



УДК 551.588.7(470.54)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.77>

Влияние метеофакторов на среднесуточную интенсивность городского острова тепла Екатеринбурга

Н. Р. Факаева, Д. Ю. Демежко, А. А. Горностаева, Б. Д. Хацкевич*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. По данным наблюдений на метеостанциях Екатеринбурга и пос. Верхнее Дуброво в 2020–2022 гг. в рамках мультирегрессионного анализа исследованы метеофакторы, определяющие среднесуточную интенсивность городского острова тепла (ГОТ). Выявлено, что средняя интенсивность ГОТ в мае – сентябре составляет 0,94 °С при стандартном отклонении среднесуточных значений 0,71 °С. Модель множественной линейной регрессии включает разность относительной влажности атмосферы в городе и селе, погодный фактор, определяемый скоростью ветра и облачностью, атмосферное давление. «Летняя» модель описывает 60 % наблюдаемой изменчивости ГОТ. Отмечено, что в декабре – марте средняя интенсивность ГОТ составляет 0,81 °С при стандартном отклонении среднесуточных значений 0,82 °С. Регрессионная модель включает единственный фактор – погодный, объясняющий 27 % изменчивости ГОТ. Сделан вывод, что интенсивность городского острова тепла в Екатеринбурге в первую очередь определяется солнечной радиацией и различными свойствами городских и сельских подстилающих поверхностей (альbedo, излучательная способность, тепловые свойства грунтов). Они определяют максимальную интенсивность ГОТ, реализующуюся лишь при «идеальной» погоде (погодный фактор ~1). Отклонения от «идеальных» условий, описываемые метеофакторами, лишь уменьшают интенсивность ГОТ. В зимний период дополнительный вклад в интенсивность ГОТ вносят утечки тепла из зданий, тепловых сетей, слабо зависящие от рассмотренных метеофакторов.

Ключевые слова: климат города, приземная атмосфера, городской остров тепла, метеофакторы.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10018, <https://rscf.ru/project/22-77-10018/>

Для цитирования: Влияние метеофакторов на среднесуточную интенсивность городского острова тепла Екатеринбурга / Н. Р. Факаева, Д. Ю. Демежко, А. А. Горностаева, Б. Д. Хацкевич // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 77–89. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.77>

Original article

Influence of Weather Factors on the Mean Daily Intensity of the Urban Heat Island In Yekaterinburg

N. R. Fakaeva, D. Yu. Demezhko, A. A. Gornostaeva, B. D. Khatskevich*

Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Urban heat island (UHI) intensity in the surface air temperature field is equal to the difference between temperatures (averaged for the period under consideration) in the city and in the im-

mediate rural surroundings. Using multi-regression analysis, We investigated the meteorological factors determining the mean daily UHI intensity based on observational data at weather stations in Yekaterinburg and the village of Verkhneye Dubrovo in 2020–2022. The average value of an UHI intensity in May–September equals to 0.94 °C with a standard deviation of daily mean values of 0.71 °C. The multiple linear regression model includes the difference in the relative humidity of the atmosphere in the city and the village, the weather factor determined by wind speed and cloudiness, and atmospheric pressure. This “summer” model describes 60 % of the observed UHI variance. In December–March, the average UHI intensity equals to 0.81 °C with a standard deviation of mean daily values of 0.82 °C. The regression model includes only the weather factor explaining 27 % of the UHI variability. It is concluded that the UHI intensity in Yekaterinburg is primarily determined by solar radiation and various properties of urban and rural surfaces (albedo, emissivity, thermal properties of soils). They determine the maximal UHI intensity that is realized only in “ideal” weather (weather factor ~1). Deviations from “ideal” conditions described by meteorological factors only reduce the maximal UHI intensity. In winter, heat leaks from buildings and heating networks weakly dependent on the meteorological factors make an additional contribution to the UHI intensity.

Keywords: urban climate, surface air temperature, urban heat island, weather factors.

For citation: Fakaeva N.R., Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khatskevich B.D. Influence of Weather Factors on the Mean Daily Intensity of the Urban Heat Island In Yekaterinburg. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 47, pp. 77–89. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.77> (in Russian)

Введение

Аномалии температуры приземной атмосферы, локализованные в пределах мегаполисов, уже два века со дня публикации работы Люка Ховарда [Howard, 1818] известны как феномен городского острова тепла (ГОТ). Рост городов и городского населения, продолжающееся глобальное потепление, сопровождаемое волнами аномальной жары, делают проблему ГОТ все более актуальной и стимулируют исследования факторов, определяющих временную и пространственную изменчивость ГОТ. Интенсивность ГОТ (ΔT) рассчитывается как разность температур приземного воздуха, зарегистрированных за некоторый промежуток времени на городских ($T_{Г}$) и ближайших к городу сельских ($T_{С}$) метеостанциях. В зависимости от длительности промежутка усреднения температур исследуются закономерности изменений интенсивности ГОТ на различных временных шкалах – многолетней, годовой, недельной, суточной [Kim, Baik, 2002; Luo, Asproudi, 2015; Earl, Simmonds, Tapper, 2016; Varquez, Kanda, 2018; Горностаева, Демежко, Хацкевич, 2023]. Эти закономерности определяются большим числом «конкурирующих» факторов [Оке 2006], включающих метеофакторы, альbedo и тепловые свойства подстилающих поверхностей, характер растительности, геометрию городских построек и др. Естественно, эффективный набор факторов, объясняющих пространственно-временные закономерности ГОТ, будет различным и для рассматриваемого временного масштаба, и для климатической зоны, в которой расположен город.

