сиреневыми – в сельской местности).

Система Хаб-5 выпускает прогнозы на трое суток вперед, но вычисления во вложенной сетке Хаб-1 ввиду ее малых геометрических размеров проводятся только на одни сутки вперед, начиная с 12 ч. от срока старта модели. Такой подход позволяет получать численные прогнозы высокого пространственного разрешения на заранее определенных вложенных сетках в рамках существующей системы ЧПП для заданного интервала времени.

Модельные прогнозы приземной температуры, скорости и направления приземного ветра, наличия и количества осадков на вычислительных сетках с шагами 1 и 5 км сравнивались между собой и с данными наземных инструментальных измерений в Хабаровске и его окрестностях. Прогностические значения метеорологических элементов по обеим версиям модели в соответствии с рекомендациями ВМО выбирались из ближайшего к пункту наблюдений узла модельной сетки с учетом положения крупных рек. Прогнозы Хаб-5 используются в качестве контрольных при оценке степени эффективности расчетов на вложенных сетках высокого пространственного разрешения с более точным и подробным описанием подстилающей поверхности и учетом городской застройки.

Данные наблюдений. Данные инструментальных измерений, использованные для оценки качества прогнозов по Хабаровску, получены с метеорологических станций и автоматических датчиков ФГБУ «Дальневосточное УГМС». Автоматические датчики выполняют ежечасные измерения температуры воздуха, точки росы, скорости и направления приземного ветра. В черте города они расположены у аэропорта Хабаровска (индекс ВМО: 31 735, высота 74 м), у Амурского моста (31 739, высота 57 м), у завода

Дальдизель (31 738, высота 37 м), в микрорайонах ДОС (31 640, высота 68 м), Красная речка (31 720, высота 53 м) и Овощесовхоз (31 734, высота 90 м, здесь имеется дополнительный прибор – пьювиограф – поставляющий ежечасные автоматические наблюдения за интенсивностью осадков). В окрестности 100 км от города находятся метеорологические станции с автоматическими датчиками, расположенные в сельской местности: в поселках Бычиха (31 726, высота 89 м), Князе-Волконское (31 740, высота 59 м), Хор (31 791, высота 72 м), Ленинское (31 710, высота 54 м) и Смидович (31 725, высота 50 м). Автоматические ежечасные наблюдения верифицировались данными измерений, поступающими в кодовой форме SYNOP от соответствующих метеорологических пунктов наблюдений каждые 3 ч. Для контроля данных наблюдений рассчитывались и анализировались средние, максимальные и минимальные значения метеорологических величин за сутки. Пропуски в рядах наблюдений не восстанавливались.

Результаты и обсуждение

Качество прогнозов приземной температуры и ветра. В табл. 1 приведены осредненные по всем указанным выше пунктам наблюдений оценки качества прогноза приземной температуры и ветра по модельным сеткам с горизонтальными шагами 1 и 5 км для заблаговременностей с 6 по 24 ч. за июнь – декабрь 2023 г. Из данных табл. 1 видно, что качество прогнозов Хаб-1 выше, чем по внешней сетке расчета с шагом 5 км.

Таблица 1. Осредненные оценки качества прогноза температуры воздуха и скорости ветра для заблаговременностей с 6 по 24 ч. за июнь – декабрь 2023 г.

Вариант расчета	Приземная температура					Приземный ветер		
	δ , °	E , °	Обеспеченность, %			δ , м/с	E , м/с	$\vec{\sigma}$, м/с
			$E \leq 1^\circ$	$E \leq 2^\circ$	$E \leq 3^\circ$			
Хаб-1	-0,7	1,6	36	58	70	1,1	2,0	2,8
Хаб-5	-1,6	3,1	21	34	61	1,2	2,2	3,2

Примечание. $\delta = N^{-1} \sum_{i=1}^N \Delta$ – средняя систематическая ошибка прогноза, $E = N^{-1} \sum_{i=1}^N |\Delta|$ – средняя абсолютная ошибка прогноза, Δ = прогноз – факт, N – количество пар «факт-прогноз», $\vec{\sigma}$ – средняя квадратическая ошибка прогноза вектора приземного ветра.

Повышение качества прогнозов более выражено для приземной температуры, т. к. на ее формирование значительное влияние оказывают характеристики подстилающей поверхности, а для сетки 1 км помимо городской застройки Хабаровска уточнено и положение русла Амура. Осредненные систематическая и абсолютная ошибки прогноза приземной температуры при переходе к сетке с шагом 1 км уменьшились примерно в 2 раза (от $-1,6^\circ$ до $-0,7^\circ$ и от $3,1^\circ$ до $1,6^\circ$ соответственно). Процент случаев, когда абсолютная ошибка прогноза приземной температуры находилась в заданном интервале (обеспеченность) значительно увеличился для одно- и двухградусного интервалов: с 21% до 36% (на 15%) и с 34% до 58% (на 24%) соответственно. В трехградусном интервале возрастание уже не столь велико – прирост составил только 9%, что связано с увеличением интервала для расчета обеспеченности.

