

Спутниковое картирование экономического ущерба от смертей городского населения, вызванных перегревом (на примере г. Хельсинки, Финляндия)

В. И. Горный, С. Г. Крицук, И. Ш. Латыпов, 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*

Разработана методика спутникового картирования удельного количества смертей и ущерба от перегрева городской среды. Знание этих эпидемиологических и экономических показателей необходимо для информационной поддержки системы принятия управленческих решений, направленных на парирование угроз здоровью населения, вызванных потеплением климата. В качестве объекта исследования выбран г. Хельсинки (Финляндия). Материалом стала серия из 32 сцен, полученных за период 2007–2019 гг. спутниками серии Landsat, а также результаты стандартных срочных наблюдений на метеостанциях. Приведено теоретическое обоснование алгоритма спутникового картирования удельного количества смертей и удельного экономического ущерба, вызванных перегревом городской среды. Окончательным результатом стали цифровые карты удельного количества смертей, вызванных перегревом городской среды, и удельной плотности экономического ущерба, обусловленного этими смертями. Продемонстрирована неоднородность пространственного распределения смертности и ущерба. Показано, что в г. Хельсинки высокой потенциальной смертностью от перегрева городской среды характеризуется не только исторический центр города с плотной застройкой, но и районы малоэтажной застройки, расположенные вдали от Финского зал. Высказана гипотеза, что этот феномен обусловлен охлаждающим влиянием на городскую среду исторического центра г. Хельсинки холодных воздушных масс Финского зал.

Ключевые слова: город, спутник, картирование, температура, перегрев, риск, смертность, ущерб

Одобрена к печати: 02.06.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-35-46

Введение

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., 2004; Оценка..., 2012).

Для снижения экономического ущерба от возрастания смертности населения, вызванной перегревом городской среды, необходима объективная и достоверная детальная информация о пространственном распределении ожидаемого количества смертей и экономического ущерба. В связи с этим требуется подготовка детальных карт потенциального экономического ущерба, вызванного перегревом городской среды, в качестве элемента информационной поддержки принятия управленческих решений, направленных на парирование негативных последствий потепления климата.

В последние годы появились работы по построению карт смертности от перегрева городской среды по материалам тепловых съёмок спутников Terra/Aqua (MODIS) (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), наземных измерений температуры воздуха и других характеристик городской среды, статистических данных о количестве смертей городского населения, случившихся при различной температуре воздуха (Ho et al., 2015; Smargiassi et al., 2009). Такой методический подход к построению цифровых карт (ЦК) смертности имеет недостатки. Во-первых, для принятия управленческих решений нужна более детальная пространственная информация, чем 1×1 км (Ho et al., 2015; Smargiassi et al., 2009). ЦК строится на

определённый момент времени, что не позволяет получить статистически усреднённые (потенциальные) за длительный период данные. Во-вторых, такое построение большого количества карт температуры воздуха на основе многолетнего функционирования статистически представительной наземной сети метеонаблюдений отодвигает горизонт получения результатов на многие годы. Математическое же моделирование многолетних ЦК температуры городов возможно, но потребует огромного объёма компьютерного времени и верификации моделей.

Перспективным направлением детального картирования эколого-экономического ущерба от повышенной смертности населения представляется применение многолетних архивных материалов спутниковых съёмки высокого пространственного разрешения. В предыдущей нашей статье (Горный и др., 2022) изложена методика построения карт рисков (вероятностей) превышения температуры минимальной смертности на основе материалов ретроспективных эпизодических съёмки спутниками серии Landsat и непрерывных временных рядов температуры воздуха, наблюдаемых на стандартных метеостанциях.

В настоящей статье делается попытка перехода от спутникового картирования риска к спутниковому картированию удельного количества смертей и экономического ущерба, вызванных перегревом городской среды.

С учётом вышесказанного цель работы заключается в разработке методики крупномасштабного спутникового картирования потенциальных смертности населения и экономического ущерба, вызванных перегревом городской среды.

Материалы и методы

Объект исследования

В качестве объекта (тестового участка) исследования был выбран г. Хельсинки (Финляндия), поскольку об этом городе в сети интернет доступна вся необходимая информация: детальная карта плотности населения (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>), многолетний ряд наблюдений за среднесуточной температурой воздуха на городской метеостанции (<https://rp5.ru>), зависимость относительного риска смертности от среднесуточной температуры воздуха (Ruuhela et al., 2017, 2021). Все эти данные были необходимы для картирования смертей, вызванных перегревом.

