Спутниковое картирование риска перегрева поверхности городской среды (на примере Санкт-Петербурга)

С. Г. Крицук¹, В. И. Горный¹, И. Ш. Латыпов¹, А. А. Павловский², А. А. Тронин¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, 191023, Россия
E-mail: A.Pavlovskiy@kga.gov.spb.ru

Предложен методологический подход к комплексированию пространственных данных дистанционного зондирования с временными рядами измеренных на земле характеристик. Подход реализован на примере спутникового картирования рисков (вероятностей) перегрева городской среды. Знание этих рисков необходимо для оценок экономических потерь от нарушения движения автотранспорта при размягчении дорожного покрытия. Актуальность проблемы вызвана наблюдающимся глобальным потеплением. В качестве объекта исследования выбран Санкт-Петербург. Материалами для исследования явились данные спутников серии LandSat и результаты стандартных срочных наблюдений на метеостанциях. Приведены теоретические основы спутникового картирования риска перегрева поверхности городской среды. Выполнен анализ устойчивости оценок рисков в зависимости от выбора опорной метеостанции и от количества спутниковых съёмок. Окончательным результатом стала карта риска перегрева поверхности городской среды. Показано, что высокими рисками перегрева характеризуются промышленные районы, а минимальными — рекреационные зоны и территории, застроенные во второй половине прошлого века пятиэтажками. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы при принятии управленческих решений, направленных на парирование угроз экологической безопасности из-за перегрева городской среды в результате глобального потепления. Сделан вывод о высокой эффективности и экономичности предложенного подхода.

Ключевые слова: город, потепление климата, асфальт, перегрев, спутник, дистанционное зондирование, риск

Одобрена к печати: 19.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44

Введение

Многочисленными исследованиями показано, что над крупными городами формируются так называемые «тепловые острова» (urban heat islands), в которых температура поверхности городской среды на несколько градусов выше, чем в пригородных районах (Балдина, Грищенко, 2011; Варенцов и др., 2014; Горный и др., 1997, 2016; Bornstein 1968; Guoyin et al., 2011; Hu et al., 2015; Javier et al., 2015; Oke et al., 1991; Price, 1979; Zhou et al., 2019). В условиях наблюдающегося глобального потепления (Allen et al., 2018) температура «тепловых островов» крупных городов возрастает быстрее, чем на остальных территориях, и уже в настоящее время климатические условия мегаполисов соответствуют тем, которые ещё только прогнозируются моделями общей циркуляции атмосферы и океана для конца XXI столетия (Менжулин, Павловский, 2016).

Анализ материалов тепловых космических съёмок Санкт-Петербурга показал, что в отдельных местах города максимальная температура поверхности достигала +57,7 °С (на крыше и/или автостоянке торгово-развлекательного комплекса «Гранд Каньон» в июле 2010 г.). По данным наших контактных режимных измерений температуры поверхности битумно-полимерных материалов кровли панельного дома в южной части Санкт-Петербурга в середине августа 2015 г. температура достигала +54,6 °С. К 2024 г. средняя по городу температура по-

верхности по сравнению с 2014 г. может повыситься на $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в среднем достигнуть $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Горный и др., 2016), т.е. подойти к нижнему пределу температуры размягчения дорожных битумов*. Поэтому необходимо разработать методы парирования угроз работе автотранспорта от перегрева городской среды.

Для количественной оценки экономических последствий транспортного коллапса в городах, вызванного размягчением дорожного покрытия, необходимы детальные (с разрешением не хуже $\sim 100\text{ м}$) карты риска (вероятности) размягчения битума от повышения температуры поверхности городской среды. Наземные измерения температуры с такой детальностью, как правило, невозможны по экономическим причинам. Например, в Сеуле выполнен уникальный научный проект, посвящённый изучению городского микроклимата (Park et al., 2016), в рамках которого было установлено 1193 регистрирующих температуру воздуха автоматических метеостанций со средним расстоянием между ними $\sim 700\text{ м}$.

