

## ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОГО СТРЕССА В АРКТИЧЕСКОМ ГОРОДЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

П. И. Константинов \*, М. И. Варенцов \*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

М. Ю. Грищенко

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Российская Федерация)

Т. Е. Самсонов, Н. В. Шартова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 13 января 2021 г.

*На примере города Надыма (Ямало-Ненецкий автономный округ) проведены оценка возможности возникновения летнего городского теплового стресса и анализ его пространственной неоднородности. Представлены результаты детализированного моделирования метеорологического режима города в рамках модели COSMO-CLM и оценки биоклиматической комфортности с использованием индекса физиологически эквивалентной температуры (Physiological Equivalent Temperature) и универсального теплового индекса климата (Universal Thermal Climate Index). В периоды экстремально жарких погодных событий в Надыме отчетливо проявляется мезо- и микроклиматическая мозаичность территорий. На антропогенно измененных территориях повторяемость эпизодов очень сильного теплового стресса может превосходить аналогичную на фоновых участках в 1,7 раза. Градостроительные решения должны учитывать не только климатическую устойчивость арктических городов к зимнему холоду, но и быть адаптированы к возникновению летней жары.*

**Ключевые слова:** биоклиматический индекс, индекс физиологически эквивалентной температуры (PET), универсальный тепловой индекс климата (UTCI), городской остров тепла, моделирование, COSMO, термическая комфортность.

### Введение

Арктический регион известен как суровым холодным климатом, так и наиболее стремительными темпами его наблюдаемого потепления [1; 2]. В терминах термического комфорта Арктика все еще остается регионом с суровой зимой и прохладным летом [3; 4]. Однако тенденции к изменению теплоощущения в различные сезоны года уже прослеживаются, особенно на примере населенных пунктов Арктической зоны России [5].

Несмотря на то что рост температуры в Арктике наиболее ярко выражен в зимний период, летнее потепление также заметно [6; 3]. Например, в Хельсинки и Оулу условия летнего термического стресса регистрируются значительно чаще по сравнению с предыдущим десятилетием. Еще более выражена разница по сравнению с 70-ми годами XX в., когда условия летнего теплового стресса практически не наблюдались [7].

Кроме того, городские условия могут существенно влиять на теплоощущения человека за счет эффекта городского острова тепла и других микро- и мезоклиматических особенностей городской среды, т. е. формировать тот или иной уровень термического комфорта [8]. Городские острова тепла высоких широт остаются фрагментарно из-

\* П. И. Константинов и М. И. Варенцов внесли равный вклад в эту работу как первые авторы вследствие междисциплинарного характера работы.

учеными, тем не менее недавние экспериментальные исследования показали, что в арктических городах интенсивность острова тепла зимой составляет в среднем  $1^{\circ}\text{C}$ , а в моменте может достигать  $5\text{--}8^{\circ}\text{C}$  [9; 10]. Острова тепла в поле температуры поверхности диагностированы как для зимнего, так и для летнего сезонов по спутниковым данным для большой выборки городов Западной Сибири [11] и Фенноскандии [12].

С учетом проживания арктического населения преимущественно в условиях городов, а также вероятного учащения возникновения волн жары в связи с глобальным потеплением [13] оценка возможности возникновения летнего городского теплового стресса и анализ его пространственной неоднородности являются актуальной проблемой. Целью данной работы является количественная оценка термического комфорта на различных территориях арктического города в условиях аномально жаркой погоды.

### Материалы и методы

Расчет неоднородности термического комфорта на внутригородском масштабе проведен на примере города Надыма в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО). Население города — 45 тыс. человек, площадь застроенной территории — около  $6\text{ км}^2$ , что позволяет считать его достаточно типичным примером арктической урбанизации в России.

В качестве периода исследования были выбраны условия аномально жаркой погоды (волны жары) с 7 по 23 июля 2016 г. Волна жары была определена согласно методике Всемирной метеорологической организации: период, когда максимальная суточная температура превышает на  $5^{\circ}\text{C}$  и более в течение пяти дней и более максимальную суточную температуру за 1961—1990 гг. [14]. Согласно анализу последних пяти лет, выделенная волна жары является наиболее продолжительной. Максимальное значение температуры воздуха в течение этого периода наблюдалось в заключительные сутки, 23 июля, и составило  $+33,2^{\circ}\text{C}$ .

Разреженность сети метеорологических наблюдений в Арктике не позволяет использовать ее данные для получения детализированной пространственной картины метеорологического режима и биометеорологических условий на масштабе города и его окрестностей. Единственная на десятки километров вокруг Надыма метеостанция расположена в аэропорту на расстоянии 10 км на юго-запад от города и характеризует фоновые загородные условия. Поэтому для получения детализированных по пространству метеорологических данных были использованы современные методы мезомасштабного моделирования атмосферных процессов, а именно негидростатическая региональная модель атмосферы COSMO, разрабатываемая одноименным международным консорциумом (Consortium for Small-Scale Modelling, <http://www.cosmo-model.org/>), в климатической конфигурации COSMO-CLM [15], дополненной параметризацией городской среды TERRA\_URB [16].

Эта модель, как и другие модели такого типа, осуществляет численное решение уравнений термодинамики атмосферы и деятельного слоя суши при заданных начальных и боковых граничных условиях с учетом особенностей подстилающей поверхности, рельефа и многих других факторов. Подобные модели активно используются для численного прогноза погоды, в том числе в Гидрометцентре России [17], и являются популярным инструментом для региональных климатических и географических исследований [18].

В нашем исследовании модель COSMO (версия 5.05urb) использовалась для динамической детализации глобальных полей метеорологических величин по данным исходного анализа глобальной модели ICON (Icosahedral Nonhydrostatic Model) [19] с использованием двух вложенных областей моделирования. Данные глобального анализа с шагом сетки 13 км и временной дискретностью 3 ч использовались в качестве начальных и граничных условий для первой (промежуточной) области моделирования размером  $720\times 720\text{ км}$  с шагом сетки 3 км. Результаты моделирования для первой области использовались в качестве начальных и граничных условий для второй (заключительной) области моделирования размером  $100\times 100\text{ км}$  с шагом сетки 500 м ( $200\times 200$  ячеек). Обе области моделирования были центрированы на Надыме. Параметры земельного покрова, рельефа и почвы в модели задавались с помощью инструмента EXTPAR (EXTERNAL PARAMETERS for Numerical Weather Prediction and Climate Application) [22] с использованием глобальных баз данных. Для описания процессов в деятельном слое суши использовалась последняя версия параметризации TERRA [23], для водных объектов — параметризация FLAKE [24].

Параметризация TERRA\_URB использовалась для второй области моделирования, при этом для каждой ячейки сетки были заданы необходимые параметры городской среды: доля площади урбанизированной (занятой застройкой и лишенной растительности) территории<sup>1</sup> в ячейках модели, среднегодовой антропогенный поток тепла, высота зданий, доля площади зданий в пределах урбанизированной территории, отношение аспекта городских каньонов (рис. 1). Эти параметры определены по методике, описанной в [23]. Доля площади урбанизированной территории задавалась по данным о типах земельного покрова Copernicus Global Land Cover (<https://land.copernicus.eu/global/products/lc>) [25], также по этим данным уточнена маска «суша/вода». Для определения характеристик застройки

<sup>1</sup> Доля площади неурбанизированной территории в ячейке соответственно представляет озелененную территорию.