Материалы

При построении ЦК удельного риска смерти в результате перегрева городской среды Хельсинки использованы 32-летние сцены, полученные спутниками серии Landsat в инфракрасном (ИК) тепловом диапазоне спектра (пространственное разрешение ИК-тепловых каналов ~100 м, <https://earthexplorer.usgs.gov>) (табл. 1), и временные ряды значений среднесуточной температуры, зарегистрированных в городе в период с 2007 по 2019 г. на метеостанциях 2978 (по индексу Всемирной метеорологической организации) и аэропорта Хельсинки-Вантаа (англ. Helsinki-Vantaa) (идентификатор METAR EFHK) (<https://rp5.ru>).

Таблица 1. Использованные спутниковые материалы

№	Спутник	Дата	$\bar{t}(x^m, y^m)$, °C	№	Спутник	Дата	$\bar{t}(x^m, y^m)$, °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

Окончание табл. 1

№	Спутник	Дата	$\bar{t}(x^m, y^m)$, °С	№	Спутник	Дата	$\bar{t}(x^m, y^m)$, °С
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	Landsat-7	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		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	
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: $\bar{t}(x^m, y^m)$ — среднесуточная температура воздуха на метеостанции.

Необходимые данные о годовом количестве смертей взяты с сайта статистического бюро Финляндии (<https://t.co/VBlpGw4sKA?amp=1>) (табл. 2). Количество смертей от перегрева в Хельсинки (см. табл. 2) заимствовано из работы (Ruuhela et al., 2021), также как и зависимость $RR(\bar{t})$ относительного риска смертности от среднесуточной температуры воздуха \bar{t} (Коппе и др., 2004) (см. рис. 2), полученная для Хельсинки.*

Таблица 2. Данные официальной статистики о количестве смертей в г. Хельсинки, вызванных тепловыми волнами, когда среднесуточная температура превышала +20 °С (Ruuhela et al., 2021)

Годы	Количество смертей от всех причин*	Годовое количество смертей, вызванных перегревом**	Численность населения***
2003	5163	52/56	559 330
2010	5109	86/93	588 549
2014	5049	65/67	620 715
2018	5191	72/78	648 042

* https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/en/StatFin/StatFin__vrm__kuol/statfin_kuol_pxt_12au.px/table/tableViewLayout1/.

** Приведены нижняя/верхняя оценки количества смертей от перегрева, опубликованные в работе (Ruuhela et al., 2021).

*** https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/en/StatFin/StatFin__vrm__kuol/statfin_kuol_pxt_12au.px/table/tableViewLayout1/.

Основные соотношения

Характеристики, позволяющие принимать информационно-обоснованные управленческие решения, направленные на снижение ущерба от роста смертности населения городов, вызванной перегревом городской среды, следующие:

- R (доли единицы) — риск (вероятность) превышения среднесуточной температурой воздуха \bar{t} (°С) среднесуточной температуры воздуха $T^{\text{ММТ}}$ (англ. minimum mortality rate) (°С), соответствующей минимальной смертности населения от перегрева. $T^{\text{ММТ}}$ характеризует адаптированность населения к местному климату (Yin et al., 2019);

* RR — относительный риск события — это отношение вероятности возникновения негативного события для здоровья после воздействия фактора риска к вероятности возникновения этого события в контрольной группе (Chittaranjan, 2015).

- M (смертей/год), $m_{x,y}$ (смертей·год⁻¹·км⁻²) — соответственно годовое количество смертей от перегрева в городе и удельное годовое количество смертей от перегрева, приходящееся на один квадратный километр с координатами (x, y) ;
- L (евро или руб.), $l(x, y)$ (евро/км²) — соответственно полный по городу и удельный экономический ущерб, приходящийся на один квадратный километр с координатами (x, y) , вызванный преждевременными смертями населения от перегрева окружающей среды;
- c (евро/смерть или руб./смерть) — стоимость преждевременной смерти одного человека;
- s (км²/пиксель) — площадь одного пикселя ЦК.

Картирование количества смертей от перегрева

Для оценки количества смертей, вызванных перегревом городской среды, прежде всего необходимо картировать значения срочной и среднесуточной температуры воздуха (Горный и др., 2022; Kritsuk et al., 2022) и иметь зависимость смертности от температуры воздуха. Эта зависимость даётся относительным риском смерти от перегрева $RR(\bar{t})$ (Коппе и др., 2004; Chittaranjan, 2015; Gasparrini et al., 2015; Ruuhela et al., 2017, 2021):

$$RR(\bar{t}) = \frac{r(\bar{t})}{r(T^{\text{ММТ}})}, \quad (1)$$

где $r(\bar{t}) = m(\bar{t})/M$ — вероятность смерти при данной среднесуточной температуре воздуха \bar{t} ; $m(\bar{t})$ (смертей/год) — статистически усреднённое количество смертей в городе, произошедших при \bar{t} ; $r^{\text{ММТ}} = M^{\text{ММТ}}/M$ — вероятность смерти при $T^{\text{ММТ}}$, где $M^{\text{ММТ}}$ — ежегодное количество смертей в городе, которое наблюдается при среднесуточной температуре $T^{\text{ММТ}}$.

