



УДК 551.584+551.588.7
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.3>

Временная изменчивость городского острова тепла Екатеринбурга

А. А. Горностаева, Д. Ю. Демежко, Б. Д. Хацкевич*

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

Аннотация. Проанализирована временная изменчивость городского острова тепла Екатеринбурга в поле приземной температуры воздуха по данным наблюдений на метеостанциях Екатеринбург и Верхнее Дуброво. Рассмотрены долговременные изменения ГОТ за период 1951–2020 гг. в годовом, недельном, суточном циклах. Обнаружено, что годовой цикл среднемесячных значений ГОТ демонстрирует W-образную форму с максимумами (около 1,0 °С) в феврале – марте и в три летних месяца; в суточном цикле максимальная интенсивность ГОТ (до 2,4 °С) наблюдается в мае – июле после захода солнца, при этом присутствует локальный послеполуденный максимум (до 0,8 °С); в осенне-зимний период и в начале весны суточная амплитуда интенсивности ГОТ падает за счет уменьшения максимальной и небольшого повышения минимальной. Обозначены основные факторы, определяющие выявленную временную изменчивость ГОТ. Результаты исследования могут найти применение в фундаментальной и прикладной климатологии, геоэкологии и выработке градостроительной политики.

Ключевые слова: городской остров тепла, микроклимат, климат города.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 22-77-10018), <https://rscf.ru/project/22-77-10018/>

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.3>

Original article

Temporal Variability of an Urban Heat Island in Yekaterinburg

A. A. Gornostaeva, D. Yu. Demezhko, B. D. Khatskevich*

Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article deals with the analysis of temporal variability of the urban heat island (UHI) in the field of surface air temperatures in Yekaterinburg using the data on meteorological observations on weather stations “Yekaterinburg” and “Verkhnee Dubrovo”. The UHI intensity variations have been analyzed for the periods from annual/interannual to diurnal. The sustainable effect of the urban heat island is manifested in all seasons. Annual cycles of monthly averaged UHI values demonstrates “W”-shaped form with maxima of about 1.0 °C in February/March and in three summer months. Summer maximum is generally determined by maximal diurnal (night) UHI values. The maximum in February/March is related to the increased minimum daily values. From the 50s of the 20th century “W”-shaped annual curve of the UHI intensity remained unchanged under the increase in mean an-

nual UHI values while growing at a rate of 1.31 °C/100 years to the beginning of the 80s. At the same time, summer maximum increased at a faster rate in comparison with the winter one. Since the beginning of the 80s, the mean annual UHI intensity has stabilized at the level of 0.8 °C. In a diurnal cycle, the maximal UHI intensity (to 2.4 °C) is observed in May-July after the sunset. Maximal daily UHI intensity values in summer months are associated with a slower cooling of the city in high-rise building area. The local afternoon maximum (up to 0.8 °C) caused by the insolation maximum under low albedo value of the urban coverage occurs also from May to July. In the autumn-winter period and at the beginning of spring, the daily amplitude of the UHI intensity decreases due to a decrease in the maximum of UHI and a slight increase in the minimum one. The increase in the minimum UHI values is facilitated by cloudiness, snow cover, calm wind conditions, an increase in the concentration of aerosol and water vapor near the surface and anthropogenic heat emissions. The study results can be used in fundamental and applied climatology, in the development of urban policy.

Keywords: urban heat island, microclimate, urban climate.

For citation: Gornostaeva A. A., Demezko D. Yu., Khatskevich B. D. Temporal Variability of an Urban Heat Island in Yekaterinburg. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 43, pp. 3-18. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.3> (in Russian)

Введение

Феномен «городского острова тепла» (ГОТ) проявляется положительной разностью температур приземного воздуха (среднегодовых, минимальных, максимальных суточных) в городах и в сельской местности [Chandler, 1970; The climate ... , 1976; Oke, 1979; Rizwan, Dennis, Liu, 2008].

Интенсивность ГОТ характеризуется значительной пространственной и временной изменчивостью. Пространственная изменчивость определяется плотностью и характером городской застройки, свойствами покрытий дорог, тротуаров и крыш, наличием газонов, парков, плотностью населения. Для описания пространственной структуры ГОТ I. D. Stewart и T. R. Oke [2012] предложили классификацию локальных климатических зон (local climate zone – LCZ). Локальная климатическая зона представляется как участок городской или сельской территории размерами обычно менее одного километра с приблизительно однородной застройкой, сходным характером земной поверхности и искусственных покрытий, растительности. Классификация LCZ впоследствии многократно дополнялась, пересматривалась и усложнялась (см. обзор [Mapping Local Climate ... , 2021], рассмотревших более 300 публикаций, посвященных LCZ). В настоящее время она широко используется при изучении эффекта ГОТ по спутниковым данным высокого разрешения с применением геоинформационных технологий [Pichierri, Bonafoni, Biondi, 2012; Sun, Chen, Zhan, 2015; Inter-/intra-zonal seasonal ... , 2019; Lokoshchenko, Eнукова, 2020]. Но спутниковые данные не дают возможности оценить временные особенности формирования эффекта ГОТ, в первую очередь долговременные тренды. Такой анализ можно провести, рассматривая длительные записи, полученные на метеостанциях. В свою очередь, редкая сеть метеостанций в городах не позволяет учесть пространственные неоднородности ГОТ.

Это противоречие отчасти снимают результаты недавних исследований [Quantifying Local ... , 2021], показавшие, что пространственная неоднородность интенсивности ГОТ в Москве обуславливается не столько локальными

факторами (описываемыми в рамках классификации LCZ), сколько мезомасштабными драйверами, оперирующими в радиусе 2–20 км. Их влияние проявляется температурными различиями в однотипных LCZ, но расположенных, к примеру, в центре и на окраине мегаполиса. Таким образом, метеоданные, а особенно длительные ряды метеонаблюдений, можно рассматривать как представительные при исследовании временной динамики ГОТ.