В Екатеринбурге изменения интенсивности ГОТ для различных временных масштабов изучались по данным о температурах приземного воздуха, зарегистрированных на метеостанциях в центре города и в пос. В. Дуброво, расположенном в 20 км восточнее [Горностаева, Демежко, Хацкевич, 2023]. Среднегодовая интенсивность ГОТ менялась синхронно с изменениями численности населения: с 1950 по 1980–1990 гг. ΔT увеличилась с 0,3 до

0,8 °С одновременно с ростом числа жителей с 600 тыс. до 1,3 млн. После этого и ΔT , и численность населения менялись незначительно вплоть до настоящего времени. В годовом цикле среднемесячных значений ΔT варьирует от 0,6 до 1,1 °С с максимумами в феврале – марте и июне – августе. В суточном цикле Екатеринбург во все сезоны демонстрирует U -образную кривую интенсивности ГОТ с дневным минимумом и ночным максимумом. Амплитуда суточных колебаний ΔT в среднем составляет 2 °С летом и около 1 °С зимой. Такая картина суточного цикла характерна для большинства городов мира [Oke, 1982; Magee, Curtis, Wendler, 1999; Kim and Baik, 2002]. В [Новая модель формирования ... , 2022] было показано, что переменную составляющую суточных вариаций интенсивности ГОТ можно объяснить различным характером теплофизических неоднородностей сельских грунтов и искусственных городских покрытий. Это приводит к различным фазам температурных реакций на радиационное воздействие в городе и селе и, как результат, к смещению максимума интенсивности ГОТ на ночное время. Однако в суточном цикле присутствует и постоянная (среднесуточная) составляющая, которая меняется от суток к суткам в заметных пределах. Колебания среднесуточных значений интенсивности ГОТ обычно связывают с влиянием метеофакторов [Oke, 1973; Kim, Baik, 2002; Wolters, Brandsma, 2012; Urban heat island ... , 2015]. Набор метеофакторов, позволяющих объяснить наблюдаемую изменчивость ГОТ, естественно, будет различным для разных климатических зон, сезонов, городов.

В настоящей статье методом мультирегрессионного анализа мы исследуем влияние метеорологических факторов на среднесуточную интенсивность ГОТ в Екатеринбурге.

Исходные данные

В анализе факторов, определяющих среднесуточную интенсивность ГОТ, были использованы метеофакторы, зарегистрированные на метеостанциях Екатеринбурга и Верхнего Дуброво в 2020–2022 гг.: $T_{\text{Екб}}$, $T_{\text{В.Дуб}}$ – среднесуточные температуры приземного воздуха в Екатеринбурге и в Верхнем Дуброво, °С; P_0 – среднесуточное значение атмосферного давления на уровне метеостанции Екатеринбурга, мм рт. ст.; F – среднесуточное значение скорости ветра на уровне метеостанции Екатеринбурга, м/с; N – среднесуточное значение общей облачности в Екатеринбурге, %; R – суточная сумма осадков в Екатеринбурге, мм; U – среднесуточное значение относительной влажности воздуха в Екатеринбурге, %.

Помимо перечисленных в выборку вошли комплексные факторы, представляющие комбинацию исходных – так называемый погодный фактор Φ_w и разность значений влажности ΔU в Екатеринбурге и В. Дуброво. Погодный фактор описывает степень «идеальности» погоды. Предполагается, что микроклиматические различия между городом и селом максимально проявляются в спокойную безоблачную погоду, когда турбулентное перемешивание приземной атмосферы невелико [Runnals, Oke, 2006]: $\Phi_w = (1 - kN^2)F^{-1/2}$, где N – облачность (десятые доли), F – средняя скорость ветра (м/с), k – попра-

вочный коэффициент на высоту облаков (от 0,16 для перистых облаков до 1,0 для тумана). При $F < 1$ м/с принимается значение 1 м/с. Таким образом, «идеальной» безоблачной погоде со слабым ветром соответствует $\Phi_w = 1$ м/с.

В [Holmer, Eliason, 1999; Study of intra-city ... , 2017] было выдвинуто предположение, что часовые различия влажностей воздуха в городе и селе в значительной мере определяют суточный цикл интенсивности ГОТ. В нашей модели формирования суточного цикла в Екатеринбурге предполагается, что его переменная составляющая определяется различиями в строении теплофизических разрезов в городе и за его пределами [Новая модель формирования ... , 2022]. Однако имеет смысл рассмотреть влияние разности значений относительных влажностей $\Delta U = U_{\text{Екб}} - U_{\text{В.Дуб}}$ на постоянную (среднесуточную) составляющую $\Delta T = T_{\text{Екб}} - T_{\text{В.Дуб}}$.

Еще одним фактором, оказывающим влияние на ГОТ, является снежный покров. Но, поскольку характеристики снежного покрова меняются довольно медленно, мы не рассматривали их в общей выборке, а выделили два периода: с устойчивым снежным покровом (декабрь – март, условно «зимний» период) и с гарантированным его отсутствием (май – сентябрь – «летний» период). Для каждого из них подбиралась своя статистическая модель.

