

Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия)

В. И. Горный, С. Г. Крицук, И. Ш. Латышов, А. Б. Манвелова, А. А. Тронин

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН
Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

Предложен алгоритм и разработана методика спутникового картирования рисков (вероятностей) превышения среднесуточной температурой воздуха температуры минимальной смертности. Знание значений этих рисков открывает возможность картирования экономического ущерба в городах от возрастания числа смертей, вызванных перегревом. Актуальность проблемы определяется наблюдающимся глобальным потеплением. В качестве объекта исследования выбран г. Хельсинки (Финляндия). Материалом для исследования стала серия из 32 сцен со спутников серии Landsat, полученных в ИК-тепловом диапазоне спектра, и результаты стандартных срочных наблюдений на городских метеостанциях WMO ID 2978 и METAR EFHK Вантаа (аэропорт) за период 2007–2019 гг. Окончательным результатом стала карта риска превышения температуры минимальной смертности в результате перегрева городской среды, построенная для г. Хельсинки. Показана неоднородность пространственного распределения рисков. Высокими рисками перегрева городской среды характеризуются промышленные зоны, а минимальными — рекреационные. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы в качестве информационной поддержки системы принятия управленческих решений, направленных на заблаговременное парирование угроз экологической безопасности из-за перегрева городской среды в результате глобального потепления.

Ключевые слова: город, тепловой остров, спутник, температура воздуха, картирование, температура минимальной смертности, риск

Одобрена к печати: 05.05.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34

Введение

В крупных городских и промышленных агломерациях под влиянием ряда факторов формируются так называемые тепловые острова (*англ.* urban heat islands), характеризующиеся повышенной температурой воздуха (Bornstein, 1968; Oke et al., 1991; Price, 1979). При этом в условиях глобального потепления (Allen et al., 2018) особенно актуальной проблемой экологической безопасности населения городов становится рост смертности из-за перегрева городской среды при появлении «тепловых волн» (Коппе и др., 2005; Оценка..., 2012).

Известно, что в различных районах города температура воздуха в одно и то же время может различаться на несколько градусов (до 10 °С). Соответственно, смертность и экономический ущерб, вызванный перегревом, в пределах города должны распределяться неравномерно. Для принятия обоснованных управленческих решений, направленных на минимизацию угрозы здоровью населения от перегрева городской среды, необходимо построение детальных карт экономического ущерба, вызванного этим перегревом. Ясно, что расчёт этого экономического ущерба должен базироваться на анализе длительных временных рядов температуры воздуха, полученных для каждого пикселя строящейся карты, т. е. быть статистически усреднённым. Это позволит построить карты рисков (вероятностей) $R(x, y)$ превышения среднесуточной температурой воздуха \bar{t} значения температуры воздуха $T^{\text{ММТ}}$ (*англ.* minimum mortality rate), соответствующей минимальной смертности. Температура $T^{\text{ММТ}}$ определяется на основе продолжительных эпидемиологических наблюдений относительного риска смертности (Chittaranjan, 2005; Ruuhela et al., 2017, 2021).

Необходимо отметить, что имеются примеры реализации подхода к детальному картированию температуры воздуха в городах, основанного на массовых наземных измерениях температуры путём привлечения добровольцев для измерений (https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/UHI_Part2_v2.pdf). Но этот подход представляется чрезвычайно трудоёмким и не позволяет построить статистически представительное количество карт температуры воздуха.

Другим подходом в построении детальных карт температуры воздуха в городах становится применение технологий ГИС (геоинформационные системы) и математического моделирования. Подобные работы также трудоёмки, так как необходимо создать и верифицировать математическую модель температуры воздуха, подготовить множество слоёв детальных цифровых карт всех микроклиматических характеристик, высотную цифровую модель города, растительности и др. (Garbero et al., 2021; Geletič et al., 2021; Gutierrez et al., 2015).

С экономических позиций для крупномасштабного картирования $R(x, y)$ целесообразно использовать архивные материалы многократных спутниковых съёмок. Известны примеры построения карт температуры воздуха на основе материалов спутниковой съёмки в комплексе с массовыми наземными измерениями характеристик состояния городской среды (Ho et al., 2015–2017; Srivanit, Hokaio, 2012). В этих работах карта температуры воздуха строится с использованием метода множественной корреляции. Недостаток методики — трудоёмкость построения статистически представительного количества карт температуры воздуха.

Недавно нами предложена и реализована методика крупномасштабного спутникового картирования температуры воздуха (Kritsuk et al., 2022) и риска перегрева поверхности городской среды (Крицук и др., 2019), основанная на комплексировании результатов эпизодических спутниковых тепловых съёмок с данными регулярных многолетних мониторинговых наблюдений за температурой воздуха на стандартных метеостанциях. Это открыло возможность разработки методики спутникового картирования рисков превышения $T^{ММТ}$ как первого этапа построения карт смертности населения и экономического ущерба от перегрева городской среды.

Поэтому цель статьи заключается в разработке методики крупномасштабного спутникового картирования рисков (вероятностей) превышения среднесуточной температурой воздуха значения температуры минимальной смертности населения.

Эта статья — первая из двух, посвящённых разработке эмпирического метода спутникового картирования риска роста смертности и экономического ущерба от перегрева городской среды.

Материалы и методы

В качестве объекта (тестового участка) исследования выбран г. Хельсинки (Финляндия), поскольку для пользователей сети интернет доступен многолетний ряд наблюдений за среднесуточной температурой воздуха на городской метеостанции (<https://rp5.ru>). Там же доступна карта плотности населения Хельсинки (размер пикселя 1×1 км (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>)). Эта карта необходима для спутникового картирования смертности населения от перегрева городской среды. Важный фактор — в Хельсинки определена $T^{ММТ}$ и зависимость риска роста смертности от среднесуточной температуры воздуха (Ruuhela et al., 2017, 2021).

