

УДК 551.588.7 551.524.3

О ГОДОВОМ ХОДЕ “ОСТРОВА ТЕПЛА” МОСКВЫ И ВЛИЯНИИ НА НЕГО КАРАНТИННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ПАНДЕМИИ КОРОНАВИРУСА В 2020 г.

© 2022 г. М. А. Локощенко^а, *, Л. И. Алексеева^а

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: loko@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 26.10.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

По данным метеорологической сети Москвы и Московского региона за 2018–2020 гг. подробно исследованы сезонные различия в показателях интенсивности городского “острова тепла” российской столицы. Показано, что годовой ход этого явления выражен сравнительно слабо. В большинстве случаев “остров тепла” сильнее всего проявляется летом и слабее зимой, однако в отдельные месяцы соотношение бывает обратным. Вопрос о статистической достоверности сезонных различий остается открытым. Наиболее тесная статистическая связь “острова тепла” выявлена с нижней облачностью в ночные часы, так что наибольшая его интенсивность отмечается в наименее облачные сезоны (обычно это лето). Функции распределения интенсивности “острова тепла” близки к нормальному закону летом и весной; зимой и осенью им присуща заметная положительная асимметрия вследствие уменьшения значений и приближения моды к нижнему физическому пределу. Период жестких карантинных ограничений во время пандемии коронавирусной инфекции весной и в начале лета 2020 г. привел к резкому и статистически достоверному ослаблению “острова тепла” Москвы — вероятно, вследствие как природных причин (повышенной облачности), так и деятельности человека (резкого сокращения антропогенного потока тепла и ослабления городской индустриальной дымки, создающей дополнительное противоизлучение).

Ключевые слова: остров тепла, интенсивность, температура воздуха, сезонные различия, статистическая достоверность, облачность, пандемия коронавирусной инфекции, антропогенный поток тепла

DOI: 10.31857/S0002351522020080

1. ВВЕДЕНИЕ

Задачей авторов явился анализ сезонных различий в интенсивности городского “острова тепла” Москвы, а также влияния на нее карантинных мероприятий (периода самоизоляции) во время первой волны пандемии коронавируса (COVID-19) в 2020 г. Известно, что “острова тепла” создаются различиями в радиационном балансе (разным в городе и за городом альбедо поверхности, усиливающей противоизлучение индустриальной дымкой), уменьшением затрат тепла на испарение осадков (вследствие их искусственного стока) и на транспирацию растениями (которых в городе меньше), прямыми выбросами тепла вследствие человеческой деятельности и др. [1, 2]. Порой к числу причин этого явления относят также большую теплоемкость асфальта и бетона в городах (стен зданий, дорожных покрытий и т.п.). Однако данный фактор приводит скорее не к образованию “островов тепла”, а к смещению во времени суточного хода их интенсивности: усилению “острова тепла” в начале ночи вследствие инерции остывания и его

ослаблению (или даже образованию недолгого “острова холода”) в городе ранним утром вследствие инерции нагрева этих поверхностей. Известно также, что “острова тепла” сильно зависят от синоптических условий: усиливаются в антициклонах при штилевой и ясной погоде.

Вопрос о годовом ходе интенсивности городских “островов тепла” в средних широтах неочевиден. Зимой сильнее антропогенные выбросы тепла вследствие работы городского отопления. С другой стороны, летом в тепловом балансе городов по сравнению с сельской местностью меньше потерь на испарение осадков и транспирацию растений. Кроме того, летом в средних широтах ослабевает зональный перенос и чаще отмечаются застои воздуха с ясными и тихими ночами, усиливающими “остров тепла”. Впрочем, усиливаться он может и зимой при ясной антициклональной погоде во время сильных морозов. Таким образом, действие разных факторов в годовом ходе разнонаправленное. Применительно к Москве с осреднением за разные периоды были получены противо-

положительные выводы о годовом ходе “острова тепла”: так, в [3] отмечен максимум интенсивности зимой, в [4] — летом. Неоднозначность сезонных особенностей “острова тепла” Москвы отражена в [5]. Для прояснения этого вопроса, а также влияния на “остров тепла” резкого снижения человеческой деятельности во время строгого карантина, потребовалось отдельное исследование.

Как известно, оценки антропогенного потока тепла в городах чрезвычайно затруднены вследствие невозможности его прямых измерений. Тем не менее, очевидны его наибольшие значения во время отопительного сезона на средних и высоких широтах. Иногда этим потоком либо пренебрегают, если рассматривают летние условия [6], либо считают его остаточным членом в расчетах теплового баланса. Однако при этом в его оценках заключены сопоставимые с его значениями ошибки в определении остальных членов, что порой приводит к нереальным выводам об отрицательных значениях этого потока в летние месяцы [7]. В большинстве работ антропогенный поток тепла оценивается косвенно на основе либо обобщенных данных для больших территорий, либо получения оценок этого потока для отдельных малых объектов и их расширения до масштабов всего города [2]. Примером первого подхода служат оценки антропогенного потока тепла в [8] по числу выделяющих тепло строений и автомобилей, а также по скорости метаболизма общего числа жителей города; примером второго — оценки в [9] энергопотребления каждого отдельного здания и их обобщение на единицу площади с использованием крупномасштабных карт. Результаты расчетов сильно разнятся в разных местах: от 12–13 Вт/м² в пригороде Ванкувера, Канада [8] до 1590 Вт/м² в центре Токио, Япония [9]; по обобщенным данным для любых городов — от 5 до 160 Вт/м² в среднем за год [2]. По оценке [10], вклад антропогенного потока тепла в образование “острова тепла” Томска в России достигает от 40–50% (~20–25 Вт/м²) летом до 80–90% (~70–75 Вт/м²) в условиях суровых сибирских зим. Помимо прямого влияния выбросов тепла, “острова тепла” создаются также антропогенными изменениями в радиационном балансе и в других потоках теплового баланса. Глобальный карантин из-за пандемии коронавируса в 2020 г. открыл уникальную возможность оценки интенсивности городских “островов тепла” при резком ослаблении создающих его антропогенных факторов — как прямых, так и косвенных — в сравнении с обычными условиями в иные годы.

2. СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ “ОСТРОВА ТЕПЛА” МОСКВЫ

Нами использованы данные о температуре воздуха в 2018–2020 гг. традиционных (оснащенных

персоналом) метеорологических станций: всех пяти в Москве и 13 из 14 станций в Подмосковье. Станция Немчиновка в силу ее пограничного положения (нахождения вблизи МКАД — традиционной границы города) исключена из анализа, поскольку она стабильно показывает промежуточные значения между городскими и загородными станциями [11]. Используются два показателя — как наибольшая ΔT_{MAX} , так и средняя по площади города $\Delta T_{\text{ср.}}$ интенсивности “острова тепла” [12]:

$$\Delta T_{\text{MAX}} = T_C - \frac{\sum_{j=1}^m T_{R_j}}{m}; \quad (1)$$

$$\Delta T_{\text{ср.}} = \frac{T_C + \sum_{i=1}^n T_{U_i}}{n+1} - \frac{\sum_{j=1}^m T_{R_j}}{m}, \quad (2)$$

где T_C — температура воздуха на станции в центре города; T_U — на остальных городских станциях; T_R — на загородных станциях; n — число станций на периферии города; m — число станций в сельской местности в окрестности города (в нашем случае $n = 4$; $m = 13$). Наибольшая интенсивность более показательна с точки зрения различий города и окружающей местности, если выбранная станция находится в зоне наиболее плотной застройки (которая, вообще говоря, может находиться не в центре города, а в любой его точке). Однако она чувствительна к качеству данных единственной станции, выбранной для сравнения с фоновыми условиями. Москва — удачный объект исследований городской климатологии в силу ее простой геометрической формы, близкой к эллипсу (в пределах традиционных границ до 2012 г.), и общего уменьшения плотности застройки от центра к краям города. Начиная с 1946 г., центральной станцией в Москве, сильнее прочих отражающей влияние города, является Балчуг в 600 м от центра Кремля. В отличие от ΔT_{MAX} , средняя интенсивность $\Delta T_{\text{ср.}}$ учитывает данные всех станций в черте города и потому более надежна, но влияние города в ней проявляется слабее.

На рис. 1а–1в показаны результаты расчетов ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср.}}$ для условий Москвы за каждый день трех лет. Как видим, однозначных сезонных различий нигде не видно: они маскированы сильной междусуточной изменчивостью. Средние значения и стандартные отклонения обоих показателей приведены в табл. 1. Как видно, наибольшая в годовом ходе интенсивность “острова тепла” наблюдается летом или, в редких случаях, весной ($\Delta T_{\text{ср.}}$ в 2019 г.). Наименьшая интенсивность обычно отмечается зимой, хотя значения $\Delta T_{\text{ср.}}$ осенью 2018 и 2020 гг., а также весной 2020 г. во время карантинных ограничений оказались столь же низкими, как и зимой. Очевидно также резкое ослабление “ост-

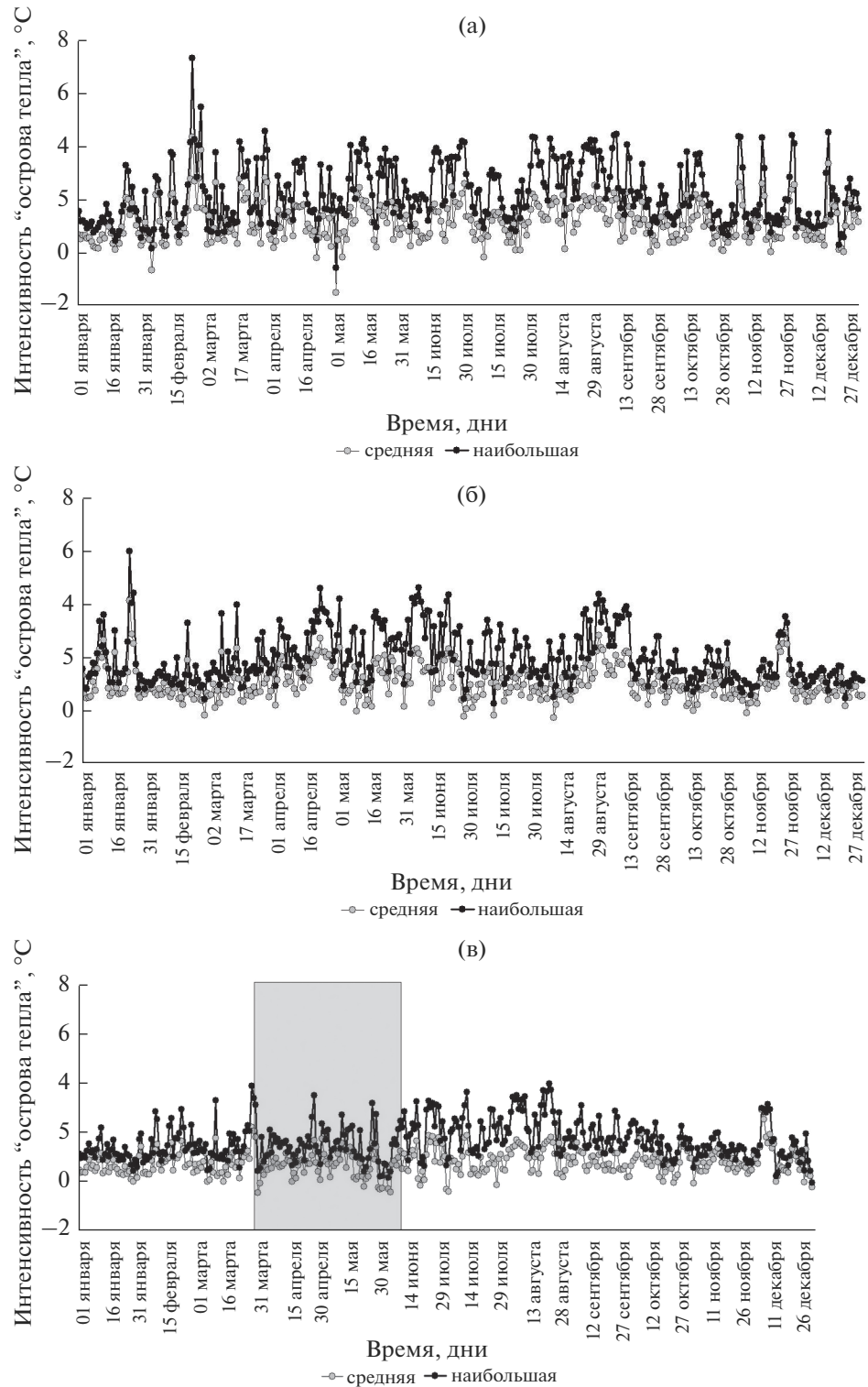


Рис. 1. Годовой ход интенсивности “острова тепла” Москвы в 2018–2020 гг. Период самоизоляции из-за пандемии коронавируса в 2020 г. отмечен серым цветом. а) 2018 год, среднесуточные значения ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} ; б) 2019 год, среднесуточные значения ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} ; в) 2020 год, среднесуточные значения ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} ; г) 2018 год, значения ΔT_{MAX} днем и ночью.