По численности населения (около 1,5 млн чел.) и размеру агломерации Екатеринбург является четвертым крупнейшим городом России, а по объему экономики – третьим. Тем не менее нам не известны работы, в которых Екатеринбург рассматривался как источник городского острова тепла. В настоящей статье мы впервые оцениваем основные характеристики и временную динамику ГОТ Екатеринбурга на основе метеоданных по двум метеостанциям, расположенным в центральной части города и в 20 км от центра.

Исходные данные

Для оценки эффекта ГОТ мы использовали ряды температур приземного воздуха, полученные на метеостанции Екатеринбург. Метеостанция расположена в центральной части города, на возвышенности в окружении парка (рис. 1, табл. 1). К северо-востоку от метеоплощадки находится здание метеоцентра. Ближайшие «сельские» метеостанции, претендующие на роль базовых, – Верхнее Дуброво, Сысерть и Ревда.

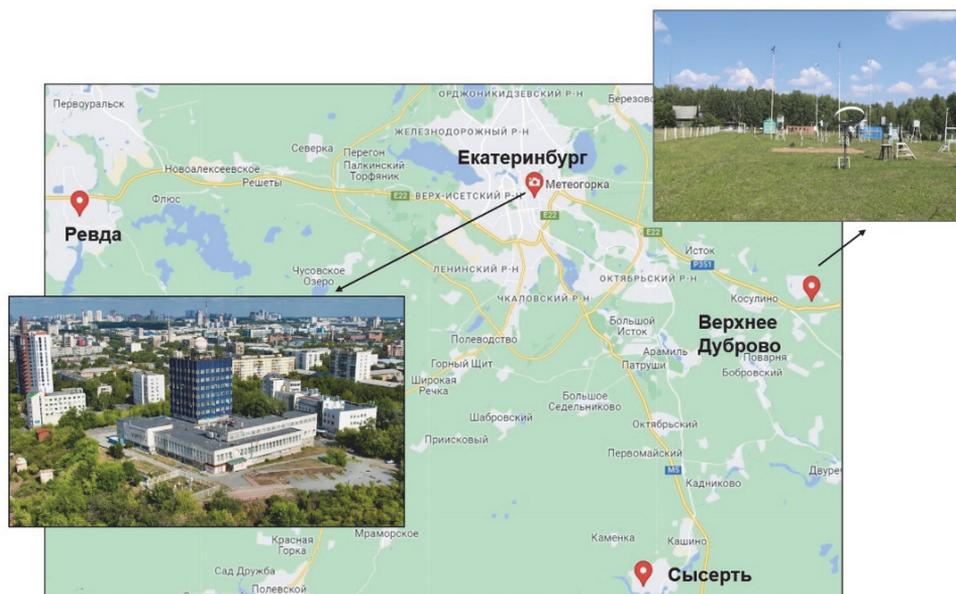


Рис. 1. Расположение площадок (красные метки) и внешний вид метеостанций Екатеринбург и Верхнее Дуброво (фото: Вячеслав Бухаров, Дмитрий Демежко)

Таблица 1

Характеристики метеостанций

Метеостанция	Широта, град.	Долгота, град.	Высота над у. м., м	Расстояние от центра Екатеринбурга, км	Население (на 2021 г.), тыс. чел.
Екатеринбург	56,83	60,63	281	–	1495
Верхн. Дуброво	56,73	61,07	288	28	5
Сысерть	56,50	60,82	263	38	21
Ревда	56,88	59,98	328	43	61

Из трех условно «сельских» метеостанций лучше других удовлетворяет необходимым требованиям расположенная на окраине небольшого поселка метеостанция Верхнее Дуброво. Она находится ближе других к метеостанции Екатеринбург и примерно на той же с ней высоте. Метеостанции Сысерть и Ревда расположены в пределах небольших городов. Температурные ряды по этим станциям имеют значительные пропуски. Метеостанция Ревда – единственная из рассматриваемых находится на западном склоне Уральского хребта. И хотя высота хребта в этом районе невелика, климатические условия в Ревде и трех других пунктах могут значительно различаться. В анализе мы использовали данные о температурах воздуха и других метеопараметрах в Екатеринбурге и Верхнем Дуброво, зарегистрированные Уральским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и опубликованные на специализированных сайтах¹. Интенсивность ГОТ оценивалась как $\Delta T = T_E - T_{ВД}$, где T_E и $T_{ВД}$ – средние температуры приземного воздуха за рассматриваемый период дискретизации (3 часа, месяц, год), соответственно, в Екатеринбурге и Верхнем Дуброво.

Анализ данных и обсуждение

Долговременные тренды. На рис. 2, а приведены изменения среднегодовых температур приземного воздуха, зарегистрированные на метеостанциях Екатеринбург и Верхнее Дуброво, и многолетние линейные тренды. Данные по метеостанции Верхнее Дуброво отражают в основном климатические изменения, в то время как температурные ряды Екатеринбурга – климатические изменения и эффект ГОТ. С начала наблюдений в Екатеринбурге среднегодовая температура непрерывно росла; наиболее быстрыми темпами – в 1951–2000 гг. (табл. 2). В этот период скорость роста температуры в Екатеринбурге обгоняла скорость роста в Верхнем Дуброво на 1,16 °C/100 лет. Теми же темпами увеличивалась и ΔT . Однако в начале XXI в. потепление в Екатеринбурге существенно замедлилось. Это замедление, очевидно, имело региональную климатическую природу, так как подтверждается близкими значениями темпов потепления и в Верхнем Дуброво, но противоречит глобальному тренду для Северного полушария [Land surface air ... , 2021].

Многолетние изменения ΔT приведены на рис. 2, б. Быстрый рост с начала 1950-х гг. прекратился даже раньше, чем замедлились темпы потеп-

¹ Расписание погоды : сайт. URL: <https://tp5.ru> (дата обращения: 24.10.2022); Погода и климат : справочно-информационный портал. URL: www.pogodaiklimat.ru (дата обращения: 30.11.2022).

