

Орографические эффекты в расчете городского острова тепла

В.И. Демин¹, И.Н. Кузнецова², Н.Е. Брусова², М.И. Нахаев²,
И.Ю. Шалыгина², П.В. Захарова^{3*}

¹Полярный геофизический институт
184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Б. Предтеченский пер., 11–13

³Мосэкомониторинг
119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, стр. 1

Поступила в редакцию 5.05.2017 г.

На примере Московского региона, где метеорологические наблюдения проводятся на 20 станциях, показано, как особенности микроклимата в местах их размещения, создаваемые рельефом местности, влияют на расчетные значения городского острова тепла в Москве. Для обнаружения локальных эффектов использовались данные о минимальной и максимальной температурах на станциях и крупномасштабные топографические карты. В отдельных случаях в качестве маркеров орографической микроциркуляции привлекались измерения концентрации СО. Демонстрируется необходимость использования данных городских и сельских станций, расположенных в схожих по микроклимату условиях, для изучения антропогенного городского острова тепла.

Ключевые слова: городской остров тепла, антропогенное тепло, микроклимат, орографический эффект, загрязнение городского воздуха; urban heat island, anthropogenic heat, microclimate, effect of topography, urban air pollution.

Введение

Характерной чертой городского микроклимата является существование внутри города области с более высокой температурой воздуха по сравнению с местностью за границами городской агломерации — так называемый городской остров тепла (ГОТ). Застройка и дорожные покрытия сильно меняют радиационные, термические, влажностные и аэродинамические характеристики городского ландшафта; городская атмосфера изменяется из-за тепловых выбросов и потерь энергии в процессах жизнедеятельности, а также вследствие эмиссий загрязняющих веществ [1–4]. Поэтому остров тепла в той или иной степени должен обнаруживаться во всех, даже небольших городах [5, 6].

Традиционный метод обнаружения ГОТ основан на сравнении температуры внутри города и за его пределами; положительная разность (город — фон) интерпретируется как проявление ГОТ, а разность температур в центре города и на удаленных станциях служит его количественной характеристикой. Однако для городов, расположенных на террито-

риях с неоднородной подстилающей поверхностью и сложным рельефом, разность температур (ΔT) между городской и фоновой метеорологическими станциями (МС) выражает не только техногенное воздействие города, но и особенности микроклимата в местах их размещения. В условиях редкой сети МС микроклиматические различия могут существенно сказаться на оценках ГОТ.

Городской остров тепла считается одним из самых наглядных примеров мезомасштабного изменения климата в результате деятельности человека. По этой причине при установлении степени антропогенного воздействия на тепловой режим городского воздуха влияние других (природных) факторов, создающих неоднородности в поле температуры, должно быть исключено [7, 8].

Цель нашей работы — обоснование выбора станций наблюдений для установления антропогенной составляющей ГОТ на основе анализа микроклиматических отклонений от регионального фона и формализация процедуры отбора станций.

Исходные данные

Исследования проведены на основе данных стандартных метеорологических измерений в период 2012–2016 гг.: минимальной (T_{\min}) и максимальной (T_{\max}) за сутки приземных температур на 20 метеостанциях Московского региона, включая городские,

* Валерий Иванович Демин (demin@pgia.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mecom.ru); Наталья Евгеньевна Брусова (nbrusova@list.ru); Мурат Ислемгалеевич Нахаев (muratmeteo@mail.ru); Ирина Юрьевна Шалыгина (shalygina@mecom.ru); Полина Владимировна Захарова (info@mosecom.ru).

пригородные и МС, удаленные от границ города на 50–150 км.

Основной метод исследований – сравнительный анализ усредненных за разные временные периоды величин отклонений приземной температуры на станциях (i) от температуры в центральной части Москвы на МС Балчуг, расположенной в наиболее теплой части мегаполиса [1]. Эту станцию будем называть «центр города», а станции в городских жилых районах (Тушино, ВДНХ) – «городская периферия». Разность температур между центром Москвы и отдельными периферийными станциями обозначим $\Delta T(i)$. Эта величина является количественной оценкой ГОТ.

Впервые для объективного выбора станций с целью минимизации погрешностей определения антропогенной составляющей ГОТ в Москве применен метод сопряженного анализа экстремальных суточных температур.

Результаты и их обсуждение

Общая характеристика термической неоднородности в регионе

По данным 2012–2016 гг. установлено, что центр Москвы в среднем за год примерно на 2 °С теплее пригорода и удаленных станций (таблица).

Средняя за год разность температур (ΔT_{mean}), разность минимальных (ΔT_{min}) и максимальных (ΔT_{max}) за сутки температур между центром Москвы и метеостанциями

Станция	$\Delta T(i)$ за год		
	ΔT_{mean}	ΔT_{min}	ΔT_{max}
ВДНХ	1,4	2,0	0,9
Тушино	1,5	2,1	1,0
Немчиновка	1,6	2,3	1,0
Внуково	1,9	2,5	1,4
Шереметьево	2,0	2,8	1,2
Домодедово	2,0	3,1	1,0
Подмосковная	1,7	2,7	0,6
Михайловское	2,3	3,1	1,4
Наро-Фоминск	2,1	3,1	1,2
Ново-Иерусалим	2,4	3,7	1,2
Можайск	2,1	3,3	1,0
Волоколамск	2,4	3,4	1,5
Клин	2,4	3,4	1,3
Дмитров	2,2	2,8	1,6
Павловский Посад	1,9	2,9	1,0
Черусти	2,6	4,3	0,9
Кашира	1,9	2,5	1,3
Коломна	1,7	3,0	0,4
Серпухов	1,8	2,8	0,8