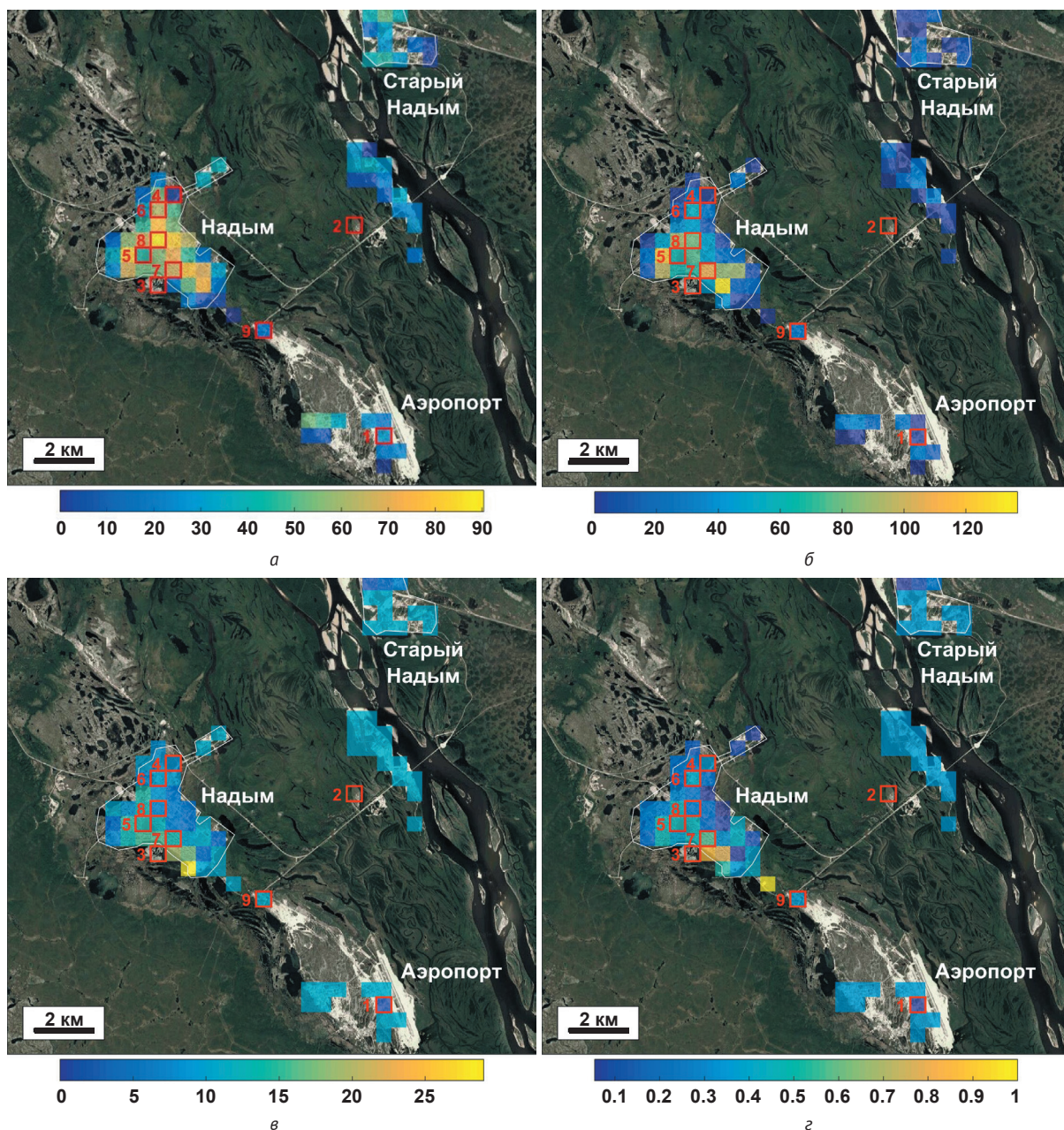


Рис. 1. Параметры городской среды в численном эксперименте: доля площади урбанизированной территории, % (а); среднегодовой антропогенный поток тела, Вт/м² (б); средняя высота зданий, м (в); отношение аспекта городских каньонов (г). Белым контуром показана граница Надыма. Красными квадратами показаны ячейки расчетной сетки, соответствующие точкам, для которых произведен расчет биометеорологических индексов

Fig. 1. Parameters of the urban environment in the numerical experiment: the proportion of the urbanized territory area, % (a); the average annual anthropogenic body flux, W/m² (b); the average height of buildings, m (c); aspect ratio of urban canyons (d). The white outline shows the border of the city of Nadym. The red squares show the cells of the computational grid corresponding to the points for which the biometeorological indices were calculated

использованы открытые картографические данные OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>).

Схожая методика моделирования (с использованием модели COSMO-CLM, параметризации TERRA\_URB и подходов к определению внешних параметров городской среды) использовалась в предыдущих работах авторов для Москвы [10; 20; 26; 27] и Апатитов [21]. В этих же работах приве-

дены результаты верификации такого подхода по данным плотных сетей наблюдений, показавшие его перспективность для получения детализированных в пространстве метеорологических данных для урбанизированных территорий. Опыт предыдущих исследований был учтен в данной работе при подборе конфигурации и настроек модели с целью минимизации ее систематических ошибок. Численный экс-

Таблица 1. Точки, для которых по данным моделирования подготовлены текстовые файлы с метеорологической информацией для микромасштабной модели RayMap

Номер точки	Описание	Широта	Долгота	Доля урбанизированной территории, %	Высота зданий, м
1	Метеостанция (аэропорт)	65,480279	72,689210	0,26	2,20
2	Садоводческое некоммерческое товарищество (СНТ) «Березка»	65,540683	72,669042	0,00	—
3	Озеро Янтарное	65,524017	72,525955	0,00	—
4	Парк на окраине города	65,551815	72,536880	0,03	7,25
5	Парк в центре города	65,533330	72,516670	0,43	13,50
6	Малоэтажная застройка	65,548624	72,529019	0,63	8,90
7	Плотная жилая застройка	65,529144	72,539493	0,67	12,90
8	Плотная промышленная застройка в центре города	72,525890	65,537892	0,90	6,60
9	Плотная промышленная застройка за городом	72,602085	65,510310	0,15	10,00

перимент проводился для периода со 2 по 23 июля, т. е. первые шесть дней до начала волны жары использовались для «разгона» модели.

Данные наблюдений на метеостанции Надым использовались при верификации результатов наиболее детальных модельных расчетов для заключительной области моделирования с шагом сетки 500 м. Для промежуточной области моделирования с шагом сетки 3 км верификация проводилась с привлечением данных 19 метеостанций ЯНАО.

Для оценки термического комфорта были выбраны современные биоклиматические индексы Physiological Equivalent Temperature (PET) и Universal Thermal Climate Index (UTCI), учитывающие не только метеорологические переменные, но и данные о тепловом балансе человека, принятые из расчета: мужчина 35 лет, рост 1,75 м, вес 75 кг, теплоотдача 80 Вт, термоизоляционные свойства одежды 0,9 кло [28; 29].