ления, – уже к концу 1980-х гг. Многолетняя интенсивность ГОТ стабилизировалась на уровне $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Примерно в это время прекратился и рост численности населения Екатеринбурга. Рост возобновился после 2010 г., хотя в этом случае он уже не привел к усилению ГОТ. Можно предположить, что население преимущественно прирастало в новых окраинных районах города.

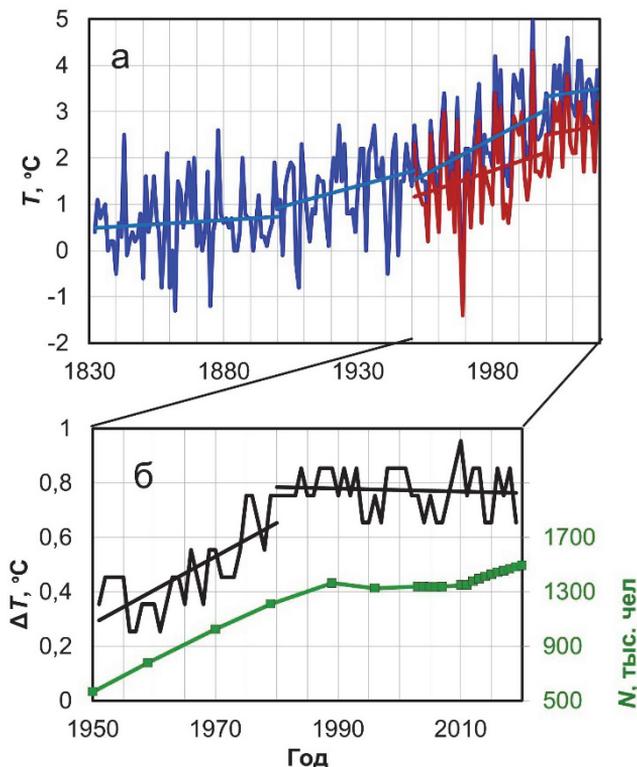


Рис. 2. Изменения среднегодовых температур приземного воздуха (а) в Екатеринбурге (синяя кривая) и Верхнем Дубровно (красная) и интенсивности ГОТ (б – черная кривая). Зеленая кривая – изменение численности населения в Екатеринбурге [Балаев, 2009]. Прямыми линиями обозначены многолетние тренды²

Таблица 2

Скорости изменения среднегодовой температуры приземного воздуха, $^{\circ}\text{C}/100$ лет

Метеостанция	Ид. № W MO	1832–1900 гг.	1900–1951 гг.	1951–2000 гг.	2000–2020 гг.
Екатеринбург	28440	0,35	1,57	3,10	0,90
Верхн. Дуброво	28445			1,94	0,97
Северное полушарие		-0,16 (1850–1900)	1,21	1,09	3,04

² Города и регионы России. URL: <https://gorodarus.ru/ekaterinburg.html> (дата обращения: 30.11.2022)

По данным, представленным на рис. 2, б, связь между ΔT и общей численностью населения в Екатеринбурге N выражается статистически значимой (на уровне 0,95) зависимостью: ΔT (°C) = $4,9 \cdot 10^{-7}N + 0,14$, $R = 0,85$.

Изменение ΔT в 1952–1980 гг. неравномерно распределено по сезонам (табл. 3): наиболее быстрые происходили весной и летом. Тренды 1980–2020 гг. оказались статистически незначимыми.

Таблица 3

Параметры линейной регрессии многолетнего хода средних сезонных значений интенсивности ГОТ, °C/100 лет

Сезон	Период			
	1952–1980 гг.		1980–2020 гг.	
	Скорость изменения ΔT , °C/100 лет	Коэффициент корреляции R	Скорость изменения ΔT , °C/100 лет	Коэффициент корреляции R
Зима	1,12	0,446	0,10	0,084
Весна	1,56	0,741	–0,45	0,421
Лето	1,59	0,707	0,03	0,084
Осень	1,33	0,700	0,14	0,158
Год	1,31	0,798	–0,0009	0,148

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые тренды.

Анализ долговременных трендов может дать представление о влиянии на ГОТ глобальных климатических изменений и антропогенных преобразований, происходящих в самих городах (изменений площади городской территории и характера застройки и кровных материалов, численности и плотности населения, энергопотребления). Однако влияния этих факторов столь сложны и запутанны, а ряды наблюдений в городах и их окрестностях ограничены во времени и пространстве (несколькими десятками лет и одной-двумя станциями), что большинство исследователей даже не пытаются их разделить и обходятся общими рассуждениями. Здесь мы, так же не вдаваясь глубоко в причины наблюдаемых в Екатеринбурге долговременных трендов, рассмотрим, как они соотносятся с трендами в других городах мира.

Многолетние изменения в городах мира демонстрируют разнонаправленные тенденции, хотя в большинстве случаев наблюдается все же рост интенсивности ГОТ [Varquez, Kanda, 2018]. Как правило, за изменения среднегодовых значений ΔT ответственны весенние и/или летние месяцы. При этом изменения общей циркуляции атмосферы оказывают большее влияние на ГОТ, чем местные изменения земного покрова или другие географические условия [Influence of synoptic ... , 2020]. Усиление циклонической активности и увеличение числа аномально теплых дней приводят к снижению интенсивности (стабилизации) ГОТ. В ряде городов, например в Буэнос-Айресе, отмечается устойчивый отрицательный тренд интенсивности ГОТ [Camilloni, Barrucand, 2012], причем максимально высокий спад происходит весной. В Сеуле небольшое снижение максимальной суточной разности температур в 1960–1980 гг. [Temporal dynamics ... , 2019] сменилось резким усилением в 1980–1997 гг. и последующим снижением к настоящему времени. В этом случае причину стабилизации и снижения ΔT связывают уже не с синоптическими факторами, а «с уникальной траекторией урбанизации в

Корею», характеризуемой резкими взлетами и падениями экономического развития.