При построении карты рисков превышения $T^{ММТ}$ в Хельсинки использованы:

- 32 сцены, полученные спутниками серии Landsat в инфракрасном (ИК) тепловом диапазоне спектра (пространственное разрешение ИК-тепловых каналов — ~ 100 м (<https://earthexplorer.usgs.gov>)) (таблица);
- временные ряды среднесуточной температуры, зарегистрированные в Хельсинки в период с 2007 по 2019 г. на метеостанциях WMO ID 2978 (англ. World Meteorological Organization Identifier — международный идентификатор Всемирной метеорологической организации) и аэропорта Хельсинки-Вантаа (англ. Helsinki-Vantaa) (идентификатор METAR EFHK) (<https://rp5.ru>). Для построения карт риска перегрева использованы результаты наблюдений температуры воздуха только на метеостанции

WMO ID 2978. Данные метеостанции METAR EFHK применялись только при анализе результатов;

- значение $T^{\text{ММТ}} = +16,7 \text{ }^\circ\text{C}$, принятое для Хельсинки в соответствии с работами (Ruuhela et al., 2017, 2021).

Использованные материалы съёмки спутниками серии Landsat

№	Спутник	Дата	$t(x^m, y^m), \text{ }^\circ\text{C}$	№	Спутник	Дата	$t(x^m, y^m), \text{ }^\circ\text{C}$
1	Landsat-7	01.06.2009	19,5	17	Landsat-7	09.08.2016	14,9
2		13.07.2010	24,8	18	Landsat-8	31.08.2016	14,6
3		22.07.2010	23,4	19	Landsat-7	07.06.2017	15,4
4		22.05.2011	12,3	20	Landsat-8	15.06.2017	14,8
5		07.06.2011	18,2	21	Landsat-7	09.07.2017	16,8
6	Landsat-8	13.07.2013	19,0	22		16.07.2017	17,8
7	Landsat-7	14.07.2013	19,7	23	Landsat-8	17.05.2018	17,3
8	Landsat-8	22.05.2014	16,7	24	Landsat-7	25.05.2018	14,6
9	Landsat-7	08.07.2014	21,3	25		10.06.2018	14,6
10		24.07.2014	23,0	26	Landsat-8	27.07.2018	24,3
11	Landsat-8	25.07.2014	23,4	27	Landsat-8	28.06.2019	17,1
12		10.08.2014	21,2	28	Landsat-7	31.07.2019	15,6
13		25.05.2015	9,8	29		15.06.2020	19,1
14		03.07.2015	21,2	30	Landsat-8	23.06.2020	19,1
15	Landsat-7	03.05.2016	11,2	31	Landsat-7	17.07.2020	19,0
16	Landsat-8	03.06.2016	18,6	32		18.08.2020	16,0

Примечание: Приведены срочные температуры воздуха на метеостанции WMO ID 2978 в момент пролёта спутника.

Предварительная подготовка материалов включала:

- построение карт $t^b(x, y)$ — яркостной температуры поверхности. Нахождение $t^b(x, y)$ выполнялось с использованием одноканальной методики (Yu et al., 2014);
- построение гистограммы распределения $\bar{t}(x^m, y^m) \text{ }^\circ\text{C}$ — среднесуточных температур воздуха на метеостанции для периодов с мая по август каждого из 2007–2019 гг. Выполнено в соответствии с выражением:

$$r_j^m = \frac{n_j}{N}, j = 1, \dots, k, \quad (1)$$

где r_j^m — встречаемость (плотность вероятности при больших массивах данных) $\bar{t}(x^m, y^m)$ — среднесуточных температур воздуха на метеостанции; (x^m, y^m) — координаты метеостанции на цифровой карте (номера в рядах и номера строк); n_j — число измерений, попавших в j -й интервал разбиения (bin) температур воздуха; N — общее число измерений. За начало рассматриваемого температурного интервала принято $\bar{t}_{j=1}(x^m, y^m) = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, за конец — $\bar{t}_{j=k}(x^m, y^m) = +27 \text{ }^\circ\text{C}$. К каждому интервалу отнесены следующие температуры: $\bar{t}_j(x^m, y^m) < \bar{t}(x^m, y^m) < \bar{t}_{j+1}(x^m, y^m)$.

При этом соблюдалось нормирующее условие: $\sum_{j=1}^{j=k} \frac{n_j}{N} = 1$.

Основные соотношения при картировании риска превышения $T^{\text{ММТ}}$

Для значений $t_j(x^m, y^m)$, соответствующим интервалам разбиения гистограммы (1) по материалам спутниковых тепловых съёмок и временным рядам среднесуточной температуры, зарегистри-

стрированным на метеостанции на территорию Хельсинки, строились карты среднесуточной температуры воздуха с пространственным разрешением ~ 100 м. Для этого использовался подход (Kritsuk et al., 2022), объединяющий пространственное распределение $t^b(x, y)$ — яркостной температуры поверхности, полученной по результатам спутниковых съёмки, с многолетними временными рядами срочных температур $t(x^m, y^m)$, зарегистрированных на стандартных метеостанциях. Вначале строилась линейная регрессия между $t(x^m, y^m)$ — температурами воздуха на метеостанциях, зарегистрированными в моменты проведения спутниковых съёмок, и 32 значениями (по числу сцен спутника Landsat, см. таблицу) $t^b(x^m, y^m)$ — яркостной температуры пикселя, соответствующего местоположению метеостанции:

$$t(x^m, y^m) = At^b(x^m, y^m) + B, \quad (2)$$

где A и B — параметры регрессии. Возможность линейной аппроксимации этой связи уравнением (2) обоснована экспериментальными результатами, изложенными в работах (Грищенко, Чернулич, 2015; Kritsuk et al., 2022).

Уравнение (2) отражает взаимосвязь между температурами воздуха и почвы на метеостанции. Параметры регрессии A и B в выражении (2) принимаются постоянными для всей исследуемой территории.

