

НАУКИ О ЗЕМЛЕ**EARTH SCIENCES**

УДК 551.582; 551.588

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143>

Поступило в редакцию 18.08.2022

Received 18.08.2022

С. А. Лысенко, П. О. Зайко*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКИХ «ОСТРОВОВ ТЕПЛА»
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО
ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

Аннотация. Представлены количественные оценки интенсивностей городских «островов тепла» на территории Беларуси и их изменений в результате глобального потепления. На основе мезомасштабного численного моделирования метеорологических условий в городах оценены потенциальные возможности улучшения городского микроклимата за счет увеличения площади лесопарковых зон города. Показано, что в летний период областные центры Беларуси в среднем теплее окружающих их пригородных районов на 2–3 °С днем и на 1,2–2,3 °С ночью. За период, прошедший с начала текущего столетия, областные центры Беларуси потептели в среднем на 1,1–2,2 °С для дневного и на 1,3–1,9 °С для ночного времени суток. Максимальный рост дневных и ночных температур в городах Беларуси составил соответственно 3,1–6,0 и 2,4–4,4 °С. На примере г. Гомель показано, что замена промышленных кластеров города лесопарковыми зонами способствует понижению температуры воздуха в пределах 2 °С и более чем в 2 раза повышает среднюю для города эвапотранспирацию. В дневное время суток отмечается усиление северо-западного ветра в городе и его окрестностях, что способствует улучшению городской вентиляции. В ночные часы озеленение города делает приземный слой атмосферы менее устойчивым, что сопровождается активизацией локальных циркуляционных ячеек, посредством которых происходит выравнивание температуры и удельной влажности в городе и пригороде.

Ключевые слова: глобальное потепление, городской «остров тепла», адаптация, дистанционное зондирование Земли, метеорологическое моделирование

Для цитирования. Лысенко, С. А. Метеорологическое моделирование городских «островов тепла» на территории Беларуси в условиях современного глобального потепления / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 2. – С. 134–143. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143>

Sergey A. Lysenko, Palina A. Zaiko*Institute of Nature Management of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***METEOROLOGICAL MODELING OF URBAN “HEAT ISLANDS” ON THE TERRITORY OF BELARUS
UNDER MODERN GLOBAL WARMING***(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

Abstract. The article presents a quantitative estimation of intensity of urban “heat islands” in Belarus and their changes as a result of global warming. The potential opportunities for improving the urban microclimate by increasing the area of forest park zones in the city have been evaluated using mesoscale numerical simulation of meteorological conditions in cities. It is shown that in summer, Belarusian regional centers are warmer than suburban areas within 2–3 °C during the day and within 1.2–2.3 °C at night. Over the period that has passed since the beginning of this century, the regional cities have warmed by an average of 1.1–2.2 °C during the day and 1.3–1.9 °C at night. The maximum increase in daytime and nighttime temperatures in Belarusian cities has amounted within 3.1–6.0 and 2.4–4.4 °C, respectively. It is shown that replacing industrial clusters with forest park zones decreases the air temperature in the city within 2 °C and more than 2 times in evapotrans-

piration in the city of Homel. In the daytime, the northwest wind increases in the city and its suburb and this improves urban ventilation. At night, the afforestation of the city makes the surface layer of the atmosphere less stable, which is accompanied by the activation of local circulation cells, through which the temperature and specific humidity in the city and the suburb are smoothed.

Keywords: climate warming, urban “heat island”, adaptation, remote sensing, meteorological modeling

For citation. Lysenko S. A., Zaiko P. A. Meteorological modeling of urban “heat islands” on the territory of Belarus under modern global warming. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 2, pp. 134–143 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-2-134-143>

Введение. Устойчивая тенденция к урбанизации привела к формированию на территории Беларуси крупных индустриальных кластеров с особенными микроклиматическими условиями. Одним из проявлений микроклимата этих территорий является присутствие на них так называемых городских островов тепла. Данное метеорологическое явление характеризуется повышением средних температур воздуха и подстилающей поверхности в городе относительно прилегающих к нему территорий. Возникновение городских «островов тепла» связано с сокращением естественного растительного покрова, изменением альбедо и теплофизических свойств подстилающей поверхности, а также с выбросами антропогенных источников тепла и аэрозолей.

В условиях глобального потепления происходит быстрая трансформация микроклиматических систем города, проявляющаяся в увеличении жарких и засушливых периодов, или так называемых волн тепла. Мультимодельные проекции изменения климата для сценария с высоким уровнем выбросов парниковых газов (RCP 8.5) показывают, что рост летней температуры в городах к концу текущего столетия может более чем на 4 °C превышать среднее региональное потепление [1; 2], что будет иметь ряд негативных последствий для здоровья людей и городской инфраструктуры [3; 4].

Для анализа и прогнозирования метеоусловий в городах широко используются мезомасштабные численные модели атмосферы и данные дистанционного зондирования Земли. В рамках данного исследования впервые проведено мезомасштабное моделирование метеорологических условий в городах Беларуси для летнего периода. Полученные результаты сопоставлены с данными спутниковых наблюдений. Для прогнозирования метеоусловий в городах использовалась мезомасштабная модель атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting), применяемая в Национальной гидрометеорологической службе (Белгидромет) для краткосрочного численного прогноза погоды [5]. На основе данной модели выполнены расчеты микроклиматических изменений для различных сценариев преобразования городского ландшафта (увеличение зеленых насаждений, сокращение промышленных территорий), что позволило оценить потенциал адаптации городов Беларуси к изменению климата.

