

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.509.5

doi: 10.17072/2079-7877-2024-4-91-105

ОЦЕНКА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫМИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ
(НА ПРИМЕРЕ WRF-ARW) ОСТРОВА ТЕПЛА АРКТИЧЕСКОГО ГОРОДА (АПАТИТЫ)
В УСЛОВИЯХ «ТЕПЛОЙ ЗИМЫ»

Павел Игоревич Константинов¹, Ален Арманович Коспанов², Варвара Сергеевна Маратканова³,
Иван Романович Бекряев⁴, Анна Александровна Нариманидзе⁵, Артем Денисович Голиков⁶,
Владимир Евгеньевич Ермаков⁷, Мария Евгеньевна Зубова⁸, Анастасия Александровна Семёнова⁹,
Ульяна Игоревна Антипина¹⁰, Игорь Владимирович Малютин¹¹, Сергей Владимирович Шувалов¹²,
Дарья Юрьевна Гущина¹³, Юлия Вячеславовна Мухартова¹⁴

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14} Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

^{1, 2, 3} Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

⁹ Университет МГУ–ППИ в Шэньчжэне, г. Шэньчжень, Гуандун, КНР

⁹ «Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью» ФМБА России, г. Москва, Россия

¹⁰ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, г. Москва, Россия

¹⁰ Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук, г. Москва, Россия

¹ kostadini@mail.ru

² kospanov.alen@gmail.com

³ varvara.mar@yandex.ru

⁴ ibekryaev@mail.ru

⁵ annanarimanidze1563@gmail.com

⁶ artemgelios@gmail.com

⁷ ermakov@yandex.ru

⁸ maria.zubova2712@gmail.com

⁹ mos7kit@mail.ru

¹⁰ ant.uly@yandex.ru

¹¹ gomalytin@yandex.ru

¹² cyclonaut@ya.ru

¹³ dasha155@mail.ru

¹⁴ muhartova@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время Арктика является регионом, в значительной степени подверженным негативным последствиям глобальных климатических изменений. В связи с этим остро встаёт проблема изучения микроклиматических особенностей арктических городов, в которых сосредоточена большая часть населения. Эта проблема усугубляется небольшим объемом доступной метеорологической информации. Исследование оценивает возможность воспроизведения такого явления, как городской остров тепла, в г. Апатиты в условиях «тёплой зимы» региональными метеорологическими моделями. Наличие острова тепла выявлялось по данным полевых измерений температуры воздуха логгерами iButton с 29 по 31 января 2024 г. Его моделирование проводилось за тот же период с использованием модельного комплекса WRF-ARW. В результате было обнаружено, что модель удовлетворительно воссоздает пространственную структуру острова тепла г. Апатиты со средней интенсивностью 1,2 °С. Его наличие в условиях «тёплой зимы» подтверждается данными полевых наблюдений (интенсивность 0,6 °С). Разница значений находится в пределах погрешности измерений. Наименьшие расхождения между результатами моделирования и прямыми измерениями термодатчиков наблюдаются в случае удачного воспроизведения условий облачности. Таким образом, в условиях «тёплой зимы» качественное прогнозирование положительной аномалии определяется качеством воспроизведения облачного покрова региональной моделью.

Ключевые слова: климат города, острова тепла, Арктические города, WRF-ARW, региональные особенности

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 23-27-00254.

Для цитирования: Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А., Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И., Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В. Оценка воспроизводимости региональными метеорологическими моделями (на примере WRF-ARW) острова тепла арктического города (Апатиты) в условиях «теплой зимы» // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 4 (71). С. 91–105. doi: 10.17072/2079-7877-2024-4-91-105



Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Zubova M.E., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

METEOROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2024-4-91-105

ASSESSMENT OF THE REPRODUCIBILITY BY REGIONAL METEOROLOGICAL MODELS (WRF-
ARW) OF AN URBAN HEAT ISLAND IN THE ARCTIC TOWN (APATITY)
UNDER 'WARM WINTER' CONDITIONS

Pavel I. Konstantinov¹, Alen A. Kospanov², Varvara S. Maratkanova³, Ivan R. Bekryaev⁴, Anna A. Narimanidze⁵,
Artem D. Golikov⁶, Vladimir E. Ermakov⁷, Mariya E. Zubova⁸, Anastasia A. Semenova⁹, Uliana I. Antipina¹⁰,
Igor V. Malyutin¹¹, Sergey V. Shuvalov¹², Daria Yu. Gushchina¹³, Yulia V. Muhartova¹⁴

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^{1, 2, 3} Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

¹ Shenzhen MSU-BIT University Longgang District, Shenzhen, Guangdong Province, PRC

⁹ Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia

¹⁰ Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Izrael, Moscow, Russia

¹⁰ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

¹ kostadini@mail.ru

² kospanov.alen@gmail.com

³ varvara.mar@yandex.ru

⁴ ibekryaev@mail.ru

⁵ annanarimanidze1563@gmail.com

⁶ artemgelios@gmail.com

⁷ ermakov@yandex.ru

⁸ maria.zubova2712@gmail.com

⁹ mos7kit@mail.ru

¹⁰ ant.uly@yandex.ru

¹¹ gomalytin@yandex.ru

¹² cyclonaut@ya.ru

¹³ dasha155@mail.ru

¹⁴ muhartova@yandex.ru

Abstract. Nowadays, the Arctic is one of the regions of the world most affected by the global climate change. Consequently, the study of microclimatic conditions of Arctic cities and towns, where resides most of the population, becomes a scientific problem of great importance, while being compounded by the lack of verified meteorological data. This research deals with an assessment of a 'warm winter' urban heat island (UHI) in the town of Apatity using a regional meteorological model. The UHI was first identified by field observation data from 29 to 31 of January 2024, recorded on iButton temperature loggers. The model experiment for the same period was conducted using the WRF-ARW model. The results demonstrate that the model is able to reproduce the spatial structure of the 'warm winter' Apatity UHI. Its average intensity was calculated to be 1.2 °C. Field observation data identified the UHI with the average intensity of 0.6 °C. The difference between the simulated and observed UHIs is within the measurement accuracy. The best correlation between the model estimation and temperature loggers' data is observed in the case of the model accurately representing the cloud cover. Therefore, in 'warm winter' conditions the accuracy of urban heat island forecasting depends on the model performing the cloud cover calculations.

Keywords: urban climate, WRF-ARW, Arctic town, regional features, urban heat island

Funding. The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation under project No. 23-27-00254.

For citation: Konstantinov, P.I., Kospanov, A.A., Maratkanova, V.S., Bekryaev, I.R., Narimanidze, A.A., Golikov, A.D., Ermakov, V.E., Zubova, M.E., Semyonova, A.A., Antipina, U.I., Malyutin, I.V., Shuvalov, S.V., Gushchina, D.Yu., Mukhartova, Yu.V. (2024). Assessment of the reproducibility by regional meteorological models (WRF-ARW) of an urban heat island in the arctic town (Apatity) under 'warm winter' conditions. *Geographical Bulletin*. No. 4(71). Pp. 91–105. doi: 10.17072/2079-7877-2024-4-91-105

Введение

Исторически сложилось так, что недостаток данных в Заполярье привел к тому, что в начале первого десятилетия XXI в. современная климатология обладала крайне скудной информацией о микроклиматических особенностях городов, расположенных за полярным кругом. В XX в. имелись лишь единичные исследования, проведенные на Аляске и показавшие существование в зимнее время мощных островов тепла в относительно небольших городах Барроу и Фэрбанксе [16]. В России к текущему моменту имеются измерения в Апатитах, Воркуте, Мурманске, Норильске, Надыме, Салехарде и Новом Уренгое [6], а также в 2015–2022 гг. были установлены постоянные системы наблюдений для сбора климатологической информации о городском острове тепла, повторяемости приземных инверсий и их пространственной неоднородности [15].