После чего в соответствии с уравнением:

$$t^b(x, y) = C(x, y)t(x^m, y^m) + D(x, y) \quad (3)$$

строилась регрессия между $t^b(x, y)$ и $t(x^m, y^m)$, но уже для каждого пикселя карты-схемы (Kritsuk et al., 2022):

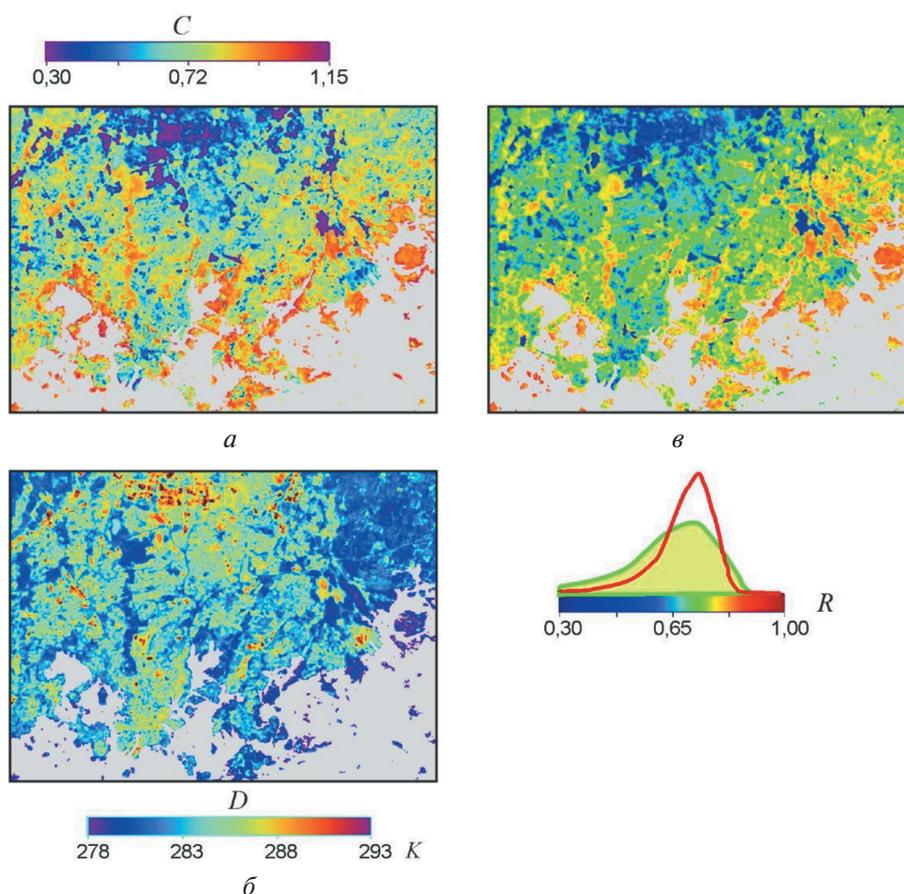


Рис. 1. Карты-схемы параметров регрессии, построенные для г. Хельсинки: a — коэффициент $C(x, y)$ в формуле (3); b — коэффициент $D(x, y)$ в формуле (3); v — коэффициент корреляции временных рядов $t(x^m, y^m)$ с $t^b(x, y)$. Гистограммы над шкалой коэффициента корреляции демонстрируют полученные различия. Зелёная гистограмма (с заливкой) построена по исходной температуре $t^b(x, y)$, красная — по модифицированной $t^{bm}(x, y)$. Серым цветом на картах-схемах показана акватория Финского зал.

Уравнение (3) отражает пространственное распределение взаимосвязи $t(x^m, y^m)$ и $t^b(x, y)$. Как следует из выражения (3), параметры регрессии определяются для каждого пикселя карты-схемы (рис. 1а, б, см. с. 26), а надёжность связи отражается картой-схемой коэффициента корреляции (рис. 1в).

Распространяя уравнение (2) на всю исследуемую территорию в виде:

$$t(x, y) = At^b(x, y) + B \quad (2a)$$

и принимая во внимание формулу (3), температуру воздуха в каждой точке территории на момент съёмки $t(x, y)$ можно найти из выражения:

$$t(x, y, \tau) = F(x, y)t(x^m, y^m, \tau) + G(x, y), \quad (4)$$

где $F(x, y) = AC(x, y)$; $G(x, y) = AD(x, y) + B$.

Необходимо отметить, что спутники серии Landsat выполняют съёмку Хельсинки в стандартном режиме утром в районе 11:00. Естественно, что $t(x, y)$ — температура воздуха, полученная для утреннего времени, отличается от $\bar{t}(x, y)$ — среднесуточной температуры воздуха, которая необходима для расчётов риска превышения T^{MMT} . Вследствие этого для спутникового картирования $\bar{t}(x, y)$ предложено модифицировать $t^b(x, y)$ с помощью $t^b(x^w, y^w, \tau_i)$ — фиксированного для каждой сцены среднего значения яркостной температуры водной поверхности внутреннего водоёма, имеющего высокую тепловую инерцию и, соответственно, меньшие амплитуды суточных колебаний температуры. Поэтому предложено следующее выражение для модификации яркостной температуры $t^{bm}(x, y)$:

$$t^{bm}(x, y) = 0,6t^b(x, y) + 0,4t^b(x^w, y^w), \quad (5)$$

где x^w, y^w — координаты участка водной поверхности, выбранного в качестве опорного. Подбор коэффициентов в формуле (5) выполнен на основе «минимизации ошибки» регрессии (3), а точнее «максимизации» моды распределения соответствующего коэффициента корреляции (см. рис. 1в).