На фоне нередко встречающейся ситуации стабилизации или даже снижения интенсивности ГОТ Москва демонстрирует его усиление [«Остров тепла» ... ; 2017, Lokoshchenko, 2017]. Колебания скорости роста ГОТ согласуются с интенсивностью и характером развития столицы. С конца XIX в. до 1960-х гг. Москва испытывала интенсивный рост, затем (в 1960–1990-х гг.) – экстенсивный, сопровождающийся расширением ее территории, и вновь интенсивный (с увеличением плотности населения в центре) с конца 1990-х. Вдобавок в этот период резко возросло энергопотребление города.

Несмотря на то что между численностью населения в Екатеринбурге и интенсивностью ГОТ выше была установлена статистически значимая линейная зависимость, мы полагаем, что свою роль в стабилизации уровня ГОТ после 1980 г. мог сыграть перенос метеоплощадки. С начала метеонаблюдений и до 1975 г. она располагалась на открытой вершине Обсерваторской (другое название – Плешивой) горки. В 1975 г. началось строительство нового высотного здания метеоцентра, и метеоплощадку перенесли на несколько десятков метров к западу. К 1980 г. коробка нового здания была построена и стала частично закрывать метеоплощадку с востока (увеличился показатель закрытости неба – с 0 до 3 %). Нельзя отрицать и влияние синоптических факторов, однако их рассмотрение выходит за рамки настоящего исследования.

Годовой цикл. Аномалия ГОТ в течение всего года имеет положительные значения и устойчивую W-образную форму с максимумами в феврале – марте и летом, а минимумами в мае и сентябре – октябре (рис. 3). Между 1952 и 2000 гг. максимальный прирост ΔT (0,6 °C) произошел в мае и в три летних месяца. В итоге к 1980–2020 гг. летний максимум достиг значений зимнего, а мартовский максимум в 2000–2020 гг. даже немного снизился.

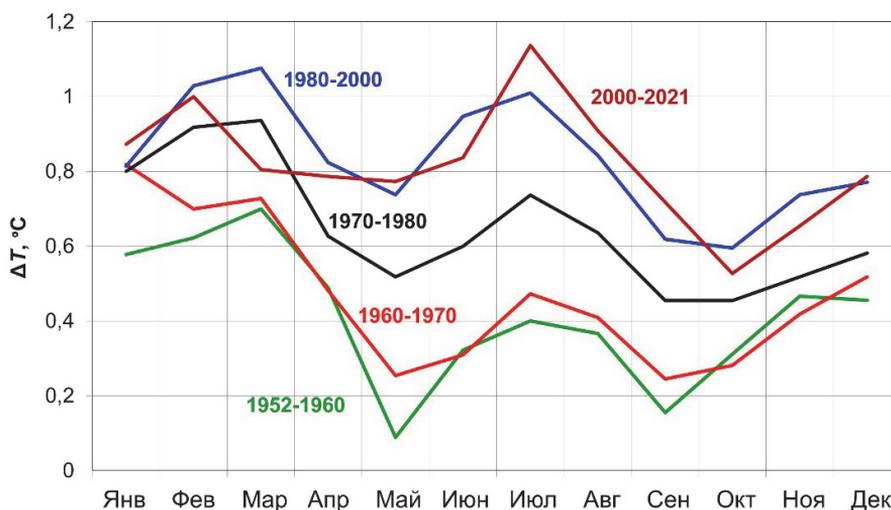


Рис. 3. Годовой ход среднемесячных значений ΔT , усредненных за отдельные периоды

Для многих городов мира характерна U-образная форма годового цикла ΔT [Luo, Asproudi, 2015] с минимумом в летние месяцы. К ним, например, относятся Лондон, Фэрбенкс, Гвадалахара, Буэнос-Айрес, Гранада, Сеул, Пекин, Улан-Батор, Канпур, Томск, Одесса. В городах с умеренным и холодным климатом эту особенность связывают с преобладанием зимних антициклонических циркуляций с ясными безоблачными ночами [Magee, Curtis, Wendler, 1999].

Существенно меньшее число городов демонстрирует противоположный – П-образный характер кривой ΔT с летним максимумом. Среди них: Анкара, Оберхаузен, Будапешт, Лодзи, Дебрецен, Познань, Прага, Бухарест, Москва. Фактором усиления летней интенсивности ГОТ называют более высокую дневную эвапотранспирацию в сельских районах по сравнению с городскими территориями с их непроницаемыми для влаги покрытиями [Adeboyo, 1991]. Этот механизм максимально реализуется в ясные дни в условиях достаточного увлажнения, например, в Париже, а в солнечном, но засушливом Мадриде он не работает [Seasonal hysteresis ... , 2020].

Наконец, как и Екатеринбург, более сложную, W-образную форму годового цикла ΔT показывает Нанкин (Китай) [Urbanization effect ... , 2011]. Авторы полагают, что летние пики обусловлены использованием кондиционеров, а зимние связаны с эксплуатацией отопительных систем. В формировании зимне-весеннего максимума в Екатеринбурге, вероятно, принимают участие и отопительные системы, и антициклонические процессы. Системы кондиционирования здесь еще не получили широкого применения, и летний максимум формируется ясными ночами за счет более интенсивного выхолаживания открытых сельских территорий и в какой-то мере повышенной дневной эвапотранспирацией.

Недельный цикл. Вариации интенсивности ГОТ в недельном цикле, если они устойчиво воспроизводятся по крайней мере в течение сезона, прямо указывают на источник – переменную активность человеческой деятельности. Для Екатеринбурга были рассчитаны недельные вариации среднесуточной интенсивности ΔT , усредненные по сезонам (рис. 4). Максимальное значение ΔT в 2020 г. наблюдалось по пятницам летом. Казалось, ее можно соотнести с увеличением автомобильного трафика в конце рабочей недели, однако статистическая проверка (и по правилу «трех сигм», и сравнением средних по критерию Стьюдента на уровне $p = 0,95$) не подтвердила значимости этой аномалии. Статистически значимой (на уровне $p = 0,95$) оказалась лишь аномалия среднесуточной ГОТ по понедельникам в холодный сезон с ноября 2019-го по март 2020 г. сравнительно с интенсивностью ГОТ по вторникам. Но ее сложно атрибутировать.