Согласно им, в Норильске и в Апатитах разница температур между центром города и окрестностями доходит до 5–7 °C, в Мурманске и Воркуте различия получились более сглаженными [15]. Но это в чрезвычайно морозных условиях антициклональной циркуляции, а зимы в Арктической зоне РФ теплеют, что соответствует

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А., Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И., Малютин И.В., Щувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

тенденциям, отмеченным в докладах IPCC [11; 18]. Следовательно, вполне перспективно изучать как острова тепла в условиях более «теплых» зим в городах Арктики, так и способность региональных моделей прогноза погоды их воспроизводить [27]. К тому же зима 2023–2024 г. на севере ЕТР изобиловала именно «теплыми» эпизодами. Поэтому в период с 25 января по 1 февраля 2024 г. были проведены полевые исследования городского острова тепла в г. Апатиты, которые параллельно дополнялись данными регионального моделирования.

Район исследования

Город Апатиты расположен в центральной части Кольского полуострова за полярным кругом (67°34' с.ш. 33°24' в.д.). Высота центра города – около 178 м над уровнем моря, в юго-восточной части – до 200 м. Город находится на возвышении (высота центральной части примерно на 50 м превышает высоту местности к западу от города). В 6 км к северо-востоку от центра города имеется подножье горного массива Хибин (высочайшая точка – гора Юдычвумчорр, высота 1200,6 м). Полярная ночь длится с 15 по 29 декабря, полярный день – с 29 мая по 14 июля.

Территория города относится к северной части умеренного климатического пояса и подвергается влиянию умеренных и арктических воздушных масс [1]. Значительное смягчающее воздействие на климат оказывает Нордкапское тёплое течение. Климат данной территории по классификации Кёппена – Dfc (Холодный климат без сухого сезона с холодным летом) [20].

К западу от Апатитов находится озеро Имандра (площадь – 876 км²). В летние месяцы его микроклиматический эффект выражается в создании более высоких суточных минимальных температур воздуха по сравнению с окружающей местностью. Напротив, зимой для котловины озера характерно инверсионное распределение температур, застой холодного воздуха в понижениях рельефа [2].

В городе действуют такие предприятия, как Апатито-Нефелиновая обогатительная фабрика (АНОФ-2) и Апатитская ТЭЦ. Также поблизости от города есть горнодобывающие предприятия. Выбросы всех этих промышленных объектов оказывают значительное воздействие на содержание твёрдых частиц в атмосфере города [25]. Апатиты являются одним из крупнейших населённых пунктов на территории за Полярным кругом. На 1 января 2024 г. численность населения г. Апатиты составляет 48277 чел. [3]. Наличие промышленных объектов и относительно большое население являются важнейшими факторами формирования городского острова тепла.

Климат региона (1991–2020 гг.)

По официальным данным Гидрометцентра России (meteoinfo.ru), самым тёплым месяцем является июль (среднеклиматическая температура составляет +14,5 °С), январь – самым холодным месяцем (среднеклиматическая температура -12,7 °С). Это существенно ниже, чем средняя температура, зафиксированная в период проведения экспедиции (-1,5 °С) (рис. 1). Средняя климатическая температура за период календарной зимы составляет -11,5 °С. Для арктической территории такая зима считается тёплой, что обусловлено воздействием атлантических воздушных масс. В среднем за зиму наблюдается около 6 дней с оттепелью, с минимумом в январе. Годовая сумма осадков – 570 мм.



Рис. 1. Климатическая диаграмма г. Апатиты (meteoinfo.ru)

Fig. 1. Climatic diagram of Apatity (meteoinfo.ru)

Синоптическая обстановка в период полевых исследований

В январе 2024 г. сложилась синоптическая обстановка, нетипичная для данного региона и времени года. Постоянная активная циклоническая деятельность, сопровождаемая прохождением атмосферных фронтов с резкими перепадами температуры на разных высотах, а также порывистый ветер, провоцировавший интенсивное

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

вертикальное перемешивание воздуха в нижних слоях атмосферы, создали непростые условия для выполнения запланированных исследований, связанных с изучением острова тепла арктического города.

Однако эта нетипичная ситуация также предоставила уникальную возможность исследовать микроклимат г. Апатиты в условиях необычно теплой зимы.

Синоптическую ситуацию на Кольском полуострове в период с 25 января по 1 февраля 2024 г. можно условно разделить на 3 отдельных периода.

Период 1 (25.01–26.01): в начале экспедиции территория Кольского полуострова находилась в области высокого давления. По данным метеостанции Апатиты, в первый день экспедиции давление составляло 988–997 гПа на уровне метеостанции, отмечался умеренный западный, северо-западный ветер (5–6 м/с), который местами способствовал образованию позёмка. При этом ярко выраженного суточного хода температуры не наблюдалось (рис. 2). В ночные часы 26.01 отмечалось ослабление ветра до 0–2 м/с, что способствовало уменьшению интенсивности перемешивания воздуха.

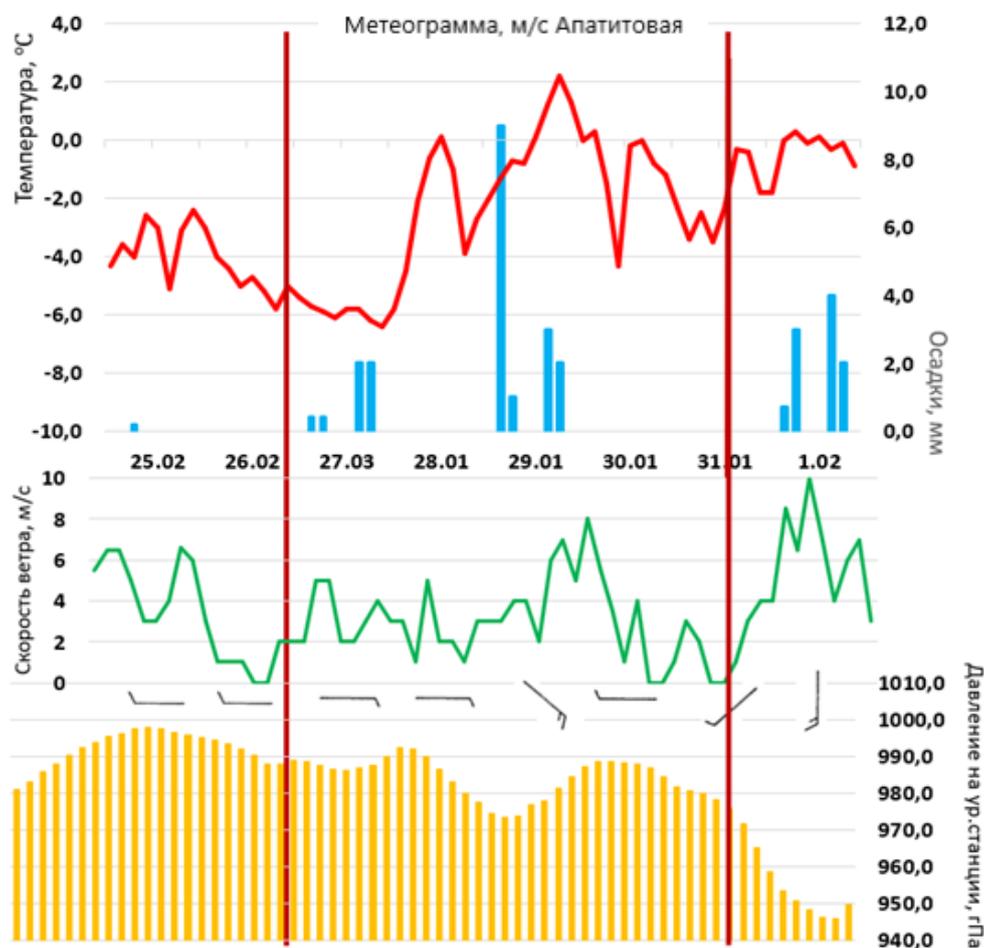


Рис. 2. Метеограмма с метеостанции Апатитовая (22 213): температура воздуха (красный), осадки (голубой), скорость ветра (зелёный), направление ветра (чёрный), атмосферное давление на уровне станции (оранжевый)

Fig. 2. Meteorogram from the Apatitovaya weather station (22 213): air temperature (red), precipitation (blue), wind speed (green), wind direction (black), atmospheric pressure at the station level (orange)

Период 2 (27.01–31.01): в этот период Кольский полуостров находился на юго-западной периферии циклона, что сопровождалось прохождением двух теплых атмосферных фронтов. На графике хода давления (рис. 3) можно увидеть два локальных минимума в данный период. Это вызвало резкий подъем температуры воздуха до аномально высоких значений для конца января – +2,2 °С. Также прохождение фронтальных зон связано с усилением ветра, выпадением осадков в виде снега, а в горных районах отмечался и дождь. Уже после прохождения фронтальной зоны, 30 января, погодные условия улучшились за счет приближения центральной части циклона. Наблюдалось постепенное прекращение осадков и ослабление ветра в исследуемом районе.