Далее, на основе гистограммы $r_f(x^m, y^m)$ находилась её аппроксимация полиномом шестой степени. В результате в непрерывной форме была представлена r_a — плотность вероятности $\bar{t}(x^m, y^m)$:

$$r_a[\bar{t}(x^m, y^m)] = \sum_{i=0}^6 a_i \bar{t}^i(x^m, y^m). \quad (6)$$

Для оценки $R(x, y)$ — риска превышения $\bar{t}(x, y)$ над T^{MMT} — в каждой точке (x, y) карты из выражения (2) по формуле (4) находилась $\bar{t}_{eqv}(x^m, y^m)$ — эквивалентная среднесуточная температура на метеостанции, которой в точке с координатами (x, y) соответствовала температура $\bar{t}(x, y) = T^{MMT} = 16,7^\circ\text{C}$:

$$\bar{t}_{eqv}(x, y) = \frac{T^{MMT} - G(x, y)}{F(x, y)}.$$

Далее, с использованием аппроксимации (6) полный риск (вероятность) превышения $\bar{t}(x, y)$ над T^{MMT} находился как:

$$R(x, y) = \int_{T^{MMT}}^{\bar{t}=27^\circ\text{C}} r_a[\bar{t}_{eqv}(x, y)] d\bar{t}_{eqv}.$$

Смысл этой операции заключается в том, чтобы от встречаемости среднесуточных значений температуры воздуха, рассчитанных по наблюдаемым на одной или нескольких метеостанциях статистически представительным временным рядам среднесуточной температуры воздуха, перейти к пространственному распределению рисков (вероятностей) превышения T^{MMT} среднесуточными температурами воздуха на всей картируемой территории.

Конечным продуктом стала карта $R(x, y)$ риска превышения среднесуточной температуры воздуха над T^{MMT} (рис. 2, см. с. 28).

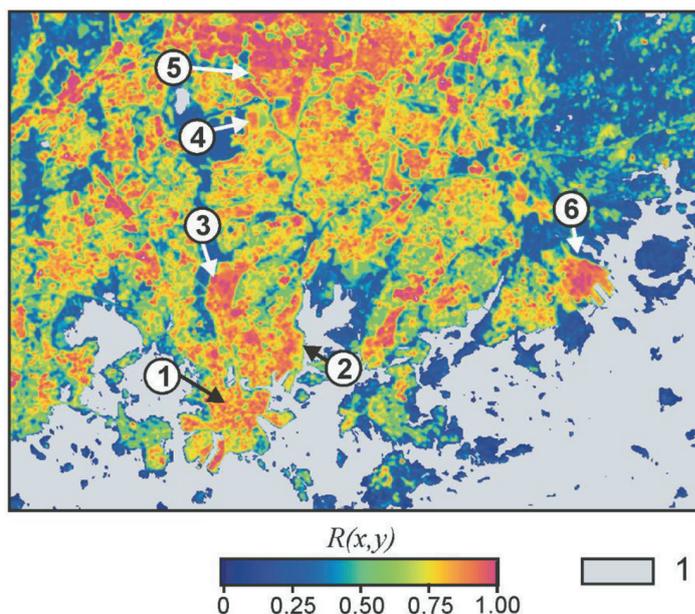


Рис. 2. Карта-схема риска (вероятности) превышения среднесуточной температуры воздуха над температурой минимальной смертности $T^{\text{ММТ}} = 16,7^\circ\text{C}$, составленная для г. Хельсинки. Эпоха: 2007–2019 гг. Условные обозначения: 1 — акватории; значения остальных цифр см. в тексте

Обсуждение результатов

На карте (см. рис. 2) обращают на себя внимание несколько районов высокого риска перегрева, близкого к 1,0, т. е. практически каждый год среднесуточная температура воздуха превышает $T^{\text{ММТ}} = 16,7^\circ\text{C}$. Например, исторический район Хельсинки характеризуется высоким риском перегрева, близким к 1,0 (1 на рис. 2).

В пределах районов Сувилахти (*англ. Suvilahti*) и Арабия (*англ. Arabia*) вдоль берега расположена протяжённая область высокого риска перегрева (2 на рис. 2). Северная её часть застроена современными многоэтажными зданиями (1 на рис. 3а, см. с. 29), а южная представляет собой береговую зону со стоянками маломерных судов и различными мелкими предприятиями, в том числе складскими и перерабатывающими многообразные отходы (2 на рис. 3а).

Высоким риском перегрева выделяется территория, на которой расположены сортировочная железнодорожная станция и депо (3 на рис. 2 и 3б).

Обширный район высокого риска перегрева городской среды расположен на севере Хельсинки (5 на рис. 2), включающий в себя аэропорт Хельсинки-Вантаа, различные грузовые терминалы, например складские помещения и офисы группы компаний Posti (3 на рис. 3в), крыши которых нагреваются солнцем из-за низкого альбедо. Там же расположена частная парковка (4 на рис. 3в) — обширная заасфальтированная территория с плотным расположением автомобилей, покрашенных тёмной краской. Тонкие металлические листы корпусов автомобилей из-за низкой эффективной тепловой инерции способствуют быстрому интенсивному нагреву под действием инсоляции (Горный и др., 1993, 2020). Все приведённые на рис. 3 участки характеризуются отсутствием или малым количеством зелёных насаждений, а следовательно, и отсутствием охлаждающего влияния транспирации.

Обращает на себя внимание высокий уровень риска перегрева в грузовом порту Гавань Вуосаари (*англ. Vuosaari Harbour*) (6 на рис. 2), обслуживающем контейнерные перевозки (в том числе и типа ро-ро (*от англ. roll-on/roll-off*)), а также выполняющем транспортировку пассажиров. Очень высокий риск перегрева не может считаться артефактом, обусловленным изменением природного ландшафта в результате строительства, так как порт Гавань Вуосаари был введён в эксплуатацию в 2008 г., т. е. до начала спутниковых съёмок (2009 г., см. таблицу), которые использованы для картирования риска перегрева. Соответственно, высокие значения

риска перегрева в порту не могут быть обусловлены искажением регрессии (3), к которому приводит быстрая изменчивость ландшафта, как, например, на участке 4 на *рис. 2*, где расположены сельскохозяйственные угодья. Проведение сельхозработ (вспашка, сбор урожая) кардинально меняет температуру земной поверхности и тем самым нарушает угол наклона регрессии (3) (*рис. 4*, см. с. 30).