В настоящее время зоны риска перегрева городской среды выявляются на основе технологий геоинформационных систем (ГИС) и математического моделирования, с помощью которых создаются микроклиматические карты городов. Подобные работы являются трудоёмкими, так как необходимо создать множество слоёв детальных цифровых карт всех микроклиматических характеристик, высотную цифровую модель города, растительности, плотности населения и др. (Gutierrez et al., 2015). Кроме того, возникают трудности верификации таких карт.

С экономических позиций для картирования температуры поверхности городской среды с поквартальной детальностью целесообразно использовать материалы спутниковых съёмок. Но для построения карт рисков перегрева необходимы длинные непрерывные временные ряды температур, которые из-за наличия облачности невозможно получить на основе только материалов спутниковых съёмок высокого пространственного разрешения, например спутников серии LandSat.

Поэтому целью настоящей статьи является разработка методологического подхода к картированию рисков перегрева городской среды на основе комплексирования пространственных данных спутниковых съёмок с временными рядами характеристик, наблюдаемых на стандартных метеостанциях.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран Санкт-Петербург.

При построении карты риска (вероятности) размягчения битума в дорожном покрытии Санкт-Петербурга использованы: 66 тепловых сцен съёмок спутниками серии LandSat (пространственное разрешение ИК-тепловых каналов — $\sim 100\text{ м}$), полученные с мая по август в период с 1999 по 2018 г.; временные ряды максимальных суточных температур, зарегистрированных ОГМС Санкт-Петербург в том же временном диапазоне на метеостанциях WMO ID 26063 (центр города) и METAR ULLI (окраина города, аэропорт Пулково; <https://rp5.ru>). Результаты срочных метеорологических наблюдений в течение летних месяцев в период с 1999 по 2018 г. представляют надёжную для оценки рисков статистику.

Предварительная обработка спутниковых данных включала восстановление термодинамической температуры поверхности T_s на основе одноканального алгоритма Single channel method (Yu et al., 2014). Для проведения атмосферной коррекции использовались совмещённые по времени материалы съёмки системами Terra/Aqua(MODIS) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Обработка метеорологических данных заключалась в построении гистограммы распределения максимальных суточных температур воздуха T в мае — августе в период 1999—2018 гг., которая аппроксимировалась функцией Гаусса:

* Порог температуры размягчения битума в дорожном покрытии варьирует от $+33$ до $+51\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 22245-90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия (с Изменением N 1)).

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где: σ — среднеквадратичное отклонение; μ — математическое ожидание T . Аппроксимация возможна*, так как в данном случае $\chi^2 \approx 1$. Это позволило оценить $R(T \geq T_o)$ — риск (вероятность) превышения максимальной температурой воздуха заданной температуры T_o , например температуры размягчения асфальта, как:

$$R(T \geq T_o) = \int_{T_o}^{\infty} f(T) dT. \quad (2)$$

Далее формировался вектор максимальных температур воздуха на метеостанции в дни съёмок:

$$\mathbf{T}(i) = T(i=1), \dots, T(i=k), \dots, T(i=N), \quad (3)$$

где $i = 1 \dots N$ — номер спутниковой съёмки (номер сцены); N — количество использованных спутниковых сцен; $T(i)$ — максимальная температура воздуха на метеостанции в день i -й съёмки.

Для построения карты риска перегрева был выбран T_o — порог перегрева T_S , температуры поверхности городской среды, равный температуре размягчения дорожных битумов марки БН 200/300: $T_S = T_o = +33$ °С. Затем в каждом пикселе карты строилась линейная регрессия между вектором термодинамической температуры поверхности $\mathbf{T}_S(i) = T_S(i=1), \dots, T_S(i=k), \dots, T_S(i=N)$ и $\mathbf{T}(i)$ — вектором максимальных температур воздуха на метеостанции:

$$\mathbf{T}(i) = a \times \mathbf{T}_S(i) + b, \quad (4)$$

где a и b — коэффициенты, рассчитываемые для каждого пикселя.