В качестве метеорологических переменных использованы результаты модельных расчетов,

а именно временные ряды температуры, относительной влажности, скорости ветра, балла общей облачности и температуры поверхности с дискретностью в 1 ч. Экспорт данных из модели произведен для 9 различных точек в городе и его окрестностях (табл. 1, рис. 1). Точки выбраны таким образом, чтобы оценить термический комфорт территорий, представляющих различное функциональное назначение. Непосредственно расчет биоклиматических индексов проведен с помощью программного обеспечения RayMap [30]. В рамках верификации результатов моделирования также произведен расчет биоклиматических индексов по данным наблюдений на метеостанции Надым.

Анализ термического комфорта проведен в соответствии с существующими градациями индексов (табл. 2).

Для дополнительной характеристики территории Надыма и окрестностей был произведен расчет спектральных вегетационного индекса, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), и температуры

Таблица 2. Градации биоклиматических индексов PET и UTCI по уровню термического стресса и теплоощущению человека

Теплоощущение	Степень термического стресса	Значение PET (для Западной и Восточной Европы) [31], °C	Значение UTCI [32], °C
Очень холодно	Экстремальный холодный стресс	< 4	< -27
Холодно	Сильный холодный стресс	4—8	-27...-13
Прохладно	Умеренный холодный стресс	8—13	-13—0
Слегка прохладно	Небольшой холодный стресс	13—18	0—9
Нейтрально	Отсутствие термического стресса	18—23	9—26



Окончание табл. 2

Теплоощущение	Степень термического стресса	Значение PET (для Западной и Восточной Европы) [31], °C	Значение UTCI [32], °C
Слегка тепло	Небольшой тепловой стресс	23—29	26—32
Тепло	Умеренный тепловой стресс	29—35	32—38
Жарко	Сильный тепловой стресс	35—41	38—46
Очень жарко	Экстремальный тепловой стресс	> 41	> 46

**Примечание.** По данным The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences 2003 [28; 29].

земной поверхности Land Surface Temperature (LST). Расчет проведен на основе снимков со спутника Landsat 8 с пространственным разрешением в оптическом диапазоне 30 м, в тепловом диапазоне 100 м.

В результате была произведена оценка как пространственных, так и временных характеристик распределения биоклиматической комфортности во время волны жары как внутри города, так и в его окрестностях.

### Результаты и обсуждение

Верификация по данным метеорологических наблюдений показала, что модель в целом адекватно воспроизвела динамику основных метеорологических величин (температуры, удельной влажности и скорости ветра) для окружающих территорий ЯНАО и непосредственно для загородных условий в окрестностях Надыма за анализируемый временной период (рис. 2). Количественные показатели верификации — значения средней (ME) и средне-

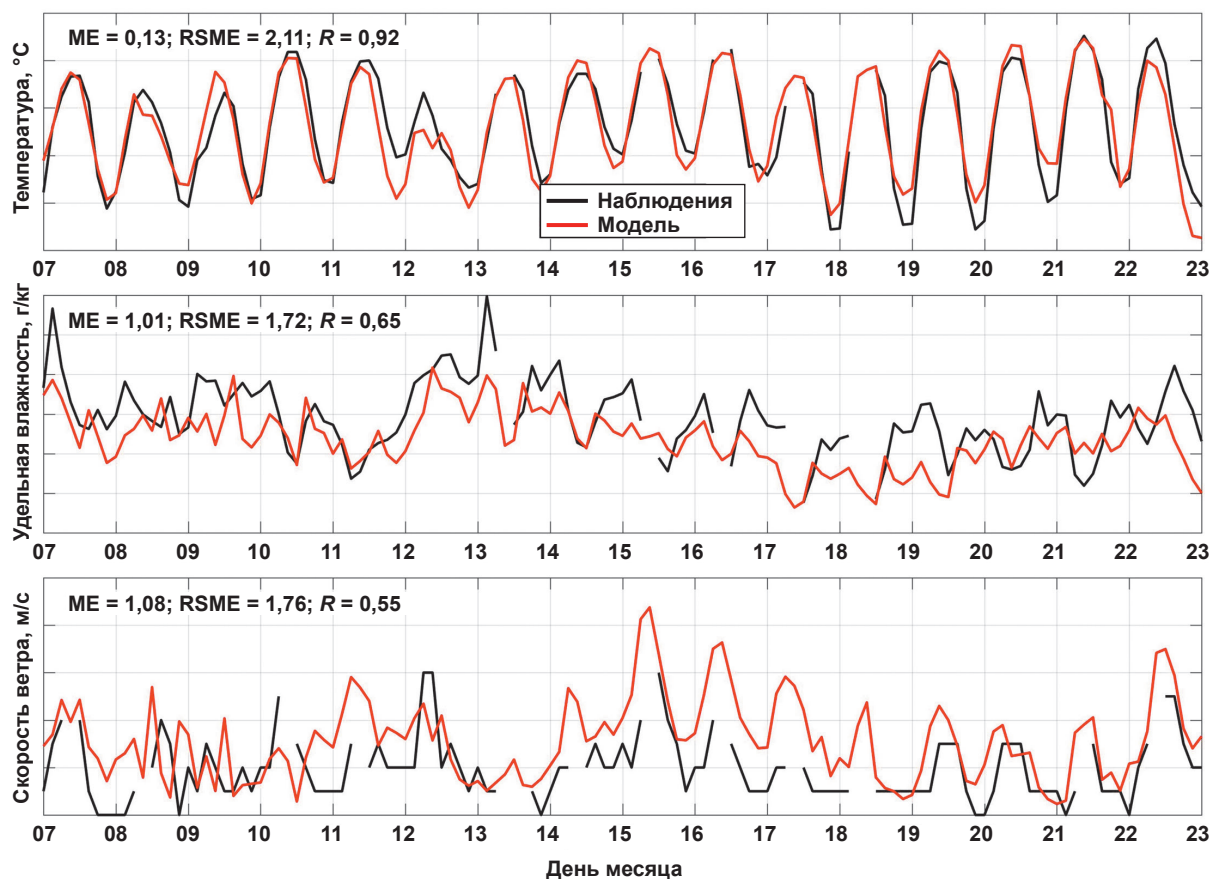


Рис. 2. Сравнение результатов модельных расчетов с шагом сетки 500 м с данными наблюдений на метеостанции Надым (аэропорт) по температуре, удельной влажности и скорости ветра за период волны жары (с 7 по 23 июля 2016 г.)  
Fig. 2. Comparison of the results of model calculations with a grid step of 500 m with observational data at the Nadym weather station (airport) in terms of temperature, specific humidity and wind speed during the heat wave period (from July 7 to 23, 2016)