В недельном цикле вариаций интенсивности ГОТ участвуют как постоянные, так и переменные факторы [Earl, Simmonds, Tapper, 2016]. К постоянным относятся климатические условия, совместно с крупными городскими структурами формирующие радиационный баланс и фоновую недельную составляющую ΔT , к переменным – недельные циклы антропогенной деятельности. Earl, Simmonds и Tapper [2016] первыми указали на то, что кор-

ректная интерпретация недельных циклов возможна лишь при рассмотрении природы суточных. В то же время ряд исследователей полагает, что наблюдаемые недельные закономерности являются статистически незначимыми в сравнении с фоновой изменчивостью [DeLisi, Cope, Franklin, 2001; Weekly cycle ... , 2009; Comment on “winter ... , 2009; Stjern, 2011]. По-видимому, так же случайны и недельные аномалии, выявленные в Екатеринбурге.

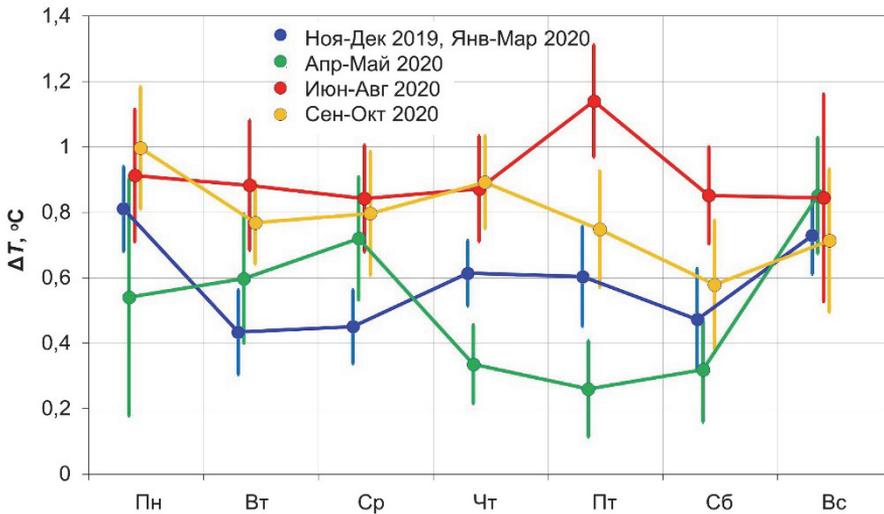


Рис. 4. Недельные вариации среднесуточной интенсивности ГОТ, усредненные по сезонам. Вертикальные планки – погрешности оценки среднего

Суточный цикл. Наибольшие суточные изменения ΔT происходят в мае – июле (рис. 5). Максимум (до 2,0–2,3 °C) наблюдается после захода солнца, минимум – через несколько часов после восхода. В апреле – мае ΔT в утренние часы ненадолго становится слабоотрицательной (–0,1 °C). Этот феномен известен как «городской остров прохлады». В мае – июле отчетливо проявляется 14-часовой максимум. В осенне-зимний период амплитуда суточных вариаций ΔT значительно меньше за счет существенного снижения максимальных суточных значений и небольшого повышения минимальных.

Эти особенности суточного цикла проявляются в большинстве городов мира. Максимум ΔT после захода солнца объясняется более быстрым охлаждением сельских территорий [Oke, 1982; Earl, Simmonds, Tapper, 2016; Jongtanom, Kositanont, Baulert, 2011; Kim, Baik, 2002; Temporal and spatial ... , 2009]. В городах уходящее длинноволновое излучение отчасти поглощается стенами домов. Максимум тем выше, чем больше коэффициент закрытости неба (sky view factor), т. е. в районах с плотной многоэтажной застройкой. Однако метеостанция Екатеринбурга расположена на возвышенности и с трех сторон окружена парком, а величина коэффициента закрытости неба невелика – около 3 %. Следовательно, максимум ΔT здесь связан с мезомасштабными процессами, а не с локальными особенностями метеоплощадки.

Эти же факторы ответственны за появление отрицательных значений ΔT в утренние часы апреля – мая. Геометрия городов (эффект каньона) препятствует прямой утренней инсоляции земной поверхности [Oke, 1982; Cool city mornings ... , 2015; Earl, Simmonds, Tapper, 2016], поэтому открытые сельские территории прогреваются быстрее.