Для каждого пикселя карты по выражению (4) определялась $\hat{T}$ — максимальная за сутки температура воздуха на метеостанции, которой на земной поверхности в момент спутниковой съёмки соответствовала температура поверхности $T_S = +33$ °С:

$$\hat{T} = a \times T_o + b. \quad (5)$$

Определялась также и $\sigma(\hat{T})$ — среднеквадратическая ошибка (СКО) восстановления $\hat{T}$ по регрессии (5).

Анализ результатов метеонаблюдений в Санкт-Петербурге показал, что $T(i)$, максимальная суточная температура воздуха на метеостанции в моменты i -х съёмок, линейно связана с $T_S(i)$ и надёжность этой связи незначительно изменяется в пределах исследуемой территории (рис. 1, см. с. 37).

Необходимо отметить, что данный статистический подход к оценке риска перегрева поверхности городской среды отражает и генетическую связь температур воздуха и земной поверхности через теплообмен земной поверхности с пограничным слоем атмосферы.

Так как распределение T близко к нормальному (1), то в соответствии с тем, что «линейное преобразование случайной величины не изменяет закона её распределения» (Корн, Корн, 1970), справедливо выражение:

$$R(T \geq \hat{T}) = R(T_S \geq T_o), \quad (6)$$

где $R(T \geq \hat{T})$ и $R(T_S \geq T_o)$ — риски (вероятности) соответственно превышения максимальной температуры воздуха на метеостанции T над $\hat{T}$ и превышения температурой поверхности в момент съёмки T_S температуры размягчения битума T_o .

* В общем случае используя нижеизложенный алгоритм, возможно непосредственное использование гистограммы (1) без аппроксимации функцией распределения.

Рис. 1. Линейная связь температуры поверхности в момент спутниковой съёмки с максимальной температурой воздуха в те же сутки на метеостанции WMO 26063. Условные обозначения, значения в центре Санкт-Петербурга: 1 — на Аптекарском острове; 2 — Елагином острове

Исходя из выражений (7) и (3), риск превышения (перегрева) температурой земной поверхности температуры размягчения битума может быть представлен как:

$$R(T_s \geq T_o) = \int_{\hat{T}}^{\infty} f(T) dT. \quad (7)$$

Результаты

Карты интервальной ($R_{\min} \dots R_{\max}$) оценки риска перегрева поверхности городской среды Санкт-Петербурга, полученные с помощью представленного выше алгоритма, приведены на рис. 2 (см. с. 38). Нижний и верхний пределы риска при 95%-м доверительном интервале рассчитывались как:

$$R_{\min} = R\left(T \geq \left(\hat{T} + 2\sigma(\hat{T})\right)\right); \quad R_{\max} = R\left(T \geq \left(\hat{T} - 2\sigma(\hat{T})\right)\right). \quad (8)$$

Полный анализ устойчивости результатов предложенного метода требует расширенной публикации, поскольку риск перегрева городской среды может определяться многими факторами. В данной работе рассмотрено влияние лишь самых очевидных из них. Как и ожидалось, основной вклад в уровень достоверности решения вносит использование регрессии (4). Возникающая из-за этого $\varepsilon(R)$ — «случайная ошибка» оценки риска (рис. 3а, см. с. 39) — рассчитывалась как:

$$\varepsilon(R) = R\left(T \geq \left(\hat{T} + \sigma(\hat{T})\right)\right) - R(T \geq \hat{T}). \quad (9)$$

По отношению равенства (7) оценивалась $\delta(\hat{T})$ — относительная регрессионная ошибка (рис. 3б), возникающая при восстановлении $\hat{T}$ по формуле (5):

$$\delta(\hat{T}) = \frac{\sigma(\hat{T})}{\hat{T}}. \quad (10)$$

Эта ошибка в основном не превысила 12 %. Значительные ошибки получены на территориях с интенсивной строительной активностью или агротехническими мероприятиями на сельскохозяйственных угодьях в ближайших пригородах, которые имели место в период 1999–2018 гг.