Оценки приземного ветра по обоим вариантам сеток мало отличаются: средняя квадратическая ошибка составляет 2,8 и 3,2 м/с, для скорости ветра систематическая ошибка принимает значения 1,1 и 1,2 м/с, абсолютная – 2,0 и 2,2 м/с для Хаб-1 и Хаб-5 соответственно. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, особенностью расположения пунктов наблюдений преимущественно на равнинной местности без больших перепадов высот, так что различия в аппроксимации фактического рельефа местности в окрестности пунктов наблюдений по сеткам 1 и 5 км мало влияют на скорость ветра. Во-вторых, климатическими особенностями ветровых характеристик в Хабаровске: доля случаев со скоростями ветра менее 10 м/с в испытываемой выборке составляет около 95%. Поэтому для выявления преимуществ расчета Хаб-1 следует рассмотреть случаи с сильным ветром отдельно.

Температура в городе и сельской местности. Характерной чертой местного климата крупных городов является возникновение области повышенных значений температуры воздуха, распространяющейся от города в подветренную сторону [Григорьев и Огородников, 2001; Lin et al., 2022; Wang and Li, 2021]. По данным испытываемой выборки получено (табл. 2), что с 19 до 9 ч. в городе фактическая температура воздуха в среднем выше на 1,0–1,7 °С, чем в сельской местности, т. е. получен слабовыраженный остров тепла. Для сравнения, в крупных городах Европы и их пригородах различия в температуре могут достигать 5–7 °С летом, 2–8 °С зимой [Григорьев и Огородников, 2001]. Например, по данным [Кузнецова и др., 2017] в Москве днем во все сезоны в 90% случаев разность температур составляет 0–2 °С, ночью повторяемость интервала 0–2 °С – около 60%, при этом отмечаются и экстремально большие значения (от 8 °С и выше). В Хабаровске за рассматриваемый период времени наибольшее превышение температуры воздуха составило 4,6 °С (в августе).

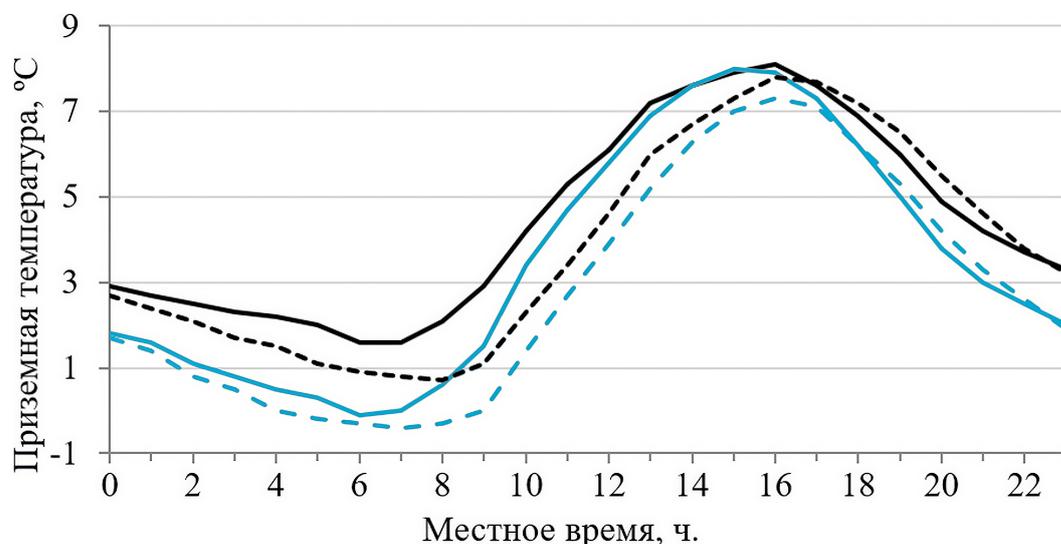


Рис. 2. Средняя по пунктам наблюдений ежечасная фактическая и модельная (Хаб-1) приземная температура за июнь – декабрь 2023 г. Черный цвет соответствует средним значениям по пунктам наблюдений в Хабаровске (индексы пунктов: 31 640, 31 720, 31 734, 31 735, 31 738, 31 739), голубой – в сельской местности (31 710, 31 725, 31 726, 31 740, 31 791). Фактические данные указаны сплошными линиями, модельные – пунктирными.