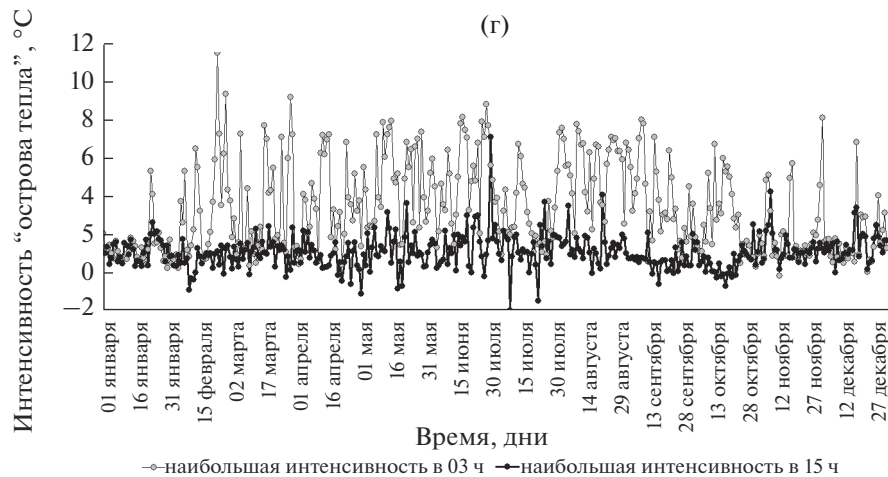


Рис. 1. Окончание

рова тепла” Москвы во все сезоны 2020 года и в среднем за этот год по сравнению с обоими предыдущими годами.

В среднем за три года (размер обеих выборок — 1096 среднесуточных значений) наибольшая и средняя интенсивности “острова тепла” Москвы составили соответственно 2.0 и 1.0°C — как и ранее в среднем за период 2010–2014 гг. [12]. Отметим тесную связь обеих характеристик: коэффициент их корреляции по всей трехлетней выборке $R = 0.90$. Небольшой разброс значений связан с разной степенью термической неоднородности столицы (отличиями данных Балчуга от остальных четырех городских станций) в отдельные дни. Рекордно высокие за три года значения ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} в среднем за сутки составили соответственно 7.4 и 4.4°C и были отмечены в один и тот же день — 23 февраля 2018 г. при нахождении Москвы в малоградиентном барическом поле вблизи оси гребня в системе антициклона с центром над Белоруссией. Ярко выраженные антициклональные условия проявились в ясном небе и штиле в

ночные сроки: отдельный расчет ΔT_{MAX} в 03 ч показал значение 11.5°C (рис. 1г).

Напротив, влияние “острова тепла” крайне слабое или даже сходит на нет при очень сильном ветре в зонах градиентных течений на периферии глубоких циклонов, а также при сплошной облачности и обильных осадках в зонах фронтов. Самые малые значения ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} в 2018–2020 гг. составили соответственно –0.6 и –1.5°C 01 мая 2018 г. в зоне теплого фронта. Близкие к нулю или даже слабоотрицательные значения обоих показателей — большая редкость: за три года ΔT_{CP} лишь 26 раз (в 2% случаев) оказалась <0, причем, кроме только 01 мая 2018 г., ни разу не оказалась менее –0.5°C; ΔT_{MAX} была отрицательной лишь один раз.

Оценим достоверность различий между средними сезонными значениями обоих показателей интенсивности “острова тепла” Москвы. Для подобных оценок обычно применяют критерий Стьюдента Z :

$$Z = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{\sqrt{\sigma^2(X)/n + \sigma^2(Y)/m}}, \quad (3)$$

Таблица 1. Интенсивность “острова тепла” Москвы в разные сезоны и в среднем за год

	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Наибольшая интенсивность ΔT_{MAX}					
2018	1.8 ± 1.2	2.3 ± 1.1	2.7 ± 1.0	2.1 ± 1.0	2.2 ± 1.1
2019	1.5 ± 0.8	2.2 ± 0.9	2.3 ± 1.0	1.8 ± 0.9	1.9 ± 1.0
2020	1.4 ± 0.7	1.6 ± 0.7	2.2 ± 0.9	1.6 ± 0.5	1.7 ± 0.8
Средняя интенсивность ΔT_{CP}					
2018	1.1 ± 0.9	1.2 ± 0.7	1.3 ± 0.6	1.1 ± 0.6	1.2 ± 0.7
2019	0.9 ± 0.6	1.2 ± 0.6	1.1 ± 0.6	1.0 ± 0.6	1.0 ± 0.6
2020	0.8 ± 0.5	0.8 ± 0.5	0.9 ± 0.6	0.8 ± 0.4	0.8 ± 0.5

Первые значения — средние; вторые — среднеквадратические отклонения.