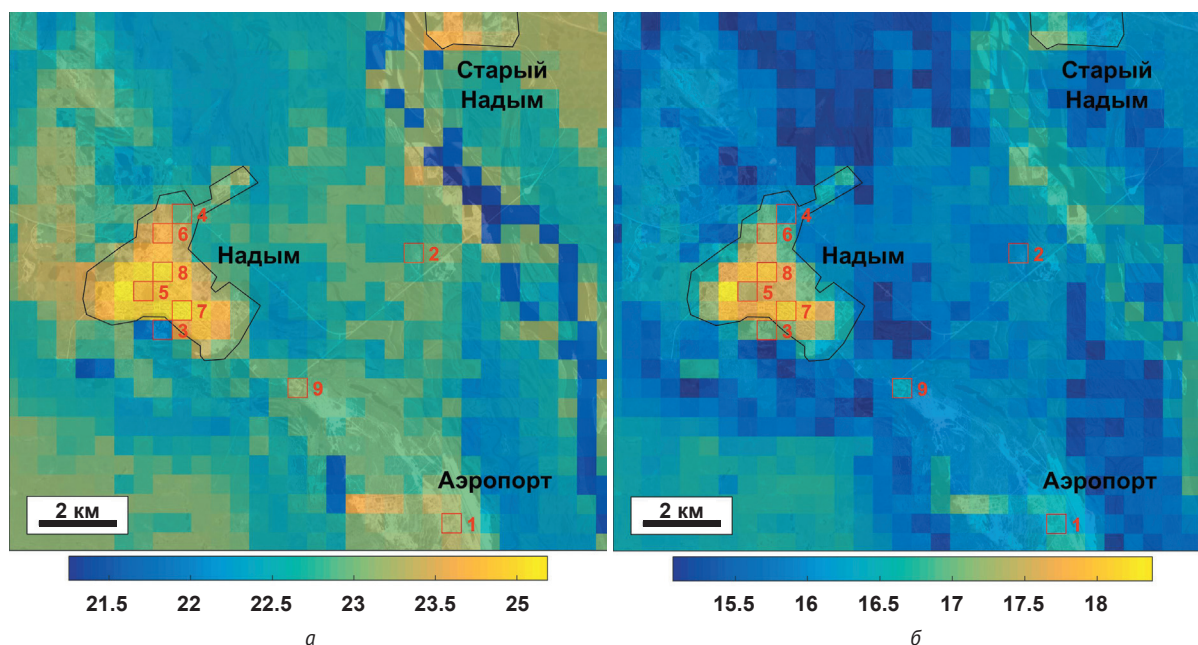
квадратической (RMSE) ошибок и коэффициента корреляции ( $R$ ) приведены в табл. 3. Для метеостанции Надым средняя ошибка по температуре оказалась близка к нулю, а среднеквадратичная составила  $2,1^{\circ}\text{C}$ , что сопоставимо с точностью современных мезомасштабных моделей в других подобных исследованиях, в том числе в предшествующих работах авторов с COSMO-CLM. Для влажности и скорости ветра модель также воспроизвела характерную динамику изменчивости этих величин (суточный ход и изменчивость, обусловленную сменой синоптических процессов), однако систематически занизила удельную влажность воздуха и завысила скорость ветра. Занижение влажности и завышение скорости ветра характерны и для промежуточной области моделирования в сравнении с данными 19 метеостанций ЯНАО. Такие ошибки модели могут быть связаны как с неточностью начальных и граничных условий и модельных параметризаций, так и с локальными особенностями расположения отдельных метеостанций. Например, завышение моделью скорости ветра для метеостанции Надым, вероятно, связано с расположением станции в ложбине, окруженной лесом.

Использование параметризации TERRA\_URB позволило воспроизвести в Надыме ярко выраженный

**Таблица 3. Результаты верификации модельных расчетов для промежуточной области моделирования по данным 19 метеостанций ЯНАО и для заключительной области моделирования по данным метеостанции Надым (аэропорт)**

Показатель	ЯНАО			Метеостанция Надым		
	ME	RMSE	R	ME	RMSE	R
Температура, $^{\circ}\text{C}$	-0,49	2,44	0,89	-0,13	2,11	0,92
Удельная влажность, г/кг	-0,58	1,95	0,54	-1,01	1,72	0,65
Скорость ветра, м/с	0,46	1,32	0,58	1,08	1,76	0,55

эффект городского острова тепла. В среднем за рассматриваемый период среднесуточная температура в городе по данным моделирования превышает загородные значения более чем на  $1^{\circ}\text{C}$ , средняя ночная температура — более чем на  $3^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Ввиду отсутствия данных метеорологических наблюдений внутри городской среды для рассматриваемого периода верифицировать качество воспроизведения моделью острова тепла невозможно. Тем не менее такие значения представляются разумными как на фоне сравнения с литературными данными для других городов сопоставимого размера в умеренных [33] и высоких широтах [34; 35], так и с данными микроклиматических измерений, выполненных в черте города Надыма впоследствии. Так, по данным измерений на метеостанции UHIARC



**Рис. 3. Пространственное распределение среднесуточной (а) и средней ночной (за срок 21 UTC или 2 утра по местному времени) (б) температуры воздуха в  $^{\circ}\text{C}$  за период волны жары (7–23 июля 2016 г.) по данным моделирования с шагом сетки 500 м. Черным контуром показана граница Надыма. Красными квадратами показаны ячейки расчетной сетки, соответствующие точкам, для которых произведен расчет биометеорологических индексов**

**Fig. 3. Spatial distribution of the average daily (a) and average nighttime (over 21 UTC or 2 a.m. local time) (b) air temperature in  $^{\circ}\text{C}$  for the heat wave period (July 7–23, 2016) according to modeling data with a grid step of 500 m. The black outline shows the city of Nadym border. The red squares show the cells of the computational grid corresponding to the points for which the biometeorological indices were calculated**

(Urban Heat Island Arctic Research Campaign) в городском парке [9] за летние сезоны 2017—2020 гг. превышение температуры относительно аэропорта для этой точки ночью может достигать 2—3°C, еще более высоких температур можно ожидать для районов с плотной застройкой.

При этом согласованность между значениями индексов PET и UTCI, рассчитанными по данным прямых измерений на метеостанции Надым и по данным моделирования COSMO, нельзя охарактеризовать единым образом. Для PET оно более тесное, нежели для UTCI, что хорошо заметно по форме облака точек (рис. 4). Модельные значения UTCI имеют явную тенденцию к более низким значениям, что может быть обусловлено большей чувствительностью индекса UTCI к ветру [36]. В свою очередь, результаты модельного эксперимента с COSMO-CLM несколько завышают скорость ветра для метеостанции Надым (см. рис. 2), что может быть связано с местоположением станции в ложбине и сказываться на значениях индекса UTCI. Дополнительную разницу в результаты по индексам может вносить характеристика их шкал и градаций.

Суточный ход биоклиматических индексов, осредненный за период волны жары, имеет более выра-

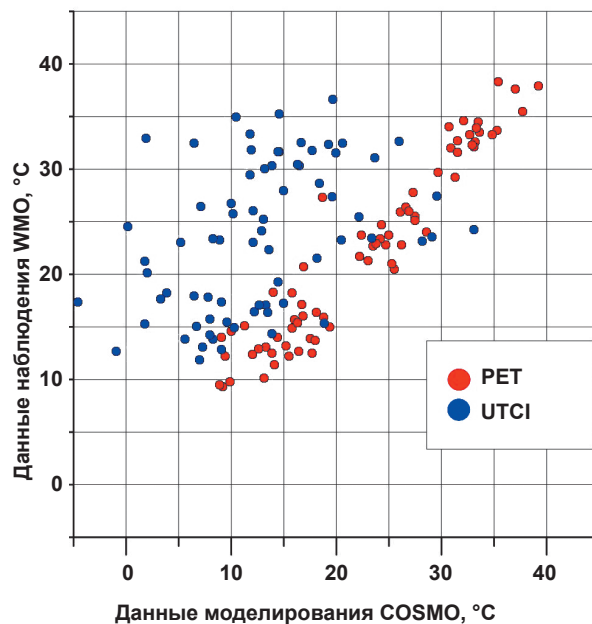


Рис. 4. Сравнение значений индексов PET и UTCI по данным наблюдения и данным моделирования

Fig. 4. Comparison of the PET and UTCI indices values according to observation and modeling data