Рис. 2. Карты интервальной оценки риска одноразового превышения температуры размягчения дорожного битума, Санкт-Петербург, опорная метеостанция WMO 26063: а — минимальный риск с вероятностью 95 % (цифры 1–5 в тексте); б — максимальный риск с вероятностью 95 %; в — карта-схема функциональных зон (по Генплану Санкт-Петербурга, <https://gov.spb.ru/law?d&nd=64230002&prevDoc=3>): 1 — рекреационные зоны, 2 — застройка индивидуальными жилыми домами, 3 — малоэтажная жилая застройка, 4 — среднеэтажная и многоэтажная жилая застройки, 5 — все виды общественно-деловой застройки, 6 — производственные зоны инженерной и транспортной инфраструктуры, 7 — областные территории, 8 — намывные территории

Примером территорий с нестабильным состоянием городской среды является намыв на Васильевском острове, начавшийся в 2007 г. (8 на рис. 2в). Поэтому абсолютные значения ошибок оценок риска, полученные по данным за 2013–2018 гг. (1 на рис. 3в), оказались для этой территории существенно выше, хотя в среднем для города выросли на 2–3 % (рис. 3в). Следует отметить, что высокие значения относительных ошибок в пределах зелёных зон города и на пригородных территориях (см. рис. 3б) соответствуют низким значениям риска перегрева (см. рис. 2а, б) и поэтому не являются критичными.

Зависимость случайной ошибки картирования риска перегрева $\sigma(R)$ от количества использованных сцен (длины периода съёмки) (см. рис. 3в) оценивалась по разнице ошибок, полученных для двух наборов сцен за 19-летний (66 сцен) и 5-летний (32 сцены) периоды (1999–2018 и 2013–2018 гг. соответственно). Для городских территорий рост ошибок в связи с уменьшением числа сцен оказался незначительным: 1–3 %. Существенные изменения $\sigma(R)$ отмечаются только на намывных (1 на рис. 3в) и сельскохозяйственных (2 на рис. 3в) территориях.

Анализ показал, что максимальные температуры воздуха на городской метеостанции WMO 26063 и метеостанциях в ближайших пригородах линейно связаны с коэффициентом корреляции близким к единице. Поэтому, в силу инвариантности функции ошибок к линейному преобразованию аргумента, результаты, полученные по данным различных метеостанций, должны иметь близкое к нулю систематическое отклонение. Некоторые коррективы и отличие от единицы коэффициента корреляции может внести аппроксимация распределения температуры функцией Гаусса. Проверка этого утверждения по данным двух городских станций WMO 26063 и METAR ULLI показала его справедливость. Систематическое расхождение решений (риск по METAR ULLI минус риск по WMO 26063) является незначительным и имеет распределение близкое к нормальному (рис. 4а, б, см. с. 40). Для решений, полученных

по 32 сценам, систематическое расхождение несколько больше, чем для варианта с 66 сценами. Повышенными (по модулю) значениями отличаются области высокого риска перегрева, характеризующиеся, кроме того, высокими случайными ошибками. Ассоциация систематических и случайных ошибок указывает на регрессионные оценки рисков как на значимую причину появления ошибок обоих типов. Систематическое расхождение решений (решение по 32 сценам минус решение по 66 сценам) показывает более сложную картину (рис. 4в), которая, с одной стороны, ассоциируется со случайными ошибками риска $\sigma(R)$ (см. рис. 4а), а с другой — с их разностью $\Delta R = \sigma(R_{32}) - \sigma(R_{66})$ (см. рис. 4в). Происхождение этих расхождений требует дополнительного анализа. Необходимо отметить, что карты расхождений рисков, приведённые на рис. 4а, б, в какой-то мере являются верификацией методологии, так как риск перегрева поверхности рассчитывался по двум временным рядам температур воздуха, независимо зарегистрированным на разных метеостанциях (WMO 26063 и METAR ULLI).