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

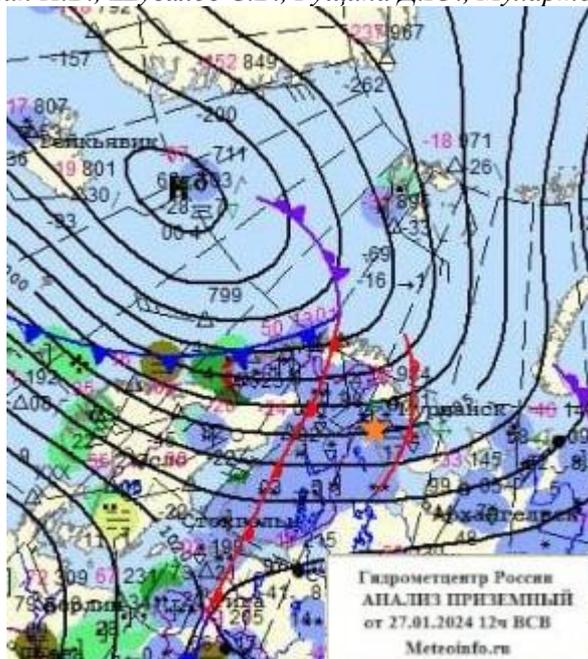


Рис. 3. Анализ приземной погоды от 27.01.24 12 ВСВ по данным Гидрометцентра России.

Цветной маркер указывает положение г. Апатиты

Fig. 3. Analysis of the Hydrometeorological Center of Russia of surface weather as of 27 Jan 2024 12 UTC.

Colored marker points to the location of Apatity

Период 3 (31.01–1.02): в последние дни экспедиционных измерений погода вновь стала резко меняться. Днём 31 января, согласно метеостанции Апатиты, давление начало стремительно понижаться перед приближающейся фронтальной зоной. Утром 1 февраля, к моменту завершения экспедиции, давление упало ниже отметки в 950 гПа, указывая на приближение очень активного атмосферного фронта. Прохождение зоны фронта сопровождалось усилением ветра, достигавшего порывов до 14 м/с, выпадением осадков до 10 мм, а также метелью. Несмотря на это, приземная температура существенно не изменялась, оставаясь на уровне от -2 до 0 °С.

Методика полевых измерений температуры

Для сбора данных о температуре воздуха в г. Апатиты и окрестностях использовались логгеры iButton, часто применяемые в микроклиматических исследованиях [12, 30]. Логгеры iButton DS1922L Thermochron внешне напоминают дисковую батарейку – они упакованы в герметичный корпус из легированной нержавеющей стали диаметром 17,35 мм и толщиной 5,89 мм. Корпус состоит из 2 изолированных друг от друга частей: основания и крышки. Части крышки представляют собой контактную часть 1-wire-порта (рис. 4).

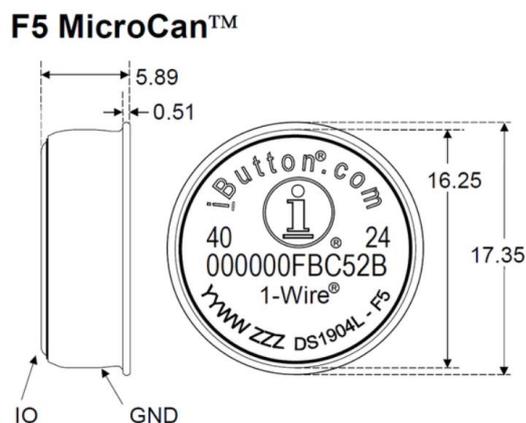


Рис. 4. Внешний вид и габариты термографа iButton DS1922L Thermochron (в мм)

Fig. 4. Appearance and dimensions of the iButton DS1922L Thermochron thermograph (in mm)

Внутри корпуса расположена интегральная электронная схема, в которую входят узел цифрового полупроводникового термометра, узел управления информационным обменом с помощью 1-wire-интерфейса, часы реального времени, тактовый генератор и память различного назначения (для записи отсчетов, калибровочных констант, дополнительных сведений, промежуточная блокнотная память и др.). Схема питается от 3-В литиевой батареи типа BR1225.

Результаты полевых измерений температуры воздуха

- Всего использовалось пять датчиков (логгеры iButton), которые были расположены в городе и за городом.
- датчик на АНОФе имеет координаты: $67,591^{\circ}$ с.ш., $33,460^{\circ}$ в.д.;
- датчик у поста Дорожно-постовой службы (ДПС): $67,583^{\circ}$ с.ш., $33,318^{\circ}$ в.д.;
- датчик на Тик-Губе: $67,552^{\circ}$ с.ш., $33,360^{\circ}$ в.д.;

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

- датчик на повороте трассы Апатиты-Аэропорт Хибины: 67,553° с.ш., 33,450° в.д.;
- датчик на метеостанции у КНЦ: 67,568° с.ш., 33,407° в.д.

Датчик в центре города, у Кольского научного центра (КНЦ), считался «типично городской» точкой измерений, и остров тепла рассчитывался как аномалия температуры, которую показывает данный датчик, относительно фоновой температуры воздуха.

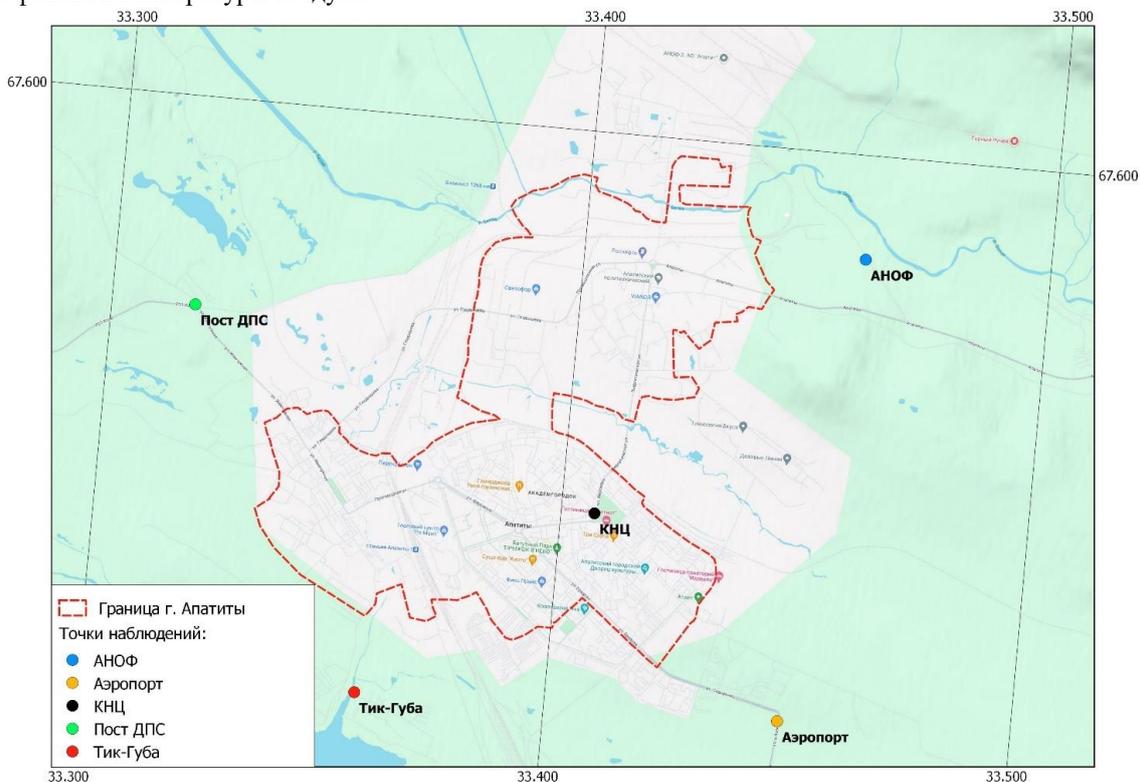


Рис. 5. Местоположение логгеров iButton в г. Апатиты
Fig. 5. Locations of iButton loggers in Apatity