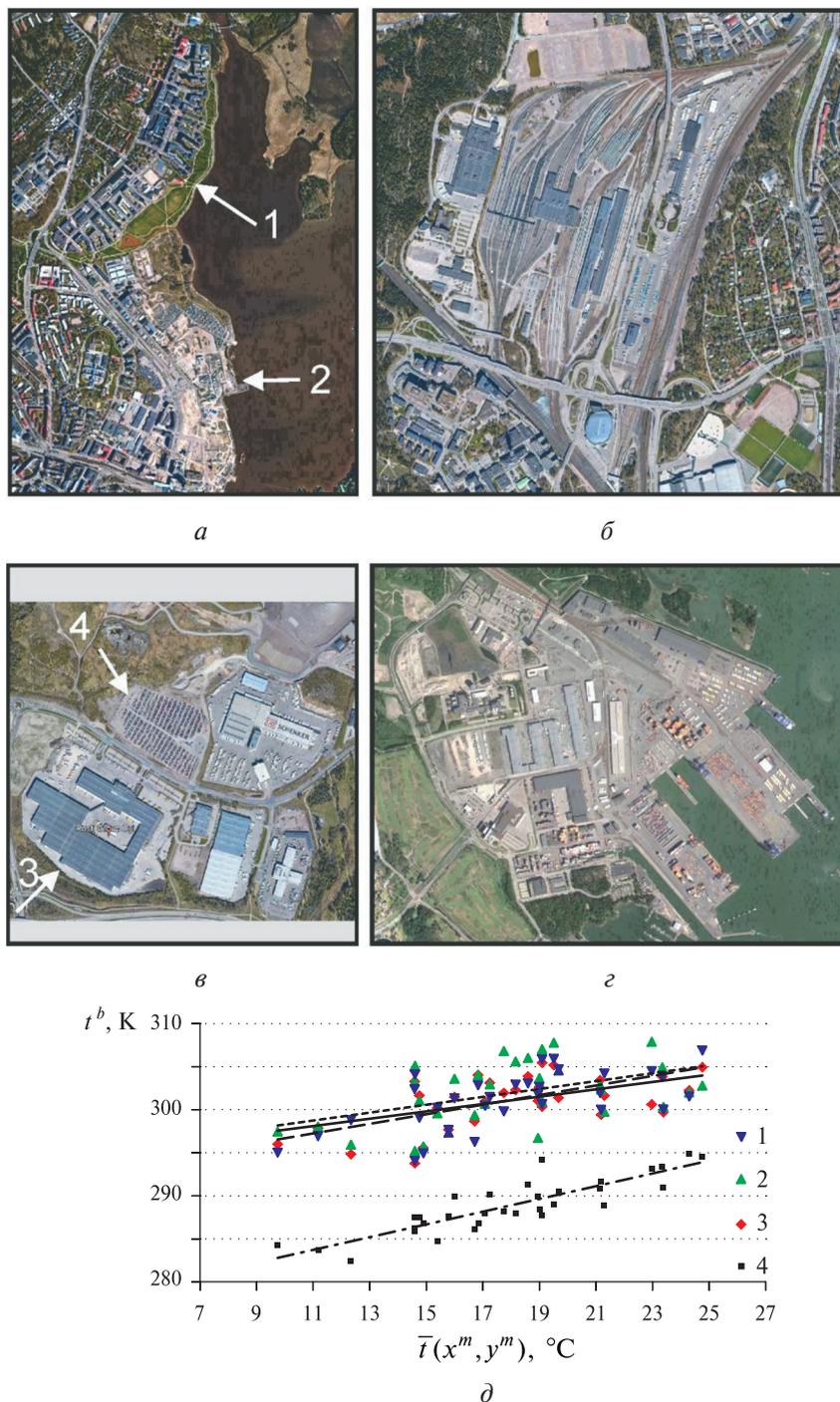


Рис. 3. Фрагменты космических снимков (сервис Google Планета Земля (*англ.* Google Earth)) территории г. Хельсинки с высоким риском перегрева: *а* — районы Сувилахти и Арабия (2 на *рис. 2*); *б* — сортировочная станция, железнодорожные депо (3 на *рис. 2*); *в* — район аэропорта Хельсинки-Вантаа (5 на *рис. 2*); *г* — Гавань Вуосаари (6 на *рис. 2*); *д* — регрессия яркостной температуры поверхности со среднесуточной температурой воздуха на метеостанции (*внизу*). 1 — морской порт Гавань Вуосаари; 2 — район аэропорта Хельсинки-Вантаа; 3 — сортировочная станция, железнодорожные депо; 4 — метеостанция