Рис. 3. Регрессионные случайные ошибки: а — «случайная ошибка» риска перегрева поверхности; б — относительная ошибка восстановления; в — изменение случайной ошибки риска перегрева при разных периодах съёмки: 1999–2018 и 2013–2018 гг. (снижение количества использованных сцен с 66 до 32)

В целом же историческая часть Санкт-Петербурга характеризуется повышенным риском размягчения дорожного битума: 10–40 % (см. рис. 2а, б). Наибольший риск размягчения битума в течение хотя бы одного дня в году лежит в интервале 35–85 % (см. рис. 2а, б) и отмечается на территории первого промышленного пояса, обрамляющего исторический центр города (6 на рис. 2в). Соответственно (см. книгу (Яглом, Яглом, 1973, с. 32)), при риске перегрева в $R(T_s \geq +33^\circ\text{C}) = 35\%$ размягчение битума с вероятностью в 99,1 % будет наступать один раз в 12 лет, а при $R(T_s \geq +33^\circ\text{C}) = 85\%$ — с вероятностью 99,7 % один раз в три года. Нормативный срок ремонта дорожного покрытия в условиях Северо-Западного региона РФ зависит от напряжённости движения автотранспорта и в среднем составляет 12 лет (О нормативах..., 2007). Ясно, что на территории первого промышленного пояса, где перегрев дорожного покрытия в настоящее время прогнозируется раз в 3–12 лет, его износ будет происходить быстрее.

Рис. 4. Систематическое расхождение оценок рисков при замене базовой метеостанции WMO 26063 на METAR ULLI (кружками показаны опорные метеостанции: 1 — WMO 26063; 2 — METAR ULLI): а — по данным 2013–2018 гг.; б — по данным 1999–2018 гг.; в — при изменении продолжительности периода съёмки по данным базовой метеостанции WMO 26063 разница рисков перегрева, полученных для 2013–2018 и 1999–2018 гг.

Повышенный риск размягчения битума в асфальте отмечен также на крупных магистралях, проходящих в спальнях районах. Таких, например, как Индустриальный проспект (1 на рис. 2б), Суздальский проспект и проспект Просвещения (3 на рис. 2б), улица Бухарестская и проспект Славы (4 на рис. 2б), Западный скоростной диаметр (5 на рис. 2б). Пересечения магистралей с напряжённым транспортным движением также характеризуются дополнительным ростом риска размягчения битума от перегрева дорожного покрытия, например перекрёсток проспекта Энгельса и Выборгского шоссе (2 на рис. 2б).

Анализ полученных материалов позволяет сделать вывод о неоднородности территории Санкт-Петербурга по уровню рисков размягчения битума в покрытиях городской среды. Размягчение же дорожного покрытия может привести к значительным экономическим потерям из-за транспортного коллапса и образования колеи. Поэтому картирование риска размягчения дорожного покрытия является чрезвычайно актуальной задачей. Кроме того, на отдельных участках города следует ожидать появления дефектов крыш из-за размягчения и стекания битума с битумно-полимерного покрытия кровли.

Необходимо отметить, что ширина дорожного покрытия транспортных магистралей в Санкт-Петербурге лишь в редких случаях превышает 100 м (пространственное разрешение данных ИК-тепловых каналов спутников LandSat). Поэтому восстановленные по результатам спутниковых съёмок температуры транспортных магистралей, включающих дорожное покрытие и зелёные насаждения по краям, могут оказаться заниженными по сравнению с однородным асфальтом. В результате оценка риска для таких комплексных по составу участков поверхности городской среды является заниженной. Поэтому повышение пространственного разрешения спутниковых систем дистанционного зондирования инфракрасного теплового диапазона спектра является актуальной задачей.

Положительным моментом данного методологического подхода к комплексированию спутниковых материалов с многолетними режимными наблюдениями на метеостанциях является возможность крупномасштабного картирования температуры воздуха в городах, продемонстрированная нами в рамках проекта ТРАКТ 2018 на примере Апатит (<http://ecosafety-spb.ru/>).