Измерения, полученные с помощью датчиков, представляют собой временные ряды температуры воздуха с разрешением по времени 15 мин. с 00:00 29.01.2024 по 21:00 31.01.2024 (UTC +3). Так как датчики устанавливались в разное время, в результате чего количество и время измерений для них не совпадали, перед обработкой результатов измерений была проведена интерполяция данных наблюдений с дискретностью по времени 15 мин. на фиксированные периоды в 30 мин. с началом в 00:00 29.01. Интерполяция осуществлялась посредством осреднения всех входящих в определённый период сроков измерений. Использование инструментария библиотеки Pandas языка программирования Python [21] позволило решить проблему несовпадения сроков наблюдений между пятью датчиками в связи с невозможностью их одновременного начала.

Статистические характеристики, рассчитанные по данным измерений, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики временных рядов наблюдения за температурой в г. Апатиты
Statistical characteristics of time series of temperature observations in the town of Apatity

Статистические характеристики	Аэропорт	АНОФ	Пост ДПС	Тик-Губа	КНЦ
Среднее значение	-1,6	-1,7	-1,0	-1,6	-0,8
Среднеквадратическое отклонение	1,4	1,7	1,4	2,4	1,2
Минимум	-4,8 (31.01, 04:30)	-5,7 (31.01, 10:00)	-4,6 (31.01, 04:00)	-7,6 (31.01, 05:00)	-3,9 (31.01, 04:00)
Максимум	+0,6 (29.01, 21:30)	+1,1 (30.01, 22:00)	+1,7 (29.01, 22:30)	+1,8 (29.01, 21:00)	+1,4 (30.01, 20:30)

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

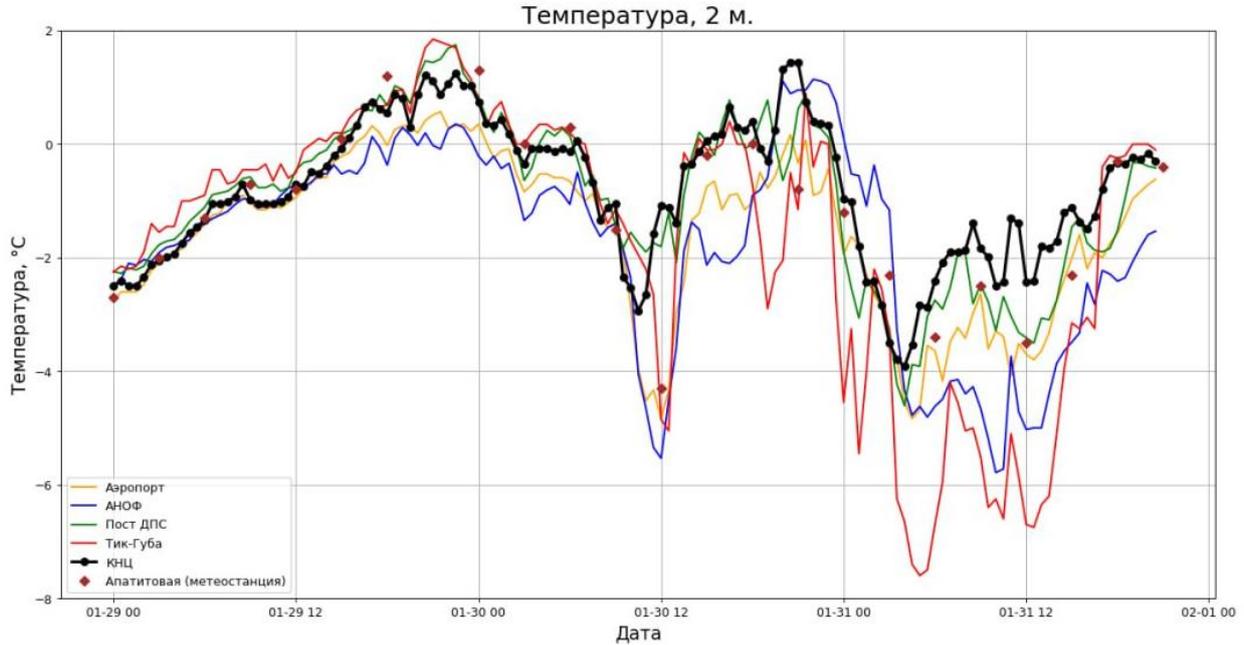


Рис. 6. Ход температуры воздуха в точках наблюдений в период измерений
Fig. 6. Temperature progression at observation points during the measurement period

В целом, 29.01 Апатиты находились под влиянием циклона. Погода была характерной для данного барического образования, присутствовали порывистый ветер, облачность в пределах 9–10 баллов, ливневый снег. Суточный ход температур не был выражен – по данным метеостанции Апатитовая, в течение суток отмечалось потепление, максимальная суточная температура была зафиксирована в 21:00. Потепление также выражено в измерениях датчиков. До 00:00 30.01 наблюдалась устойчивая тенденция к потеплению.

Наибольший интерес с точки зрения анализа городского острова тепла представляет ситуация, сложившаяся днем 30.01. В районе полудня произошло резкое прояснение с уменьшением облачности (с 9 баллов до 2–3) и уменьшением скоростей ветра до 1 м/с. Совокупность этих факторов привела к заметному похолоданию, что было зафиксировано всеми датчиками и выражено в ходе температур в период измерений (рис. 5). С увеличением балла облачности и скоростей ветра к вечеру в ходе температур вновь возникла тенденция к росту.

Следующее прояснение (уменьшение облачности до 4 баллов) было зафиксировано метеостанцией в 00:00 31.01. Оно также сопровождалось снижением скоростей ветра до 1 м/с, штилевыми условиями в утренние (03:00–06:00) часы. Это привело к уменьшению температуры и достижению минимальных значений за весь период наблюдения всеми датчиками (табл. 1).

В течение 31.01 преобладали отрицательная барическая тенденция, увеличение балла облачности до 100 % с образованием слоистых и слоисто-кучевых облаков, увеличение скоростей ветра до 6 м/с в порывах в 21:00. Всё это вызвало нарушение суточного хода температуры, тенденция к её росту в течение суток была зафиксирована всеми пятью датчиками (рис. 6).

Таблица 2

Статистические характеристики временного ряда интенсивности острова тепла в г. Апатиты
Statistical characteristics of the time series of the heat island intensity in Apatity

Статистические характеристики	Интенсивность острова тепла
Среднее значение	+0,63
Среднеквадратическое отклонение	0,87
Минимум	- 0,68 (31.01, 03:00)
Максимум	+3,18 (30.01, 12:00)

Как было сказано выше, с точки зрения анализа эффекта городского острова тепла наибольший интерес представляют собой 30–31.01. В предыдущие сутки вследствие погоды, которая сопровождалась усилением ветра и, следовательно, интенсивным перемешиванием, городской остров тепла был выражен слабо. Разница температур между городом и окружающей местностью не превышала 0,5 °С.