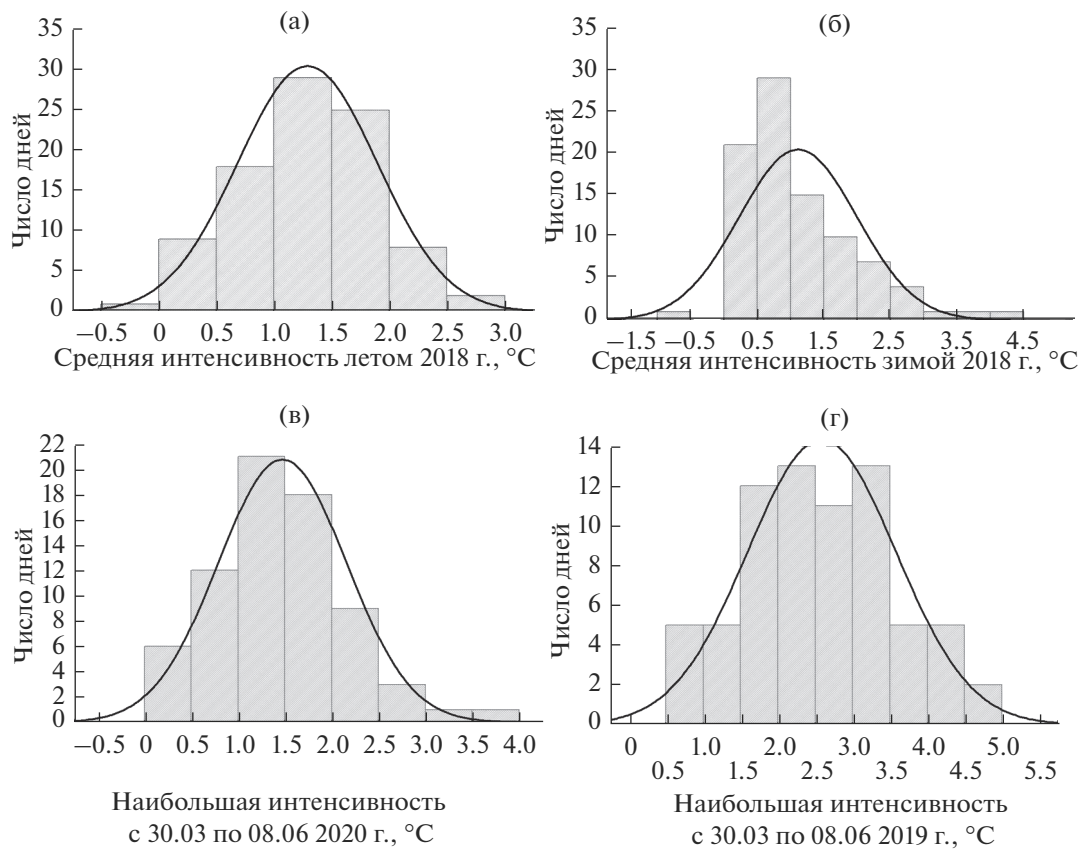


Рис. 2. Распределения значений интенсивности “острова тепла” Москвы в отдельные сезоны и периоды.

где X и Y – математические ожидания обеих выборок, $\sigma^2(X)$ и $\sigma^2(Y)$ – их дисперсии; n и m – их размер. Однако этот критерий параметрический и, строго говоря, применим лишь при соответствии обоих выборочных распределений нормальному закону. В нашем случае это не совсем так. Сравнительно близки к нормальному распределению лишь распределения интенсивности в летние и весенние месяцы. Так, в приведенном на рис. 2а) примере лета 2018 г. величина χ^2 (критерий Пирсона) составляет 6.02 с 7-ю степенями свободы для ΔT_{cp} и 5.48 с 4-мя степенями свободы для ΔT_{MAX} . Соответственно, вероятность ошибки при отвержении нулевой гипотезы о соответствии выборочного распределения нормальному закону в обоих случаях велика: 0.54 для средней и

0.24 для наибольшей интенсивности. Зимой же распределения обеих характеристик не соответствуют нормальному закону вследствие их положительной асимметрии как результата общего уменьшения значений и приближения моды к нижнему физическому пределу (коэффициент асимметрии A летних распределений близок к нулю; весенних – от 0 до 1; осенних – около 1; зимних – от 1 до 3). Так, для лета и зимы 2018 г. на рис. 2а и 2б A равен соответственно 0.03 и 1.87.

При незначительных отличиях функций распределения от нормального закона критерий Стьюдента можно приближенно использовать для качественных оценок, однако границы доверительных вероятностей могут быть смещены. Результаты расчетов (3) для парных сравнений разных сезонов

Таблица 2. Значения критерия Стьюдента Z при оценке сезонных различий в интенсивности “острова тепла” Москвы

	Зима–лето	Зима–весна	Зима–осень	Лето–весна	Лето–осень	Весна–осень
2018	−5.4 (−1.6)	−2.9 (−0.8)	−2.1 (−0.3)	2.6 (0.8)	3.6 (1.5)	0.9 (0.6)
2019	−5.9 (−2.3)	−5.6 (−3.2)	−2.6 (−1.5)	0.6 (−0.8)	3.4 (0.8)	3.0 (1.7)
2020	−6.7 (−1.4)	−1.3 (0.8)	−2.2 (−0.2)	5.3 (2.1)	5.4 (1.4)	−0.6 (−1.1)

Первые значения – для наибольшей интенсивности ΔT_{MAX} ; вторые значения в скобках – для средней интенсивности ΔT_{cp} .

приведены в табл. 2. Жирным шрифтом в ней отмечены значения Z , соответствующие статистически достоверным различиям с доверительной вероятностью 0.99 при условии близости выборочных распределений к нормальному закону.

Как видим, наибольшие различия присущи центральным сезонам: зиме и лету. Слабее всего интенсивность “острова тепла” различается при сравнении осени с зимой, а также с весной. Исключение в последнем случае только одно — необычно антициклональная весна 2019 г., показавшая даже немногим большее среднее за сезон значение $\Delta T_{\text{ср}}$ по сравнению с летом. Отметим также, что различия для наибольшей интенсивности выражены сильнее, чем для средней, в 17 из 18 случаев, кроме только сравнения весны и осени 2020 г.

Поскольку применение критерия Стьюдента в нашем случае дает лишь качественные сравнительные оценки достоверности, рассмотрим также непараметрический критерий Вилкоксона, свободный от исходной гипотезы о виде распределения. Он основан на ранжировании случайных величин обеих выборок и суммировании сдвигов значений в обе стороны и фактически сводится к подсчету числа инверсий (обратных сдвигов по сравнению с обычной разностью) при проверке нулевой гипотезы о случайном характере различий. Расчеты с использованием среднесуточных значений ΔT_{MAX} показали, что при сравнении между собой всех трех зимних и трех летних месяцев на примере 2018 г. число инверсий (превышений зимних значений над летними) составило 1992 при размере выборки 90 и 92. Это — существенно меньше значения $(m \cdot n/2) = 4140$, характеризующего число равновероятных сдвигов в обе стороны. Однако обычно критерий Вилкоксона применяется для небольших выборок размером $n = 25$ или, реже, 50. Повторные расчеты по сравнению частных выборок, составленных из первых 25 дней месяцев 2018 г.: декабря—июня, января—июля, февраля—августа, а также декабря—августа показали числа инверсий соответственно 127, 153, 152 и 72 при $(m \cdot n/2) = 312.5$. Критические значения Вилкоксона при $n = 25$ составляют 100 для уровня значимости 5% и 76 для уровня значимости 1%. Как видим, в трех из четырех случаев полученные эмпирические значения превышают теоретические даже с относительно мягким уровнем значимости 5%, что подтверждает нулевую гипотезу о несущественности различий. Лишь при сравнении августа и декабря различия достоверны с доверительной вероятностью $P = 0.99$. Для этой выборки число инверсий было рассчитано также по данным $\Delta T_{\text{ср}}$ и составило 132, так что различия между среднесуточными значениями средней интенсивности по критерию Вилкоксона незначимы даже с $P = 0.95$ ($132 > 100$). Очевидно, что в

остальных случаях различия между значениями $\Delta T_{\text{ср}}$ тем более не являются значимыми.