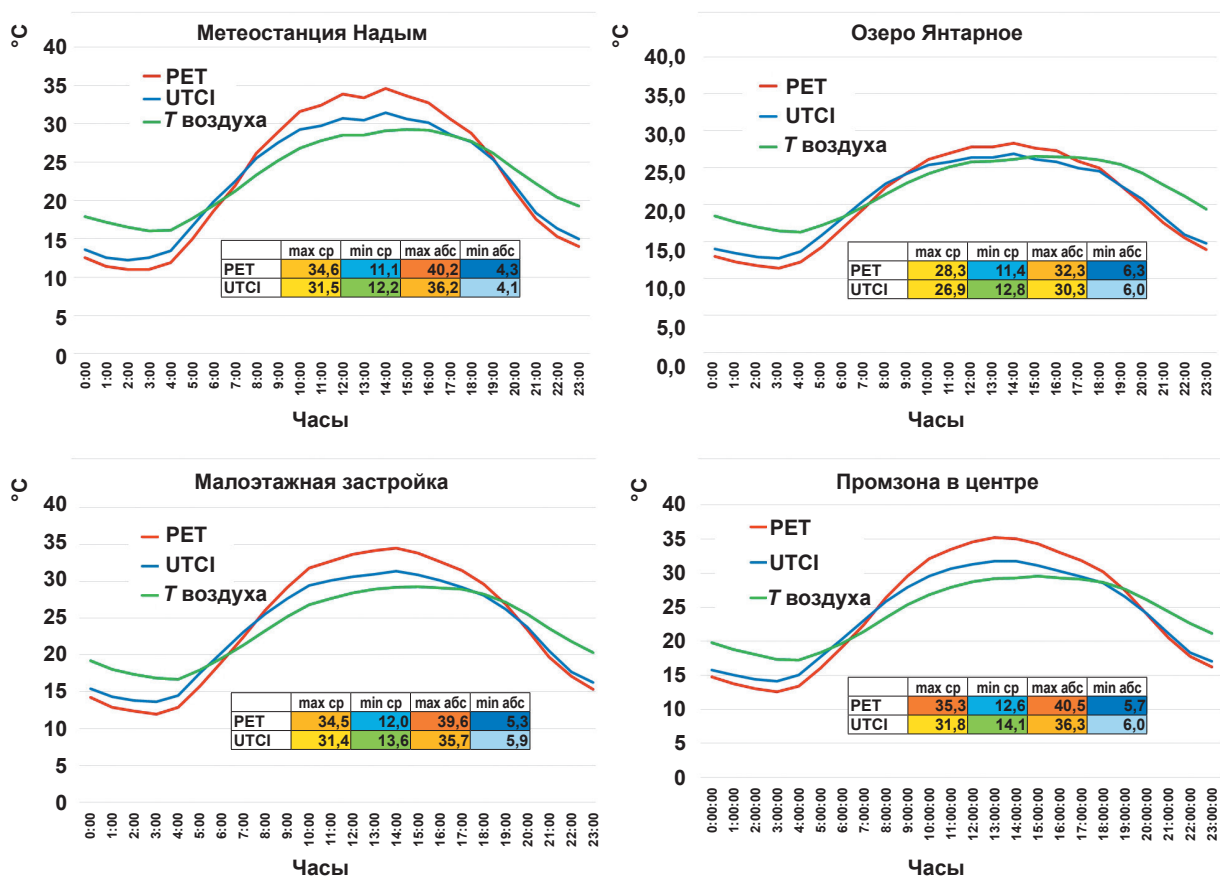


Рис. 5. Осредненный суточный ход индекса PET за период волны жары по четырем контрастным точкам в пределах изучаемого района (см. табл. 1)

Fig. 5. Average daily variation of the PET index during the heat wave period by four contrasting points within the study area (see Table 1)

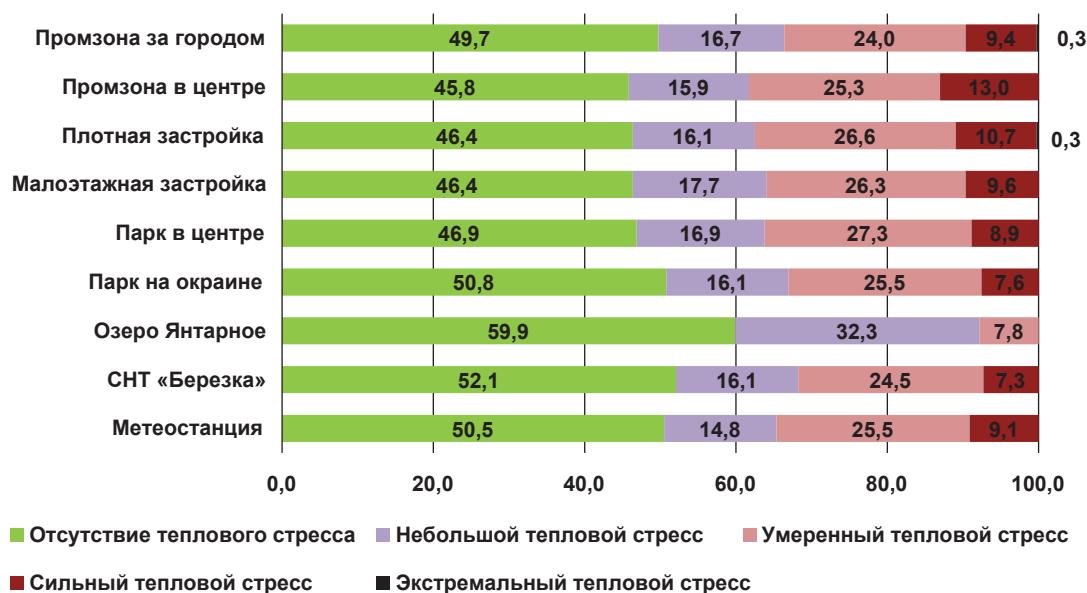


Рис. 6. Сравнение повторяемости градаций теплового стресса (индекс PET) в период волны жары в Надыме и окрестностях  
Fig. 6. Frequency comparison of the heat stress gradations (PET index) during the heat wave in Nadym and its surroundings

женный характер по сравнению с каноническим ходом температуры воздуха (рис. 5).

Так, минимум PET достигается вскоре после восхода солнца, максимум — в течение пары часов после истинного полудня. В отдельных застроенных ландшафтах (например, в точках 7 и 8 — плотной застройки) средний максимум PET достигает  $+35^{\circ}\text{C}$ , что является пороговым значением сильного теплового стресса (см. табл. 2). Для застроенных территорий как жилых, так и промышленных кварталов характерен более сглаженный суточный ход температуры воздуха и биоклиматических индексов. Наиболее близкие значения температуры воздуха и биоклиматических индексов наблюдаются в ранние утренние и вечерние часы. В дневные часы значения биоклиматических индексов на несколько градусов выше температуры воздуха. Индекс PET для всех рассмотренных точек показывает более высокие значения по сравнению с индексом UTCI, минимальное превышение характерно для зеркала озера Янтарное.

В пространственном отношении на территории Надыма и его окрестностей в период волны жары с 7 по 23 июля наблюдалось пять состояний термического стресса по биоклиматическому индексу PET (от отсутствия теплового стресса до экстремального теплового стресса) и только три состояния, идентифицируемых по индексу UTCI (от отсутствия до умеренного теплового стресса) (рис. 6 и 7).