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А., Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И., Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

30.01. вследствие описанного выше проявления около полудня был отмечен остров тепла максимальной интенсивности за весь период наблюдений. В 12:00 аномалия городского датчика относительно фоновой температуры достигла $+3,2$ °C (табл. 2). Также положительные аномалии, превышающие 1 °C, наблюдались в последующие сроки (12:30 и 13:00). Второй максимум в течение этих суток был зафиксирован с 20:00 до 21:00, когда положительная аномалия также превысила это значение.

Модельные эксперименты по воспроизведению городского острова тепла

Для моделирования острова тепла арктического города в условиях циклонического типа погоды, характеризующегося относительно высокой температурой, облачностью и скоростью ветра, был использован модельный комплекс WRF-ARW [24]. В связи с небольшим размером города было необходимо проводить моделирование с высоким пространственным разрешением. Временной шаг выдачи модельных данных должен был соответствовать частоте данных измерений.

Для представления области счета были использованы 4 вложенных домена (рис. 7). Шаг сетки доменов изменялся от 9 км по горизонтали в старшем домене до 333 м в младшем. Моделирование охватывало период с 00:00 24.01.2024 по 21:00 31.01.2024. Горизонтальный размер всех доменов составил 160×160 узлов. Вычислительная сетка содержала 62 вертикальных уровня, из них 15 ниже 100 м, 30 ниже 1000 м. Это позволило достаточно точно воспроизвести как динамику в пограничном слое над городом, так и выхолаживание при просветах в облачности, а также динамику в сложном рельефе массива Хибинских гор.

Скорость счета на 256 вычислительных ядрах суперкомпьютера Гидрометцентра России CrayXC40 – 9:1, то есть 9 часов модельного времени вычислялись за 1 час реального. Столь низкая скорость счета связана как с малым шагом сетки, так и с горным рельефом, что вынудило производить вычисления с уменьшенным шагом по времени для сохранения численной устойчивости.

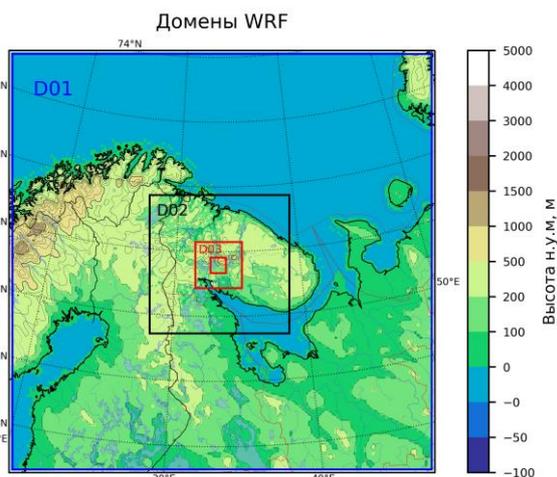


Рис. 7(a). Карта вычислительных доменов модели WRF-ARW
Fig. 7(a). Map of computing domains of the WRF-ARW model

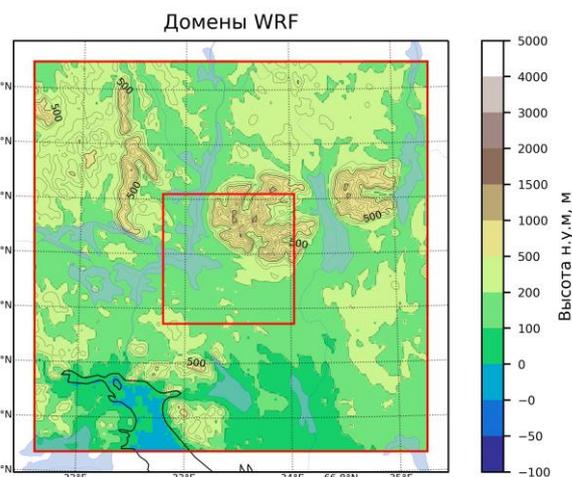


Рис. 7(б). Карта младших доменов модели WRF-ARW
Fig. 7(b). Map of low domains of the WRF-ARW model

Для задания в модели городской подстилающей поверхности с необходимым пространственным разрешением был использован глобальный набор данных локальных климатических зон [4]. Пространственное разрешение данного набора данных составляет 100 м. Применение локальных климатических зон позволяет учитывать пространственную структурную неоднородность застройки.

Для выделения модельного городского острова тепла также необходимо проводить моделирование без города. Это способствует сохранению фоновых значений метеорологических полей и уменьшению собственных ошибок модели при вычитании в условиях сравнения полей. Для моделирования без города была установлена доля застройки 0,00 в руководящей таблице городских параметров URBPARM_LCZ.TBL в модели.

Для моделирования в высоких широтах важен используемый набор параметризаций, особенно пограничного слоя, поверхности и радиации. В качестве параметризаций коротко- и длинноволновых процессов была выбрана параметризация RRTMG [10].

Наличие города с характерными размерами зданий порядка первых десятков метров при шаге сетки 333 м приводит к необходимости применения параметризации городской подстилающей поверхности. Для более точного описания динамики атмосферы в городе была использована параметризация BEP+VEM [17, 23]. Её точность в обрисовке городских процессов неоднократно продемонстрирована при воспроизведении острова тепла крупных городов, таких как Барселона [22, 23], Мадрид, [23], Берлин [29].

Работа с параметризацией городской подстилающей поверхности значительно ограничивает выбор возможных параметризаций пограничного слоя атмосферы. По данным работ [14, 32], наилучшие результаты при расчетах показывает параметризация пограничного слоя Mellor–Yamada–Janjić (MYJ) [13].

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А., Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И., Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

В качестве параметризации подстилающей поверхности была взята Noah-MP [7, 19, 28].

В результате получены поля метеорологических переменных с горизонтальным шагом сетки 333 м и временной дискретностью 10 мин. для основных метеорологических величин. Так как во время измерительной кампании проводились только измерения температуры воздуха, далее будут рассмотрены только данные о температуре воздуха.

Для каждой переменной существуют два поля – поле, полученное в результате моделирования с городом, а также поле с «отключенным» городом.

Для данных моделирования с дискретностью по времени 10 мин. было проведено осреднение по интервалам, аналогичным временным рядам наблюдений, полученных датчиками iButton. Это позволило с большей точностью сравнивать данные моделирования и наблюдений.

Для временной интерполяции и осреднения были использованы библиотеки Numpy [8], Pandas [21] языка программирования Python [26].

Результаты и обсуждение

По итогам модельного эксперимента была рассчитана интенсивность острова тепла, представленная как разность между температурой в точке КНЦ и средним значением температуры на фоновых точках. Максимальная интенсивность городского острова тепла составила 3,1 °C и наблюдалась в утренние часы 30.01. Остров тепла также ярко проявился утром 31.01 с интенсивностью 2–3 °C.

Данные моделирования с учетом города (рис. 8) показывают схожую картину интенсивности острова тепла. В утренние часы 29.01 при прохождении теплового фронта интенсивность острова тепла была близка к 0 °C, по модельным данным с учетом города порядка 0,5 °C. Однако после прохождения фронта и прояснения в модели остров тепла проявляется с интенсивностью порядка 3 °C. По данным наблюдения, этого не происходит из-за сохранения облачности. Однако в утренние часы 30.01 при прояснении наблюдаемая интенсивность острова тепла действительно превышает 3 °C.

Для визуализации полученных данных была использована библиотека Matplotlib [9].