Статистические характеристики изменчивости среднесуточных значений метеофакторов приведены в табл. 1. Средняя температура воздуха в Екатеринбурге независимо от сезона почти на градус выше, чем в В. Дуброво. Большая часть осадков и в городе, и в селе выпадает в летний период, но относительная влажность выше зимой. При этом разность $\Delta U = U_{\text{Екб}} - U_{\text{В.Дуб}}$ отрицательна летом и положительна зимой. Летний дефицит влажности в городе связан с работой ливневой канализации и более быстрым испарением влаги с твердых городских покрытий. Более высокая зимняя относительная влажность обусловлена охлаждением теплого воздуха, поступающего в атмосферу города из жилых и производственных зданий, а также утечками воды из тепловых сетей.

Таблица 1

Статистические характеристики изменчивости среднесуточных значений метеофакторов: среднее значение и стандартное отклонение

Фактор	$T_{\text{Екб}},$ °С	$T_{\text{В.Дуб}},$ °С	$P_0,$ мм рт. ст.	$F,$ м/с	$N,$ %	$\Phi,$ у. е.	$R,$ мм	$U,$ %	$\Delta U,$ %	$\Delta T,$ °С
Летние месяцы										
Сред. знач.	16,40	15,46	735,57	2,12	48,68	0,62	1,68	56,03	-2,34	0,94
Станд. откл.	6,05	5,92	5,80	0,91	29,07	0,19	5,40	14,50	4,36	0,71
Зимние месяцы										
Сред. знач.	-8,39	-9,23	737,70	2,71	54,26	0,52	0,86	70,97	1,30	0,81
Станд. откл.	7,05	7,29	9,36	1,07	33,74	0,19	1,70	10,77	2,96	0,82

На рис. 1 приведены ряды изменений интенсивности ГОТ. В поведении кривых ΔT отсутствуют заметные тренды, воспроизводящиеся из года в год. Спектральная плотность колебаний ΔT (рис. 2) растет пропорционально увеличению периода. Такая зависимость именуется «розовым шумом» и характерна для систем, обладающих «памятью». Иными словами, текущее значение ΔT в какой-то мере зависит от погодных условий за несколько предыдущих дней. Отметим, что в зимний период эта зависимость проявляется более отчетливо.

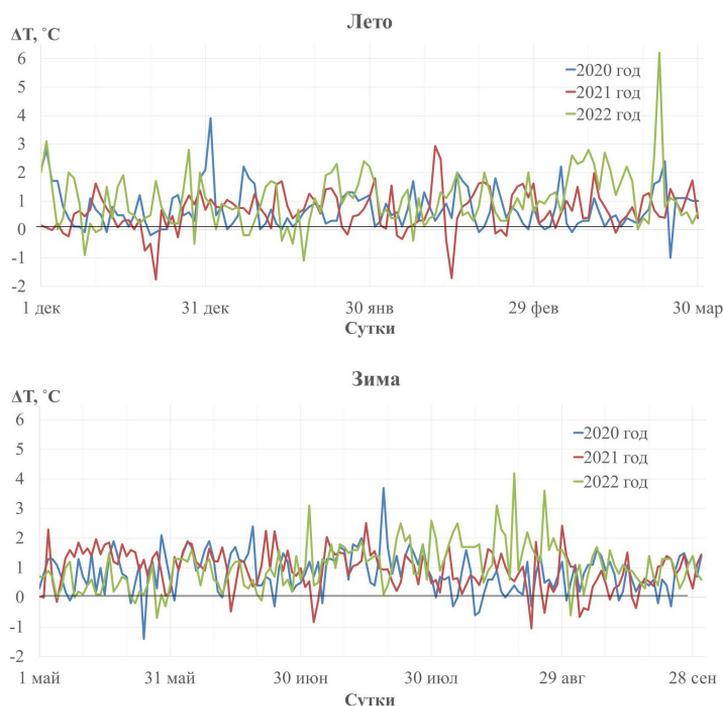


Рис. 1. Колебания среднесуточных значений интенсивности ГОТ в 2020–2022 гг.

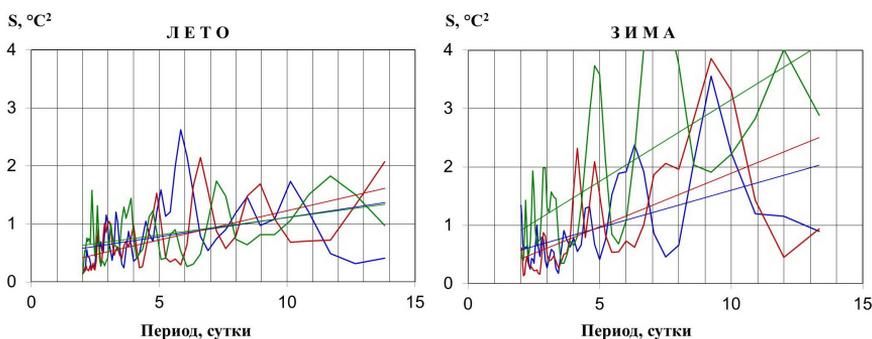


Рис. 2. Спектральная плотность колебаний среднесуточных значений ГОТ в 2020–2022 гг. Цвета графиков соответствуют году на рис. 1