Материалы и методы исследования. В настоящем исследовании для количественных оценок интенсивности городских «островов тепла» использовались данные спутникового прибора MODIS/Terra, имеющие пространственное разрешение 1 км и охватывающие период с 2000 г. по настоящее время. Эффекты городских «островов тепла» проанализированы для шести областных центров Беларуси. Для каждого города рассчитаны распределения аномалии температуры поверхности, определяемой как разница между температурой поверхности на территории города и средней температурой свободной от застроек поверхности в пригороде. Расчеты выполнены отдельно для дневных и ночных температур на основе всех доступных для территории Беларуси спутниковых снимков MODIS, прошедших контроль качества [6].

Количественные оценки эффектов потепления городов Беларуси анализировались на основе составленных отдельно для каждого года композитных распределений средней летней температуры подстилающей поверхности. Тренды температуры рассчитывались попиксельно методом наименьших квадратов. Изменение температуры для каждого пиксела оценивалось по изменению ее трендовой компоненты с 2000 по 2021 г.

Для оценки потенциальных возможностей адаптации городов Беларуси к изменению климата проведено численное моделирование метеорологических условий в г. Гомель на основе негидростатической численной мезомасштабной модели WRF-ARW. Данная модель основана на интегрировании уравнений гидротермодинамики на прямоугольной сетке методом конечных разно-

стей, с параметризацией атмосферных процессов подсеточного масштаба (микрофизики, длинноволновой и коротковолновой радиации, тепло- и влагообмена в почве, конвекции, турбулентности и др.).

Моделирование метеорологических условий в городе выполнялось в два этапа. На первом этапе вычислялись распределения метеовеличин на всей территории Европы при начальных и граничных условиях, заданных на основе расчетов глобальной системы численного прогноза погоды GFS (Global Forecast System). Для расчета метеорологических полей использовались две сетки: первая – внешняя с шагом 9 км, охватывающая всю расчетную область (Европа), вторая – вложенная с разрешением 3 км, охватывающая юго-восточную часть Беларуси. Поля метеовеличин, рассчитанные на вложенной сетке, использовались в качестве начальных и граничных условий на втором этапе моделирования для вычисления метеорологических полей в анализируемом городе и его окрестности с пространственным разрешением 1 км. При этом боковые условия на сетке с разрешением 1 км корректировались на основании предшествующих расчетов на более крупной сетке с разрешением 3 км каждые 6 ч моделируемого периода. Такая последовательность моделирования по сравнению с использованием в модели WRF сразу трех вложенных сеток с уменьшающимся шагом обеспечивает большую экономичность счета и в несколько раз сокращает время вычислений.

Моделирование проводилось с заблаговременностью +48 ч на 32 вертикальных уровнях. Для параметризации физических процессов подсеточного масштаба использовались следующие схемы: микрофизика – WSM6, коротковолновая и длинноволновая радиация – RRTMG, подстилающая поверхность – Noah, конвекция на крупномасштабных сетках – Grell3D, пограничный слой – схема университета Ёнсей [7].

Для более детального описания метеорологических условий в пределах городской территории использовалась однослойная модель городского навеса (SLUCM, Urban Canopy Model) [8], учитывающая процессы обмена энергией и импульсом между городскими поверхностями (асфальт, бетон и др.) и атмосферой. Применение SLUCM-модели для мезомасштабного метеорологического моделирования потребовало задания расширенной пространственной структуры классов землепользования для урбанизированных территорий (10 классов). В большинстве исследований по моделированию городского климата используются три наиболее упрощенные категории городских поверхностей (жилые дома с низкой плотностью, высокоплотная застройка и промышленные кластеры) [9; 10], однако в последнее время были предприняты попытки для улучшения численного моделирования городских ландшафтов за счет увеличения количества различаемых в модели классов подстилающей поверхности [11; 12]. Для этой цели применяются современные базы данных спутниковых наблюдений, позволяющие учесть влияние на микроклимат мелкомасштабных городских ландшафтов [13; 14].

Для создания цифровых моделей классов землепользования проведен экспертный анализ спутниковых снимков для городов Беларуси на предмет выделения областей, входящих в классификацию локальных климатических зон (LCZ, WUDAPT) для урбанизированных территорий. Выделение областей проводилось с помощью приложения Google Earth, с последующим использованием стороннего генератора классов городских территорий – LCZ Generator [15] (рис. 1). Полученная база данных городских ландшафтов включает 10 классов: компактная высокоэтажная застройка; компактная средневысотная застройка; компактная низковысотная застройка; открытая высокоэтажная застройка; открытая среднеэтажная застройка; открытая низкоэтажная застройка; легкая малоэтажная застройка; крупная низковысотная застройка; редкая застройка; промышленная зона.

Главным достоинством мезомасштабного метеорологического моделирования в сравнении с эмпирическими методами изучения городских «островов тепла» является возможность проведения численных экспериментов по преобразованию структуры подстилающей поверхности в пределах модельной области с оцениванием соответствующих климатических последствий.