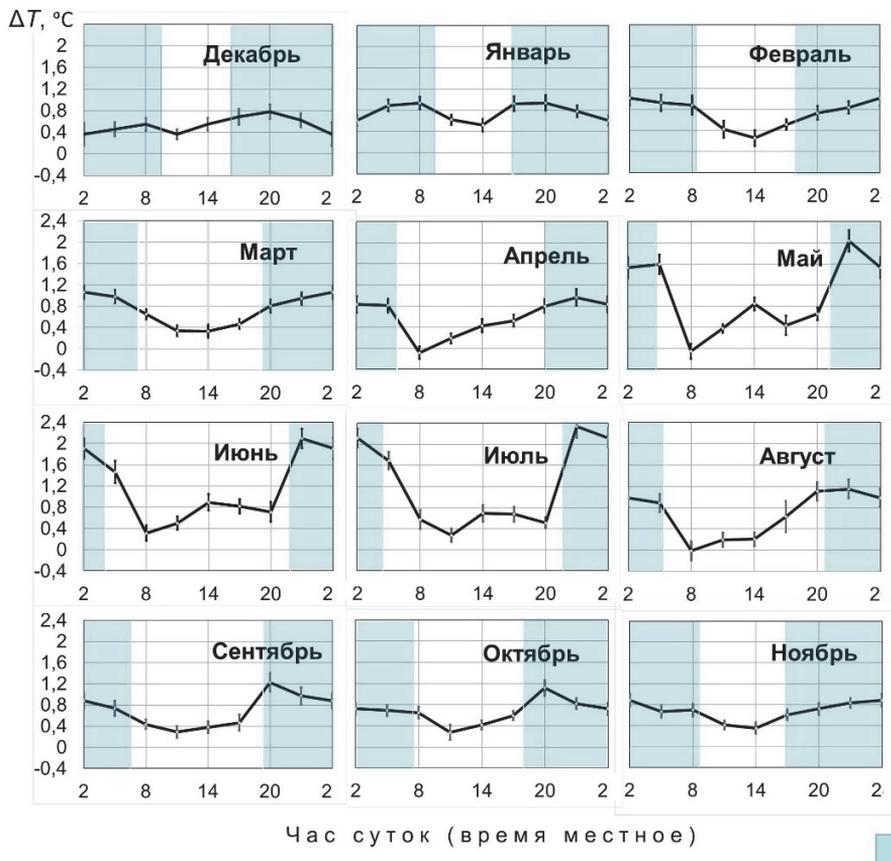


Рис. 5. Суточные изменения интенсивности ГОТ (3-часовые средние значения ΔT , усредненные за месяц 2020 и 2021 гг.). Вертикальные планки – погрешности оценки среднего. Голубым цветом выделен временной интервал от захода до восхода солнца для каждого месяца года

Максимум в мае – июле около 14–17 часов связан с суточным ходом инсоляции и более низким альбедо асфальтированных поверхностей. Трех-часовая дискретизация данных не дает возможности оценить запаздывание максимума ΔT относительно солнечного полдня (около 13 часов). Однако наши предыдущие исследования фазовых соотношений между изменениями потока солнечной радиации и температурой прогнозируют отставание температуры в 2–3 часа [Горностаева, Демежко, Антипин, 2021; Демежко, Горностаева, Антипин, 2022].

В зимний период в присутствии снежного покрова инсоляционный источник ГОТ ослабевает и температурная разность в большей степени обеспечивается техногенными источниками (отопительными системами домов, тепловыми сетями, автомобильными выбросами) [Дудорова, Белан, 2016]. Так как эти источники действуют круглосуточно, они увеличивают минимальные значения ΔT . Именно ростом минимальных значений объясняется зимний максимум среднесуточных значений ΔT в годовом цикле.

Довольно резкое уменьшение ΔT в августе, вероятно, связано с погодными изменениями. Известно, что облачность снижает температурную разницу между городом и селом. В Екатеринбурге между среднесуточным значением ΔT с одной стороны, облачностью и осадками – с другой установлены значимые отрицательные корреляции (табл. 4). Облачность и осадки в первую очередь влияют на максимальное суточное (ночное) значение ΔT , поскольку облачность нивелирует различия в интенсивности радиационного охлаждения в городе и селе. Минимальные (утренние) значения ΔT практически не зависят от облачности. Связь минимальных значений ΔT с осадками положительная, хотя и слабая. Она, вероятно, обусловлена эффектом эвапотранспирации и испарения влаги с поверхности. Испарение влаги несколько уменьшает температуру поверхности в большей степени в сельской местности, нежели в городах с непроницаемыми покрытиями и ливневой канализацией [Adebaayo, 1991]. Впрочем, это влияние для Екатеринбурга, как и для близкого к нему Томска [Дудорова, Белан, 2016], незначительно.

Таблица 4

Коэффициенты парной корреляции между облачностью, осадками и интенсивностью ГОТ в июле – августе 2020 г.

Параметр	Среднесуточное значение ΔT	Минимальное суточное значение ΔT	Максимальное суточное значение ΔT
Облачность, среднесуточный балл	-0,492	-0,014	-0,662
Суточная сумма осадков, мм	-0,26	+0,146	-0,441

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые тренды.

Заключение

Как и большинство городов мира, Екатеринбург демонстрирует устойчивый эффект городского острова тепла во все сезоны. В суточном цикле максимальная интенсивность ГОТ (до 2,4 °С) наблюдается в мае – июле после захода солнца, минимальная, близкая к нулю или слабоотрицательная, – также весной – летом, перед восходом. Максимальные суточные значения ΔT в летние месяцы связаны с более медленным остыванием города в районах многоэтажной застройки. В мае – июле также проявляется локальный послеполуденный максимум (до 0,8 °С), обусловленный максимумом инсоляции при низком значении альбедо городских покрытий. В осенне-зимний период и в начале весны суточная амплитуда интенсивности ГОТ падает за счет уменьшения максимальной и небольшого повышения минимальной. Повышению минимальных значений ΔT способствуют облачность, снежный

покров, спокойная ветровая обстановка, рост концентрации аэрозоля и водяного пара вблизи поверхности и антропогенные выбросы тепла.

Годовой цикл среднемесячных значений ΔT демонстрирует W-образную форму с максимумами (около $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) в феврале – марте и в три летних месяца. Летний максимум в основном определяется максимальными суточными (ночными) значениями ΔT , максимум в феврале – марте – повышенными минимальными суточными значениями. С 50-х гг. XX в. W-образная годовая кривая интенсивности ГОТ оставалась неизменной при росте среднегодовых значений со скоростью $1,31\text{ }^{\circ}\text{C}/100$ лет до начала 1980-х. При этом летний максимум увеличивался опережающими темпами в сравнении с зимним. С начала 1980-х гг. среднегодовая интенсивность ГОТ стабилизировалась на уровне $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Условия размещения метеостанции в Екатеринбурге (в центральной части города, на возвышенности в окружении парка) позволяют предположить, что полученные здесь оценки интенсивности ГОТ характеризуют мезомасштабные факторы формирования городского острова тепла. Вероятно, локальные значения существенно различаются: на участках с многоэтажной застройкой суточная амплитуда и среднесуточные значения интенсивности ГОТ могут быть выше, а в лесопарковых зонах на окраинах – ниже.

Список литературы

Балаев С. Ю. Строительный рынок Екатеринбурга и Свердловской области // Энциклопедия маркетинга : сайт. URL: <https://www.marketing.spb.ru/mr/realstate/eburg.htm> (дата обращения: 23.09.2009).