Статистические модели

Коэффициенты парной корреляции между всеми анализируемыми факторами приведены в табл. 2, статистически значимые регрессионные зависимости между отдельными метеофакторами и интенсивностью ГОТ – на рис. 3, 4. В летний период интенсивность ΔT наиболее тесно коррелирует с атмосферным давлением (P_0), скоростью ветра (F), облачностью (N), погодным фактором (Φ_w), влажностью (U) и разностью влажностей (ΔU). Для всех этих факторов корреляция с ΔT статистически значима на уровне 0,05 по критерию Стьюдента, и они являются кандидатами на включение в множественную регрессионную модель. Но, поскольку N и F входят в Φ_w , их следует исключить из модели, оставив лишь Φ_w , наиболее тесно коррелирующий с ΔT . По тем же соображениям мы исключили из модели U , сохранив ΔU . В итоговую регрессионную модель не принято включать и факторы, тесно коррелирующие между собой (мультиколлинеарные). Такая корреляция ($R = 0,58$) наблюдается между P_0 и Φ_w . Однако она не превышает принятого нами порогового значения ($R_{\text{пор}} = 0,7$), поэтому P_0 входит в итоговую модель.

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции метеофакторов и интенсивности ГОТ (ΔT) за летние и зимние периоды 2020–2022 гг. Цветом выделены статистически значимые (по критерию Стьюдента на уровне 0,05) корреляции

	$T_{\text{Екб}}$	$T_{\text{В.Дуб}}$	P_0	F	N	Φ_w	R	U	ΔU	ΔT
	<i>Зима (364 сут)</i>									
$T_{\text{Екб}}$	1	0,99	–0,30	0,24	0,28	–0,34	–0,03	–0,20	0,04	–0,20
$T_{\text{В.Дуб}}$	0,99	1	–0,32	0,28	0,32	–0,38	–0,01	–0,17	0,06	–0,20
P_0	0,15	0,10	1	–0,25	–0,44	0,42	–0,33	–0,16	–0,10	0,30
F	–0,32	–0,28	–0,41	1	0,23	–0,55	–0,01	–0,18	0,25	–0,40
N	–0,49	–0,46	–0,56	0,29	1	–0,79	0,43	0,49	0,09	–0,42
Φ_w	0,50	0,45	0,58	–0,62	–0,83	1	–0,35	–0,26	–0,09	0,52
R	–0,14	–0,12	–0,30	0,12	0,32	–0,31	1	0,38	–0,03	–0,22
U	–0,50	–0,46	–0,44	0,12	0,69	–0,55	0,39	1	–0,06	–0,18
ΔU	0,02	0,10	–0,18	0,31	–0,04	–0,11	0,003	–0,12	1	–0,28
ΔT	0,24	0,12	0,44	–0,40	–0,38	0,50	–0,23	–0,36	–0,66	1

Итоговая модель множественной регрессии для летнего периода выглядит следующим образом:

$$\Delta T = -0,0929\Delta U + 1,15\Phi_w + 0,0190P_0 - 13,97, R_{\Sigma} = 0,773. \quad (1)$$

Она позволяет описать $(R_{\Sigma})^2 = 0,773^2 \cdot 100 = 60$ % изменчивости (дисперсии) среднесуточных значений ΔT . О вкладе каждого из факторов в модель можно судить, сравнив по модулю нормированные на стандартное отклонение коэффициенты регрессии (β -коэффициенты). Наибольший вклад в регрессию вносит разность влажностей ΔU ($\beta = -0,57$), затем погодный фактор ($\beta = 0,30$) и наименьший – атмосферное давление ($\beta = 0,16$).

Регрессионная модель для зимних периодов включает единственную переменную – погодный фактор

$$\Delta T = 2,29\Phi_w - 0,383, R_{\Sigma} = 0,523, \quad (2)$$

позволяющий описать лишь $(R_{\Sigma})^2 = 0,523^2 \cdot 100 = 27$ % наблюдаемой изменчивости среднесуточных значений ΔT .

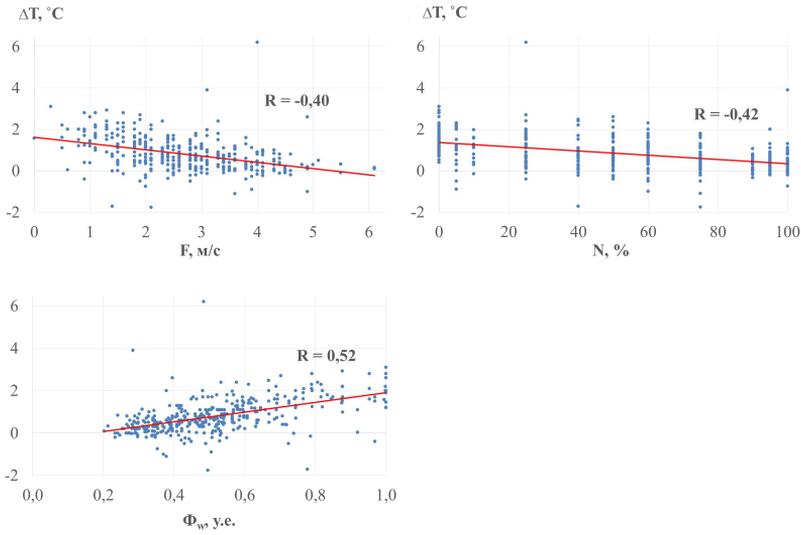


Рис. 3. Зависимости среднесуточной интенсивности ГОТ (ΔT) от метеофакторов в зимний период. Представлены факторы, имеющие статистически значимую связь с ΔT