Выражая в формуле (1) риски через количество смертей, получаем:

$$RR(\bar{t}) = \frac{m(\bar{t})}{M^{\text{ММТ}}}. \quad (2)$$

Отсюда $RR(\bar{t}) \geq 1$ и показывает во сколько раз возрастает смертность при \bar{t} , превышающей $T^{\text{ММТ}}$.

Для Хельсинки в результате анализа большого объёма статистических данных за период 2000–2018 гг. в работе (Ruuhela et al., 2017) была получена зависимость $RR(\bar{t})$ от среднесуточной температуры на городской метеостанции, которая нами была аппроксимирована полиномом второй степени (рис. 1):

$$\begin{aligned} RR(\bar{t}) &= 0,0061\bar{t}^2 - 0,204\bar{t} + 2,7081 && \text{при } \bar{t} \geq +16,7 \text{ }^\circ\text{C}, \\ RR(\bar{t}) &= 0 && \text{при } \bar{t} < +16,7 \text{ }^\circ\text{C}, \\ R^2 &= 0,9993. \end{aligned} \quad (3)$$

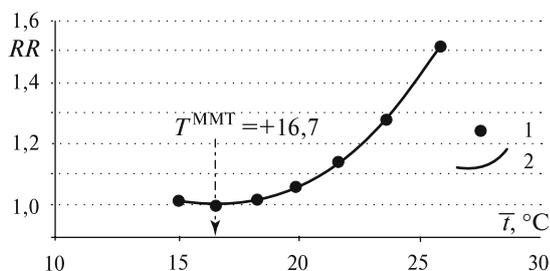


Рис. 1. Зависимость $RR(\bar{t})$ относительного риска смерти, вызванной перегревом, от среднесуточной температуры воздуха; 1 — значения $RR(\bar{t})$ сняты с графика из работы (Ruuhela et al., 2017), 2 — аппроксимационная кривая

Далее, ежегодное количество смертей от перегрева в городе (M) было представлено как интеграл по всему наблюдаемому за годы наблюдений диапазону значений среднесуточной температуры:

$$M = \int_{T^{MMT}}^{t_{\max}} M^{MMT} \cdot RR(\bar{t}) d\bar{t} = M^{MMT} \int_{T^{MMT}}^{t_{\max}} RR(\bar{t}) d\bar{t}. \quad (4)$$

Отсюда:

$$M^{MMT} = \frac{M}{\int_{T^{MMT}}^{t_{\max}} RR(\bar{t}) d\bar{t}}, \quad (5)$$

где t_{\max} — максимальная срочная температура воздуха, зарегистрированная на метеостанции.

Таким образом, если отсутствуют статистические данные о M^{MMT} , то, зная M по данным общегородской медицинской статистики, имея зависимость $RR(\bar{t})$ от температуры (см. выражение (3)) и используя формулу (5), можно оценить значение M^{MMT} .

В предыдущей статье нами изложена методика спутникового картирования $R(x, y)$ риска (вероятности) превышения \bar{t} над T^{MMT} (Горный и др., 2022):

$$R_{x,y} = \int_{T^{MMT}}^{t_{\max}} r_{x,y}^a(\bar{t}_{eqv}) d\bar{t}_{eqv}, \quad (6)$$

где $r_{x,y}^a(\bar{t}_{eqv})$ — аппроксимированная полиномом плотность вероятности от среднесуточной температуры, в данном случае от \bar{t}_{eqv} (°C) — эквивалентной температуры на метеостанции. Эквивалентная среднесуточная температура воздуха — это та температура воздуха на метеостанции, которой в точке с координатами (x, y) в один и тот же день соответствовала температура $\bar{t}(x, y)$, т.е. $\bar{t}(x, y, \tau) = \bar{t}_{eqv}(x^m, y^m, \tau)$. Отсюда $m(x, y)$ — статистически усреднённое (потенциальное) за срок проведения съёмки (см. табл. 1) годовое количество смертей из-за перегрева на площади в 1 км^2 — может быть представлено в виде:

$$m_{x,y} = M^{MMT} \frac{p_{x,y}}{P} \int_{T^{MMT}}^{t_{\max}} r_{x,y}(\bar{t}) \times [RR(\bar{t}) - 1] d\bar{t}, \quad (7)$$

где $r_{x,y}(\bar{t})$ — плотность вероятности появления среднесуточной температуры воздуха в точке с координатами (x, y) , рассчитываемая как $r_{x,y}(\bar{t}) = r_{x,y}^a(\bar{t}_{eqv})$; $p_{x,y}$ (чел./км²) — плотность населения (снимается с цифровой карты (см. рис. 1а)); x, y — координаты цифровой карты; t_{\max} (°C) — максимальная срочная температура в тёплый период года, зарегистрированная на метеостанции; P (чел.) — численность населения города.