Такие эксперименты позволяют в первом приближении оценить потенциал адаптации городских территорий к изменению климата. Ниже рассмотрены изменения микроклимата в результате увеличения площади зеленых зон города Гомеля. Для этой цели проводилось моделирование

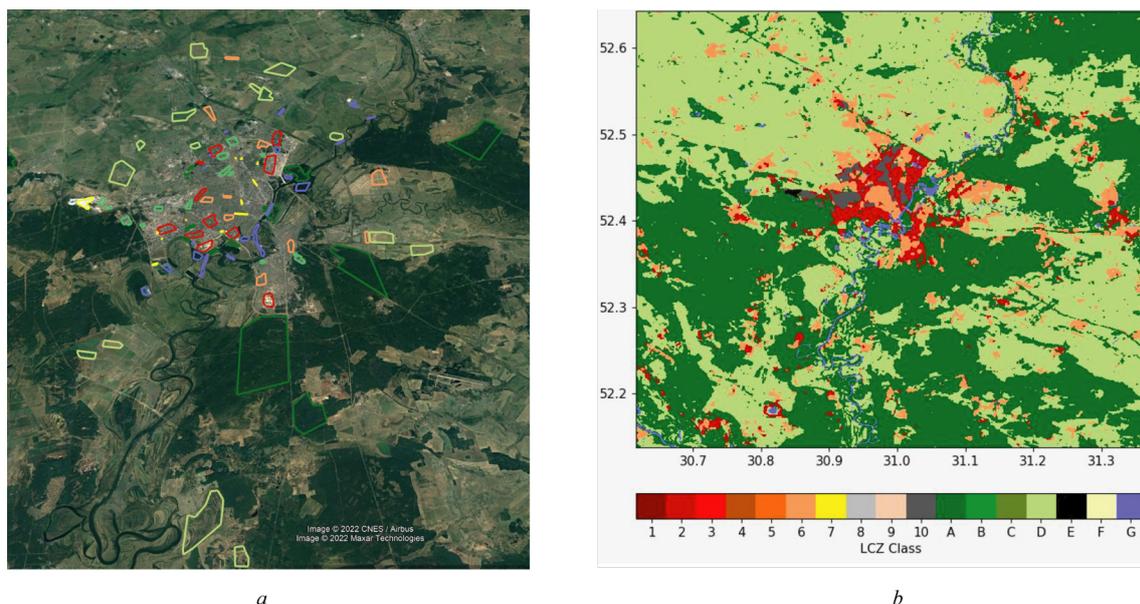


Рис. 1. Локальные климатические зоны г. Гомель: *a* – экспертные области урбанизированных классов, *b* – цифровая модель урбанизированных классов

Fig. 1. Local climate zones of the Homel city: *a* – expert areas of urbanized classes, *b* – digital model of urbanized classes

полей метеорологических величин (температуры, влажности, облачности, тепловых потоков и др.) при исходном и преобразованном состоянии подстилающей поверхности в анализируемом городе. Моделирование включало два разных сценария преобразования городского ландшафта: сокращение промышленных территорий с непроницаемыми поверхностями за счет замены их территориями с травой и низкорастущими растениями, а также вариант расширения лесопарковых зон за счет промышленных комплексов.

Результаты и их обсуждение. Средние и максимальные значения аномалии летней температуры поверхности в городах Беларуси и оценки их потепления за период с 2000 по 2021 г. сведены в таблице. Максимальные аномалии температуры поверхности (7,8 °С днем и 4,4 °С ночью), а также максимальные величины тренда потепления отмечаются в столице Беларуси. В отдельных районах Минска средняя летняя температура поверхности лишь с начала текущего столетия повысилась на 6 °С днем и на 4,4 °С ночью (рис. 2). Второе место по величинам максимальных аномалий температуры городских поверхностей занимает Гомель – 6,6 °С днем и 4,3 °С ночью. Однако по величинам максимального для города тренда потепления второе место принадлежит Витебску, в котором летняя дневная температура поверхности в отдельных районах с 2000 г. повысилась на 5,0 °С.

Количественные оценки температурных аномалий в областных центрах Беларуси и их потепления за период с 2000 по 2021 г.

Quantitative estimates of temperature anomalies in the regional centers of Belarus and their warming for the period from 2000 to 2021

Город City	Средняя интенсивность «острова тепла», °С Average “heat island” intensity, °С		Максимальная интенсивность «острова тепла», °С Maximum “heat island” intensity, °С		Среднее потепление в городе, °С Average warming in the city, °С		Максимальное потепление в городе, °С Maximum warming in the city, °С	
	День Day	Ночь Night	День Day	Ночь Night	День Day	Ночь Night	День Day	Ночь Night
Минск	2,6	2,0	7,8	4,4	1,6	1,5	6,0	4,4
Гродно	2,2	1,2	5,6	2,6	1,9	1,6	3,7	2,7
Брест	2,0	1,8	5,3	4,1	1,1	1,9	3,1	2,9
Гомель	3,0	2,3	6,6	4,3	2,2	1,7	3,9	2,7
Витебск	2,8	1,4	5,7	3,9	2,1	1,6	5,0	2,7
Могилев	2,8	1,7	5,9	3,1	2,2	1,3	4,1	2,4