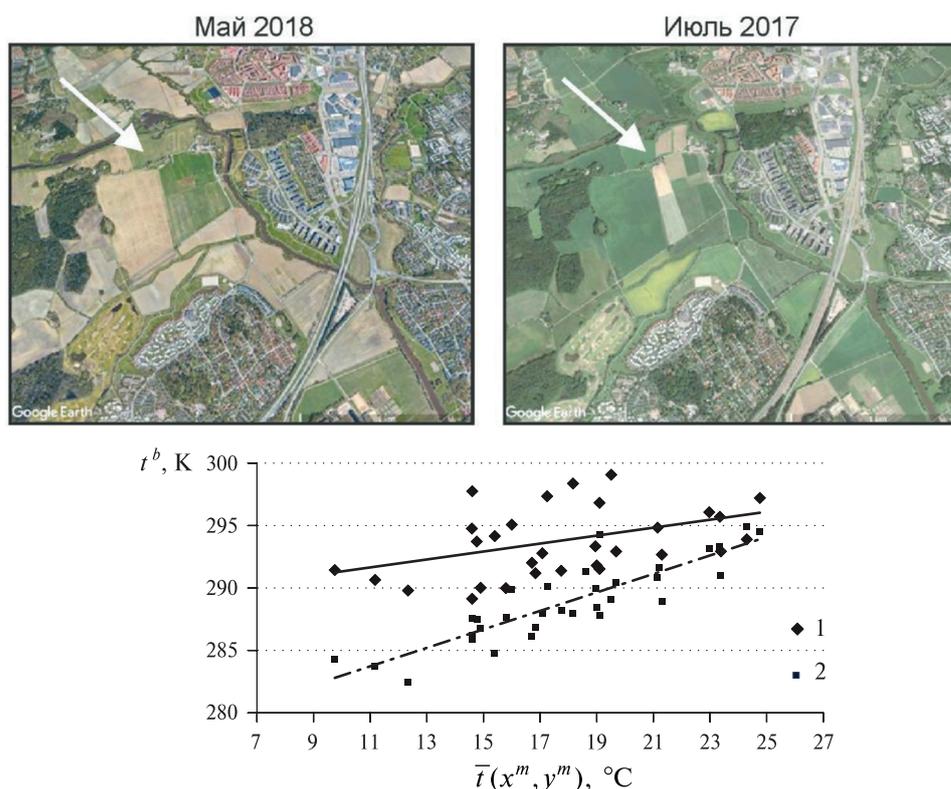


Рис. 4. Фрагменты космических снимков (Google Earth) сельскохозяйственной территории г. Хельсинки (вверху). Графики регрессий яркостной температуры поверхности со среднесуточной температурой воздуха на метеостанции (внизу). 1 — сельскохозяйственное поле (4 на рис. 2) (показано стрелками на разносезонных космических снимках вверху); 2 — городская метеостанция

Скорее всего, интенсивный перегрев этой территории вызван отсутствием охлаждающего влияния растительного покрова, большой площадью кровель с низким альbedo поверхности и забетонированных или асфальтированных территорий (этот вопрос нами исследован ранее в работах (Горный и др., 2017, 2020)). Кроме того, на территории порта складировается большое количество контейнеров, уровень нагрева которых должен быть близок к чрезвычайно интенсивному нагреву железных крыш старых домов в Санкт-Петербурге. Это вызвано низкой эффективной тепловой инерцией железных крыш (Горный и др., 2020), а соответственно, и контейнеров, покрытых тонкими металлическими листами. К интенсивному солнечному нагреву приводит и низкое альbedo поверхности контейнеров, покрашенных в тёмные цвета (рис. 3г). Хотя уже сейчас контейнеры типа ро-ро (см. крайнюю юго-восточную часть порта на рис. 3г) окрашиваются светлой краской с высоким альbedo поверхности, что явно снижает нагрев этих контейнеров солнцем.

Преимуществом разработанного метода построения карт риска перегрева температуры воздуха перед уже известными методами, использующими многомерную корреляцию или прямую корреляцию с многочисленными наземными измерениями температуры воздуха (Ho et al., 2015–2017; Srivanit, Nokao, 2012), представляется меньшая трудоёмкость. В предложенном методе для получения статистического распределения температуры воздуха в каждом пикселе карты для последующего расчёта риска перегрева не требуется построения большого, статистически представительного числа карт температуры воздуха. Для этого используется линейная связь между температурой воздуха, наблюдаемой на метеостанции, и температурой воздуха в каждом пикселе строящейся цифровой карты риска перегрева (см. формулу (4)). Срочные наблюдения за температурой воздуха на метеостанции выполняются в течение длительного времени, что легко позволяет построить распределение случайной величины — температуры воздуха на метеостанции. В соответствии с теоремой о том, что линейное преобразование случайной величины не изменяет вида закона её распределения (Корн, Корн, 1973),

становится возможным построение статистического распределения температуры воздуха в каждом пикселе карты. Это значительно упрощает спутниковое картирование риска перегрева температуры воздуха путём комплексирования пространственных спутниковых данных с временным рядом наблюдений за температурой воздуха, полученным на метеостанции.

Заключение

В заключение следует отметить, что разработанный нами подход к спутниковому картированию температуры воздуха (Kritsuk et al., 2022), основанный на комплексировании пространственно-временного распределения температуры, модернизирован для случая картирования среднесуточной температуры воздуха. Это открыло возможность для разработки и реализации алгоритма и методики спутникового картирования риска (вероятности) превышения среднесуточной температуры воздуха над температурой минимальной смертности $T^{ММТ}$.

Построение карты $R(x, y)$ риска превышения среднесуточной температурой воздуха температуры минимальной смертности позволило выявить области высокого риска перегрева приземного воздуха в районах исторической застройки и в пределах производственно-транспортных функциональных зон.

Дальнейшее развитие этого направления применения космической тепловой съёмки предполагается направить на разработку алгоритмов и методики картирования смертности населения от перегрева приземного воздуха и вызванного этим экономического ущерба.

Литература

1. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съёмка. М.: Недра, 1993. 128 с.
2. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский Н. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съёмок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66.
3. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Прогноз температуры поверхности городской среды Санкт-Петербурга на основе спутникового картирования теплофизических свойств // Всероссийская науч. конф. с международ. участием «Земля и космос» к столетию акад. РАН К. Я. Кондратьева: сб. ст. 2020. С. 14–21.
4. Грищенко М. Ю., Чернулич К. К. Расчёт значений температуры воздуха по значениям температуры земной поверхности, полученным по тепловым снимкам (на примере Южно-Курильского района) // Региональные проблемы дистанц. зондирования Земли: материалы 2-й Международ. науч. конф. 22–25 сент. 2015, Красноярск / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. 2015. С. 251–255.
5. Koppe K., Kovats S., Jenkinson D., Menzies B. Periods of intense heat: threats and response measures / Всемир. организация здравоохранения. Европ. регион. бюро. 2005. Сер. «Здоровье и глобальное изменение окружающей среды». № 2. 122 p. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/276740>.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: Для научных работников и инженеров. 2-е изд. / пер. с англ. М.: Наука, 1973. 832 с.
7. Крицук С. Г., Горный В. И., Латыпов И. Ш., Павловский А. А., Тронин А. А. Спутниковое картирование риска перегрева поверхности городской среды (на примере Санкт-Петербурга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 34–44. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44.
8. Оценка риска и ущерба от климатических изменений, влияющих на повышение уровня заболеваемости и смертности в группах населения повышенного риска: Методические рекомендации. М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 48 с.
9. Allen M. R., Dube O. P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K. Global warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland, 2018. 630 p. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf.