Картирование экономического ущерба от смертей, вызванных перегревом

В Скандинавских государствах выполнена оценка экономических потерь от преждевременной смерти. Экономический ущерб от одной преждевременной смерти гражданина Финляндии составляет $c = 619\,000$ евро/смерть (Ulas et al., 2019). Соответственно, удельный годовой ущерб от смертей, вызванных перегревом, может быть оценён умножением ущерба от преждевременной смерти одного человека на потенциальное удельное количество смертей, вызванных перегревом, в пикселе с координатами (x, y) :

$$l_{x,y} = cm_{x,y}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет строить ЦК ущербов и по ним, выделяя отдельные районы, оценивать годовой ущерб по району от смертности, используя выражение:

$$L = l_{x,y}ns,$$

где n — количество пикселей внутри границы оцениваемого района.

Результаты

Конечным продуктом стала ЦК удельных смертностей и экономических ущербов от преждевременной смерти населения в результате перегрева (рис. 2в). В соответствии с выражением (8) имеется линейная зависимость между удельными годовыми количеством смертей от перегрева и ущербом. Поэтому достаточно на одной и той же ЦК дать двойную шкалу (см. рис. 2в).

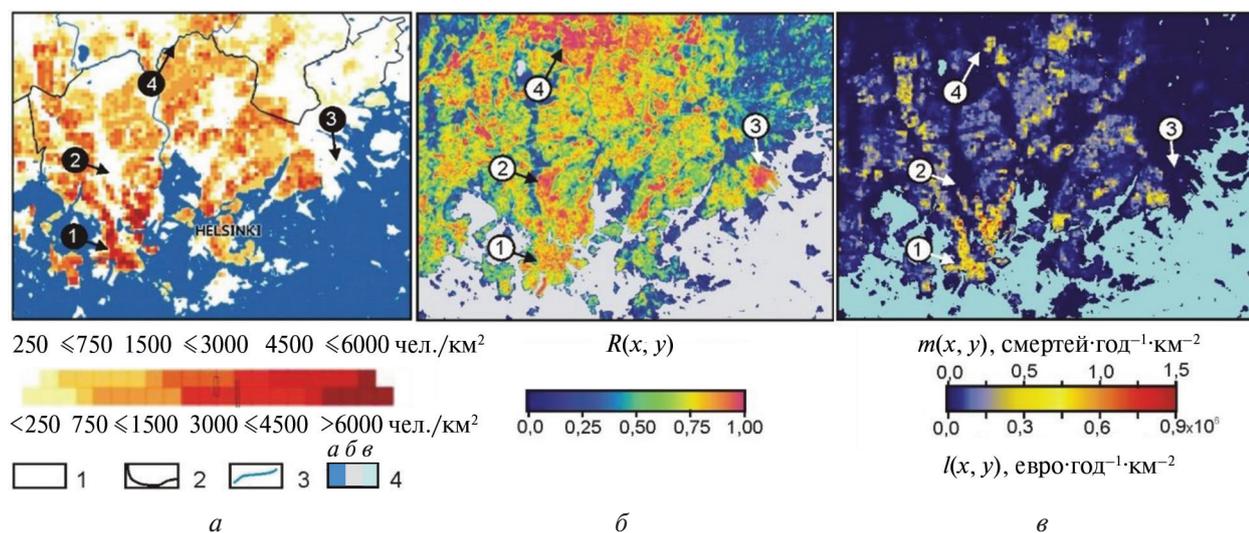


Рис. 2. Цифровые карты г. Хельсинки (эпоха 2009–2020 гг.): а — плотность населения ($p(x, y)$), размер пикселя 1×1 км (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>), 1 — незаселённые территории, 2 — административная граница города, 3 — водотоки, 4 — акватории; б — риск превышения \bar{T} над T^{MMT} (Горный и др., 2022); в — удельная смертность и удельный экономический ущерб от преждевременной смерти населения в результате перегрева, размер пикселя 100×100 м

Обсуждение результатов

Необходимо отметить, что картируемые величины — смертность и экономический ущерб — следует рассматривать как «стационарные», т.е. соответствующие отсутствию суточной миграции населения в пределах города. В дальнейшем, когда будут проведены специальные исследования и получены данные о внутригородской суточной миграции, в итоговые выражения могут быть введены поправочные коэффициенты. Как это сделано, например, в работе (Hua et al., 2020), посвящённой оценке смертности населения от загрязнения воздуха в городах Китая.