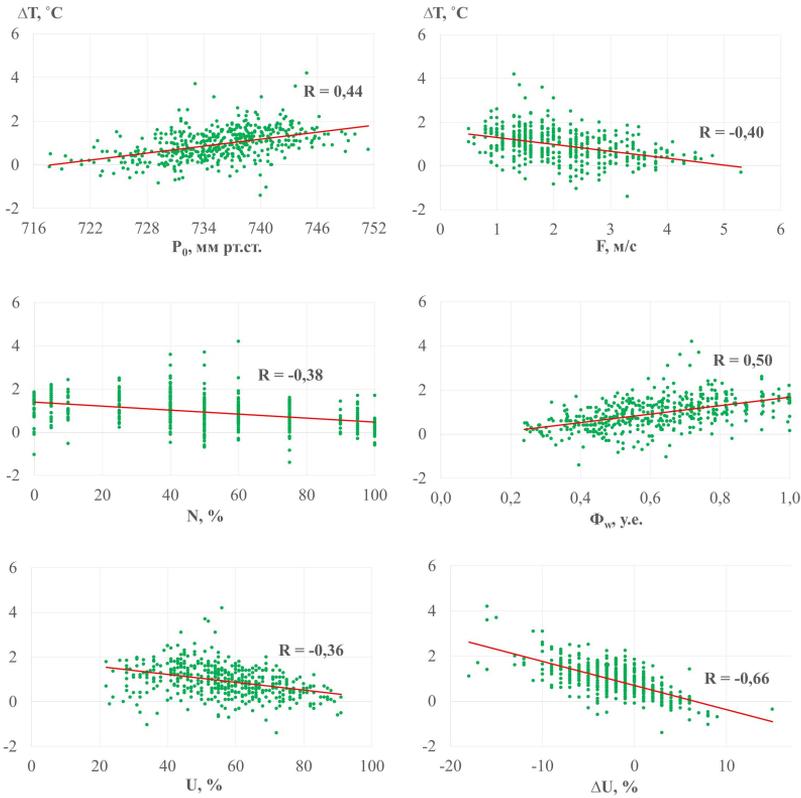


Рис. 4. Зависимости среднесуточной интенсивности ГОТ (ΔT) от метеофакторов в летний период. Представлены факторы, имеющие статистически значимую связь с ΔT

Обсуждение

Погодный фактор привлекается исследователями либо для объяснения суточного цикла интенсивности ГОТ [Fortuniak, 2003; Runnals, Oke, 2006; A diagnostic equation ... , 2017], либо для выделения периодов с «идеальными» погодными условиями, на которых удобно изучать радиационные факторы ГОТ [Gál, Skarbit, Unger, 2016]. Результаты исследования показали, что погодный фактор играет важную роль в формировании среднесуточной интенсивности ГОТ в Екатеринбурге как в холодный, так и в теплый периоды. Причем для зимы он оказался единственным значимым фактором. Высокие значения Φ_w , как и высокие значения P_0 сопровождают периоды антициклонической циркуляции, с характерной для них ясной безветренной погодой. Этим объясняется корреляционная связь между Φ_w и P_0 . В Екатеринбурге периоды с высоким давлением характерны для зимних месяцев, когда Урал входит в область Сибирского антициклона. Летняя погода в основном обусловлена западным переносом воздушных масс и связанных с ним чередованием циклонов и антициклонов, увеличением количества осадков. При этом число пасмурных дней летом меньше, чем зимой [Климат Свердловска, 1981].

В статистические модели ГОТ также нередко входят U или ΔU . При этом рассматривают одну из двух характеристик – парциальное давление водяного пара или относительную влажность. Последняя учитывает температуру воздуха, поскольку от нее зависит давление насыщенных водяных паров. В суточном цикле положительная корреляция между интенсивностью ГОТ и влажностью отмечалась в [Sundborg, 1951; Lindqvist, 1970], отрицательная – в [Kim, Baik, 2002; Roy, Singh, 2015]. Для сезонных циклов упоминается как положительная [Lee, 1991], так и отрицательная [Temporal characteristics of ... , 2007] корреляции влажности и интенсивности ГОТ. В зависимости от знака установленной связи выдвигаются различные механизмы для ее объяснения. Положительную связь объясняют тем, что водяные пары в атмосфере задерживают уходящее длинноволновое излучение с земной поверхности. Увеличение водяных паров в атмосфере приводит к росту ее «освещенности», а обратное, направленное вниз, длинноволновое излучение дополнительно нагревает земную поверхность [Kobayashi, 1982; Lindgren, 1997; Holmer, Eliasson, 1999]. Для объяснения отрицательной связи рассматриваются несколько механизмов. 1. Более интенсивное испарение в сельской местности, где почвы содержат больше влаги, одновременно приводит и к увеличению давления водяных паров в атмосфере, и к уменьшению температуры [Kim, Baik, 2002]. Отметим, что относительная влажность при этом меняется еще больше. 2. При одинаковом содержании водяных паров в городе и селе относительная влажность выше там, где температура ниже [Temporal characteristics of ... , 2007]. Последнее объяснение предполагает, что вовсе не различие влажностей является причиной ГОТ, а прямо наоборот. Возможно, все эти конкурирующие механизмы одновременно, но в разной степени проявляются в различных климатических условиях.