10. *Bornstein R. D.* Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City // *J. Applied Meteorology*. 1968. V. 7. No. 4. P. 575–582.
11. *Chittaranjan A.* Understanding relative risk, odds ratio, and related terms: as simple as it can get // *J. Clinical Psychiatry*. 2015. V. 76(7). P. e857–e861. DOI: 10.4088/JCP.15f10150. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26231012>.
12. *Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varentsov M., Rozinkina I., Rivin G., Blinov D., Wouters H., Schulz J.-P., Schättler U., Bassani F., Demuzere M., Repola F.* Evaluating the Urban Canopy Scheme TERRA_URB in the COSMO Model for Selected European Cities // *Atmosphere*. 2021. V. 12. Art. No. 237. 24 p. <https://doi.org/10.3390/atmos12020237>.
13. *Geletič J., Lehnert M., Krč P., Resler J., Krayenhoff E. S.* High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic // *Atmosphere*. 2021. V. 12. Art. No. 175. 28 p. <https://doi.org/10.3390/atmos12020175>.
14. *Gutierrez E., Gonzalez J. E., Martilli A., Bornstein R., Arend M.* Simulations of a Heat-Wave Event in New York City Using a Multilayer Urban Parameterization // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2015. V. 54. P. 283–301. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0028.1.
15. *Ho H. C., Knudby A., Huang W.* Spatial Framework to Map Heat Health Risks at Multiple Scales // *Intern. J. Environmental Research and Public Health*. 2015. V. 12. P. 16110–16123. DOI: 10.3390/ijerph121215046.
16. *Ho H. C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M.* A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area // *Science of the Total Environment*. 2016. V. 544. P. 929–938. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.021>.
17. *Ho H. C., Knudby A., Walker B. B., Henderson S. B.* Delineation of Spatial Variability in the Temperature-Mortality Relationship on Extremely Hot Days in Greater Vancouver, Canada // *Environmental Health Perspectives*. 2017. V. 125. No. 1. P. 66–75. DOI: 10.1289/EHP224.
18. *Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Davidan T. A., Latypov I. Sh., Manvelova A. V., Konstantinov P. I., Tronin A., Varentsov M. I., Vasiliev M.* Satellite mapping of air temperature under polar night conditions // *Geo-spatial Information Science*. 2022. P. 325–336. DOI: 10.1080/10095020.2021.2003166.
19. *Oke T. R., Johnson G. T., Steyn D. G., Watson I. D.* Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night part 2: Diagnosis of causation // *Boundary-Layer Meteorology*. 1991. V. 56. P. 339–358. doi.org/10.1007/BF00119211.
20. *Price J. C.* Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data // *Monthly Weather Review*. 1979. V. 107. P. 1554–1557. [doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2).
21. *Ruuhela R., Jylhä K., Lanki T., Tiittanen P., Matzarakis A.* Biometeorological Assessment of Mortality Related to Extreme Temperatures in Helsinki Region, Finland, 1972–2014 // *Intern. J. Environmental Research and Public Health*. 2017. V. 14. Art. No. 944. 19 p. DOI: 10.3390/ijerph14080944.
22. *Ruuhela R., Votsis A., Kukkonen J., Jylhä K., Kankaanpää S., Perrels A.* Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves // *Atmosphere*. 2021. V. 12. Art. No. 46. 13 p. doi.org/10.3390/atmos12010046.
23. *Srivanit M., Hokao K.* Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: An Application for the City of Bangkok, Thailand // *J. Architectural and Planning Research and Studies*. 2012. No. 9. P. 83–100. URL: https://www.researchgate.net/publication/286134867_.
24. *Yu X., Guo X., Wu Zh.* Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS — Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829.

Satellite risk mapping of urban air overheating (by the example of Helsinki, Finland)

V. I. Gornyy, S. G. Kritsuk, I. Sh. Latypov, A. B. Manvelova, A. A. Tronin

*Saint Petersburg Federal Research Center RAS,
Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

An algorithm has been proposed and a methodology has been developed for satellite mapping of risks (probabilities) of exceeding the minimum mortality temperature by the average daily air temperature. Knowledge of these risks opens the possibility to estimate the economic damage due to an increase in the number of deaths caused by overheating. The urgency of the problem is determined by the observed global warming. The city of Helsinki (Finland) was chosen as the object of study. The materials for the study were a series of 32 scenes from Landsat series satellites obtained in the IR thermal range of the spectrum and the results of standard urgent observations at urban weather stations WMO ID 2978 and METAR EFHK Vantaa (airport) for the period 2007–2019. The result was a map of the risk of exceeding the temperature of the minimum mortality because of overheating of the urban environment, built up for the city of Helsinki. The heterogeneity of the spatial distribution of risks is shown. Industrial areas are characterized by high risks of overheating of the urban environment, and recreational areas are characterized by minimal risks. It is noted that the results obtained can be used as information support for the management decision-making system aimed at early fending off threats to environmental safety due to overheating of the urban environment because of global warming.