Горностаева А. А., Демежко Д. Ю., Антипин А. Н. Температурный отклик на внешнее радиационное воздействие: Верификация простой модели // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 4. С. 5–19. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.4-1>

Демежко Д. Ю., Горностаева А. А., Антипин А. Н. Оценка фазовых соотношений между тепловыми потоками и температурой земной поверхности в суточном цикле по результатам мониторинга на ОГМС «Верхнее Дуброво» // Литосфера. 2022. Т. 22(2). С. 239–250. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-2-239-250>

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

«Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления / А. В. Кислов, М. И. Варенцов, И. А. Горлач, Л. И. Алексеева // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2017. № 4. С. 12–19.

Adebayo Y. Day-Time Effects of Urbanization on Relative Humidity and Vapour Pressure in a Tropical City // Theoretical and Applied Climatology. 1991. Vol. 43. P. 17–30. <https://doi.org/10.1007/BF00865039>

Camilloni I., Barrucand M. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island // Theoretical and Applied Climatology. 2012. Vol. 107, N 1. P. 47–58.

Chandler T. J. Selected bibliography on urban climate. Tech. Note N 155. Geneva : World Met. Organiz., 1970. WMO N 276. 383 p.

Comment on “winter ‘weekend effect’ in Southern Europe and its connection with periodicities in atmospheric dynamics” by a Sanchez-Lorenzo et al. / H. J. Hendricks Franssen, T. Kuster, P. Barmet, U. Lohmann // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. L13706.

Cool city mornings by urban heat / N. E. Theeuwes, G. J. Steeneveld, R. J. Ronda [et al.] // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10 (114022).

DeLisi M. P., Cope A. M., Franklin J. K. Weekly precipitation cycles along the northeast corridor? // Weather Forecast. 2001. Vol. 16. P. 343–53.

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

Influence of synoptic scale atmospheric circulation on the development of urban heat island in Prague and Bucharest / M. Zak, I. A. Nita, A. Dumitrescu, S. Cheval // *Urban Climate*. 2020. Vol. 34. P. 100681.

Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities / J. Geletič, M. Lehnert, S. Savić, D. Milošević // *Building and Environment*. 2019. Vol. 156. P. 21–32.

Jongtanom Y., Kositanont C., Baulert S. Temporal variations of urban heat island intensity in three major cities, Thailand // *Modern Applied Science*. 2011. Vol. 5, N 5. P. 105.

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

Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: the CRUTEM5 dataset / T. J. Osborn, P. D. Jones, D. H. Lister [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. Vol. 126. <https://doi.org/10.1029/2019JD032352>

Lokoshchenko M. A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017. Vol. 56, N 10. P. 2729–2745.

Lokoshchenko M. A., Erukova E. A. Urban Heat Island in Moscow Derived from Satellite Data // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. Vol. 45, N 7. P. 488–97.

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

Mapping Local Climate Zones: A Bibliometric Meta-Analysis and Systematic Review / S. Jiang, F. Huang, W. Zhan [et al.] // *OSF Prepr.* 2021. P. 1–106. <https://doi.org/10.31219/osf.io/c2bez>.

Oke T. R. Review of urban climatology, 1973–1976. Tech. Note N 169. Geneva : World Met. Organiz, 1979. WMO N 539.100 p.

Oke T. R. The energetic basis of the urban heat island // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1982. Vol. 108. 455 p.

Pichierri M., Bonafoni S., Biondi R. Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 127. P. 130–138.

Quantifying Local and Mesoscale Drivers of the Urban Heat Island of Moscow with Reference and Crowdsourced Observations / M. Varentsov, D. Fenner, F. Meier [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. P. 716968. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.716968>

Rizwan A. M., Dennis L. Y. L., Liu C. A review on the generation determination and mitigation of Urban Heat Island // *Journal of Environmental Sciences*. 2008. Vol. 20. P. 120–128.

Seasonal hysteresis of surface urban heat islands / G. Manoli, S. Fatichi, E. Bou-Zeid, G. G. Katul // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117, N 13. P. 7082–7089.

Stewart I. D., Oke T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies // *Bulletin of American Meteorological Society*. 2012. Vol. 93. P. 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Stjern C. W. Weekly cycles in precipitation and other meteorological variables in a polluted region of Europe Atmos // *Chemical Physics*. 2011. Vol. 11. P. 4095–104.

Sun H., Chen Y., Zhan W. Comparing surface- and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. P. 5448–5465.

Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai / K. Zhang, R. Wang, C. Shan, L. Da // *China. Environmental Monitoring and Assessment*. 2009. Vol. 169, N 1-4. P. 101–112.

Temporal dynamics of urban heat island correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea / J. W. Hong [et al.] // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 254. P. 112934.

The climate of towns, Ch. 14 in the “The Climate of the British Isles” / T. J. Chandler, S. Gregory (eds.). London : Longman, 1976. P. 307–329.

Urbanization effect on soil temperature in Nanjing, China / C. S. Tang, B. Shi, L. Gao, J. L. Daniels, H. T. Jiang, C. Liu // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, N 11. P. 3090–3098.

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.

Weekly cycle in particulate matter versus weekly cycle in precipitation over Switzerland / P. Barmet, T. Kuster, A. Muhlbauer, U. Lohmann // *Journal of Geophysical Research*. 2009. Vol. 114. D05206.