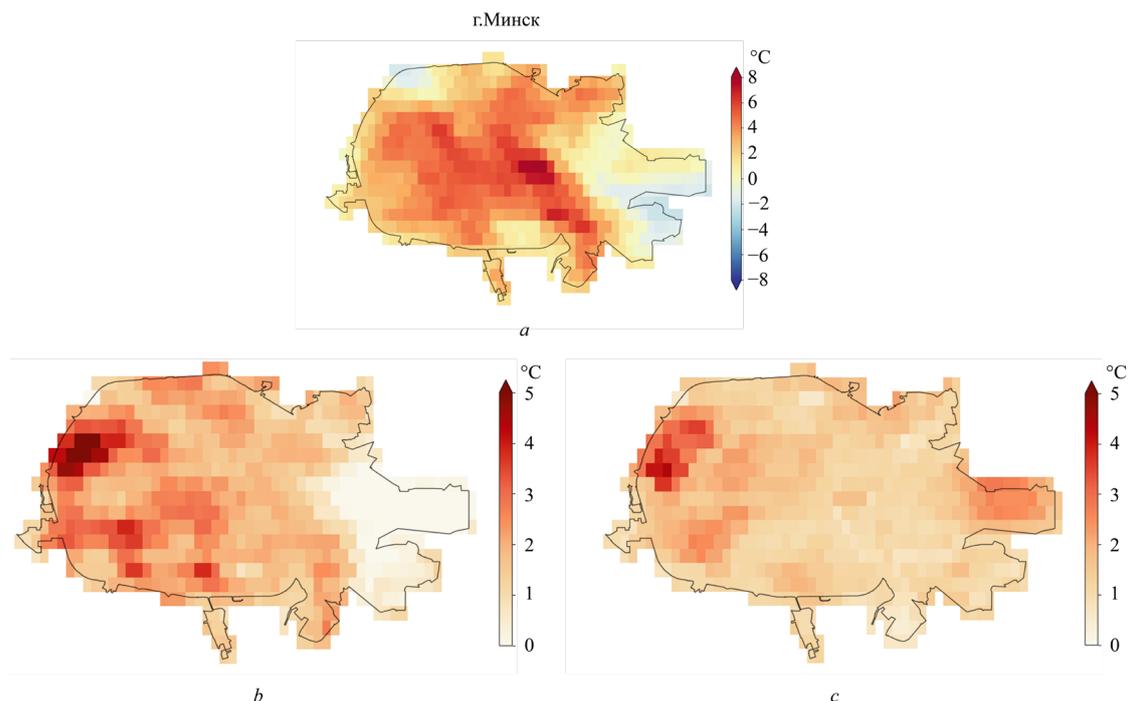


Рис. 2. Распределения средней для лета аномалии температуры поверхности в г. Минск (а) и изменения трендовой компоненты летней температуры поверхности в городе для дневного (b) и ночного (c) времени суток за период с 2000 по 2021 г.

Fig. 2. Distributions of the average summer surface temperature anomaly in Minsk (a) and changes in the trend component of the summer surface temperature in the city for daytime (b) and nighttime (c) for the period from 2000 to 2021

В среднем областные центры Беларуси летом оказываются теплее окружающих их пригородных районов на 2–3 °С днем и на 1,2–2,3 °С ночью. Максимальные для них температурные аномалии для дневного и ночного времени суток составляют соответственно 5,3–7,8 и 2,6–4,4 °С.

За период, прошедший с начала текущего столетия, областные центры Беларуси потеплели в среднем на 1,1–2,2 °С для дневного и на 1,3–1,9 °С для ночного времени суток. Рост средней температуры подстилающей поверхности в рассматриваемых городах на 7–38 % опережает среднюю для Беларуси скорость летнего потепления, однако в целом укладывается в диапазон ее разброса для метеорологических станций. При этом средняя интенсивность городских островов тепла с 2000 г. практически не изменилась – это означает, что рост средней температуры в городах и их пригородах происходит примерно с одинаковой скоростью. Однако в отдельных районах наиболее крупных городов Беларуси рост дневной и ночной летней температур значительно превышает среднюю по стране скорость летнего потепления: максимальное потепление с 2000 г. в областных центрах Беларуси для дневного и ночного времени суток составило 3,1–6,0 и 2,4–4,4 °С соответственно.

Для объяснения различий в проявлении «островов тепла» на территории Беларуси рассмотрим структуру подстилающей поверхности в пределах областных центров. Минск из данного рассмотрения можно исключить, поскольку максимальные значения присущих ему температурных аномалий вполне объяснимы максимальной среди городов Беларуси численностью населения, а также наличием обширных промышленных кластеров. Для других городов использовалась глобальная классификация земной поверхности Европейского космического агентства WorldCover 10m v100, составленная с разрешением 10 м на основе данных дистанционного зондирования Земли, полученных за 2020 г. со спутников Sentinel-1 и Sentinel-2.

На основе использованной классификации подстилающей поверхности рассчитаны доли непроницаемых поверхностей, зеленых насаждений, древесной растительности и водных объектов в общей площади каждого из рассматриваемых городов Беларуси. Исходя из полученных данных, наименьшая доля древесных насаждений (29,5 %) свойственна второму по численности

городу Беларуси – Гомелю. Очевидно, что в летние месяцы древесная растительность, создающая тень и способствующая отводу от поверхности тепла в виде эвапотранспирации, является важным фактором терморегулирования. Вероятно, что именно с малой долей древесных насаждений в общей площади г. Гомель связана высокая интенсивность соответствующего ему «острова тепла» и быстрый рост в городе летних температур. Это вывод косвенно подтверждается аналогичными данными по г. Брест, имеющему максимальный процент древесных насаждений (40,5 %) и отличающемуся минимальной интенсивностью соответствующего ему «острова тепла» и наименьшей среди областных центров Беларуси скоростью летнего потепления.