С учётом знания таких рисков могут быть разработаны методики оценки экономических ущербов здоровью населения от повышения температуры городской среды и остановки автотранспорта при размягчении дорожного покрытия. Кроме того, предложенный метод спутникового картирования риска перегрева городской среды позволяет заблаговременно планировать мероприятия по парированию этого риска, который, согласно прогнозам (Горный и др., 2016; МГЭИК..., 2014; Периоды..., 2005), будет только возрастать.

Важным моментом для практической реализации разработанного метода является низкая стоимость карт рисков перегрева, так как исходные спутниковые материалы и результаты стандартных метеорологических наблюдений находятся в открытом доступе, а затраты на их обработку относительно невелики.

Заключение

Первый опыт реализации предложенного методологического подхода для построения карты риска размягчения дорожных битумов, основанный на комплексной обработке пространственной информации (материалы дистанционного зондирования) и временных рядов исследуемых величин (данные метеостанций), показал достаточную для практики устойчивость и низкую стоимость карт.

Повышенный риск размягчения дорожных битумов в Санкт-Петербурге отмечен в первом промышленном поясе и на перекрёстках крупных магистралей, в пределах которых при плановых ремонтах дорожного покрытия в первоочередном порядке целесообразно применять тугоплавкие марки асфальта. Наименьшим риском перегрева поверхности городской среды характеризуются рекреационные зоны и спальные районы, застроенные пятиэтажками в 50–60-х гг. прошлого века.

Метод спутникового картирования рисков перегрева городской среды может быть положен в основу методик картирования экономических ущербов здоровью населения от перегрева городской среды и экономике города от размягчения дорожного покрытия.

Результаты картирования рисков перегрева городской среды Санкт-Петербурга могут быть полезными при планировании мероприятий по парированию угроз экологической безопасности, возникающих в условиях наблюдающегося глобального потепления.

Для повышения достоверности картирования рисков перегрева поверхности городской среды необходимо создание спутниковых систем дистанционного зондирования инфракрасного теплового диапазона спектра с пространственным разрешением в 10–30 м, что в 3–10 раз лучше, чем у современных спутниковых тепловизоров. Создание таких систем позволит избежать появления ошибок, вызванных интегрированием различных температур земной поверхности внутри мгновенного поля зрения, превышающего размеры элементов городской среды (ширину транспортных магистралей, размеры домов и т. п.).

Литература

1. Балдина Е. А., Грищенко М. Ю. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat 7/ETM+ // Геоинформатика. 2011. № 3. С. 62–69.
2. Варенцов М. И., Константинов П. И., Самсонов Т. Е., Репина И. А. Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.
3. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Шилин Б. В. Дистанционный измерительный мониторинг теплотерь городских и промышленных агломераций (на примере Санкт-Петербурга и Хельсинки) // Теплоэффективные технологии. Информац. бюл. № 2. 1997. С. 17–23.