Дополнительно расчеты проведены и по девяти среднедекадным значениям ΔT_{MAX} для зимних и летних месяцев всех трех лет. Числа инверсий составили 10, 9 и 9 соответственно для 2018, 2019 и 2020 гг. при критических значениях 8 и 3 с уровнями значимости 5 и 1%. Следовательно, ни в одном из трех примеров различия не значимы даже с $P = 0.95$. Примечательно, что среднее значение ΔT_{MAX} за 3-ю декаду февраля 2018 г. (4.2°C) намного превысило все 27 среднедекадных значений летних месяцев за три года. Таким образом, вопрос о значимости различий ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср}}$ в зимние и летние месяцы, строго говоря, остается открытым (достоверность этих различий по критерию Стьюдента Z ненадежна из-за асимметричных функций распределений зимой).

3. СВЯЗИ ИНТЕНСИВНОСТИ “ОСТРОВА ТЕПЛА” С ОБЛАЧНОСТЬЮ

Для прояснения причин сезонных различий значения ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср}}$ были рассчитаны отдельно для середины ночи и середины дня на примере 2018 г. (ход ΔT_{MAX} за все дни года в 03 и 15 ч приведен на рис. 1г). Известно, что “острова тепла” сильнее выражены в темное время суток — действительно, среднегодовые значения ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср}}$ составляют соответственно 3.4 и 1.9°C в 03 ч и лишь 1.1 и 0.4°C в 15 ч. Кроме того, как видно на рис. 1г), дневные значения в продолжение года не испытывают заметных различий и меняются в узких пределах — как правило от 0 до 2°C (предельные значения: -2.0°C 09 июля и 7.1°C 30 июня). Среднеквадратическое отклонение σ по всей выборке 365 значений в 15 ч составляет лишь 0.9°C для ΔT_{MAX} и 0.7°C для $\Delta T_{\text{ср}}$. Ночным значениям присуща гораздо более сильная изменчивость: σ в 03 ч достигает 2.3 и 1.4°C соответственно для ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср}}$; предельные величины ΔT_{MAX} составили -0.2°C 11 ноября и 11.5°C 23 февраля. Как видим, ход ночных значений ΔT_{MAX} показывает резкие неперіодические изменения, причем “остров тепла” бывает сильно выраженным ($\Delta T_{\text{MAX}} > 5^\circ\text{C}$) вплоть до 7–8 ночей подряд. Чаще всего такие синоптические периоды с устойчиво сильным “островом тепла” отмечаются в теплое и переходное время года, но возможны и зимой: на рис. 1г) — в 3-й декаде февраля. Очевидна их связь с антициклональными условиями, прежде всего — с малым количеством облаков.

Проведенное на примере 2018 г. сравнение обоих показателей интенсивности “острова тепла” с различными метеорологическими величинами по данным Метеорологической обсерватории (МО) МГУ (общей и нижней облачностью, средней и максимальной скоростью ветра, суточ-

ной амплитудой T и др.) показало, что наиболее тесными являются их связи с облачностью. Действительно, коэффициенты корреляции (R) ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} с общей облачностью в 03 ч составили соответственно -0.58 и -0.50 , а с нижней -0.67 и -0.61 . Более тесная связь “острова тепла” именно с нижней облачностью неудивительна с учетом сравнительно слабого влияния разреженных облаков верхнего яруса (Сi и др.) на радиационный баланс поверхности. Для 15 ч все значения R незначимые (<0.1), что также неудивительно с учетом незначительной доли противоизлучения в общей величине дневного радиационного баланса.

Для оценки возможной нелинейности связей привлечены значения η^2 — показателя достоверности их описания степенной функцией 6-й степени, поскольку для функции столь высокого порядка η можно считать приблизительной оценкой корреляционного отношения. Оказалось, что во всех четырех случаях для середины ночи ($\eta^2 - R^2$) < 0.1 , так что нелинейная составляющая связей незначительна, и при их анализе можно использовать значения R [13]. Значимость их не вызывает сомнений. Так, согласно критерию Стьюдента с использованием выборочного порога достоверности:

$$t = \frac{R}{\sigma_R},$$

где $\sigma_R = \frac{\sqrt{1-R^2}}{\sqrt{n-2}}$ — ошибка коэффициента корреляции при большом размере выборки n , значения t для всех четырех коэффициентов корреляции ночных данных составляют по абсолютной величине от 11 до 17. Поскольку пороговое значение t при 363 степенях свободы и уровне значимости 0.001 равно 3.3, все четыре связи в 03 ч как общей, так и нижней облачности и с ΔT_{MAX} , и с ΔT_{CP} статистически значимы с P намного более 0.999. Заметим, что t -критерий параметрический, однако при больших ($n > 100$) выборках и значениях R , далеких от 0 и 1, его применение возможно и без специальной оценки вида распределения [13].

Тем не менее, для большей надежности вывода привлечем для оценки значимости R также и непараметрический Z — критерий Фишера:

$$t_z = \frac{Z}{\sigma_z},$$

где $Z \approx \frac{1}{2} \ln \frac{1+R}{1-R}$, $\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}$. Значения t_z тоже чрезвычайно велики по абсолютной величине: от 10 до 15. Таким образом, статистическая достоверность связей интенсивности “острова тепла” и с общей, и с нижней облачностью в ночные часы с $P \gg 0.999$ подтверждается обоими критериями.

Полученный результат означает важный вывод: связи “острова тепла” с ночной облачно-

стью выражены гораздо сильнее, чем его различия между календарными сезонами. Иначе говоря, “остров тепла” Москвы сильнее выражен в тот сезон, когда облачность в ночные часы меньше; обычно это — лето, поскольку летние ночи, как правило, менее облачные. Однако в морозные зимы с преобладанием антициклональной погоды и ясными ночами “остров тепла”, напротив, проявляется сильнее, чем летом при пасмурной погоде. Так, в очень холодном и преимущественно антициклональном феврале 2018 г. “остров тепла” Москвы в среднем за месяц был выражен сильнее ($\Delta T_{\text{MAX}} = 2.3^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{CP}} = 1.5^\circ\text{C}$), чем в пасмурном июле того же года, отмеченном преобладанием циклонической погоды ($\Delta T_{\text{MAX}} = 2.0^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{CP}} = 1.0^\circ\text{C}$). Среднемесячная нижняя облачность в феврале, аномально малая для зимы (6.4 в среднем за сутки и 6.0 баллов в 03 ч), оказалась почти равной аномально большой для лета нижней облачности в июле (6.2 в среднем за сутки и 5.8 баллов в 03 ч). Дополнительно “остров тепла” в феврале был, видимо, усилен выбросами тепла систем городского отопления. Таким образом, различия в оценках годового хода “острова тепла” в прошлом, скорее всего, были связаны с многолетними изменениями преобладающих синоптических условий и, как следствие, ночной облачности в разные сезоны.