Верификация результатов картирования потенциального количества смертей от перегрева в Хельсинки выполнена сравнением общего количества потенциальных смертей, рассчитанного по ЦК (см. рис. 2) для всей площади города, с данными официальной статистики. Полученное с применением методики спутникового картирования значение в 33 потенциальных смерти в год от перегрева (табл. 3) не противоречит значениям, полученным в аномально жаркие годы (см. табл. 2). Например, по оценкам официальной статистики (см. табл. 2), при аномально жарком лете 2010 г. в Хельсинки от перегрева скончалось количество жителей, оцениваемое в диапазоне от 86 до 93 (Ruuhela et al., 2021).

По тем же данным, в 2003 г., когда лето было менее жарким, скончалось от перегрева от 52 до 56 жителей. Эти данные не на много отличаются от полученного нами по результатам спутникового картирования значения в 33 потенциальные смерти в год от перегрева. Это доказывает, что разработанная методика позволяет получать адекватные результаты и может быть использована для информационной поддержки принятия управленческих решений, направленных на парирование угроз здоровью населения городов от глобального потепления климата.

Таблица 3. Количество смертей и экономический ущерб от перегрева городской среды главных административных округов Хельсинки: SMD (англ. Southern Major District, фин. Eteläinen suurpiiri) (1 на рис. 3) и NEMD (англ. North-Eastern Major District, фин. Koillinen suurpiiri) (2 на рис. 3) (по результатам анализа цифровой ЦК (рис. 3))

Характеристика	Административный округ	
	SMD	NEMD
Площадь района (без акваторий)*, км ²	18,1	36,4
Население*, чел.	119 514	100 500
Средний риск превышения $T^{ММТ}$ по району	0,57	0,7
Ежегодное потенциальное количество смертей от перегрева по району, смертей·год ⁻¹ ·район ⁻¹	9,1	11,1
Ежегодное среднее удельное потенциальное количества смертей от перегрева, смертей·год ⁻¹ ·км ⁻²	0,5	0,3
Ежегодный экономический ущерб, вызванный преждевременными смертями от перегрева, евро·год ⁻¹ ·район ⁻¹	5,6·10 ⁶	6,8·10 ⁶
Ежегодный средний удельный потенциальный экономический ущерб, вызванный преждевременными смертями от перегрева, евро·год ⁻¹ ·км ⁻²	0,3·10 ⁶	0,2·10 ⁶
Ежегодный потенциальный экономический ущерб, вызванный преждевременными смертями от перегрева, приходящийся на каждого жителя, евро·год ⁻¹ ·чел. ⁻¹	46,9	67,7
Количество смертей от перегрева по всему городу по результатам спутникового картирования, смертей·город ⁻¹	33	

* Справочник статистических данных Хельсинки, 2020 г. (англ. Statistical Yearbook of Helsinki, 2020).