4. Горный В. И., Лялько В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Бровкина О. В., Киселев А. В., Давидан Т. А., Лубский Н. С., Крылова А. Б. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / пер. с англ. М.: Наука, 1970. 720 с.
6. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / основная группа авторов, Р. К. Пачаури и Л. А. Мейер (ред.). Женева: МГЭИК, 2014. 163 с. URL: <http://www.meteorf.ru/upload/iblock/69e/Izmenenie-klimata-N51-NovDec-2014.pdf/>.
7. Менжулин Г. В., Павловский А. А. Комплексная методика расчета и оценки нарушений естественно-климатического режима в мегаполисе Санкт-Петербург // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2016. № 43. С. 154–173.
8. О нормативах денежных затрат на содержание и ремонт автомобильных дорог федерального значения и правилах их расчета. Постановление Правительства РФ № 539 от 23.08.2007.
9. Периоды сильной жары: угрозы и ответные меры // Сер.: «Здоровье и глобальное изменение окружающей среды». № 2. Копенгаген: Европейское Бюро ВОЗ, 2005. 121 с. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/96975/E82629R.pdf/.
10. Яглом И. М., Яглом А. М. Вероятность и информация. М.: Наука, 1973. 512 с.
11. 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. 2018. URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
12. 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. URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281968%29007%3C0575%3A00TUHI%3E2.0.CO%3B2> (accessed in 2019).
13. Guoyin C., Mingyi D., Xue Y. Monitoring of urban heat island effect in Beijing combining ASTER and TM data // Intern. J. Remote Sensing. 2011. V. 32. No. 5. P. 1213–1232.
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.
15. Hu Y., Jia G., Pohl C., Feng Q., He Y., Gao H., Xu R., van Genderen J., Feng J. Improved monitoring of urbanization processes in China for regional climate impact assessment // Environmental Earth Sciences. 2015. V. 73. Iss. 12. P. 8387–8404.
16. Javier M. V., Sarricolea P., Moreno-García C. On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference // Frontiers in Earth Science. 2015. V. 3. Article 24. P. 1–3. URL: https://www.researchgate.net/publication/277217810_On_the_definition_of_urban_heat_island_intensity_The_rural_reference/.
17. 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(4). P. 339–358. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00119211/>.
18. Park M. S., Park S. H., Chae J. H., Choi M. H., Song Y., Kang M. High-Resolution Urban Observation Network for a User-Specific Meteorological Information Service in the Seoul Metropolitan Area, Korea // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2016. P. 1–25.
19. 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: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1554:AO TUHI>2.0.CO;2/](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AO TUHI>2.0.CO;2/).
20. 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. No. 6. P. 9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829.
21. Zhou D., Xiao J., Bonafoni S., Berger C., Deilami K., Zhou Y., Frolking S., Yao R., Qiao Z., Sobrino J. A. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives // Remote Sensing. 2019. V. 11. Iss. 1. P. 48. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/1/48/>.

Satellite risk mapping of urban surface overheating (by the example of Saint Petersburg)

S. G. Kritsuk¹, V. I. Gornyy¹, I. Sh. Latypov¹, A. A. Pavlovskii², A. A. Tronin¹

¹ Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² State Research and Design Center for Saint Petersburg Master Plan
Saint Petersburg 191023, Russia
E-mail: A.Pavlovskiy@kg.gov.spb.ru

A methodological approach for integration of spatial data from remote sensing with time series of local characteristics of near surface boundary layer of atmosphere is proposed. The approach is implemented by the example of satellite mapping of risks (probabilities) of urban surface overheating. Knowledge of these risks is necessary for assessing the economic losses from traffic disruption as a result of road cover softening. The urgency of the problem is caused by the global warming. St. Petersburg was chosen as the object of study. Materials for the study were Landsat scenes and the time series of standard observations of few meteorological stations. The theoretical foundations of satellite mapping of the risk of urban surface overheating are given. The analysis of the sustainability of proposed algorithm of risk assessments was performed depending on the choice of the reference meteorological station and on the number of satellite images. The result was a map of the risk of urban surface overheating. It was shown that industrial zones were characterized by highest risk of overheating, while recreational zones, as well as the territories built up with five-story buildings had minimal risk. The method can be used in supporting management decisions aimed to parry threats of overheating as a result of global warming. It is concluded that the proposed approach is highly effective and cost efficient.

Keywords: city, climate warming, asphalt, overheating, satellite, remote sensing, risk of overheating