Рис. 8. Временной ход интенсивности городского острова тепла города Апатиты по данным измерений и моделирования в период 29.01.2024 – 31.01.2024

Fig. 8. Time course of the intensity of the urban heat island in Apatity according to measurement and modeling data from 29 Jan 2024 to 31 Jan 2024

Пространственное сравнение поля температуры воздуха на высоте 2 м показывает интенсивность и распространение положительной аномалии температуры, возникающей из-за влияния города. Согласно данным моделирования, средняя интенсивность городского острова тепла за исследуемый период составила 1,2–1,5 °C в пределах города. Средняя разность температуры воздуха за пределами города при моделировании с городом и без города варьирует от -0,1 до +0,1 °C, что позволяет однозначно выделить влияние городского эффекта на приземную температуру воздуха.

Карта средней интенсивности городского острова тепла (рис. 9) была создана с использованием библиотеки Cartopy [5].

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
 Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
 Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

Средняя интенсивность острова тепла
 29.01.2024 00:00 - 31.01.2024 21:00

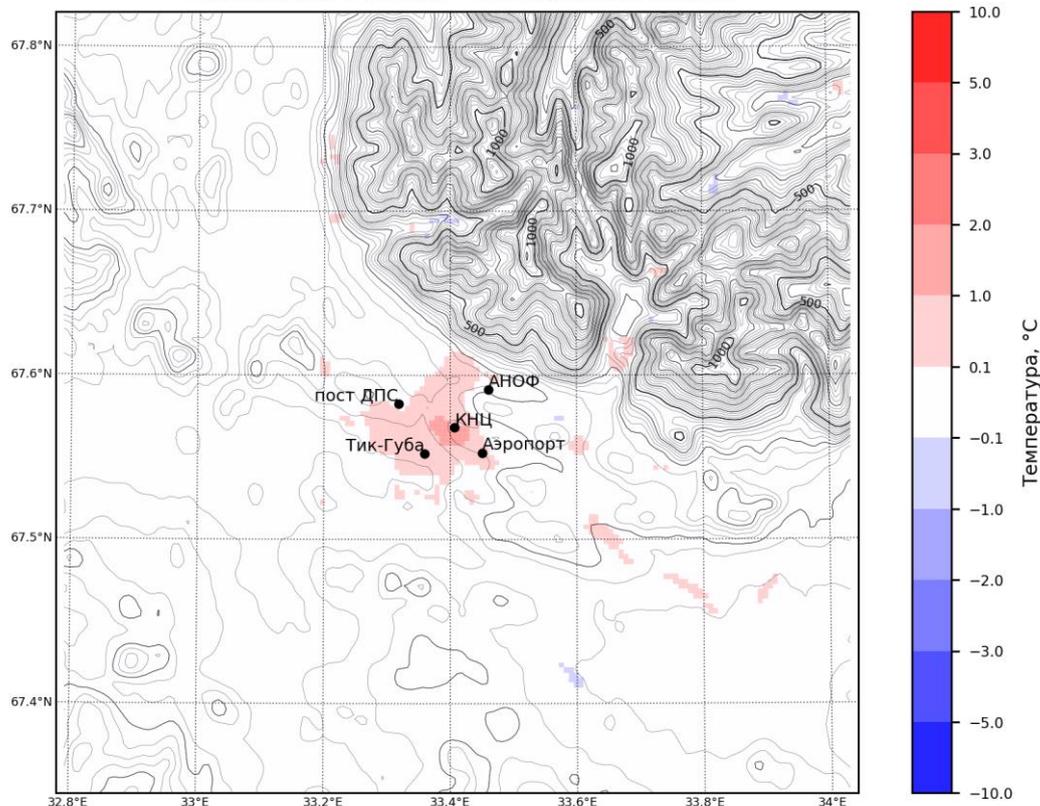


Рис. 9. Карта средней интенсивности городского острова тепла города Апатиты с отмеченными точками измерений приземной температуры воздуха

Fig. 9. Map of the average intensity of the Apatity urban heat island with marked points of surface air temperature measurements

Исходя из рис. 8, видно, что основной причиной рассогласованности в значениях измеренной и смоделированной температуры является облачность. В те моменты, когда облачность моделируется успешно, и качество воспроизведения модельных значений довольно высокое. А вот в периоды ошибки в моделировании облачности (12:00 31.01.2024), наоборот, возникают самые большие ошибки в интенсивности городского острова тепла.

Что же касается пространственной картины, то на уровне средних значений смоделированная WRF-ARW за период наблюдений интенсивность городского острова тепла (+1,2 °C) на 0,6 °C (почти в пределах погрешности измерений) превышает измеренную (табл. 2).

Заключение

По итогам проведенного сравнения модельных экспериментов WRF-ARW и данных полевых экспедиционных измерений в районе города Апатиты Мурманской области в период «теплой зимы» 26–31 января 2024 г. представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Пространственная структура острова тепла в Апатитах с помощью WRF-ARW воспроизводится удовлетворительно с максимальным развитием явления в центральной части города и плотной застройки (здание КНЦ).
2. Наименьшее расхождение между результатами моделирования и прямыми измерениями с помощью термодатчиков достигается в случае удачного воспроизведения моделью условий облачности. Таким образом, для качественного прогнозирования интенсивности городской термической аномалии стоит выбирать такие варианты модели WRF-ARW, в которых облачный покров воспроизводится наиболее успешно.
3. Дальнейшее изучение островов тепла в арктических городах в условиях «тёплой зимы» заключается как в проведении полевых наблюдений с использованием более плотной сети термодатчиков, что позволит выяснить влияние внутригородских микроклиматических условий на это явление, так и в проведении дальнейших модельных экспериментов.
4. Полученные результаты имеют практическую значимость, в том числе для дальнейшего развития системы прогнозирования как условий комфортности климата в городах Арктики, так и планирования, например, сортового состава зеленой инфраструктуры.

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
 Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
 Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