Наиболее неблагоприятными с точки зрения термического комфорта являются плотно застроенные жилые и индустриальные территории: плотная жилая застройка (точка 7) и плотная промышленная застройка в центре города (точка 8). Здесь одно-

временно самая высокая повторяемость сильного теплового стресса (более 10% времени) и низкая повторяемость отсутствия теплового стресса (менее 46,4%). Зоны плотной застройки (точка 7) и загородной промзоны (точка 9) — единственные из анализируемых территорий, где проявился экстремальный тепловой стресс. Однако частота его проявления была крайне низка — 0,3%. При этом для загородной промзоны характерна более высокая продолжительность периода без теплового стресса (49,7%) по сравнению с территориями плотной жилой застройки (46,4%) и плотной промышленной застройки в центре города (45,8%).

Парк на окраине города (точка 4) предсказуемо оказался слегка комфортнее парка в центре (точка 5) за счет эффекта городского острова тепла, который летом довольно незначителен в Надыме, но проявляется в период волны жары. Наиболее комфортными в период волны жары были территории дачных участков (СНТ «Березка», точка 8) и вблизи водных объектов. Над зеркалом озера Янтарного (точка 3) вообще не наблюдалось эпизодов с сильным тепловым стрессом в отличие от всех остальных анализируемых территорий.

Индекс UTCI идентифицирует те же пространственные закономерности распределения теплового стресса, однако показывает значительно меньшую его интенсивность (см. рис. 7). Доля времени, когда не наблюдалось теплового стресса, достигает 82% над озером Янтарное и 56% для промышленной застройки в центре города и плотной жилой застройки. Умеренный тепловой стресс варьирует от 7,6% до 11,5%, а сильный тепловой стресс не наблюдается вовсе.



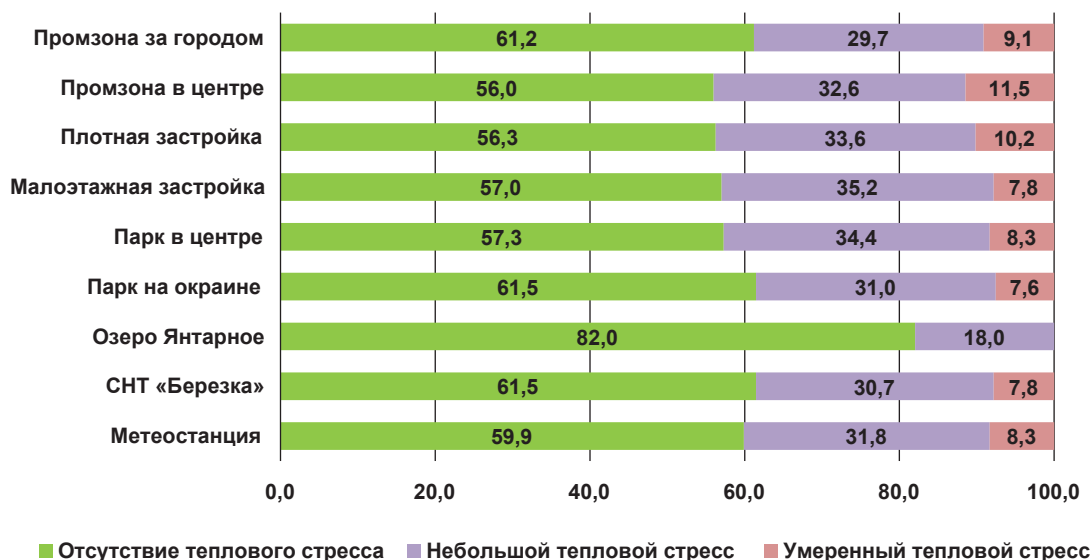


Рис. 7. Сравнение повторяемости градаций теплового стресса (индекс UTCI) в период волны жары в Надыме и окрестностях  
 Fig. 7. Frequency comparison of the heat stress gradations (UTCI index) during the heat wave in Nadym and its surroundings

Подобная разница в индексах была подтверждена на примере Квебека (Канада). UTCI был немного более чувствителен к средней радиационной температуре (демонстрирует воображаемую температуру среды в предположении, что она определяется для человеческого тела лишь потоками коротковолнового (от Солнца) и длинноволнового (теплого) излучения), умеренно чувствителен к влажности и сильно чувствителен к скорости ветра по сравнению с PET. Эти соотношения немного менялись в зависимости от состояния окружающей среды и сезона. Так, в жаркую погоду PET был более чувствителен к средней радиационной температуре, что означает более частую регистрацию термического стресса по сравнению с UTCI [37].

Учитывая полученную разницу в термическом стрессе, идентифицируем по двум биоклиматическим индексам, вывод о практическом применении одного из них может быть сделан только после дополнительных исследований. Одним из таких направлений может быть анкетирование населения на модельных участках и дальнейшее сопоставление теплоощущений, которые определяет непосредственно человек, с результатами расчетов индексов PET и UTCI.

Использование в качестве дополнительных характеристик индексов NDVI и LST (рис. 8) показало, что на территории промышленной зоны значения индекса NDVI практически для каждого пикселя ниже нуля. Это говорит о почти полном отсутствии растительности и, как следствие, сказывается на возникновении сильного и даже экстремального теплового стресса. Для жилой зоны характерна относительно высокая для нее озелененность (значения NDVI до 0,2), однако, по всей видимости, недостаточная для недопущения возникновения сильного теплового стресса (может также сказываться неточность учета внутригородской растительности

в модели). По показателю температуры земной поверхности LST весь город довольно ярко выделяется на фоне окружающих объектов в виде четкой положительной тепловой аномалии, при этом характеризующейся неоднородной структурой. В пределах города мощная положительная тепловая аномалия (до +35°C) связана с промышленной застройкой (большим по площади корпусом ныне не функционирующего завода крупнопанельного домостроения). Мощные положительные тепловые аномалии также связаны с плотно застроенными гаражными кооперативами, что позволяет предположить высокую вероятность возникновения теплового стресса на этих территориях при наступлении аномально жаркой погоды. Таким образом, индексы NDVI и LST, отличающиеся простотой расчета, могут быть использованы в качестве первичного индикатора для определения наиболее дискомфортных в термическом отношении территорий города. Расчет биоклиматических индексов на основе микроклиматического моделирования позволяет получить более детальную оценку комфортности внутригородской территории.

В целом, несмотря на расположение Надыма в Арктической зоне России, нельзя исключать возможность возникновения условий термического стресса на отдельных территориях города. При этом наибольшее температурное воздействие человек может испытывать не только при нахождении на территории промышленных объектов, складских и гаражных строений, но и в районах жилой застройки, что создает дополнительные риски для здоровья. Например, для населения Архангельска, которое проживает в условиях холодного лета и умеренно-холодной зимы, было показано, что влияние жаркой погоды на возникновение дополнительных случаев смерти также прослеживается.