Accepted: 19.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44

References

1. Baldina E. A., Grishchenko M. Yu., Issledovanie "teplovogo ostrova" Moskvy po raznosezonnym snimkam Landsat 7/ETM+ ("Heat Island" of Moscow Investigation by using multi-time images of Landsat 7/ETM+), *Geoinformatika*, 2011, No. 3, pp. 62–69.
2. Varentsov M. I., Konstantinov P. I., Samsonov T. E., Repina I. A., Izuchenie fenomena gorodskogo ostrova tepla v usloviyakh polyarnoi nochi s pomoshch'yu eksperimental'nykh izmerenii i distantsionnogo zondirovaniya na primere Noril'ska (Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 329–337.
3. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Shilin B. V., Distantsionnyi izmeritel'nyi monitoring teplopoter' gorodskikh i promyshlennykh aglomeratsii (na primere Sankt-Peterburga i Khel'sinki) (Remote measuring monitoring of urban and industrial heat losses (on the example of Saint Petersburg and Helsinki)), *Teploeffektivnye tekhnologii. Informatsionnyi byulleten'*, No. 2, 1997, pp. 17–23.
4. Gornyy V. I., Lyal'ko V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Filippovich V. E., Stankevich S. A., Brovkina O. V., Kiselev A. V., Davidan T. A., Lubskii N. S., Krylova A. B., Prognoz teplovoi reaktsii gorodskoi sredy Sankt-Peterburga i Kiev na izmenenie klimata (po materialam s'emok sputnikami EOS i Landsat) (Forecast of Saint Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 176–191.
5. Korn G. A., Korn T. M., *Mathematical handbook for sciences and engineering*, New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1961, 1152 p.
6. MGEIK, 2014: *Izmenenie klimata, 2014 g.: Obobshchayushchii doklad. Vklad Rabochikh grupp I, II i III v Pyatyi otsenochnyi doklad Mezhpriavitel'svennoi gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* (MGEIK, 2014: Climate change, 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), core group of authors,

- R. K. Pachauri, L. A. Meier (eds.), Geneva: MGEIK, 2014, 163 p., available at: <http://www.meteorf.ru/upload/iblock/69e/Izmenenie-klimata-N51-NovDec-2014.pdf/>.
7. Menzhulin G. V., Pavlovskii A. A., Kompleksnaya metodika rascheta i otsenki narushenii estestvennogo klimaticheskogo rezhima v megapolise Sankt-Peterburg (Combined technique for analysis of natural climate infraction by megacities evaluations for Saint Petersburg), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2016, No. 43, pp. 154–173.
8. Government of Russian Federation: Order No. 539, Date 23.08.2007.
9. Periody sil'noi zhary: ugrozy i otvetnye mery (Heat waves and retaliation), *Ser: Zdorov'e i global'noe izmenenie okruzhayushchei sredy* (Series "Health and global environmental change"), No. 2, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2005, 121 p., available at: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/96975/E82629R.pdf (accessed in 2019).
10. Yaglom I. M., Yaglom A. M., *Veroyatnos' i informatsiya* (Probability and information), Moscow: Nauka, 1973, 512 p.
11. 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*, 2018, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
12. 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, available at: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281968%29007%3C0575%3A00TUHI%3E2.0.CO%3B2/>.
13. Guoyin C., Mingyi D., Xue Y., Monitoring of urban heat island effect in Beijing combining ASTER and TM data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 5, pp. 1213–1232.
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.
15. Hu Y., Jia G., Pohl C., Feng Q., He Y., Gao H., Xu R., van Genderen J., Feng J., Improved monitoring of urbanization processes in China for regional climate impact assessment, *Environmental Earth Sciences*, 2015, Vol. 73, Issue 12, pp. 8387–8404.
16. Javier M. V., Sarricolea P., Moreno-García C., On the definition of urban heat island intensity: the "rural" reference, *Frontiers in Earth Science*, 2015, Vol. 3, Article 24, pp. 1–3, available at: https://www.researchgate.net/publication/277217810_On_the_definition_of_urban_heat_island_intensity_The_rural_reference/.
17. 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(4), pp. 339–358, available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00119211> (accessed in 2019).
18. Park M. S., Park S. H., Chae J. H., Choi M. H., Song Y., Kang M., High-Resolution Urban Observation Network for a User-Specific Meteorological Information Service in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2016, pp. 1–25.
19. 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, DOI: [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/).
20. 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, No. 6, pp. 9829–9852, DOI: 10.3390/rs6109829.
21. Zhou D., Xiao J., Bonafoni S., Berger C., Deilami K., Zhou Y., Frolicking S., Yao R., Qiao Z., Sobrino J. A., Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Issue 1, p. 48, available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/1/48/>.