Библиографический список

1. Кобышева Н.В. Климат России. СПб: Гидрометеоздат, 2001. 655 с.
2. Моисенко Т.И., Даувальтер В.А., Сандимиров С.С. (ред.) и др. Экологическое состояние озера Имандра: в 2 томах: Гидролого-геохимические условия. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. Т. 1. 221 с.
3. Федеральная служба государственной статистики. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 06.06.2024)
4. Demuzere M., Kittner J., Martilli A., Mills G., Moede C., Stewart I.D., van Vliet J., Bechtel B. A global map of Local Climate Zones to support earth system modelling and urban scale environmental science // *Earth System Science Data Discussions*. 2022. Vol. 14, No. 8. P. 3835–3873. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>
5. Elson P. et al. SciTools/cartopy: v0. 21.0. Zenodo. 2022. URL: <https://zenodo.org/records/7430317>
6. Esau I., Miles V., Soromotin A., Sizov O., Varentsov M., Konstantinov P. Urban heat islands in Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote sensing estimations // *Advances in Science and Research*. 2021. Vol. 18. P. 51–57. URL: <https://doi.org/10.5194/asr-18-51-2021>
7. He C. et al. The community Noah-MP land surface modeling system technical description version 5.0. NCAR Technical Note N CAR/TN-575+ STR. 2023. 278 p. URL: <https://doi.org/10.5065/ew8g-yr95>
8. Harris C.R. et al. Array programming with NumPy // *Nature*. 2020. V. 585, No. 7825. P. 357–362. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
9. Hunter J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment // *Computing in science & engineering*. 2007. Vol. 9, No. 03. P. 90–95.
10. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. Vol. 113, No. D13.
11. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Gen., Switzerland. 2014. 151 p.
12. Johnson A.N., Boer B., Woessner W.W., Stanford J.A., Poole G.C., Thomas S., O’Daniel S.J. Evaluation of an inexpensive small-diameter temperature logger for documenting ground water-river interactions // *Groundwater Monitoring & Remediation*. 2005. Vol. 25, No. 4. P. 68–74.
13. Janjic Z.I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes // *Monthly weather review*. 1994. Vol. 122, No. 5. P. 927–945.
14. Kim J. et al. Evaluation of land-atmosphere processes of the Polar WRF in the summertime Arctic tundra // *Atmospheric research*. 2020. Vol. 240. 104946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104946>
15. Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2018. 3. 075007. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84>
16. Magee N., Curtis J., Wendler G. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // *Theoretical and Applied Climatology*. 1999. Vol. 64. P. 39–47.
17. Martilli A., Clappier A., Rotach M.W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models // *Boundary-layer meteorology*. 2002. Vol. 104. P. 261–304.
18. Masson-Delmotte V. et al. (eds.) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, IPCC. 2021. P. 3–32.
19. Niu G.Y. et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. V. 116, No. D12.
20. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // *Hydrology and Earth System Science*. 2008. 11. P. 1633–1644.
21. Reback J. et al. pandas-dev/pandas: Pandas 1.0. 5. Zenodo. 2020. URL: <https://zenodo.org/records/3898987>
22. Ribeiro I., Martilli A., Falls M., Zonato A., Villalba G. Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ // *Atmospheric Research*, 2021. Vol. 248. 105220. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105220>
23. Salamanca F., Martilli A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations —Part II. Validation with one dimension off-line simulations // *Theoretical and Applied Climatology*. 2010. Vol. 99. P. 345–356.
24. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR). 2021. 148 p. URL: <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
25. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobievskaya E., Sedova N. Anthropogenic pollution of the southern part of the Khibiny mountain massif and foothills // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. 302. 012024.
26. Van Rossum G. et al. Python reference manual. Amsterdam: CWI, 1995. Vol. 111. P. 1–52.
27. Vorotilova P.G., Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Timazhev A.V., Baklanov A.A. Study of surface-based temperature inversions in the city of Nadym (Western Siberia) with direct measurements and numerical simulation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. 611. 012021. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012021>
28. Vogel J., Afshari A. Comparison of urban heat island intensity estimation methods using urbanized WRF in Berlin, Germany // *Atmosphere*, 2020. Vol. 11, No. 12. 1338 p. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos11121338>
29. Wolaver B. D., Sharp J.M. Thermochron iButton: Limitation of this inexpensive and small-diameter temperature logger // *Ground Water Monitoring and Remediation*. 2007. Vol. 27, No. 3. P. 127–128.
30. Yang Z.L. et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. Vol. 116, No. D12.
31. Zhang T., Le C., Simeng L., Jiandong W. Evaluation of meteorological predictions by the WRF model at Barrow, Alaska and Summit, Greenland in the Arctic in April 2019 // *Advances in Polar Science*. 2023. Vol. 34, No. 4. P. 352–367. URL: <https://doi.org/10.12429/j.advps.2023.0006>

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
 Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
 Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

References

1. Kobysheva N.V. (2001). *The Climate of Russia*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 655 p.
2. Moscenko T.I., Dauvalter V.A., Sandimirov S.S. (ed.) et al. (2023). *Ecological state of the Imandra lake in two volumes. Vol. 1: Hydrological and Geochemical conditions*. Apatity: FRC KSC RAS (Publ.), 221 p.
3. Federal State Statistics Service. Russian Federation. Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (Accessed 6 June 2024)
4. Demuzere M., Kittner J., Martilli A., Mills G., Moede C., Stewart I.D., van Vliet J., Bechtel B. (2022). A global map of Local Climate Zones to support earth system modelling and urban scale environmental science. *Earth System Science Data Discussions*, vol. 14, no. 8, pp. 3835–3873. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>
5. Elson P. et al. (2022). *SciTools/cartopy: v0. 21.0*. Available at: <https://zenodo.org/records/7430317>
6. Esau I., Miles V., Soromotin A., Sizov O., Varentsov M., Konstantinov P. (2021). Urban heat islands in Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote sensing estimations. *Advances in Science and Research*, vol. 18, pp. 51–57. Available at: <https://doi.org/10.5194/asr-18-51-2021>
7. He C. et al. (2023). *The community Noah-MP land surface modeling system technical description version 5.0*. NCAR Technical Note N CAR/TN-575+ STR, 278 p. Available at: <https://doi.org/10.5065/ew8g-yr95>
8. Harris C.R. et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
9. Hunter J.D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in science & engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95.
10. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, no. D13.
11. IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. Geneva: IPCC (Publ.), 151 p.
12. Johnson A.N., Boer B., Woessner W.W., Stanford J.A., Poole G.C., Thomas S., O’Daniel S.J. (2005). Evaluation of an inexpensive small-diameter temperature logger for documenting ground water–river interactions. *Groundwater Monitoring & Remediation*, vol. 25, no. 4, pp. 68–74.
13. Janjic Z.I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly weather review*, vol. 122, no. 5, pp. 927–945.
14. Kim J. et al. (2020). Evaluation of land-atmosphere processes of the Polar WRF in the summertime Arctic tundra. *Atmospheric research*, vol. 240, 104946. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104946>
15. Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. (2018). A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic. *Environmental Research Letters*, 3, 075007. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac884>
16. Magee N., Curtis J., Wendler G. (1999). The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 64, pp. 39–47
17. Martilli A., Clappier A., Rotach M.W. (2002). An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-layer meteorology*, vol. 104, pp. 261–304.
18. Masson-Delmotte V. et al. (eds.) (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, IPCC, pp. 3–32.
19. Niu G. Y. et al. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116, no. D12.
20. Peel M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2008). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Science*, 11, pp. 1633–1644.
21. Reback J. et al. (2020). *pandas-dev/pandas: Pandas 1.0. 5*. Available at: <https://zenodo.org/records/3898987>
22. Ribeiro I., Martilli A., Falls M., Zonato A., Villalba G. (2021). Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ. *Atmospheric Research*, vol. 248, 105220. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105220>
23. Salamanca F., Martilli A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations —Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 99, pp. 345–356.
24. Skamarock W. C. et al. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR), 148 p. Available at: <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
25. Slipenchuk M., Kirillov S., Vorobievskaya E., Sedova N. (2019). Anthropogenic pollution of the southern part of the Khibiny mountain massif and foothills. *IOP Conference Series.: Earth and Environmental Science*, 302, 012024.
26. Van Rossum G. et al. (1995). *Python reference manual*. Amsterdam: CWI, vol. 111, pp. 1–52.
27. Varentsov, M., Konstantinov, P., Baklanov, A., Esau, I., Miles, V., and Davy, R.: Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 17573–17587, 2018 <https://doi.org/10.5194/acp-18-17573-2018>
28. Vorotilova P.G., Konstantinov P.I., Varentsov M.I., Timazhev A.V., Baklanov A.A. (2020). Study of surface-based temperature inversions in the city of Nadym (Western Siberia) with direct measurements and numerical simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 611, 012021. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012021>
29. Vogel J., Afshari A. (2020). Comparison of urban heat island intensity estimation methods using urbanized WRF in Berlin, Germany. *Atmosphere*, vol. 11, no. 12, 1338 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos11121338>
30. Wolaver B. D., Sharp J. M. (2007). Thermochron iButton: Limitation of this inexpensive and small-diameter temperature logger. *Ground Water Monitoring and Remediation*, vol. 27, no. 3, pp. 127–128.

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

31. Yang Z. L. et al. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116, no. D12.

32. Zhang T., Le C., Simeng L., Jiandong W. (2023). Evaluation of meteorological predictions by the WRF model at Barrow, Alaska and Summit, Greenland in the Arctic in April 2019. *Advances in Polar Science*, vol. 34, no. 4, pp. 352-367. Available at: <https://doi.org/10.12429/j.advps.2023.0006>

Статья поступила в редакцию: 04.06.24, одобрена после рецензирования: 05.09.24, принята к опубликованию: 12.12.24.

The article was submitted: 4 June 2024; approved after review: 5 September 2024; accepted for publication: 12 December 2024.