Для остальных областных центров, имеющих меньшие различия по численности населения и процентному соотношению различных типов городских поверхностей, столь явных закономерностей не прослеживается. Вероятно, что на формирование «островов тепла» в этих городах оказывают влияние ряд других факторов, например, геометрические характеристики городской застройки, физические свойства поверхности, взаимное расположение источников тепла, атмосферная циркуляция, влажность, загрязнение воздуха и др. [13; 14].

Несмотря на то что спутниковые данные и результаты мезомасштабного моделирования имеют некоторые несоответствия по времени, между ними наблюдается вполне удовлетворительное согласие. Так, мезомасштабное метеорологическое моделирование позволяет вполне адекватно прогнозировать динамику городского «острова тепла» на протяжении суток. Это подтверждает сравнительный анализ дневной температуры подстилающей поверхности, полученной по спутниковым измерениям и по результатам моделирования (рис. 3): среднеквадратическая погрешность прогноза дневной температуры составила 2,4 °С, что находится в пределах погрешности ее измерений спутниковым прибором MODIS.

Для ночного времени суток прогнозы температуры подстилающей поверхности хуже согласуются с данными спутниковых наблюдений: среднеквадратическая погрешность прогноза температуры составила 4,2 °С. Средний для модельной области коэффициент корреляции между прогнозными и спутниковыми данными составил 0,35. При этом метеорологическое моделирование дает значения температуры поверхности со систематической погрешностью – они в среднем на 18 % ниже результатов спутниковых измерений температуры. Причиной этому может быть некоторое несоответствие используемой в модели WRF температуры на почвенном уровне спутниковому продукту «температура подстилающей поверхности», определяемому по радиояркостной температуре на верхней границе атмосферы.

Результаты мезомасштабного численного моделирования метеорологических условий в г. Гомель при сценарии замены в нем промышленных объектов лесопарковыми зонами представлены

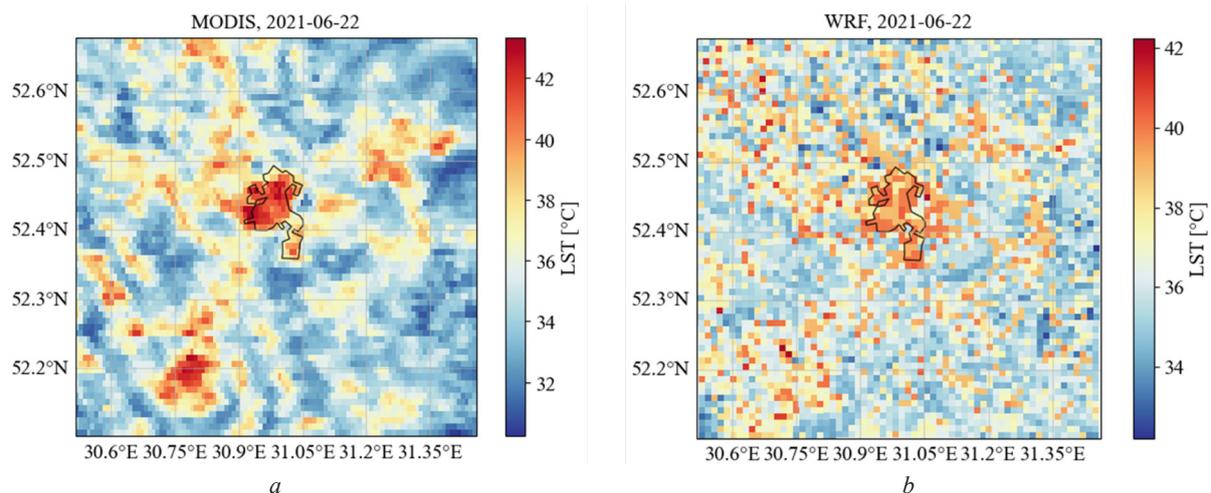


Рис. 3. Дневная температура подстилающей поверхности по данным спутниковых измерений (а) и результатам мезомасштабного метеорологического моделирования (б) для г. Гомель

Fig. 3. Day land surface temperature the satellite measurements (a) and results of mesoscale meteorological modeling (b) for the city of Homel

на рис. 4. Для оценок изменений метеорологических параметров в дневное время суток выбраны сроки прогноза +12 и +36 ч, для ночных – +24 и +48 ч. На карте отражены разницы между значениями метеорологических параметров до и после преобразования городских ландшафтов – температуры T_{2m} и удельной влажности q_{2m} (массовой доли водяного пара) на уровне 2 м, вертикаль-