В летний период в Екатеринбурге наблюдаются статистически значимая отрицательная корреляция между ΔU и ΔT (см. табл. 2, рис. 4) и дефицит влаги в городе (см. табл. 1). Здесь могут быть задействованы оба из перечисленных выше механизмов – и более высокая среднесуточная температура в городе, и более интенсивное испарение в сельской местности. Впрочем, исследование теплового баланса в Томске, сходном в климатическом отношении с Екатеринбургом, показало, что затраты тепла на испарение летом незначительны, а зимой и вовсе отсутствуют [Дудорова, Белан, 2016].

Для зимнего периода, напротив, характерен избыток городской влаги (см. табл. 1). Вероятно, это связано с охлаждением теплого воздуха, поступающего в атмосферу города из жилых и производственных зданий, а также с постоянными и аварийными утечками воды из тепловых сетей. При этом среднесуточная интенсивность ГОТ статистически не связана с различием влажностей (см. табл. 2).

Не стало неожиданностью отсутствие связи с количеством осадков. В большинстве опубликованных моделей такая связь также не была выявлена. Исключение составляют исследования [Runnalls, Oke, 2000; He, 2018; Burger, Gubler, Bronnimann, 2022], в которых отмечается ослабляющее влияние осадков на интенсивность ГОТ. Исходя из предположения, что на текущую интенсивность ГОТ могут влиять осадки, накопленные за предшествующий период (это предположение следует из рассмотрения спектральной плотности – рис. 2), мы рассчитали корреляции между ΔT и суммой осадков, накопленных за 3 и 5 сут, включая текущие. Это, однако, не привело к увеличению коэффициентов корреляций, а в зимний период даже несколько их понизило.

Помимо скорости ветра, входящей в погодный фактор, определенную роль, возможно, играет и его направление [Hinkel, Nelson, 2007; Кораблева, Ленская, 2010]. Однако влияние направления ветра будет сильно зависеть от геометрии застройки конкретного района города и для его оценки требуется рассматривать пространственное распределение метеофакторов.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Вариации среднесуточных значений интенсивности городского острова тепла в Екатеринбурге можно описать регрессионными моделями, включающими погодный фактор, атмосферное давление и разность относительных влажностей для летнего периода и единственно погодный фактор – для зимнего. Эти модели описывают 60 % наблюдаемой изменчивости (дисперсии) интенсивности ГОТ летом и лишь 27 % зимой.

2. Интенсивность ГОТ в Екатеринбурге в первую очередь определяется солнечной радиацией и различными свойствами городских и сельских подстилающих поверхностей (альbedo, излучательная способность, тепловые свойства грунтов). Эти факторы определяют максимальную интенсивность ГОТ, реализующуюся лишь при «идеальной» погоде (погодный фактор равен 1). Отклонения от «идеальных» условий, описываемые метеофакторами, лишь уменьшают интенсивность ГОТ.

3. В зимний период дополнительный вклад в интенсивность ГОТ вносят утечки тепла из зданий и тепловых сетей, слабо зависящие от рассмотренных метеофакторов. Вероятно, этим объясняется малая доля дисперсии ΔT , которую можно описать метеофакторами.

Список литературы

Горностаева А. А., Демежко Д. Ю., Хацкевич Б. Д. Временная изменчивость городского острова тепла Екатеринбурга // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 3–18.

Дудорова Н. В., Белан Б. Д. Оценка факторов, определяющих формирование городского острова тепла в г. Томск // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 5. С. 426–436.

Климат Свердловска / под ред. Морокова В. В., Швер Ц. А. Л. : Гидрометеоздат, 1981. 190 с.

Кораблева Е. Г., Ленская О. Ю. Исследования острова тепла города Челябинска в зимний период // Вестник Челябинского государственного университета. Серия: Экология. Природопользование. 2010. № 8 (189), вып. 4. С. 15–23.

Новая модель формирования суточного цикла интенсивности городского острова тепла / Д. Ю. Демежко, А. А. Горностаева, Б. Д. Хацкевич [и др.] // Мониторинг, наука и технологии. 2022. № 4 (54). С. 26–31.

A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe / N. E. Theeuwes, G.-J. Steeneveld, R. J. Ronda, A. A. M. Holtslag // International journal of climatology. 2017. Vol. 37, N 1. P. 443–454.

Burger M., Gubler M., Bronnimann S. Modeling the intra-urban nocturnal summertime air temperature fields at a daily basis in a city with complex topography // Plos climate. 2022. N 1 (12).

Earl N., Simmonds I., Tapper N. Weekly cycles in peak time temperatures and urban heat island intensity // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11. 074003.

Fortuniak K. An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity // Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate. University of Lodz, 2003. Vol. 1. P. 59–62.