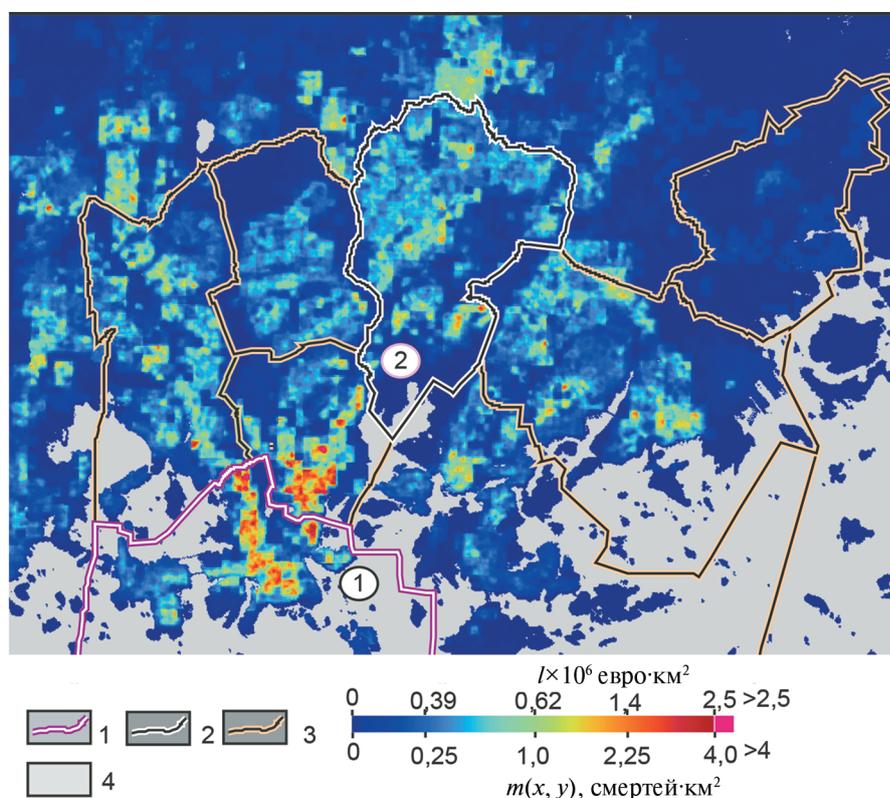


Рис. 3. Цифровая карта потенциальных количества смертей и экономического ущерба от перегрева городской среды г. Хельсинки; 1 — граница района SMD, 2 — граница района NEMD, 3 — границы других главных районов, 4 — акватории

Анализ подготовленных ЦК позволяет отметить следующие закономерности. Укрупнённый район SMD включает в себя исторический центр г. Хельсинки. Наглядно видно (1 на *рис. 3*), что исторический центр (*рис. 4а*) характеризуется высоким удельным количеством смертей от перегрева ($0,5 \text{ смерти} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$, см. *табл. 3*) и, соответственно, высоким ($0,3 \text{ млн евро} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$) средним по району удельным экономическим ущербом, вызванным смертностью от перегрева (см. *табл. 3*), что превышает соответствующие значения этих параметров в районе NEMD (2 на *рис. 3*, см. *табл. 3*).



а

б

Рис. 4. Космические снимки (сервис Google Планета Земля (*англ.* Google Earth)) участков характерных типов застройки укрупнённых районов г. Хельсинки, для которых оценён потенциальный экономический ущерб от перегрева городской среды: *а* — SMD — исторический центр города (1 на *рис. 3*); *б* — NEMD — район в основном коттеджной застройки (2 на *рис. 3*)

На *рис. 4а* видно, что исторический центр города застроен многоэтажными зданиями с тёмными крышами, остальная территория занята также тёмным дорожным покрытием при малом количестве зелёных зон. В противоположность историческому центру район NEMD застроен в основном малоэтажными домами с приусадебными зелёными участками. Тем не менее общее потенциальное количество смертей от перегрева в районе NEMD по результатам спутникового картирования получилось выше, чем в районе SMD, хотя количество жителей в обоих районах почти одинаково (см. *табл. 3*).

Анализ ЦК риска перегрева (см. *рис. 2б*) показал, что и средний риск перегрева (см. *табл. 3*) в районе NEMD выше, чем в районе SMD. Такой результат не соответствует традиционным представлениям о понижении температуры воздуха в районах с большой площадью зелёных зон. В связи с этим была выполнена проверка данного феномена, проведённая на основе материалов съёмок других спутников: Terra/Aqua (MODIS). Для июлей, августов 2010–2018 гг. были получены статистически усреднённые значения температуры поверхности для обоих районов (*табл. 4*). Эти результаты показывают, что в самые тёплые периоды последнего десятилетия средняя температура поверхности в удалённом от Финского зал. районе NEMD почти на два градуса выше, чем в историческом центре г. Хельсинки (см. *табл. 4*), что и определило более высокую среднесуточную температуру воздуха и высокий риск превышения T^{MMT} (см. *рис. 2б*). При этом днём температура в NEMD выше, чем в SMD, а ночью — наоборот. Это объясняется более высокой эффективной тепловой инерцией (меньшая амплитуда суточных колебаний температуры поверхности) (Горный и др., 1993) (см. *табл. 4*) исторической части города, входящей в SMD, по сравнению с коттеджной застройкой в NEMD, имеющей пониженную эффективную тепловую инерцию по сравнению с застройкой центра (Горный и др., 2017б).

Кроме того, охлаждение поверхности SMD может быть вызвано прилегающей с трёх сторон к району SMD акваторией Финского зал. Охлаждению SMD должна способствовать циркуляция воздуха в тепловом острове города, когда над нагретой частью формируются восходящие потоки, а на их место с периферии поступают массы со стороны пригорода (Горный

и др., 2017а; Cotton, Pielke, 2007). При этом воздушные массы со стороны Финского зал. более холодные, чем массы, поступающие в NEMD с суши. Дополнительно необходимо учитывать, что SMD включает в себя ряд крупных ненаселённых островов Финского зал., что снижает средние по всему району значения смертности от перегрева (см. табл. 2).