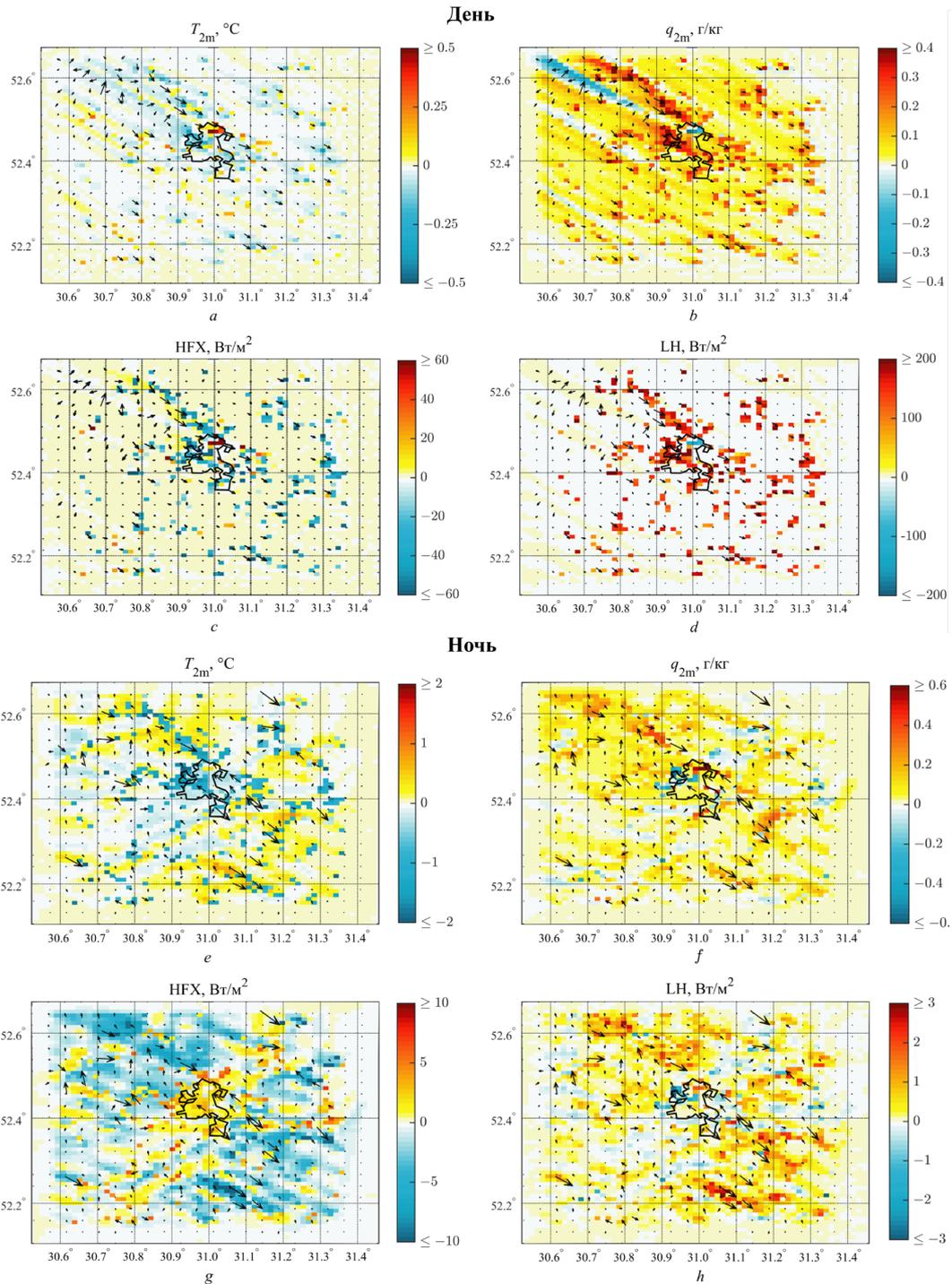


Рис. 4. Изменения метеорологических параметров в г. Гомель и его окрестностях в дневное (a, b, c, d) и ночное (e, f, g, h) время суток, спрогнозированные моделью WRF на дату 22.06.2021 для сценария замены промышленных комплексов лесопарковыми зонами

Fig. 4. Changes in meteorological parameters in Homel city and its suburban in the day time (+12 h) – a, b, c, d, and at night time (+24 h) – e, f, g, h, predicted by the WRF model for date 06.22.2021 for the considered replacement of industrial complexes to park areas (forestation)

ных турбулентных потоков явного НФХ и скрытого ЛН тепла на уровне подстилающей поверхности.

При увеличении площади зеленых зон города наблюдаются существенные изменения метеорологических условий в пределах города и его окрестности как в дневные, так и в ночные часы. Для обоих вариантов замены промышленных комплексов на лесную или травянистую растительность для дневных часов наблюдается понижение температуры воздуха в городе и его окрестностях в пределах 0,4–0,7 °С. Массовая доля водяного пара в городе возрастает в пределах 5 %. Расширение площади зеленых зон города кардинальным образом трансформирует структуру его теплового баланса: в озеленяемых районах города наблюдается уменьшение потока явного тепла в пределах 60 %, а поток скрытого тепла возрастает до 2,5 раз. Средний для города поток явного тепла за счет охлаждения подстилающей поверхности уменьшается на 3,0–4,5 %, а поток скрытого тепла увеличивается примерно вдвое. Общий вертикальный турбулентный поток тепла на уровне подстилающей поверхности возрастает на 48–52 Вт/м², что способствует отводу тепла с территории города. Для рассматриваемого города зоны микроклиматического влияния преобразованных городских ландшафтов в дневные часы вытянуты с северо-запада на юго-восток, что связано с изменением поля приземного ветра в результате изменений шероховатости подстилающей поверхности.

Для ночного времени суток влияние озеленения города на метеорологические условия в нем проявляется в более сложной форме. В результате замены городских непроницаемых поверхностей и промышленных объектов лесопарковыми зонами ночная температура воздуха в городе уменьшается в среднем на 0,54–0,64 °С, а в озеленяемых районах города ее понижение достигает 2 °С. Падение температуры воздуха в ночное время значительно превышает ее аналогичные изменения для дневного времени. Это обстоятельство может быть связано с различиями высоты планетарного пограничного слоя атмосферы в дневное и ночное время суток. Ночью планетарный пограничный слой имеет минимальную толщину и в наибольшей степени подвержен термическому и динамическому влиянию подстилающей поверхности.