References

Balaev S.Yu. *Stroitel'nyi rynek Ekaterinburga i Sverdlovskoi oblasti* [Construction market of Yekaterinburg and Sverdlovsk region]. Available at: <https://www.marketing.spb.ru/mr/realstate/eburg.htm> (date of access: 23.09.2009). (in Russian)

Gornostaeva A.A., Demezko D.Yu., Antipin A.N. Temperaturnyi otklik na vneshnee radiatsionnoe vozdeistvie: Verifikatsiya prostoi modeli [Temperature response to external radiative forcing: Verification of a simple model]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera* [Geophysical Processes and Biosphere], 2021, vol. 20, no. 4, pp. 5-19. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.4-1> (in Russian)

Demezko D.Yu., Gornostaeva A.A., Antipin A.N. Otsenka fazovykh sootnoshenii mezhdru teplovymi potokami i temperaturai zemnoi poverkhnosti v sutochnom tsikle po rezul'tatam monitoringa na OGMS “Verkhnee Dubrovo” [Estimation of the phase relationships between heat fluxes and the ground surface temperature in a daily cycle based on the results of monitoring at the “Verkhnee Dubrovo” meteorological station]. *Litosfera* [Lithosphere], 2022, vol. 22, no. 2, pp. 239-250. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-2-239-250> (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)

Kislov A.V., Varentsov M.I., Gorlach I.A., Alekseeva L.I. “Ostrov tepla” moskovskoi aglomeratsii i urbanisticheskoe usilenie global'nogo potepleniya [“Heat Island” of the Moscow agglomeration and urban increase in global warming]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography], 2017, no. 4, pp. 12-19. (in Russian)

Adebayo Y. Day-Time Effects of Urbanization on Relative Humidity and Vapour Pressure in a Tropical City. *Theoretical and Applied Climatology*, 1991, vol. 43, pp. 17-30. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00865039>

Camilloni I., Barrucand M. Temporal variability of the Buenos Aires, Argentina, urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, vol. 107, no. 1, pp. 47-58.

Chandler T. J. *Selected bibliography on urban climate. Tech. Note N 155*. Geneva, World Met. Organiz., 1970, WMO N 276, 383 p.

Hendricks Franssen H.J., Kuster T., Barmet P., Lohmann U. Comment on ‘winter ‘weekend effect’ in Southern Europe and its connection with periodicities in atmospheric dynamics’ by a Sanchez-Lorenzo et al. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36 (L13706).

Theeuwes N.E., Steeneveld G.J., Ronda R.J., Rotach M.W., Holtslag A.A. Cool city mornings by urban heat. *Environmental Research Letters*, 2015, vol. 10 (114022).

DeLisi M.P., Cope A.M., Franklin J.K. Weekly precipitation cycles along the northeast corridor? *Weather Forecast*, 2001, vol. 16, pp. 343-53.

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

Zak M., Nita I.A., Dumitrescu A., Cheval S. Influence of synoptic scale atmospheric circulation on the development of urban heat island in Prague and Bucharest. *Urban Climate*, 2020, vol. 34, pp. 100681.

Geletič J., Lehnert M., Savić S., Milošević D. Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. *Building and Environment*, 2019, vol. 156, pp. 21-32.

- Jongtanom Y., Kositanont C., Baulert S. Temporal variations of urban heat island intensity in three major cities, Thailand. *Modern Applied Science*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 105.
- Kim Y.H., Baik J.J. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, vol. 41(6), pp. 651-659.
- Osborn T.J., Jones P.D., Lister D.H. [et al.]. Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: the CRUTEM5 dataset // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126. <https://doi.org/10.1029/2019JD032352>
- Lokoshchenko M.A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, vol. 56, no. 10, pp. 2729-2745.
- Lokoshchenko M.A., Erukova E.A. Urban Heat Island in Moscow Derived from Satellite Data. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, vol. 45(7), pp. 488-497.
- 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.
- Jiang S., Huang F., Zhan W., Bechtel B., Liu Z., Demuzere M., Huang Y., Xu Y., Quan J., Xia W., Ma L. Mapping Local Climate Zones: A Bibliometric Meta-Analysis and Systematic Review. *OSF Prepr*, 2021, pp. 1-106. <https://doi.org/10.31219/osf.io/c2bez>
- Oke T.R. *Review of urban climatology, 1973-1976. Tech. Note N 169*. Geneva, World Met. Organiz., 1979, WMO N 539, 100 p.
- Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 1982, vol. 108, 455 pp.
- Pichierri M., Bonafoni S., Biondi R. Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 127, pp. 130-138.
- Varentsov M., Fenner D., Meier F., Samsonov T., Demuzere M. Quantifying Local and Mesoscale Drivers of the Urban Heat Island of Moscow with Reference and Crowdsourced Observations. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, vol. 9, pp. 716968. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.716968>
- Rizwan A.M., Dennis L.Y.L., Liu C. A review on the generation determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, vol. 20, pp. 120-8.
- Manoli G., Faticchi S., Bou-Zeid E., Katul G.G. Seasonal hysteresis of surface urban heat islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, vol. 117, no. 13, pp. 7082-7089.
- Stewart I.D., Oke T.R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2012, vol. 93, pp. 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stjern C.W. Weekly cycles in precipitation and other meteorological variables in a polluted region of Europe Atmos. *Chemical Physics*, 2011, vol. 11, pp. 4095-104.
- Sun H., Chen Y., Zhan W. Comparing surface- and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 36, pp. 5448-5465.
- Zhang K., Wang R., Shan C., Da L. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai. China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, vol. 169, no. 1-4, pp. 101-112
- Hong J.W. [et al.]. Temporal dynamics of urban heat island correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, pp. 112934.
- Chandler T.J. *The climate of towns, Ch. 14 in the "The Climate of the British Isles"*, Chandler T.J., and Gregory S. (eds.), London, Longman, 1976, pp. 307-329.
- Tang C.S., Shi B., Gao L., Daniels J.L., Jiang H.T., Liu C. Urbanization effect on soil temperature in Nanjing, China. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, no. 11, pp. 3090-3098.
- 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.
- Barnet P., Kuster T., Muhlbauer A., Lohmann U. Weekly cycle in particulate matter versus weekly cycle in precipitation over Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, 2009, vol. 114 (D05206).

Сведения об авторах

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

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

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

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

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

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

Код научной специальности: 1.6.21

Статья поступила в редакцию 25.08.2022; одобрена после рецензирования 20.12.2022; принята к публикации 05.03.2023

The article was submitted August, 25, 2022; approved after reviewing December, 20, 2022; accepted for publication March, 5, 2023