Таблица 4. Усреднённая за период с 2010 по 2018 г. температура земной поверхности по материалам съёмки спутников Terra/Aqua (MODIS)

Район	Температура земной поверхности, °С			
	Terra (MODIS), день	Aqua (MODIS), ночь	Разность «день – ночь»	Terra/Aqua (MODIS), средняя суточная
SMD	24,7	12,4	12,3	17,0
NEMD	27,9	11,6	16,3	18,8

Окончательно следует отметить, что разработанная методика спутникового картирования количества смертей и экономического ущерба от перегрева позволяет подготовить концентрированные, усреднённые за длительный период данные, которые дают возможность соотносить затраты на озеленение, осветление дорожного покрытия и стен домов, замену обычных кровельных материалов на «холодные» (Dominguez-Delgado et al., 2020; <https://hvacseer.com/how-much-do-cool-roofs-cost/>) с экономическим ущербом от дополнительной смертности населения, вызванной перегревом окружающей среды, и на этой основе принять экономически-обоснованные управленческие решения по снижению негативных последствий изменения климата.

Заключение

В результате исследования разработана методика крупномасштабного спутникового картирования потенциальных удельного количества смертей и удельного экономического ущерба, вызванных перегревом городской среды. Сделано заключение, что эта методика может рассматриваться в качестве инструмента информационной поддержки системы принятия управленческих решений, направленных на парирование угроз здоровью населения городов, возникающих при потеплении климата.

На примере укрупнённых районов г. Хельсинки показана пространственная неоднородность потенциального удельного количества смертей и экономических ущербов, обусловленных перегревом городской среды. Этот факт определяет необходимость дифференцированного подхода к мероприятиям по парированию угроз здоровью населения, вызванных потеплением климата.

На основании анализа полученных результатов высказана гипотеза, что существенную роль в снижении смертности в историческом центре Хельсинки по сравнению с периферийными районами малоэтажной застройки играет охлаждающее влияние холодных воздушных масс Финского зал.

Литература

1. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съёмка. М.: Недра, 1993. 128 с.
2. Горный В. И., Донченко В. К., Самуленков Д. А., Сапунов М. В., Бровкина О. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. (2017а) О циркуляции воздушных масс в «тепловых островах» городов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 207–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-207-212.
3. 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. (2017б) Теплофизические свойства поверхности город-

- ской среды (по результатам спутниковых съемок 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.
4. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Манвелова А. Б., Тронин А. А. Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 23–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
 5. Koppe K., Kovats S., Jendritskiy G., Menz B. Периоды сильной жары: угрозы и ответные меры / 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. Оценка риска и ущерба от климатических изменений, влияющих на повышение уровня заболеваемости и смертности в группах населения повышенного риска: метод. рекомендации. М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 48 с.
 7. Allen M. R., Dube O. P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugeta 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.
 8. 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/>.
 9. Cotton W. R., Pielke R. A. Human Impacts on Weather and Climate. Cambridge: Univ. Press, 2007. 308 p. URL: <http://www.geoversum.by/catalog/item677.html>.
 10. Dominguez-Delgado A., Domínguez-Torres H., Domínguez-Torres C. A. Energy and Economic Life Cycle Assessment of Cool Roofs Applied to the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain // Sustainability. 2020. V. 12(14). Art. No. 5602. 35 p. DOI: 10.3390/su12145602.
 11. Gasparrini A., Guo Yu., Hashizume M., Lavigne E., Zanobetti A., Schwartz J., Tobias A., Tong Sh., Rocklöv J., Forsberg B., Leone M., De Sario M., Bell M. L., Guo Y.-L. L., Wu Ch., Kan H., Yi S.-M., Coelho M., Saldiva P. H., Honda Y., Kim H., Armstrong B. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study // Lancet. 2015. V. 386(9991). P. 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0).
 12. 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. <https://doi.org/10.3390/ijerph121215046>.
 13. Hua Y., Yao M., Liua Y., Zhaoa B. Personal exposure to ambient PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, and SO₂ for different populations in 31 Chinese provinces // Environment Intern. 2020. V. 144. Art. No. 106018. 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106018>.
 14. Kritsuk S., Gornyy V., Davidan T., Latypov I., Manvelova A., Konstantinov P., Tronin A., Varentsov M., Vasiliev M. Satellite mapping of air temperature under polar night conditions // Geo-Spatial Information Science. 2022. P. 325–336. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.2003166>.
 15. 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.
 16. 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. <https://doi.org/10.3390/atmos12010046>.
 17. Smargiassi A., Goldberg M. S., Plante C., Fournier M., Baudouin Y., Kosatsky T. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands // J. Epidemiology and Community Health. 2009. V. 63. P. 659–664. DOI: 10.1136/jech.2008.078147.
 18. Yin Q., Wang J., Ren Zh., Li J., Guo Y. Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change // Nature Communication. 2019. V. 10. Art. No. 4640. 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12663-y>.