В этой связи следует отметить, что Амур, ширина которого у Хабаровска составляет более 1 км, оказывает значительное влияние на перенос городских тепловых выбросов и сглаживает колебания приземной температуры между районами города и сельской местностью. Доминирующее юго-западное направление ветра соответствует направлению русла Амура, а температура воды значительно отличается от температуры воздуха, что определяет суточные колебания внутригородского переноса воздушных масс: днем от Амура на берег, ночью в обратном направлении. Смена направления переноса местных воздушных масс происходит около 22 ч. местного времени, когда температуры поверхности воды и воздуха существенно сближаются.

По модельным данным различие в температуре воздуха между городом и сельской местностью также выявлено: с 19 до 9 ч. модельная температура воздуха в городе в среднем выше на 1,0–1,5 °С, чем в сельской местности. Модельная температура, как правило, ниже фактической, за исключением периода с 17–18 ч. вечера до 0–1 ч. ночи.

Сильный ветер. В табл. 2 представлены оценки качества прогноза скорости и направления приземного ветра для градации фактических скоростей от 10 м/с и выше (за рассматриваемый период зафиксировано 537 случаев).

Таблица 2. Оценки качества прогноза скорости и направления приземного ветра в градации скорости от 10 м/с и выше (537 случаев)

Вариант расчета	Скорость		Направление
	δ , м/с	E, м/с	E, °
Хаб-1	-1,8	2,9	14
Хаб-5	-2,1	3,2	32

Примечание. Обозначения соответствуют табл. 1

На качество прогноза скорости и направления приземного ветра существенное влияние оказывает шаг сетки, особенно в районах со сложной орографией [Романский и Вербицкая, 2023; Siuta et al., 2017; Solbakken et al., 2021]. Для рассматриваемой территории в среднем скорость приземного ветра в заданной градации занижается по обоим вариантам модели. Тем не менее, на сетке с горизонтальным шагом в 1 км достигнуто некоторое уменьшение абсолютной и арифметической ошибок прогноза (с 3,2 до 2,9 м/с и от -2,1 до -1,8 м/с соответственно, т. е. примерно на 10%). Наибольший эффект от уменьшения горизонтального шага получен для прогноза направления ветра: абсолютная ошибка уменьшилась более чем в два раза: от 32 до 14°, что особенно важно для прогнозов на аэродромах, т. к. сильный боковой ветер существенно влияет на безопасность взлета и посадки воздушных судов. Уточнение положения русел крупных рек в сетке с шагом 1 км определенно имеет эффект на модельное направление ветра и, вероятно привело к росту оправдываемости.

Сильные осадки. При анализе степени успешности прогнозов факта и количества осадков нужно учитывать, что, осадки не являются непрерывной функцией пространственных и временных координат и/или параметров состояния атмосферы. Наиболее неблагоприятным и даже опасным явлением считаются продолжительные осадки высокой интенсивности, поэтому модель должна предсказать не только факт и количество осадков, но и правильно локализовать их во времени и пространстве. Прогностические осадки, рассчитанные на сетках высокого пространственного разрешения, как правило, достаточно адекватно отражают интенсивность фактических осадков, но по времени и месту выпадения они могут не соответствовать данным наблюдений [Jeworrek et al., 2021; Wang, 2014]. Это приводит к занижению оценок качества прогноза при стандартном подходе к расчету оценок: ближайший узел сетки – пункт наблюдений и срок в срок. Для данного исследования имеются наблюдения только одного датчика, который регистрирует ежечасное количество осадков в Хабаровске (31734), поэтому ограничимся рассмотрением случаев фиксации осадков высокой интенсивности (табл. 3).

Из данных табл. 3 видно, что Хаб-1 в большинстве случаев генерирует осадки более высокой интенсивности, чем Хаб-5. Но в двух случаях (27 июля и 1 августа) ближайший узел Хаб-1 оказался неудачным для оценки местоположения и времени выпадения осадков максимальной интенсивности в окрестности пункта наблюдений. Вариант с шагом 5 км за счет большего размера ячейки сетки в этих случаях дал более точный прогноз. Для иллюстрации, на рис. 3 представлены прогнозы ливневых дождей 22 августа и 19 сентября 2023 г. Они отражают типичные особенности прогнозирования интенсивных осадков на сетках высокого разрешения. Так, 22 августа получен практически идеальный прогноз – на обеих сетках, верно, спрогнозирована пиковая интенсивность осадков (между 7 и 8 ч. утра), хотя Хаб-5 ее несколько занизила. Другая ситуация была 19 сентября: по Хаб-1 время выпадения наиболее интенсивных осадков в ближайшем узле сетки оказалось сдвинутым на 3 ч., а по Хаб-5 осадки, суммарно соответствующие фактической пиковой часовой интенсивности, выпадали в ближайшем узле сетки в течение двух часов: с 10 до 12 ч.