Более устойчивая термическая стратификация атмосферы в ночное время обуславливает менее развитую турбулентность планетарного пограничного слоя и меньший размер зоны микроклиматического влияния озеленяемых территорий города по сравнению с дневным временем суток, что отчетливо видно на векторном поле изменений скорости приземного ветра для дневного и ночного времени суток, представленном на рис. 4.

Изменения турбулентных потоков тепла в результате озеленения города для ночного времени суток в целом противоположны тем, что отмечают для дневного времени, однако их значения существенным образом зависят от термической стратификации атмосферы. Для атмосферных условий, рассмотренных на рис. 4, средние для города и его окрестностей турбулентные потоки явного и скрытого тепла составляют –13,0 и –1,73 Вт/м². Отрицательный знак этих потоков указывает на неустойчивую стратификацию приземного слоя (потоки направлены к подстилающей поверхности). При замене промышленных объектов лесопарковыми зонами поток явного тепла увеличивается для города в среднем на 1,62 Вт/м² (максимально на 4,3 Вт/м²), а для пригорода – уменьшается в среднем на 0,78 Вт/м² (в отдельных районах до 13 Вт/м²). Поток скрытого тепла в одних районах модельной области увеличивается в пределах 3,3 Вт/м², а в других уменьшается примерно в тех же пределах, в результате средние для города и пригорода потоки скрытого тепла практически не изменяются. Таким образом, можно сделать вывод, что озеленение урбанизированных территорий в ночное время нарушает устойчивость атмосферы и активизирует локальные циркуляционные ячейки, посредством которых осуществляется теплообмен между более теплыми и более холодными участками подстилающей поверхности.

Заключение. Анализ городских «островов тепла», проведенный на основе данных дистанционного зондирования Земли, позволил установить, что областные центры Беларуси летом в среднем теплее окружающих их пригородных районов на 2–3 °С днем и на 1,2–2,3 °С ночью. Максимальные температурные аномалии для дневного и ночного времени суток составляют соответственно 5,3–7,8 и 2,6–4,4 °С. За период, прошедший с начала текущего столетия, областные центры Беларуси потептели в среднем на 1,1–2,2 °С для дневного и на 1,3–1,9 °С для ночного

времени суток. Максимальный рост дневных и ночных температур в городах Беларуси составил соответственно 3,1–6,0 и 2,4–4,4 °С.

Важным фактором терморегулирования городской среды является площадь древесных насаждений, способствующих отводу из города антропогенного тепла за счет эвапотранспирации. В связи с этим максимальная среди областных центров Беларуси средняя интенсивность «острова тепла» отмечается для г. Гомель (3,0 °С в дневное время), имеющего минимальный процент древесных насаждений (29,5 %). В противоположность к этому для г. Брест, отличающегося наибольшей относительной площадью древесных насаждений (40,5 %), средняя интенсивность «острова тепла» имеет минимальное значение (2,0 °С в дневное время), а летнее потепление городской среды происходит даже медленнее, чем в среднем по стране.

Результаты мезомасштабного численного моделирования метеорологических условий в г. Гомель показывают, что при замене в нем непроницаемых городских поверхностей и промышленных объектов лесопарковыми зонами происходит существенная трансформация структуры теплового баланса подстилающей поверхности. В дневное время суток резко увеличивается поток скрытого тепла (примерно вдвое), что способствует отводу тепла с территории города и понижению средней для него температуры воздуха на 0,4–0,7 °С. Средний для города поток явного тепла за счет охлаждения подстилающей поверхности уменьшается на 3,0–4,5 %. Массовая доля водяного пара в результате усиления эвапотранспирации возрастает в пределах 5 %. Помимо этого, отмечается увеличение скорости северо-западного ветра, что способствует улучшению городской вентиляции.

Для ночного времени суток средняя температура воздуха в городе уменьшается в среднем на 0,54–0,64 °С, а в озеленяемых районах города ее понижение достигает 2 °С. При этом изменения восходящих с подстилающей поверхности турбулентных потоков тепла противоположны тем, что отмечаются для дневного времени суток и существенным образом зависят от термической стратификации в приземном слое атмосферы. Озеленение города делает приземный слой атмосферы в ночное время менее устойчивым, что сопровождается усилением восходящих турбулентных потоков тепла и активизацией локальных циркуляционных ячеек, посредством которых происходит выравнивание температуры и удельной влажности в городе и его окрестностях.