Satellite mapping of economic damage from urban deaths caused by overheating (by example of Helsinki, Finland)

V. I. Gornyy, S. G. Kritsuk, I. Sh. Latypov, 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*

A technique for satellite mapping of the specific number of deaths and damages due to overheating of the urban environment has been developed. Knowledge of these epidemiological and economic indicators is necessary for information support of the management decision-making system aimed to parrying the threats to public health caused by climate warming. The city of Helsinki (Finland) was chosen as the object of study. The materials were a series of 32 scenes of the Landsat satellites obtained over the period 2007–2019 and the results of standard urgent observations at weather stations. A theoretical basis of the algorithm of satellite mapping of the specific number of deaths and specific economic damage caused by overheating of the urban environment is given. The final results are presented in the form of digital maps of the specific number of deaths caused by overheating of the urban environment and the specific density of economic damage caused by these deaths. The heterogeneity of the spatial distribution of deaths and losses is demonstrated. It is shown that in Helsinki, not only the historical center of the city with dense buildings, but also areas of low-rise buildings located far from the Gulf of Finland are characterized by a high potential mortality from overheating of the urban environment. It is hypothesized that this phenomenon is due to the cooling effect of the cold air masses of the Gulf of Finland on the urban environment of the historical center of Helsinki.

Keywords: city, satellite, mapping, temperature, overheating, risk, mortality, damage

Accepted: 02.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-35-46

References

1. Gornyy V. I., Shilin B. V., Yasinskii G. I., *Teplovaya aerokosmicheskaya s'emka* (Thermal airborne and satellite flown survey), Moscow: Nedra, 1993, 128 p. (in Russian).
2. Gornyy V. I., Donchenko V. K., Samulenkov D. A., Sapunov M. V., Brovkina O. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A. (2017a), On air circulation in "heat islands" of urban areas, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 207–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-207-212.
3. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Kiselev A. V., Brovkina O. V., Filippovich V. E., Stankevich S. A., Lubskii N. S. (2017b), Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev), *Sovremennye 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.
4. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Manvelova A. B., Tronin A. A., Satellite risk mapping of urban air overheating (by example of Helsinki, Finland), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 23–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
5. Koppe Ch., Kovats S., Jendritzky G., Menne B., *Heat-waves: risks and responses*, World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, 2004, Ser. Health and Global Environmental Change, No. 2, 124 p., available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107552>.
6. *Osenka riska i ushcherba ot klimaticheskikh izmenenii, vliyayushchikh na povyshenie urovnya zabolevayemosti i smertnosti 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).
7. 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., available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf.
8. 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>.
 9. Cotton W. R., Pielke R. A., *Human Impacts on Weather and Climate*, Cambridge: Univ. Press, 2007, 308 p., available at: <http://www.geoversum.by/catalog/item677.html>.
 10. Dominguez-Delgado A., Domínguez-Torres H., Domínguez-Torres C. A., Energy and Economic Life Cycle Assessment of Cool Roofs Applied to the Refurbishment of Social Housing in Southern Spain, *Sustainability*, 2020, Vol. 12(14), Art. No. 5602, 35 p., DOI: 10.3390/su12145602.
 11. Gasparrini A., Guo Yu., Hashizume M., Lavigne E., Zanobetti A., Schwartz J., Tobias A., Tong Sh., Rocklöv J., Forsberg B., Leone M., De Sario M., Bell M. L., Guo Y.-L. L., Wu Ch., Kan H., Yi S.-M., Coelho M., Saldiva P. H., Honda Y., Kim H., Armstrong B., Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study, *Lancet*, 2015, Vol. 386(9991), pp. 369–375, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0).
 12. 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, No. 12, pp. 16110–16123, <https://doi.org/10.3390/ijerph121215046>.
 13. Hua Y., Yao M., Liua Y., Zhao B., Personal exposure to ambient PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, and SO₂ for different populations in 31 Chinese provinces, *Environment Intern.*, 2020, Vol. 144, Art. No. 106018, 11 p., <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106018>.
 14. Kritsuk S., Gornyy V., Davidan T., Latypov I., Manvelova A., Konstantinov P., Tronin A., Varentsov M., Vasiliev M., Satellite mapping of air temperature under polar night conditions, In: *Geo-Spatial Information Science*, 2022, pp. 325–336, <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.2003166>.
 15. 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, No. 14, Vol. 944, DOI: 10.3390/ijerph14080944.
 16. 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>.
 17. Smargiassi A., Goldberg M. S., Plante C., Fournier M., Baudouin Y., Kosatsky T., Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands, *J. Epidemiology and Community Health*, 2009, Vol. 63, pp. 659–664, DOI: 10.1136/jech.2008.078147.
 18. Yin Q., Wang J., Ren Zh., Li J., Guo Y., Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change, *Nature Communication*, 2019, Vol. 10, Art. No. 4640, 8 p., <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12663-y>.