4. “ОСТРОВ ТЕПЛА” МОСКВЫ ВО ВРЕМЯ КАРАНТИНА 2020 г.

Рассмотрим также изменения интенсивности “острова тепла” Москвы в период карантинных мероприятий (периода самоизоляции) в разгар первой волны пандемии коронавирусной инфекции в 2020 г. Остановка или замедление в условиях карантина работы промышленных предприятий, а также резкое уменьшение автомобильного движения могут приводить не только к сокращению антропогенных выбросов тепла, но и к изменениям в радиационном балансе — прежде всего, к исчезновению или ослаблению создающей противоизлучение индустриальной городской дымки. Между тем имеющиеся данные об “островах тепла” в поле температуры поверхности по данным спутников во время глобального карантина весной 2020 г. неоднозначны. В ряде мест отмечено их ослабление: в 8-ми крупнейших городах Пакистана — в среднем на 20% [14], а также в городах ОАЭ [15]. Городская зона Нью-Дели в апреле 2020 г. была даже отмечена довольно сильным “островом холода” в поле температуры поверхности [16]. Напротив, “поверхностные острова тепла” городов бассейна рек Инда и Ганга по спутниковым данным весной 2020 г. усилились на 0.2 – 0.4°C в дневные часы, поскольку вызванная карантином задержка с уборкой урожая озимых привела к дополнительному озеленению сельской местности и,

Таблица 3. Интенсивность “острова тепла” Москвы во время карантина 2020 г. в сравнении с другими периодами, °C

	Период карантина 30/III–08/VI 2020 г.	Тот же период 30/III–08/VI в 2019 г.	Тот же период 30/III–08/VI в 2018 г.	Период до и после карантина 01/I–29/III и 09/VI–31/XII 2020 г.
ΔT_{MAX}	1.5 ± 0.7	2.6 ± 1.0	2.3 ± 1.0	1.7 ± 0.8
$\Delta T_{\text{ср.}}$	0.7 ± 0.5	1.3 ± 0.6	1.1 ± 0.7	0.9 ± 0.5

Первые значения – средние; вторые – среднеквадратические отклонения.

как следствие, увеличению затрат тепла на транспирацию растениями [17].

В Москве, как и в других российских городах, наиболее жесткие карантинные ограничения существовали лишь с весны и до начала лета 2020 г. в первую волну пандемии (позднее осенью, с приходом второй волны заболеваемости, повторно введенный режим самоизоляции был неполным). Частично режим самоизоляции в Москве был введен 28 марта, окончательно – 30 марта; отменен он был с 09 июня. Таким образом, возможные расхождения в дате начала этого периода составляют два дня. Будем считать этот период лишь в границах полной самоизоляции всего населения столицы за исключением работников экстренных служб, каковым он был 71 день с 30 марта по 08 июня. По данным [18], в это время приземное содержание основных загрязняющих примесей в Москве уменьшилось в среднем на 30–50%, а интенсивность дорожного движения сократилась еще сильнее: в апреле ~ в 4 раза по сравнению с апрелем 2019 г.

При оценке достоверности различий в интенсивности “острова тепла” возможны два подхода: сравнение периода жестких карантинных ограничений либо с периодами в те же даты в другие годы, либо со временем до и после карантина в 2020 г. Второй подход также вполне корректен, поскольку период самоизоляции в основном пришелся на переходный весенний сезон, так что основные различия в годовом ходе между летом и зимой не должны проявиться в результатах сравнения.

Как видно из табл. 3, в среднем за период самоизоляции с 30 марта по 08 июня 2020 г. значения обоих показателей интенсивности оказались аномально низкими: $\Delta T_{\text{MAX}} = 1.46^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{ср.}} = 0.66^\circ\text{C}$. В это же время в предыдущие годы средние значения ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср.}}$ были существенно больше, чем во время карантина: соответственно 2.31 и 1.12°C в 2018 г., 2.57 и 1.34°C в 2019 г. Функции распределений этих показателей, особенно ΔT_{MAX} , в целом близки к нормальному закону: так, значения критерия Пирсона χ^2 для распределения ΔT_{MAX} составляют лишь 2.92 за период самоизоляции в 2020 г. и 2.43 за тот же период в 2019 г. (рис. 2в, 2г). Это означает очень высокую вероятность ошибки при отвержении нулевой гипотезы о соответ-

ствии нормальному закону: соответственно 0.82 и 0.66 в 2020 и 2019 гг. Таким образом, в отличие от анализа сезонных различий, использование параметрического критерия Стьюдента Z здесь полностью корректно. Его значения при оценке различий между периодом самоизоляции 2020 г. и тем же временем в предыдущие годы оказались чрезвычайно велики: 5.84 и 4.54 при сравнении с 2018 г. и 7.79 и 6.95 при сравнении с 2019 г. соответственно для ΔT_{MAX} и $\Delta T_{\text{ср.}}$. Таким образом, согласно критерию Стьюдента, различия между выборочными математическими ожиданиями достоверны с доверительной вероятностью значительно более 0.999 (т.е. с уровнем значимости намного менее 0.001).

Для дополнительной проверки значимости различий по критерию Вилкоксона для каждого из трех лет были рассчитаны 7 средних значений ΔT_{MAX} за отдельные декады с увеличенной на два дня (30 и 31 марта) первой декадой апреля и неполной (8-дневной) первой декадой июня. Оказалось, что для ряда этих среднедекадных значений в 2020 г. нет ни одной инверсии при сравнении с аналогичными рядами ни в 2019 г., ни в 2018 г. Иначе говоря, наибольшее из семи средних значений ΔT_{MAX} в 2020 г. меньше наименьшего из семи в оба эти года. Согласно критерию Вилкоксона, это означает значимость различий со столь же высокой доверительной вероятностью 0,999, как и при использовании критерия Стьюдента.

При сравнении средней интенсивности “острова тепла” в период карантина и во все остальные 295 дней 2020 г. значение Z составило 3.04 для ΔT_{MAX} и 2.92 для $\Delta T_{\text{ср.}}$, что также подтверждает значимость различий с доверительной вероятностью 0,99.