Список использованных источников

1. Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. / В. П. Юшков [и др.] // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55, № 5. – С. 13–31. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555513-31>
2. Global multi-model projections of local urban climates / L. Zhao [et al.] // Nat. Clim. Change. – 2021. – Vol. 11, N 2. – P. 152–157. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00958-8>
3. Ревич, Б. А. Особенности воздействия волн холода и жары на смертность в городах с резко-континентальным климатом / Б. А. Ревич, Д. А. Шапошников // Сибирское медицинское обозрение. – 2017. – № 2. – С. 84–90. <https://doi.org/10.20333/2500136-2017-2-84-90>
4. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска / М. И. Варенцов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 4. – С. 329–337.
5. Зайко, П. О. Ассимиляция метеорологических данных в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Республике Беларусь / П. О. Зайко // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – 2020. – № 3 (55). – С. 4–12.
6. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using *in situ* measurements / S.-B. Duan [et al.] // Remote Sens. Environ. – 2019. – Vol. 225. – P. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
7. A description of the Advanced Research WRF. Version 3 / W. C. Skamarock [et al.]. – Boulder, 2008. – 113 p.
8. Kusaka, H. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case / H. Kusaka, F. Kimura // J. Meteorol. Soc. Jpn. – 2004. – Vol. 82, N 1. – P. 67–80. <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.67>
9. Coupled WRF/Unified Noah/Urban-Canopy Modelling System / M. Tewari [et al.]. – Boulder, 2007. – 22 p.
10. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid / O. Brousse [et al.] // Urban Clim. – 2016. – Vol. 17. – P. 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001>
11. WUDAPT: Facilitating Advanced Urban Canopy Modeling for Weather Climate and Air Quality Applications [Electronic Resource] / J. Ching [et al.] // 94th American Meteorological Society Annual Meeting, 2–6 February 2014, Georgia, USA. – Georgia, 2014. – Available at: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11169/>.
12. Vahmani, P. High-resolution land surface modeling utilizing remote sensing parameters and the Noah UCM: a case study in the Los Angeles Basin / P. Vahmani, T. S. Hogue // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2014. – Vol. 18, N 12. – P. 4791–4806. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4791-2014>

13. Impacts of the decadal urbanization on thermally induced circulations in Eastern China / M. Li [et al.] // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* – 2015. – Vol. 54, N 2. – P. 259–282. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-14-0176.1>
14. Лысенко, С. А. Оценки влияния подстилающей поверхности на точность численного прогноза температуры воздуха на территории Беларуси с использованием модели WRF / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы.* – 2021. – № 4 (382). – С. 50–68. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-50-68>
15. Stewart, I. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies / I. D. Stewart, T. R. Oke // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 2012. – Vol. 93, N 12. – P. 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>

References

1. Yushkov V. P., Kurbatova M. M., Varentsov M. I., Lezina E. A., Kurbatov G. A., Miller E. A., Repina I. A., Artamonov A. Yu., Kallistratova M. A. Modeling of the heat island in the period extreme frost in Moscow in January 2017. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean], 2019, vol. 55, no. 5, pp. 13–31 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002-35155513-31>
2. Zhao L., Oleson K., Bou-Zeid E., Krayenhoff E. S., Bray A., Zhu Q., Zheng Z., Chen C., Oppenheimer M. Global multi-model projections of local urban climates. *Nature Climate Change*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 152–157. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00958-8>
3. Revich B. A., Shaposhnikov D. A. Influence features of cold and heat waves to the population mortality – the city with sharply continental climate. *Sibirskoe Medicinskoje Obozrenie = Siberian Medical Review*, 2017, no. 2, pp. 84–90 (in Russian). <https://doi.org/10.20333/2500136-2017-2-84-90>
4. Varentsov M. I., Konstantinov P. I., Samsonov T. E., Repina I. A. Investigation of urban heat island phenomenon during the polar night with application of experimental measurements and remote sensing for Norilsk city. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*, 2014, vol. 11, no. 4, pp. 329–337 (in Russian).
5. Zaiko P. O. Assimilation of meteorological data in the WRF-ARW mesoscale model in the Republic of Belarus. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe = Eastern European Scientific Journal*, 2020, vol. 55, no. 3, pp. 4–12 (in Russian).
6. Duan S.-B., Li Z.-L., Li H., Göttsche F.-M., Wu H., Zhao W., Leng P., Zhang X., Coll C. Validation of collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2019, vol. 225, pp. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
7. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D., Duda M. G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J. G. *A Description of the Advanced Research WRF*. Version 3. Boulder, 2008. 113 p.
8. Kusaka H., Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2004, vol. 82, no. 1, pp. 67–80. <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.67>
9. Tewari M., Chen F., Kusaka H., Miao S. *Coupled WRF/Unified Noah/Urban-Canopy Modeling System*. Boulder, 2007. 22 p.
10. Brousse O., Martilli A., Foley M., Mills G., Bechtel B. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for meso-scale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*, 2016, vol. 17, pp. 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001>
11. Ching J., Mills G., Fedemma J., Oleson K., See L., Stewart I., Bechtel B., Chen F., Wang X., Neophytou M., Hanna A. WUDAPT: Facilitating Advanced Urban Canopy Modeling for Weather, Climate and Air Quality Applications. *94th Annual Meeting of the American Meteorological Society, February 2–6, 2014, Georgia, USA*. USA, 2014. Available at: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11169/>.
12. Vahmani P., Hogue T. S. High-resolution land surface modeling utilizing remote sensing parameters and the Noah UCM: a case study in the Los Angeles basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, vol. 18, no. 12, pp. 4791–4806. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4791-2014>
13. Li M., Mao Z., Song Y., Liu M., Huang X. Impacts of the Decadal Urbanization on Thermally Induced Circulations in Eastern China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, vol. 54, no. 2, pp. 259–282. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-14-0176.1>
14. Lysenko S. A., Zaiko P. O. Estimates of the Earth surface influence on the accuracy of numerical prediction of air temperature in Belarus using the WRF model. *Gydrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological research and forecasting*, 2021, no. 4, pp. 50–68 (in Russian). <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-50-68>
15. Stewart I. D., Oke T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Зайко Полина Олеговна – науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com.

Zaiko Polina O. – Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.