Таблица 3. Численный прогноз осадков в Хабаровске

	Факт	Хаб-1	Хаб-5
Дата		26 июня 2023 г.	
Местное время	14–15 ч.	13–14 ч.	11–14 ч.
Количество осадков, мм	15,0	10,2	10,1
Дата		27 июля 2023 г.	
Местное время	4–6 ч.	1–9 ч.	1–9 ч.
Количество осадков, мм	13,1	0,4	7,6
Дата		29–30 июля 2023 г.	
Местное время	23–4 ч.	23–4 ч.	20–7 ч.
Количество осадков, мм	32,0	26,7	24,9
Дата		1 августа 2023 г.	
Местное время	7–11 ч.	10–12 ч.	10–12 ч.
Количество осадков, мм	10,9	0,7	5,8
Дата		11 августа 2023 г.	
Местное время	1–6 ч.	2–4 ч.	0–6 ч.
Количество осадков, мм	27,0	20,1	14,1
Дата		22 августа 2023 г.	
Местное время	3–13 ч.	3–13 ч.	3–13 ч.
Количество осадков, мм	35,2	44,7	28,9
Дата		19 сентября 2023 г.	
Местное время	7–13 ч.	7–13 ч.	7–13 ч.
Количество осадков, мм	17,4	22,3	11,1
Дата		2–3 ноября 2023 г.	
Местное время	19–7 ч.	17–3 ч.	17–3 ч.
Количество осадков, мм	16,5	13,5	12,3

Обработка расчетов модели высокого пространственного разрешения. На примере осадков показана сложность интерпретации модельных данных при подготовке прогноза по территории города и его окрестностям.

Сетка с шагом 5 км покрывает Хабаровск 15 узлами, что очевидно, недостаточно для детализированного прогноза. При переходе к шагу 1 км количество узлов возрастает до нескольких сотен, что позволяет сформулировать прогноз по отдельным округам города (табл. 4). Для этой цели узлы сетки объединены в группы по округам города: северный, центральный и южный. Ежечасные данные в узлах сетки, относящихся к какому-либо округу, автоматически интерпретируются в прогноз погоды на ночь и день по следующим правилам:

- дневная и ночная температура воздуха соответствуют максимуму и минимуму температуры в узлах сетки за текущие сутки;
- на день и ночь определяется минимальное атмосферное давление в узлах сетки;
- количество выпавших осадков рассчитывается как среднее по узлам, при этом наличие осадков соответствует выпадению осадков хотя бы в одном узле;
- в прогнозе дополнительно приводится фаза осадков и максимальная часовая интенсивность, если она не менее 3 мм/ч, с указанием периода времени, когда она получена в модели;
- определяется максимальная (по узлам) скорость приземного ветра и порывов [по Романский и Вербицкая, 2023] при их наличии;
- направление ветра определяется как преобладающее для узлов, в которых скорость ветра составляет не менее 3 м/с.