Следовательно, как показали оба подхода к сравнению, ослабление “острова тепла” в период жестких карантинных ограничений несомненно и статистически достоверно. В этом ослаблении имеются и природная, и антропогенная составляющие. Первая связана с ослабляющим влиянием на “остров тепла” облаков (выше уже отмечены устойчивые обратные связи “острова тепла” с облачностью, особенно ночной). Май и начало июня 2020 г. выдались аномально пасмурным временем. Май 2020 г. со средним баллом 7.9 общей и 6.3 ниж-

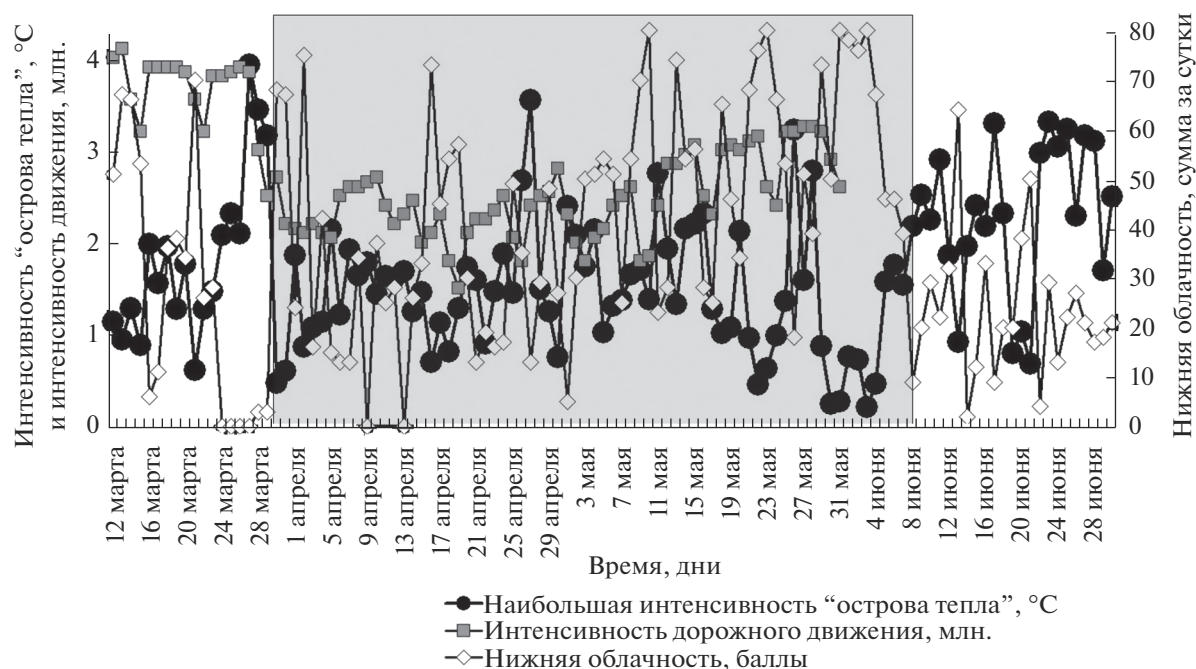


Рис. 3. Ход интенсивности «острова тепла» Москвы и предположительно влияющих на него показателей в марте–июне 2020 г. Период самоизоляции из-за пандемии коронавируса отмечен серым цветом.

ней облачности при климатической норме соответственно 6.8 и 4.3 балла оказался по данным МО МГУ седьмым в ряду самых облачных маев, начиная с 1954 года. Примечательно, что и май, и июнь 2020 г. стали самыми дождливыми маем и июнем за все 200 лет измерений в Москве осадков, количество которых составило в эти месяцы соответственно 170 и 193 мм.

На рис. 3, в дополнение к рис. 1в, приведен ход среднесуточных значений ΔT_{MAX} за время с 12 марта до 30 июня 2020 г., охватывающее период карантина. Здесь же показан ход суммарного за сутки балла нижней облачности по данным МО МГУ и интенсивности дорожного движения по данным Департамента транспорта Москвы, собранным А.С. Гинзбургом [18] вплоть до конца мая. Как видим, устойчивая обратная зависимость интенсивности «острова тепла» от облачности прослеживается и в этот период, особенно ярко она видна в аномально слабом «острове тепла» при сплошных плотных облаках — например, с 30 мая по 04 июня при нахождении Москвы в зонах атмосферных фронтов на ближней периферии циклона с центром над Украиной.

Помимо облачности, рассмотрим также по данным МО МГУ еще два метеорологических показателя: среднесуточную скорость ветра V по показаниям прибора М-63 на высоте 15 м и амплитуду суточного хода T . Усиление ветра, так же как и облачность, ведет к ослаблению «островов тепла», хотя и в меньшей степени. Амплитуда тем-

пературы воздуха (разность между максимальным и минимальным значениями T за каждый день) сама по себе на «остров тепла» непосредственно не влияет, но служит ярким признаком антициклональной погоды, при которой «остров тепла» выражен сильнее. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 4. Как видим, связи обеих характеристик интенсивности «острова тепла» с метеорологическими показателями статистически значимые, но лишь умеренные, не тесные. Множественный коэффициент корреляции наибольшей интенсивности «острова тепла» с нижней облачностью и V , отражающий совместное влияние на ΔT_{MAX} обеих метеорологических величин, составил -0.78 .

Таким образом, сама по себе облачность, взятая в отрыве от антропогенных факторов, и даже с учетом влияния скорости ветра, полностью не объясняет аномально слабого «острова тепла» Москвы во время карантина. Действительно, если май 2020 г. выдался в столице на редкость пасмурным месяцем, то апрель 2020 г., напротив, оказался малооблачным со средней общей и нижней облачностью меньше климатической нормы: соответственно 7.0 и 3.8 баллов. Между тем, интенсивность «острова тепла» в среднем за оба эти месяца оказалась аномально малой и почти одинаковой: 1.51 и 0.74°C в апреле и 1.56 и 0.72°C в мае соответственно для ΔT_{MAX} и ΔT_{CP} . Аномально слабым «остров тепла» Москвы, как уже показано в Таблице 3, был в среднем и за весь период ка-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции R природных и антропогенных показателей с интенсивностью “острова тепла” Москвы за период 12/III–30/VI 2020 г.

	Средняя интенсивность $\Delta T_{\text{ср.}}$, °C	Наибольшая интенсивность $\Delta T_{\text{МАХ}}$, °C
Общая облачность – суточная сумма	–0.40	–0.40
Нижняя облачность – суточная сумма	–0.64	–0.67
Среднесуточная скорость ветра на 15 м V , м/с	–0.28	–0.43
Суточная амплитуда температуры воздуха, °C	0.43	0.56
Интенсивность дорожного движения – личный авто-транспорт, млн. перевезенных чел. [18]*	0.06	0.09

* Оценки R получены за период 12 марта–31 мая 2020 г.