Keywords: city, heat island, satellite, air temperature, mapping, minimum mortality temperature, risk

Accepted: 05.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34

References

1. Gornyy V. I., Shilin B. V., Yasinskii G. I., *Teplovaya aerokosmicheskaya s'emka* (Thermal aerospace and satellite flown survey survey), Moscow: Nedra, 1993, 128 p. (in Russian).
2. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Kiselev A. V., Brovkina O. V., Fillippovich V. E., Stankevich S. A., Lubskii N. S., Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 51–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66.
3. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Forecast of the surface temperature of the urban environment of St. Petersburg, based on satellite mapping of thermophysical properties, *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Zemlya i kosmos" k stoletiyu akademika RAN K. Ya. Kondrat'eva* (All-Russia Scientific Conf. with Intern. Participation "Earth and Space" Dedicated to the Centenary of Academician of the Russian Academy of Sciences K. Ya. Kondratiev), Proc. Conf., 2020, pp. 14–21 (in Russian).
4. Grishchenko M. Yu., Chernulich K. K., Calculation of the air temperature values using the surface temperature values obtained by the thermal imagery (Case of Yuzhno-Kurilsk District), *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 2-i Mezhdunarodnoi nauchoi konferentsii* (Regional problems of remote sensing of the Earth: Proc. Conf.), 22–25 Sept. 2015, Krasnoyarsk, E. A. Vaganov, M. V. Noskov (eds.), 2015, pp. 251–255 (in Russian).
5. Koppe Ch., Kovats S., Jendritzky G., Menne B., *Heat-waves: risks and responses*, World Health Organization, Regional Office for Europe, 2005, Ser. Health and Global Environmental Change, No. 2, 124 p., available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107552>.
6. Korn G. A., Korn T. M., *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*, McGraw Hill Book Company, 1968, 926 p.
7. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Pavlovskii A. A., Tronin A. A., Satellite risk mapping of urban surface overheating (by the example of Saint Petersburg), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 34–44 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44.

8. *Otsenka riska i ushcherba ot klimaticheskikh izmenenii, vliyayushchikh na povyshenie urovnya zabolevayemosti i smernosti v gruppakh naseleniya povyshennogo riska: Metodicheskie rekomendatsii* (Assessing the risk and damage from climate change affecting the increase in morbidity and mortality in high-risk population groups: Guidelines), Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2012, 48 p. (in Russian).
9. Allen M. R., Dube O. P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Muluetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K., *Global warming of 1.5 °C, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Geneva, Switzerland, 2018, 630 p., available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf.
10. Bornstein R. D., Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City, *J. Applied Meteorology*, 1968, Vol. 7, No. 4, pp. 575–582.
11. Chittaranjan A., Understanding relative risk, odds ratio, and related terms: as simple as it can get, *J. Clinical Psychiatry*, 2015, Vol. 76(7), pp. e857–e861, DOI: 10.4088/JCP.15f10150, available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26231012>.
12. Garbero V., Milelli M., Bucchignani E., Mercogliano P., Varentsov M., Rozinkina I., Rivin G., Blinov D., Wouters H., Schulz J.-P., Schättler U., Bassani F., Demuzere M., Repola F., Evaluating the Urban Canopy Scheme TERRA_URB in the COSMO Model for Selected European Cities, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, Art. No. 237, 24 p., <https://doi.org/10.3390/atmos12020237>.
13. Geletič J., Lehnert M., Krč P., Resler J., Krayenhoff E. S., High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, Art. No. 175, 28 p., <https://doi.org/10.3390/atmos12020175>.
14. Gutierrez E., Gonzalez J. E., Martilli A., Bornstein R., Arend M., Simulations of a Heat-Wave Event in New York City Using a Multilayer Urban Parameterization, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2015, Vol. 54, pp. 283–301, DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0028.1.
15. Ho H. C., Knudby A., Huang W., Spatial Framework to Map Heat Health Risks at Multiple Scales, *Intern. J. Environmental Research and Public Health*, 2015, Vol. 12, pp. 16110–16123, DOI: 10.3390/ijerph121215046.
16. Ho H. C., Knudby A., Xu Y., Hodul M., Aminipouri M., A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area, *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 544, pp. 929–938, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.021>.
17. Ho H. C., Knudby A., Walker B. B., Henderson S. B., Delineation of Spatial Variability in the Temperature-Mortality Relationship on Extremely Hot Days in Greater Vancouver, Canada, *Environmental Health Perspectives*, 2017, Vol. 125, No. 1, pp. 66–75, DOI: 10.1289/EHP224.
18. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Davidan T. A., Latypov I. Sh., Manvelova A. V., Konstantinov P. I., Tronin A., Varentsov M. I., Vasiliev M., Satellite mapping of air temperature under polar night conditions, *Geo-Spatial Information Science*, 2022, pp. 325–336, DOI: 10.1080/10095020.2021.2003166.
19. Oke T. R., Johnson G. T., Steyn D. G., Watson I. D., Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night part 2: Diagnosis of causation, *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, Vol. 56, pp. 339–358, doi.org/10.1007/BF00119211.
20. Price J. C., Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data, *Monthly Weather Review*, 1979, Vol. 107, pp. 1554–1557, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2).
21. Ruuhela R., Jylhä K., Lanki T., Tiittanen P., Matzarakis A., Biometeorological Assessment of Mortality Related to Extreme Temperatures in Helsinki Region, Finland, 1972–2014, *Intern. J. Environmental Research and Public Health*, 2017, Vol. 14, Art. No. 944, 19 p., DOI: 10.3390/ijerph14080944.
22. Ruuhela R., Votsis A., Kukkonen J., Jylhä K., Kankaanpää S., Perrels A., Temperature-Related Mortality in Helsinki Compared to Its Surrounding Region Over Two Decades, with Special Emphasis on Intensive Heatwaves, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, Art. No. 46, 13 p., <https://doi.org/10.3390/atmos12010046>.
23. Srivanit M., Hokao K., Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: An Application for the City of Bangkok, Thailand, *J. Architectural and Planning Research and Studies*, 2012, No. 9, pp. 83–100, available at: https://www.researchgate.net/publication/286134867_.
24. Yu X., Guo X., Wu Zh., Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS — Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 9829–9852, DOI: 10.3390/rs6109829.