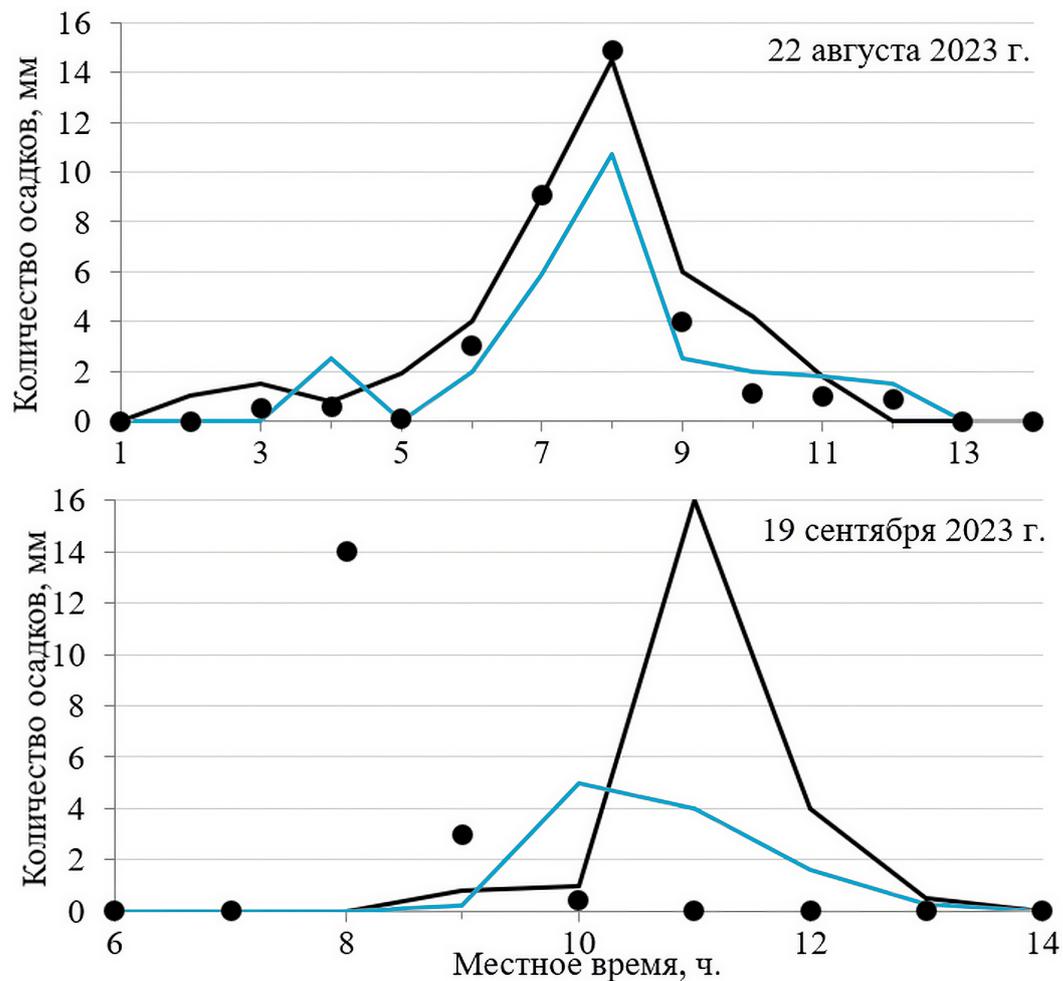


Рис. 3. Фактические и модельные осадки в Хабаровске (31734). Кружками – факт. Черной и голубой линиями указаны прогнозы по сеткам с горизонтальными шагами 1 и 5 км соответственно.

Таблица 4. Пример суточного прогноза по Хабаровску

Округ города	Ночь	День
Центральный	-6 °C, 757 мм рт. ст., 5 м/с западный, твердые осадки: 5 мм	0 °C, 744 мм рт. ст., 12 м/с западный, порыв до 15 м/с, смешанные осадки: 8 мм
Северный	-5 °C, 760 мм рт. ст., 5 м/с западный, твердые осадки: 4 мм	-1 °C, 753 мм рт. ст., 10 м/с западный, смешанные осадки: 6 мм
Южный	-6 °C, 757 мм рт. ст., 3 м/с южный, твердые осадки: 4 мм	-1 °C, 751 мм рт. ст., 3 м/с южный, смешанные осадки: 4 мм

Заклучение

В работе продемонстрирована возможность использования вложенных сеток с малым горизонтальным шагом в общей системе ЧПП по большой территории на базе модели WRF-ARW для детализированного прогноза погоды в крупных населенных пунктах. В модели WRF-ARW предусмотрена возможность определения нескольких непересекающихся вложенных сеток с одинаковым шагом по горизонтали, что позволяет одновременно рассчитывать прогнозы высокого пространственного разрешения по

нескольким населенным пунктам. На примере Хабаровска апробировано использование специальной параметризации SLUCM и данных о подстилающей поверхности с учетом городской застройки для вложенной сетки с горизонтальным шагом 1 км.

Расчеты на сетке с шагом 1 км показали более высокое качество прогнозов приземной температуры по городу в сравнении с прогнозами общего пользования на сетке с шагом 5 км. Качество прогноза скорости приземного ветра возросло незначительно для общей выборки с преобладающими скоростями ветра менее 10 м/с и несколько более существенно для выборки со скоростями от 10 м/с и выше. Наибольший эффект от малого шага сетки получен для прогноза направления сильных ветров – средняя абсолютная ошибка прогноза уменьшилась более, чем в 2 раза (с 32° до 14°). Уточнение положения русел крупных рек в сетке с шагом 1 км определенно имеет эффект на модельное направление ветра и, вероятно привело к росту оправдываемости. Это особенно важно для метеорологического обслуживания авиации на аэродромах, функционирования водного транспорта, прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий для накопления загрязняющих веществ в нижнем слое атмосферы над территорией города.

На примере анализа результатов прогнозирования осадков большой интенсивности, показаны задачи обработки данных модели высокого пространственного разрешения. Представлен способ интерпретации модельных данных в крупном населенном пункте для выпуска прогноза основных элементов погоды по отдельным округам города.

Дальнейшее развитие встроенной системы прогнозирования высокого пространственного разрешения для крупных городов дальневосточного региона России планируется в следующих направлениях: уточнение типов подстилающей поверхности и их свойств; апробация системы на других крупных населенных пунктах Дальнего Востока России; прогноз неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению веществ загрязняющих воздух.

Благодарности. Благодарим рецензентов за ценные советы и замечания к статье. Работа выполнена по внутреннему плану ФГБУ «ДВНИГМИ».