Gál T. M., Skarbit N., Unger J. Urban heat island patterns and their dynamics based on an urban climate measurement network // Hungarian Geographical Bulletin (2009). 2016. Vol. 65, N 2. P. 105–116.

He B. J. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects // Urban climate. 2018. N 24. P. 26–33.

Hinkel K. M., Nelson F. E. Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001–2005 // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. D06118. <https://doi.org/10.1029/2006JD007837>

Holmer B., Eliasson I. Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands // International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. 1999. Vol. 19, N 9. P. 989–1009.

Howard L. The climate of London. (W Phillips, sold also by J. A. Arch). 1818. Vol. 1. 221 p.

Kim Y. H., Baik J. J. Maximum urban heat island intensity in Seoul // Journal of Applied Meteorology. 2002. Vol. 41, N 6. P. 651–659.

Kobayashi M. Influence of urbanized atmosphere on longwave radiation field at night // Geographical Review of Japan. 1982. Vol. 55, N 6. P. 421–444.

Lee D.O. Urban-rural humidity differences in London // International journal of climatology. 1991. Vol. 11, N 5. P. 577–582.

Lindgren J. Nocturnal Incoming Radiation in and Around Göteborg. Sweden. Diss. Univ., 1997. B93. P. 47.

Lindqvist S. Bebyggelseklimatologiska studier. Meddelande fran Lunds Universitets Geografiska institution, Avhandlingar LXI (with English summary). 1970.

Luo Z., Asproudi C. Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. P. 530–537.

Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska // *Theoretical and applied climatology*. 1999. Vol. 64, N 1. P. 39–47.

Oke T. R. City size and the urban heat island // *Atmospheric Environment*. 1973. Vol. 7, N 8. P. 769–779.

Oke T. R. The energetic basis of the urban heat island // *Quarterly journal of the royal meteorological society*. 1982. Vol. 108. P. 455.

Oke T. R. Towards better scientific communication in urban climate // *Theoretical and Applied Climatology*. 2006. Vol. 84. P. 179–190.

Runnalls K. E., Oke T. R. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia // *Physical Geography*. 2000. Vol. 21, N 4. P. 283–304.

Runnalls K. E., Oke T. R. A Technique to Detect Microclimatic Inhomogeneities in Historical Records of Screen-Level Air Temperature // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19, N 6. P. 959–978.

Roy S. S., Singh R. B. Role of local level relative humidity on the development of urban heat island across the Delhi Metropolitan Region // *Urban development challenges, risks and resilience in Asian mega cities*. 2015. P. 99–118.

Study of intra-city urban heat island intensity and its influence on atmospheric chemistry and energy consumption in Delhi / N. Yadav, C. Sharma, S. K. Peshin, R. Masiwal // *Sustainable cities and society*. 2017. Vol. 32. P. 202–211.

Sundborg A. Climatological studies in Uppsala // *Geographica*. 1951. Vol. 22. P. 1–107.

Temporal characteristics of the Beijing urban heat island / W. Liu [et al.] // *Theoretical and Applied Climatology*. 2007. Vol. 87, N 1. P. 213–221.

Urban heat island intensity: A literature review / A. Tzavali, J.P. Paravantis, G. Mihalakakou [et al.] // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2015. Vol. 24 (12b). P. 4537–4554.

Varquez A. C. G., Kanda M. Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960–2009) // *Climate and Atmospheric Science*. 2018. Vol. 1, N 1. P. 1–8.

Wolters D., Brandsma T. Estimating the urban heat island in residential areas in the Netherlands using observations by weather amateurs // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2012. Vol. 51, N 4. P. 711–721.

References

Gornostaeva A.A., Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D. Vremennaya izmenchivost gorodskogo ostrova tepla Ekaterinburga [Temporal Variability of an Urban Heat Island in Yekaterinburg]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences], 2023, vol. 43, pp. 3–18. (in Russian)

Dudorova N.V., Belan B.D. Otsenka faktorov, opredelyayushchikh formirovanie gorodskogo ostrova tepla v g. Tomsk [Assessment of factors determining the formation of an urban heat island in Tomsk]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and ocean optics], 2016, vol. 29, no. 5, pp. 426–436. (in Russian)

Klimat Sverdlovsk [Climate of Sverdlovsk]. Ed. by V.V. Morokov, C.A. Shver. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981, pp. 190. (in Russian)

Korableva E.G., Lenskaya O.Yu. Issledovaniya ostrova tepla goroda Chelyabinska v zimnii period [Studies of the heat island of the city of Chelyabinsk in the winter period]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriy: Ekologiya i Prirodopolzovanie* [The Bulletin of Chelyabinsk State University. Ecology. Nature management], 2010, vol. 4, no. 8, pp. 15–23. (in Russian)

Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khatskevich B.D. et al. Novaya model formirovaniya sutochnogo tsikla intensivnosti gorodskogo ostrova tepla [A new model for the formation of the diurnal cycle of the urban heat island intensity]. *Monitoring, nauka i tekhnologii* [Monitoring. Science & Technologies], 2022, vol. 4, no. 4, pp. 26–31. (in Russian)

Theeuwes N. E., Steeneveld G.-J., Ronda R. J., Holtslag A. A. M. A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *International journal of climatology*, 2017, vol. 37, no. 1, pp. 443–454.