Информация об авторах

Павел Игоревич Константинов

кандидат географических наук,
доцент кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1;
старший научный сотрудник Лаборатории
моделирования средней и верхней атмосферы,
Российский Гидрометеорологический университет;
192007, Россия, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79;
доцент Университета МГУ–ППИ в Шэньчжэне,
518115, КНР Гуандун, г. Шэньчжень

e-mail: kostadini@mail.ru

Ален Арманович Коспанов

студент кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1;
Техник лаборатории моделирования верхней и средней
атмосферы, Российский государственный
гидрометеорологический университет
192007, Россия, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79

e-mail: kospanov.alen@gmail.com

Варвара Сергеевна Маратканова

Техник лаборатории моделирования верхней
и средней атмосферы,
Российский государственный гидрометеорологический
университет;
192007, Россия, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79;
студент кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: varvara.mar@yandex.ru

Иван Романович Бекряев

студент кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: ibekryaev@mail.ru

Анна Александровна Нариманидзе

студент кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: annanarimanidze1563@gmail.com

Information about the authors

Pavel I. Konstantinov

Candidate of Geographical Sciences, Associate
Professor, Department of Meteorology
and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia
Senior Researcher, Laboratory for the Modeling of
Middle and High Atmosphere,
Russian State Hydrometeorological University;
79, Voronezhskaya st., St. Petersburg, 192007, Russia
Assistant Professor Shenzhen MSU-BIT University,
Shenzhen, Guangdong Province, PRC, 518115

Alen A. Kospanov

Master's Student, Department of Meteorology
and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia
Technician, Laboratory for the Modeling of Middle
and High Atmosphere, Russian State
Hydrometeorological University;
79, Voronezhskaya st., St. Petersburg, 192007, Russia;

Varvara S. Maratkanova

Technician, Laboratory for the Modeling of Middle
and High Atmosphere, Russian State
Hydrometeorological University;
79, Voronezhskaya st., St. Petersburg, 192007, Russia;
Master's Student, Department of Meteorology
and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Ivan R. Bekryaev

Bachelor's Student, Department of Meteorology
and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Anna A. Narimanidze

Bachelor's Student, Department of Meteorology
and Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Метеорология

Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
 Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
 Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.

Артем Денисович Голиков

студент кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет, Московский
 государственный университет им. М.В. Ломоносова;
 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
 e-mail: artemgelios@gmail.com

Artem D. Golikov

Bachelor's Student, Department of Meteorology
 and Climatology, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Владимир Евгеньевич Ермаков

студент кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет, Московский
 государственный университет им. М.В. Ломоносова;
 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
 e-mail: ermakov@yandex.ru

Vladimir E. Ermakov

Bachelor's Student, Department of Meteorology
 and Climatology, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Мария Евгеньевна Зубова

студент кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет, Московский
 государственный университет им. М.В. Ломоносова;
 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
 e-mail: maria.zubova2712@gmail.com

Mariya E. Zubova

Master's Student, Department of Meteorology
 and Climatology, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Анастасия Александровна Семёнова

аспирант кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет Московский
 государственный университет имени Ломоносова;
 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1;
 лаборант-исследователь, Центр стратегического
 планирования и управления медико-биологическими
 рисками здоровью» ФМБА России;
 119121, Россия, г. Москва, Погодинская ул., 10, с. 1
 e-mail: mos7kit@mail.ru

Anastasia A. Semenova

Postgraduate Student, Department of Meteorology
 and Climatology, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia;
 Research Assistant, Centre for Strategic Planning and
 Management of Biomedical Health Risks at the
 Federal Medical-Biological Agency;
 10, bld. 1, Pogodinskaya st., Moscow, 119121, Russia

Ульяна Игоревна Антипина

младший научный сотрудник отдела мониторинга
 и вероятностного прогноза климата,
 Институт глобального климата и экологии
 им. академика Ю.А. Израэля;
 107258, Россия, г. Москва, Глебовская ул. 20Б;
 младший научный сотрудник лаборатории теории
 климата Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
 Российской академии наук;
 Пыжевский пер., 3, г. Москва, 119017

Uliana I. Antipina

Junior Researcher, Department of Climate Monitor-
 ing and Probabilistic Forecasting, Institute of Global
 Climate and Ecology named after Academician
 Yu.A. Israel;
 20B, Glebovskaya st., Moscow, 107258, Russia;
 Junior Researcher, Laboratory of Climate Theory,
 A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of
 the Russian Academy of Sciences;
 3 Pyzhevskiy pereulok, Moscow, Russia

e-mail: ant.ulya@yandex.ru

Игорь Владимирович Малютин

сотрудник кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет, Московский
 государственный университет им. М.В. Ломоносова;
 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
 e-mail: gomalytin@yandex.ru

Igor V. Malyutin

Researcher, Department of Meteorology and
 Climatology, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Сергей Владимирович Шувалов

сотрудник кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет, Московский
 государственный университет им. М.В. Ломоносова;
 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
 e-mail: cyclonaut@ya.ru

Sergey V. Shuvalov

Researcher, Department of Meteorology and Clima-
 tology, Faculty of Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Дарья Юрьевна Гущина

доктор географических наук
 профессор кафедры метеорологии и климатологии,
 географический факультет, Московский
 государственный университет им. М.В. Ломоносова;
 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1
 e-mail: dasha155@mail.ru

Daria Yu. Gushchina

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Depart-
 ment of Meteorology and Climatology, Faculty of
 Geography,
 Lomonosov Moscow State University;
 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Метеорология

*Константинов П.И., Коспанов А.А., Маратканова В.С., Бекряев И.Р., Нариманидзе А.А.,
Голиков А.Д., Ермаков В.Е., Зубова М.Е., Семёнова А.А., Антипина У.И.,
Малютин И.В., Шувалов С.В., Гущина Д.Ю., Мухартова Ю.В.*

Юлия Вячеславовна Мухартова,

кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
кафедры метеорологии и климатологии,
географический факультет, Московский
государственный университет им. М.В. Ломоносова;
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

Yulia V. Muhartova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher, Department of Meteorology and
Climatology, Faculty of Geography,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

e-mail: muhartova@yandex.ru

Вклад авторов

Константинов П.И. – руководство полевыми измерениями, концепция исследования, обработка результатов, написание и коррекция текста статьи.

Коспанов А.А. – настройка модельного комплекса WRF-ARW, проведение вычислительных экспериментов, визуализация результатов.

Маратканова В.С. – проведение полевых измерений, обработка данных написание и коррекция текста статьи, визуализация результатов.

Бекряев И.Р. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов.

Нариманидзе А.А. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов.

Голиков А.Д. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов.

Ермаков В.Е. – проведение полевых измерений.

Зубова М.Е. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов, визуализация результатов.

Семёнова А.А. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов.

Антипина У.И. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов.

Малютин И.В. – проведение полевых измерений, обработка данных, визуализация результатов.

Шувалов С.В. – проведение полевых измерений.

Гущина Д.Ю. – руководство полевыми измерениями, концепция исследования, обработка результатов.

Мухартова Ю.В. – руководство полевыми измерениями, концепция исследования, обработка результатов, написание и коррекция текста статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Pavel I. Konstantinov – supervision over field measurements; research concept; processing of the results; writing and proofreading of the text.

Alen A. Kospanov – setting up of the WRF-ARW modeling system; computational experiments; visualization of the results.

Varvara S. Maratkanova – field measurements; data processing; writing and editing of the text; visualization of the results.

Ivan R. Bekryaev – field measurements; data processing; visualization of the results.

Anna A. Narimanidze – field measurements, data processing, visualization of the results.

Artem D. Golikov – field measurements; data processing; visualization of the results.

Vladimir E. Ermakov – field measurements.

Mariya E. Zubova – field measurements; data processing; visualization of the results.

Anastasia A. Semenova – field measurements; data processing; visualization of the results.

Uliana I. Antipina – field measurements; data processing; visualization of the results.

Igor V. Malyutin – field measurements; data processing; visualization of the results.

Sergey V. Shuvalov – field measurements; data processing.

Daria Yu. Gushchina – supervision over field measurements; research concept; processing of the results.

Yulia V. Muhartova – supervision over field measurements; research concept; processing of the results; writing and proofreading of the text.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.