Список литературы

- Григорьев В. А., Огородников И. А. Проблемы экологизации городов в мире, России, Сибири: Аналит. обзор. — Новосибирск : Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы, Вып. 63. ГПНТБ СО РАН, 2001. — 152 с. — EDN: [FMJFFB](#).
- Кузнецова И. Н., Бруслова Н. Е., Нахаев М. И. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость // Метеорология и гидрология. — 2017. — № 5. — С. 49–61. — EDN: [YNWCKX](#).
- Ривин Г. С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М. и др. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 7. — С. 5–19. — EDN: [RVBBLZ](#).
- 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. — EDN: [TNDODH](#).
- Романский С. О., Вербицкая Е. М. Сильные шквалистые ветры в Южно-Сахалинске летом 2014 г. // Геосферные исследования. — 2023. — № 4. — С. 141–154. — DOI: [10.17223/25421379/29/10](#). — EDN: [LZBUBM](#).
- Тарасова М. А., Варенцов М. И., Степаненко В. М. Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2023. — Т. 59, № 2. — С. 127–148. — DOI: [10.31857/S0002351523020062](#).
- Buchhorn M., Smets B., Bertels L., et al. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe. — 2020. — DOI: [10.5281/ZENODO.3939050](#). — (visited on: 17.11.2022).
- Chen F., Kusaka H., Bornstein R., et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // International Journal of Climatology. — 2011. — Vol. 31, no. 2. — P. 273–288. — DOI: [10.1002/joc.2158](#).

- Dowell D. C., Alexander C. R., James E. P., et al. The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR): An Hourly Updating Convection-Allowing Forecast Model. Part I: Motivation and System Description // *Weather and Forecasting*. — 2022. — Vol. 37, no. 8. — P. 1371–1395. — DOI: [10.1175/waf-d-21-0151.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-21-0151.1).
- Garuma G. F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models // *Urban Climate*. — 2018. — Vol. 24. — P. 830–851. — DOI: [10.1016/j.uclim.2017.10.006](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.006).
- Hong Kong Observatory. Numerical modelling for weather prediction in Hong Kong. — 2022. — URL: <https://www.hko.gov.hk/en/wservice/tsheet/nwp.htm>; (visited on: 17.01.2024).
- Jeworrek J., West G., Stull R. W. WRF Precipitation Performance and Predictability for Systematically Varied Parameterizations over Complex Terrain // *Weather and Forecasting*. — 2021. — Vol. 36, no. 3. — P. 893–913. — DOI: [10.1175/waf-d-20-0195.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-20-0195.1).
- Kim G., Lee J., Lee M.-I. Impacts of urbanization on atmospheric circulation and aerosol transport in a coastal environment simulated by the WRF-Chem coupled with urban canopy model // *Atmospheric Environment*. — 2021. — Vol. 249. — P. 118253. — DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118253](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118253).
- Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., et al. A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2001. — Vol. 101, no. 3. — P. 329–358. — DOI: [10.1023/a:1019207923078](https://doi.org/10.1023/a:1019207923078).
- Kwok Y. T., Ng Y. Y. E. Trends, topics, and lessons learnt from real case studies using mesoscale atmospheric models for urban climate applications in 2000-2019 // *Urban Climate*. — 2021. — Vol. 36. — P. 100785. — DOI: [10.1016/j.uclim.2021.100785](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100785).
- Lin Y., Wang C., Yan J., et al. Observation and Simulation of Low-Level Jet Impacts on 3D Urban Heat Islands in Beijing: A Case Study // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 2022. — Vol. 79, no. 8. — P. 2059–2073. — DOI: [10.1175/jas-d-21-0245.1](https://doi.org/10.1175/jas-d-21-0245.1).
- Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J., et al. Urban Climates and Climate Change // *Annual Review of Environment and Resources*. — 2020. — Vol. 45, no. 1. — P. 411–444. — DOI: [10.1146/annurev-environ-012320-083623](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623).
- Mills G., Molina L. T., Schlutzen H., et al. Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environment Services. Vol. II: Demonstration Cities. — Geneva, Switzerland : Publications Board World Meteorological Organization, 2021. — 166 p.
- Shin H. H., Dudhia J. Evaluation of PBL Parameterizations in WRF at Subkilometer Grid Spacings: Turbulence Statistics in the Dry Convective Boundary Layer // *Monthly Weather Review*. — 2016. — Mar. — Vol. 144, no. 3. — P. 1161–1177. — DOI: [10.1175/mwr-d-15-0208.1](https://doi.org/10.1175/mwr-d-15-0208.1).
- Siuta D., West G., Stull R. W. WRF Hub-Height Wind Forecast Sensitivity to PBL Scheme, Grid Length, and Initial Condition Choice in Complex Terrain // *Weather and Forecasting*. — 2017. — Vol. 32, no. 2. — P. 493–509. — DOI: [10.1175/waf-d-16-0120.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-16-0120.1).
- Skamarock W. C., Klemp J. B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications // *Journal of Computational Physics*. — 2007. — Vol. 227, no. 7. — P. 3465–3485. — DOI: [10.1016/j.jcp.2007.01.037](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037).
- Solbakken K., Birkelund Y., Samuelson E. M. Evaluation of surface wind using WRF in complex terrain: Atmospheric input data and grid spacing // *Environmental Modelling & Software*. — 2021. — Vol. 145. — P. 105182. — DOI: [10.1016/j.envsoft.2021.105182](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105182).
- Wang C.-C. On the Calculation and Correction of Equitable Threat Score for Model Quantitative Precipitation Forecasts for Small Verification Areas: The Example of Taiwan // *Weather and Forecasting*. — 2014. — Vol. 29, no. 4. — P. 788–798. — DOI: [10.1175/waf-d-13-00087.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-13-00087.1).
- Wang L., Li D. Urban Heat Islands during Heat Waves: A Comparative Study between Boston and Phoenix // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. — 2021. — Vol. 60, no. 5. — P. 621–641. — DOI: [10.1175/JAMC-D-20-0132.1](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0132.1).