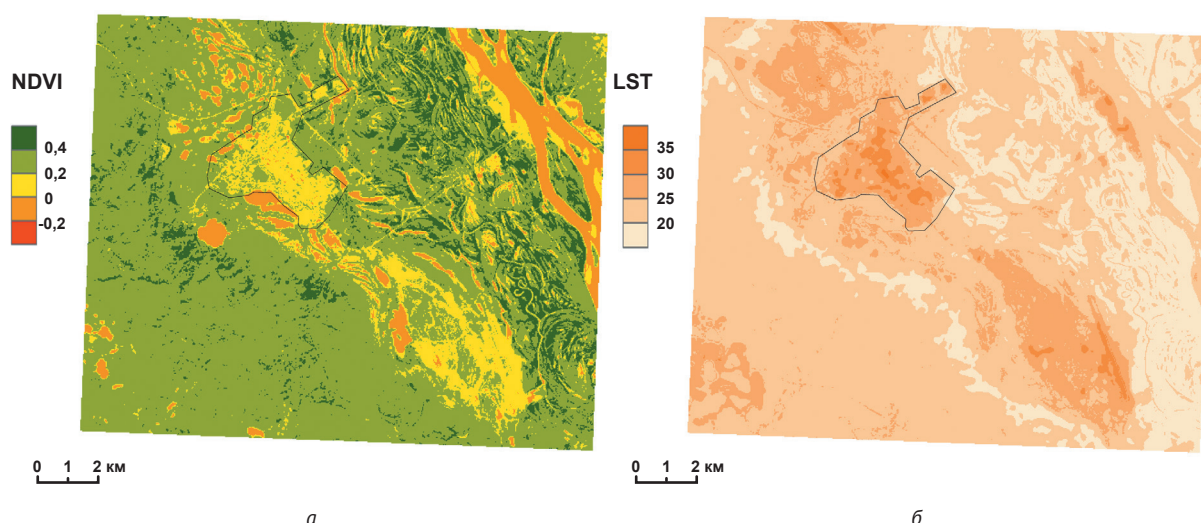


Рис. 8. Значения вегетационного индекса NDVI (а) и температуры земной поверхности LST (б) для Надыма и окрестностей  
Fig. 8. Vegetation index NDVI (a) and surface temperature LST values (b) for Nadym and its surroundings

Такие неблагоприятные эффекты возникают при наступлении высоких ночных температур [38].

### Заклучение

Оценка внутригородской биоклиматической комфортности по результатам численного микроклиматического моделирования показала, что в периоды экстремально жарких погодных событий в Надыме отчетливо проявляется мезо- и микроклиматическая мозаичность территорий. Наиболее дискомфортные условия приходятся на максимально антропогенно измененные территории, идентифицируемые также по значениям LST, — в них повторяемость эпизодов очень сильного теплового стресса может превосходить аналогичную на фоновых территориях в 1,7 раза (11,8% и 6,7% соответственно). Таким образом, для определения потенциальных участков термического стресса может быть достаточно использования индексов, определяемых по спутниковым снимкам, таких как LST и NDVI, в то время как для детализация термического стресса необходимо мезо- и микроклиматическое моделирование.

На фоне глобального потепления угроза возникновения термического стресса может возрастать. Одним из эффективных решений для арктических городов при этом может стать внедрение повышающих безопасность проживания климатически обоснованных планировочных решений не только по отношению к зимнему холоду, но и к летней жаре, а также озеленение территорий.

Суперкомпьютерное моделирование и анализ данных выполнены коллективом авторов при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 18-05-60146. Работа по определению необходимых для модели параметров городской среды Надыма выполнена Т. Е. Самсоновым и М. И. Варенцовым при

финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-05-60126. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М. В. Ломоносова.

### Литература/References

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. by Th. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge Univ. Press, 1535 p. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
2. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C. et al. The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, 2009, vol. 3, iss. 1, pp. 11—19. Available at: <https://doi.org/10.5194/tc-3-11-2009>.
3. Varentsov M., Shartova N., Grischenko M. et al. Spatial patterns of human thermal comfort conditions in Russia: Present climate and trends. *Weather, Climate, and Society*, 2020, vol. 12, iss. 3, pp. 629—642. Available at: <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0138.1>.
4. Vinogradova V. Using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) for the assessment of bioclimatic conditions in Russia. *Intern. J. of Biometeorology*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4>.
5. Semenova A. A., Konstantinov P. I., Varentsov M. I. et al. Modeling the Dynamics of Comfort Thermal Conditions in Arctic Cities under Regional Climate Change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 386, p. 012017. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012017>.
6. Johannessen O. M., Kuzmina S. I., Bobylev L. P. et al. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalisa-

- tion. *Tellus, Ser. A Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, 2016, vol. 68, iss. 1. DOI: 10.3402/tellusa.v68.28234.
7. Founda D., Pierros F., Katavoutas G. et al. Observed trends in thermal stress at European cities with different background climates. *Atmosphere*, 2019, vol. 10, iss. 8. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos10080436>.
8. Oke T. R., Mills G., Christen A. et al. *Urban Climates*. [S. l.], Cambridge Univ. Press, 2017, 546 p. Available at: <https://doi.org/10.1017/9781139016476>.
9. Konstantinov P., Varentsov M., Esau I. A High Density Urban Temperature Network Deployed in Several Cities of Eurasian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 7. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb84>.
10. Varentsov M., Wouters H., Platonov V. et al. Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia. *Atmosphere*, 2018, vol. 9, iss. 2, p. 50. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos9020050>.
11. Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, iss. 10. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs9100989>.
12. Miles V., Esau I. Surface urban heat islands in 57 cities across different climates in northern Fennoscandia. *Urban Climate*, 2020, vol. 31. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100575>.
13. Perkins-Kirkpatrick S., Gibson P. Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, iss. 1, p. 12256. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12520-2>.
14. Rockel B., Will A., Hense A. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorol. Zeitschrift*, 2008, vol. 17, iss. 4, pp. 347—348.
15. Wouters H., Demuzere M., Blahak U. et al. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: Description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, iss. 9, pp. 3027—3054. Available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3027-2016>.
16. Frich A., Alexander L. V., Della-Marta P. et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, vol. 19, pp. 193—212. Available at: <https://doi.org/10.3354/cr019193>.
17. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // *Метеорология и гидрология*. — 2015. — № 6. — С. 58—70.
- Rivin G. S., Rozinkina I. A., Vil'fand R. M. et al. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: the second stage of implementation and development. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400—410. DOI: 10.3103/S1068373915060060.
18. Кислов А. В., Торопов П. А., Платонов В. С. и др. Региональное моделирование климата для географического анализа // *Вестн. Моск. ун-та. — Сер. 5. География*. — 2019. — № 5. — С. 3—12.
- Kislov A. V., Toropov P. A., Platonov V. S. et al. Regional climate modeling for geographical analysis. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2019, vol. 5, pp. 3—12. (In Russian).
19. Zangl G., Reinert D., Rípodas P. et al. The ICON (ICO-sahedral Nonhydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the nonhydrostatic dynamical core. *Quart. J. of the Royal Meteorological Society*, 2015, vol. 141, pp. 563—579. Available at: <https://doi.org/10.1002/qj.2378>.
20. Варенцов М. И., Самсонов Т. Е., Кислов А. В. и др. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // *Вестн. Моск. ун-та. — Сер. 5. География*. — 2017. — № 6. — С. 25—37.
- Varentsov M. I., Samsonov T. E., Kislov A. V. et al. Simulations of Moscow agglomeration heat island within the framework of the regional climate model COSMO-CLM. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2017, vol. 6, pp. 25—37. (In Russian).
21. Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A. et al. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city. *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, iss. 23, pp. 17573—17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018.
22. Smiatek G. Time invariant boundary data of regional climate models COSMO-CLM and WRF and their application in COSMO-CLM. *J. Geophys. Res.*, 2014, vol. 119, iss. 12, pp. 7332—7347.
23. Schulz J., Vogel G. Improving the Processes in the Land Surface Scheme TERRA: Bare Soil Evaporation and Skin Temperature. *Atmosphere [Basel]*, 2020, vol. 11, iss. 5, p. 513. DOI: 10.3390/atmos11050513.
24. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ. Res.*, 2010, vol. 15, iss. 2, pp. 218—230.
25. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N. E. et al. Copernicus global land cover layers-collection 2. *Remote Sens.*, 2020, vol. 12, iss. 6, pp. 1—14.
26. Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M. Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment. *Atmosphere [Basel]*, 2020, vol. 11, iss. 12, p. 1349. DOI: 10.3390/atmos11121349.
27. Samsonov T. E., Varentsov M. I. Computation of City-descriptive Parameters for High-resolution Numerical Weather Prediction in Moscow Megacity in the Framework of the COSMO Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, iss. 7, pp. 515—521. DOI: 10.3103/S1068373920070079.
28. Matzarakis A., Nastos P. T. Human-biometeorological assessment of heat waves in Athens. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, vol. 105, pp.