рантина, хотя степень покрытия облаками в среднем за апрель и май (7.45/5.05 для общей/нижней облачности) лишь ненамного превысила их общую климатическую норму: на 0.3 балла для общей и на 0.4 балла для нижней облачности. С другой стороны, в другие гораздо более пасмурные месяцы последних лет “остров тепла” Москвы был выражен значительно сильнее: так, в очень облачные июли 2018 и 2019 гг. со средним баллом облаков соответственно 8.2/6.2 и 8.2/5.9 значения $\Delta T_{\text{МАХ}}$ и $\Delta T_{\text{ср}}$ составили в обоих случаях 2.0 и 0.9°C.

Следовательно, в ослаблении “острова тепла” Москвы в период карантина, помимо влияния повышенной облачности, имеется заметная антропогенная составляющая. Вероятными основными причинами этого ослабления явились уменьшение прямых выбросов антропогенного тепла, а также ослабление создающей противозлучение индустриальной дымки в результате остановки многих промышленных предприятий. К сожалению, суммарные оценки промышленных выбросов в Москве в отдельные дни карантина, если и существуют, авторам неизвестны. Что касается приведенных на рис. 3 данных о загруженности столичной дорожной сети, то, как видно из табл. 4, их статистическая связь с интенсивностью “острова тепла” отсутствует. Видимо, данный показатель либо не отражает реальных изменений в радиационном балансе городской атмосферы, либо его оценки по данным Департамента транспорта Москвы в период карантина были недостаточно точными.

5. ВЫВОДЫ

1. Годовой ход интенсивности “острова тепла” Москвы выражен сравнительно слабо. Обычно она наибольшая летом и наименьшая зимой, но в отдельных случаях соотношение бывает обратным.

2. Из числа природных (не антропогенных) факторов интенсивность “острова тепла” наиболее тесно связана с нижней облачностью в ночные ча-

сы; сильнее всего “остров тепла” выражен в месяцы и сезоны с ясными или малооблачными ночами (как правило, это лето).

3. Период самоизоляции во время эпидемии коронавирусной инфекции с марта по июнь 2020 г. отмечен резким и статистически достоверным ослаблением “острова тепла” Москвы – вследствие как природных причин (повышенной облачности), так и деятельности человека (ослабления антропогенного потока тепла, а также индустриальной дымки в результате резкого сокращения промышленных выбросов и интенсивности дорожного движения).

Авторы сердечно благодарят сотрудников Центрального УГМС Н.А. Терешонка и Н.С. Николаева за любезно предоставленные данные наблюдений метеорологических станций Москвы и Подмосковья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.Е. Климат города. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 248 с.
2. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban climates. Cambridge University Press. 2017. 525 p.
3. Lokoshchenko M.A. and Isaev A.A. Influence of Moscow city on the air temperature in Central Russia // Proc. 5th International Conference on Urban Climate (ICUC). Poland, Lodz. 2003. V. 2. P. 449–453.
4. Рубинштейн К.Г., Гинзбург А.С. Оценки изменения температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка) // Метеорология и гидрология. 2003. № 2. С. 29–38.
5. Климат Москвы в условиях глобального потепления / Под ред. Кислова А.В. М.: Изд-во МГУ, 2017. 288 с.
6. Grimmond C.S.B., Oke T.R. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities // J. Applied Meteorology. 1995. V. 34. № 4. P. 837–889.
7. Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy

- balance of a Central European city centre // Intern. J. Climatology. 2005. V. 25. P. 1405–1419.
8. *Grimmond C.S.B.* The suburban energy balance: methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions // International J. Climatology. 1992. V. 12. № 5. P. 481–497.
 9. *Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K.* Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo // Atmospheric Environment. 1999. V. 33. № 24. P. 3897–3909.
 10. *Дудорова Н.Д., Белан Б.Д.* Оценка факторов, определяющих формирование городского острова тепла в г. Томск // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 5. С. 426–436.
 11. *Алексеева Л.И.* Особенности городского “острова тепла” в Москве в 2018 г. в приземном слое воздуха по данным метеорологической сети // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. Под ред. Локощенко М.А. М.: МАКС Пресс, 2019. С. 95–110.
 12. *Lokoshchenko M.A.* Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes // J. Applied Meteorology and Climatology. 2017. V. 56. № 10. P. 2729–2745.
 13. *Исаев А.А.* Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
 14. *Ali G., Abbas S., Qamer F.M. et al.* Environmental impacts of shifts in energy, emissions, and urban heat island during the COVID-19 lockdown across Pakistan // J. Cleaner Production. 2021. V. 291. 125806.
 15. *Alqasemi A.S., Hereher M.E., Kaplan G. et al.* Impact of COVID-19 lockdown upon the air quality and surface urban heat island intensity over the United Arab Emirates // Science of the Total Environment. 2021. V. 767. 144330.
 16. *Mukherjee S., Debnath A.* Correlation between Land Surface Temperature and Urban Heat Island with COVID-19 in New Delhi, India // Research Square. 2020. P. 1–11.
 17. *Chakraborty T.C., Chandan S., Xuhui Lee.* Reduction in human activity can enhance the urban heat island: insights from the COVID-19 lockdown // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. 054060.
 18. *Гинзбург А.С., Семенов В.А., Семутникова Е.Г. и др.* Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве // Доклады РАН. 2020. Т. 495. № 1. С. 74–79.

About Annual Course of Moscow ‘Heat Island’ and Influence on It Quarantine Measures for the COVID-19 Pandemic in 2020

M. A. Lokoshchenko^{1, *} and L. I. Alekseeva¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: loko@geogr.msu.su

Seasonal differs of the Moscow urban ‘heat island’ intensity (UHII) have been studied precisely by the data of meteorological network in Moscow region for the period 2018–2020. As is shown, the UHII annual course is comparatively weak. At the most cases ‘heat island’ is stronger in summer and weaker in winter, however, in some cases their ratio is reverse. The question about the statistical significance of seasonal differences remains open. The closest statistical relationship between the ‘heat island’ was revealed with lower cloudiness at night, so that the greatest UHII is observed in the least cloudy seasons (usually summer). The ‘heat island’ intensity distribution functions are close to the Normal law in summer and spring; in winter and autumn, they are characterized by a noticeable positive asymmetry due to a decrease in the values and the approach of the mode to the lower physical limit. The period of strict quarantine restrictions during the COVID-19 pandemic in the spring and early summer of 2020 led to a sharp and statistically significant weakening of the ‘heat island’ of Moscow — probably due to both natural factors (increased cloudiness), and human activity (sharp reduce of the anthropogenic heat flux and weakening of the urban industrial haze, creating additional counter-radiation).

Keywords: urban heat island intensity, air temperature, seasonal differences, statistical significance, cloudiness, COVID-19 pandemic, anthropogenic heat flux