SHORT-TERM HIGH-RESOLUTION WEATHER FORECASTING IN THE CITY OF KHABAROVSK, RUSSIA

S. O. Romanskiy ^{**},¹ , E. M. Verbitskaya¹

¹Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

****Correspondence to:** Stanislav O. Romanskiy, khvrom@ya.ru

Experimental short-term numerical weather prediction system based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model with grid spacing of 1 km for the city of Khabarovsk, Russia is presented. Single-layer urban canopy parametrization is used in the model runs and takes into consideration urban land use. Urban land surface consists of three types: low-rise, high-rise buildings and industrial zones. Niceties of forecasts' interpretation in a large city based on data of a high-resolution numerical grid are considered. Simulations of the WRF model with the grid spacing of 1 km have shown better quality of prediction in the city than forecasts on the grid spacing of 5 km for the period of time from June to December of 2023. Mean absolute errors of the forecasting speed and direction of surface wind with a velocity above 10 m/s are 2.9 m/s and 3.2 m/s, and 14° and 32° and absolute error of the forecasting air temperature is 1.6° and 3.1° for the WRF model with the grid spacing of 1 and 5 km respectively for the considered period of time.

Keywords: numerical weather prediction, mesoscale process, heavy rainfall, strong wind, land use, WRF-ARW, Khabarovsk.

Citation: Romanskiy, S. O. and E. M. Verbitskaya (2025), Short-Term High-Resolution Weather Forecasting in the City of Khabarovsk, Russia, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES1009, <https://doi.org/10.2205/2025ES000942>, EDN: MQMDJW

Received: 6 June 2024

Accepted: 15 October 2025

Published: 10 March 2025



© 2025. The Authors.

References

- Buchhorn M., Smets B., Bertels L., et al. Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe. — 2020. — DOI: [10.5281/ZENODO.3939050](https://doi.org/10.5281/ZENODO.3939050). — (visited on: 17.11.2022).
- Chen F., Kusaka H., Bornstein R., et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // *International Journal of Climatology*. — 2011. — Vol. 31, no. 2. — P. 273–288. — DOI: [10.1002/joc.2158](https://doi.org/10.1002/joc.2158).
- Dowell D. C., Alexander C. R., James E. P., et al. The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR): An Hourly Updating Convection-Allowing Forecast Model. Part I: Motivation and System Description // *Weather and Forecasting*. — 2022. — Vol. 37, no. 8. — P. 1371–1395. — DOI: [10.1175/waf-d-21-0151.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-21-0151.1).
- Garuma G. F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models // *Urban Climate*. — 2018. — Vol. 24. — P. 830–851. — DOI: [10.1016/j.uclim.2017.10.006](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.006).
- Grigoriev V. A., Ogorodnikov I. A. Problems of cities' ecologization in the world, Russia and Siberia: Analytical review. — Novosibirsk : Ecology. Series of analytical reviews of world literature, Issue 63. State Public Scientific, Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2001. — P. 152. — EDN: [FMJFFB](https://doi.org/10.2205/2025ES000942) ; (in Russian).
- Hong Kong Observatory. Numerical modelling for weather prediction in Hong Kong. — 2022. — URL: <https://www.hko.gov.hk/en/wservice/tsheet/nwp.htm> ; (visited on: 17.01.2024).
- Jeworrek J., West G., Stull R. W. WRF Precipitation Performance and Predictability for Systematically Varied Parameterizations over Complex Terrain // *Weather and Forecasting*. — 2021. — Vol. 36, no. 3. — P. 893–913. — DOI: [10.1175/waf-d-20-0195.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-20-0195.1).
- Kim G., Lee J., Lee M.-I. Impacts of urbanization on atmospheric circulation and aerosol transport in a coastal environment simulated by the WRF-Chem coupled with urban canopy model // *Atmospheric Environment*. — 2021. — Vol. 249. — P. 118253. — DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118253](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118253).

- Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., et al. A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models // *Boundary-Layer Meteorology*. — 2001. — Vol. 101, no. 3. — P. 329–358. — DOI: [10.1023/a:1019207923078](https://doi.org/10.1023/a:1019207923078).
- Kuznetsova I. N., Brusova N. E., Nakhaev M. I. Moscow Urban Heat Island: Detection, boundaries, and variability // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2017. — Vol. 42, no. 5. — P. 305–313. — DOI: [10.3103/S1068373917050053](https://doi.org/10.3103/S1068373917050053).
- Kwok Y. T., Ng Y. Y. E. Trends, topics, and lessons learnt from real case studies using mesoscale atmospheric models for urban climate applications in 2000-2019 // *Urban Climate*. — 2021. — Vol. 36. — P. 100785. — DOI: [10.1016/j.uclim.2021.100785](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100785).
- Lin Y., Wang C., Yan J., et al. Observation and Simulation of Low-Level Jet Impacts on 3D Urban Heat Islands in Beijing: A Case Study // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 2022. — Vol. 79, no. 8. — P. 2059–2073. — DOI: [10.1175/jas-d-21-0245.1](https://doi.org/10.1175/jas-d-21-0245.1).
- Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J., et al. Urban Climates and Climate Change // *Annual Review of Environment and Resources*. — 2020. — Vol. 45, no. 1. — P. 411–444. — DOI: [10.1146/annurev-environ-012320-083623](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623).
- Mills G., Molina L. T., Schlutzen H., et al. Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environment Services. Vol. II: Demonstration Cities. — Geneva, Switzerland : Publications Board World Meteorological Organization, 2021. — P. 166.
- Rivin G. S., Rozinkina I. A., Vil'fand R. M., et al. Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2020. — Vol. 45, no. 7. — P. 455–465. — DOI: [10.3103/S1068373920070018](https://doi.org/10.3103/S1068373920070018).
- 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 of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. — 2014. — 5(177). — P. 48–57. — EDN: [TNDODH](https://www.edn.ru/tnododh) ; (in Russian).
- Romanskiy S. O., Verbitskaya E. M. Strong Gusty Winds in the City of Yuzhno-Sakhalinsk in the Summer of 2014 // *Geosphere Research*. — 2023. — No. 4. — P. 141–154. — DOI: [10.17223/25421379/29/10](https://doi.org/10.17223/25421379/29/10). — EDN: [LZBUBM](https://www.edn.ru/lzbubm) ; (in Russian).
- Shin H. H., Dudhia J. Evaluation of PBL Parameterizations in WRF at Subkilometer Grid Spacings: Turbulence Statistics in the Dry Convective Boundary Layer // *Monthly Weather Review*. — 2016. — Mar. — Vol. 144, no. 3. — P. 1161–1177. — DOI: [10.1175/mwr-d-15-0208.1](https://doi.org/10.1175/mwr-d-15-0208.1).
- Siuta D., West G., Stull R. W. WRF Hub-Height Wind Forecast Sensitivity to PBL Scheme, Grid Length, and Initial Condition Choice in Complex Terrain // *Weather and Forecasting*. — 2017. — Vol. 32, no. 2. — P. 493–509. — DOI: [10.1175/waf-d-16-0120.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-16-0120.1).
- Skamarock W. C., Klemp J. B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications // *Journal of Computational Physics*. — 2007. — Vol. 227, no. 7. — P. 3465–3485. — DOI: [10.1016/j.jcp.2007.01.037](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037).
- Solbakken K., Birkelund Y., Samuelson E. M. Evaluation of surface wind using WRF in complex terrain: Atmospheric input data and grid spacing // *Environmental Modelling & Software*. — 2021. — Vol. 145. — P. 105182. — DOI: [10.1016/j.envsoft.2021.105182](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105182).
- Tarasova M. A., Varentsov M. I., Stepanenko V. M. Parameterization of the Interaction between the Atmosphere and the Urban Surface: Current State and Prospects // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2023. — Vol. 59, no. 2. — P. 111–130. — DOI: [10.1134/s0001433823020068](https://doi.org/10.1134/s0001433823020068).
- Wang C.-C. On the Calculation and Correction of Equitable Threat Score for Model Quantitative Precipitation Forecasts for Small Verification Areas: The Example of Taiwan // *Weather and Forecasting*. — 2014. — Vol. 29, no. 4. — P. 788–798. — DOI: [10.1175/waf-d-13-00087.1](https://doi.org/10.1175/waf-d-13-00087.1).
- Wang L., Li D. Urban Heat Islands during Heat Waves: A Comparative Study between Boston and Phoenix // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. — 2021. — Vol. 60, no. 5. — P. 621–641. — DOI: [10.1175/JAMC-D-20-0132.1](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0132.1).