- 99—106. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0379-3>.
29. McGregor G. R. Universal Thermal Comfort Index (UTCI). Intern. J. of Biometeorology, 2012, vol. 56, p. 419. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0546-6>.
30. Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. Modelling Radiation Fluxes in Simple and Complex Environments: Basics of the RayMan Model. Intern. J. of Biometeorology, 2010, vol. 54, iss. 2, pp. 131—39. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>.
31. Matzarakis A., Mayer H. Another kind of environmental stress. Thermal stress. WHO News, 1996, vol. 18, pp. 7—10.
32. Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K. et al. Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI). Intern. J. of Biometeorology, 2012, vol. 56, pp. 481—494. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.
33. Wolters D., Brandsma T. Estimating the urban heat Island in residential areas in the Netherlands using observations by weather amateur. J. of Applied Meteorology and Climatology, 2012, vol. 51, iss. 4, pp. 711—721. Available at: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0135.1>.
34. Miles V., Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities. Remote Sens., 2017, vol. 9, iss. 10, pp. 989. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs9100989>.
35. Miles V., Esau I. Surface urban heat islands in 57 cities across different climates in northern Fennoscandia. Urban Climate, 2020, vol. 31, p. 100575. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100575>.
36. Novak M. Use of the UTCI in the Czech Republic. Geographia Polonica, 2013, vol. 86, iss. 1, pp. 21—28. Available at: <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.3>.
37. Provençal S., Bergeron O., Leduc R. et al. Thermal comfort in Quebec City, Canada: sensitivity analysis of the UTCI and other popular thermal comfort indices in a mid-latitude continental city. Intern. J. of Biometeorology, 2016, vol. 60, iss. 4, pp. 591—603. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1054-2>.
38. Шартова Н. В., Шапошников Д. А., Константинов П. И. и др. Определение порогов температурно-зависимой смертности на основе универсального индекса теплового комфорта — UTCI // Анализ риска здоровью. — 2019. — № 3. — С. 83—93. — URL: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.3.10>. Shartova N. V., Shaposhnikov D. A., Konstantinov P. I. et al. Universal thermal climate index (UTCI) applied to determine thresholds for temperature-related mortality. Analiz riska zdorov'yu. [Health Risk Analysis], 2019, no. 3, pp. 83—93. Available at: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.3.10>. (In Russian).

### Информация об авторах

**Константинов Павел Игоревич**, кандидат географических наук, доцент, Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: kostadini@mail.ru.

**Варенцов Михаил Иванович**, кандидат географических наук, научный сотрудник, Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: mikhael.varentsov@srcc.msu.ru.

**Грищенко Михаил Юрьевич**, кандидат географических наук, научный сотрудник, Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), доцент, Факультет географии и геоинформационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (109028, Россия, Москва, Покровский б-р, д. 11), e-mail: m.gri@geogr.msu.ru.

**Самсонов Тимофей Евгеньевич**, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru.

**Шартова Наталья Витальевна**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: shartova@yandex.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Константинов П. И., Варенцов М. И., Грищенко М. Ю. и др. Оценка термического стресса в арктическом городе в летний период // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 219—231. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-219-231.

## THERMAL STRESS ASSESSMENT FOR AN ARCTIC CITY IN SUMMER

Konstantinov, P. I.\*, Varentsov, M. I.\*

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Grishchenko, M. Yu.

Lomonosov Moscow State University, National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)

Samsonov, T. E., Shartova, N. V.

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The article was received on January 13, 2021

### Abstract

Despite the fact, that against the background of global warming the Russian Arctic is still a region with severe winters and cool summers; the likelihood of thermal stress conditions in summer is also increasing. At the same time, urban conditions can significantly affect the human heat perception due to the appearance of the urban heat island effect and other factors. Using the example of the city of Nadym (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug), the authors have assessed the possibility of the summer urban heat stress occurrence and analyzed its spatial heterogeneity. The article presents the detailed modeling results of the meteorological regime of the city within the framework of the COSMO-CLM model and the assessment of bioclimatic comfort using the Physiologically Equivalent Temperature (PET) index and Universal Thermal Climate Index (UTCI). During periods of the extremely hot weather events in Nadym, the territory meso- and microclimatic mosaicism clearly manifests itself. In anthropogenically altered territories, the frequency of strong heat stress events can exceed that in the background areas by 1.7 times. Urban planning solutions should take into account not only the climatic resistance of Arctic cities to the winter cold, but also be adapted to the occurrence of summer heat.

**Keywords:** *bioclimatic index, Physiologically Equivalent Temperature (PET) index, Universal Thermal Climate Index (UTCI), urban heat island, modelling, COSMO, thermal comfort.*

The team of authors performed supercomputer modeling and data analysis with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project No. 18-05-60146. T. E. Samsonov and M. I. Varentsov determined the parameters of the urban environment of Nadym necessary for the model with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the project No. 18-05-60126. During their work, the authors used the equipment of the Center for Collective Use of Ultra-High Performance Computing Resources of the Lomonosov Moscow State University.

### Information about the authors

**Konstantinov, Pavel Igorevich**, PhD of Geography, Associate Professor, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: kostadini@mail.ru.

**Varentsov, Mikhail Ivanovich**, PhD of Geography, Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru.

**Grishchenko, Mikhail Yurievich**, PhD of Geography, Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), Associate Professor, Faculty of Geography and Geoinformation Technology, HSE University (11, Pokrovsky blvd., Moscow, Russia, 109028), e-mail: m.gri@geogr.msu.ru.

**Samsonov, Timofey Evgenievich**, PhD of Geography, Leading Researcher, Head of the Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru.

**Shartova, Natalia Vitalievna**, PhD of Geography, Senior Researcher, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: shartova@yandex.ru.

### Bibliographic description of the article

Konstantinov, P. I., Varentsov, M. I., Grishchenko, M. Yu., Samsonov, T. E., Shartova, N. V. Thermal stress assessment for an Arctic city in summer. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 219—231. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-219-231. (In Russian).

© Konstantinov P. I., Varentsov M. I., Grishchenko M. Yu., Samsonov T. E., Shartova N. V., 2021

\* Konstantinov P. I. and Varentsov M. I. made equal contributions to this work as early authors due to the interdisciplinary nature of the work.