Burger M., Gubler M., Bronnimann S. Modeling the intra-urban nocturnal summertime air temperature fields at a daily basis in a city with complex topography. *Plos climate*, 2022, vol. 1, no. 12.

- Earl N., Simmonds I., Tapper N. Weekly cycles in peak time temperatures and urban heat island intensity. *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, 074003.
- Fortuniak K. An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity. *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate*. University of Lodz, 2003, vol. 1, pp. 59-62.
- Gál T.M., Skarbit N., Unger J. Urban heat island patterns and their dynamics based on an urban climate measurement network. *Hungarian Geographical Bulletin (2009-)*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 105–116.
- He B.J. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban climate*, 2018, no. 24, pp. 26-33.
- Hinkel K.M., Nelson F. E. Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001-2005. *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, D06118, <https://doi.org/10.1029/2006JD007837>
- Holmer B., Eliasson I. Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, vol. 19, no. 9, pp. 989-1009.
- Howard L. *The climate of London*. (Phillips W., sold also by J.A. Arch), 1818, vol. 1, pp. 221.
- Kim Y.H., Baik J. J. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, vol. 41, no. 6, pp. 651-659.
- Kobayashi M. Influence of urbanized atmosphere on longwave radiation field at night. *Geographical Review of Japan*, 1982, vol. 55, no. 6, pp. 421-444.
- Lee D.O. Urban-rural humidity differences in London. *International journal of climatology*, 1991, vol. 11, no.5, pp. 577-582.
- Lindgren J. *Nocturnal Incoming Radiation in and Around Göteborg, Sweden*. Diss. Univ. 1997, B93, p. 47.
- Lindqvist S. *Bebyggelse klimatologiska studier*. Meddelande fran Lunds Universitets Geografiska institution, Avhandlingar LXI. 1970.
- Luo Z., Asproudi C. Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 90, pp. 530-537.
- Magee N., Curtis J., Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and applied climatology*, 1999, vol. 64, no. 1, pp. 39-47.
- Oke T.R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973, vol. 7, no. 8, pp. 769-779.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 1982, vol. 108, pp. 455.
- Oke T.R. Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, vol. 84, pp. 179-190.
- Runnalls K.E., Oke T.R. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. *Physical Geography*, 2000, vol. 21, no. 4, pp. 283-304.
- Runnalls K.E., Oke T.R. A Technique to Detect Microclimatic Inhomogeneities in Historical Records of Screen-Level Air Temperature. *Journal of Climate*, 2006, vol. 19, no. 6, pp. 959-978.
- Roy S.S., Singh R.B. Role of local level relative humidity on the development of urban heat island across the Delhi Metropolitan Region. *Urban development challenges, risks and resilience in Asian mega cities*, 2015, pp. 99-118.
- Yadav N., Sharma C., Peshin S.K., Masiwal R. Study of intra-city urban heat island intensity and its influence on atmospheric chemistry and energy consumption in Delhi. *Sustainable cities and society*, 2017, vol. 32, pp. 202-211.
- Sundborg A. Climatological studies in Uppsala. *Geographica*, 1951, vol. 22, pp. 1-107.
- Liu W. et al. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, vol. 87, no. 1, pp. 213-221.
- Tzavali A., Paravantis J.P., Mihalakakou G. [et al.]. Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2015, vol. 24, no. 12b, pp. 4537-4554.
- Varquez A.C.G., Kanda M. Global urban climatology: a meta-analysis of air temperature trends (1960-2009). *Climate and Atmospheric Science*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 1-8.

Wolters D., Brandsma T. Estimating the urban heat island in residential areas in the Netherlands using observations by weather amateurs. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, vol. 51, no. 4, pp. 711-721.

Сведения об авторах

Факаева Нелли Рафаэлевна
младший научный сотрудник
Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича
УрО РАН
Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 100
e-mail: fakaeva.n@gmail.com

Демежко Дмитрий Юрьевич
доктор геолого-минералогических наук
главный научный сотрудник
Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича
УрО РАН
Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 100
e-mail: ddem54@inbox.ru

Горностаева Анастасия Александровна
Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича
УрО РАН
Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 100
e-mail: free_ride_@mail.ru

Хацкевич Богдан Дмитриевич
научный сотрудник
Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича
УрО РАН
Россия, 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 100
e-mail: disaybl@yandex.ru

Information about the authors

Fakaeva Nelly Rafaelevna
Junior Research Scientist
Institute of Geophysics UB RAS
100, Amundsen st., 620016, Yekaterinburg
Russian Federation
e-mail: fakaeva.n@gmail.com

Demezhko Dmitry Yurievich
Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy)
Principal Research Scientist
Institute of Geophysics UB RAS
100, Amundsen st., 620016, Yekaterinburg
Russian Federation
e-mail: ddem54@inbox.ru

Gornostaeva Anastasiya Aleksandrovna
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Senior Research Scientist
Institute of Geophysics UB RAS
100, Amundsen st., 620016, Yekaterinburg
Russian Federation
e-mail: free_ride_@mail.ru

Khatskevich Bogdan Dmitrievich
Research Scientist
Institute of Geophysics UB RAS
100, Amundsen st., 620016, Yekaterinburg
Russian Federation
e-mail: disaybl@yandex.ru