Но в течение суток влияние мегаполиса на приземную температуру проявляется по-разному: в среднем за месяц в послеполуденное время центр города теплее большей части окрестностей примерно на 1,0–1,5 °С, в ночное время на 2,5–3,5 °С. Кроме того, в Московском регионе наблюдаются значительные сезонные флуктуации $\Delta T(i)$: годовой минимум приходится на октябрь–ноябрь – период активной атмосферной циркуляции с большой частотой и продолжительностью осадков, максимум

наблюдается летом, в т.ч. вследствие возрастания частоты застойных ситуаций в атмосферном пограничном слое. Зимой по сравнению с летом $\Delta T(i)$ уменьшается на всех станциях в первую очередь из-за сглаживания теплофизических неоднородностей подстилающей поверхности при наличии снежного покрова, а также под воздействием преобладающих в этот сезон активных крупномасштабных атмосферных процессов [7].

В Москве ГОТ устойчиво проявляется при сопоставлении температуры на МС Балчуг с температурами практически всех региональных метеостанций. Несмотря на разные источники получения данных о приземной температуре, в т.ч. спутниковые и микроволновые, больших расхождений в оценках ГОТ у разных авторов нет [1, 9–12]. Но дисперсия рассчитанных значений ГОТ довольно значительная. Это доказывает, что в разности температур между МС Балчуг и выбранными для сравнения фоновыми станциями отражается не только тепловое воздействие мегаполиса, но и влияние природных факторов. К их числу относится хорошо выраженный на некоторых МС микроклимат, формирующийся в условиях холмистого рельефа даже при небольших перепадах высот и под влиянием неоднородностей подстилающей поверхности. Приведем несколько примеров отражения в температурном режиме МС особенностей их местоположения.

Орографические и ландшафтные эффекты в термическом режиме

В двух расположенных примерно в 100 км от Москвы на юго-востоке области МС Коломна и Кашира средние показатели термического режима довольно близки: средние за год температуры в период 2012–2016 гг. составляют 6,3 и 6,4 °С соответственно. Станции находятся в одной климатической зоне, но разности температур $\Delta T(i)$ между МС Балчуг и ними отличаются не только численно, но и качественно (рис. 1).

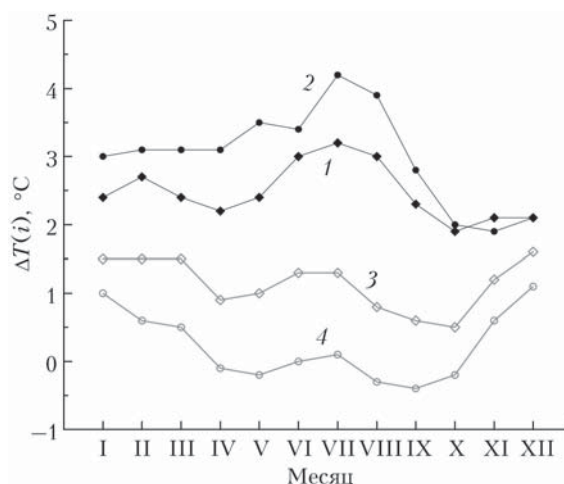


Рис. 1. Годовой ход разности температур на МС Балчуг и Кашира (1, 3); Балчуг и Коломна (2, 4) (1, 2 – среднемесячные минимальные, 3, 4 – среднемесячные максимальные значения за 2012–2016 гг.)

При сравнении суточных минимумов температуры наибольшая разность наблюдается между МС Балчуг и Коломна ($\Delta T(i)_{\min} \approx 3,0 \text{ }^\circ\text{C}$), а при сравнении дневных максимумов — между МС Балчуг и Кашира ($\Delta T(i)_{\max} \approx 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$). И если $\Delta T(\text{Балчуг—Кашира})_{\max}$ во все сезоны остается положительной, то $\Delta T(\text{Балчуг—Коломна})_{\max}$ в теплое полугодие оказывается отрицательной. Разные величины и знаки сезонных и внутрисуточных температурных различий $\Delta T(\text{Балчуг—Кашира})$ и $\Delta T(\text{Балчуг—Коломна})$, на наш взгляд, обусловлены особенностями микроклимата в местах размещения МС.

Метеорологическая станция Коломна расположена в речной долине южной ориентации на высоте 112 м н. у. м., а МС Кашира — на северном склоне р. Оки (219 м н. у. м.). Известно, что днем речные долины (особенно южной ориентации) хорошо прогреваются и оказываются теплее, чем верхние части холмов [13]. По этой причине в дневные часы температура на МС Коломна выше, чем на МС Кашира (рис. 1); более того, она сравнима и часто превышает температуру воздуха в Москве [7]. В ночные часы наблюдается обратная ситуация: самыми холодными оказываются дно долины и подножия склонов (Коломна), а вершины (Кашира) — более теплыми из-за стока холодного воздуха в понижения рельефа. Следует подчеркнуть, что эффекты орографической микроциркуляции зависят от погодных условий: сплошная облачность, осадки, туман уменьшают радиационное охлаждение воздуха, а сильный ветер способствует выравниванию пространственного распределения температуры.

Рассмотренный пример показывает, что количественная оценка ГОТ в Москве путем сравнения температуры на МС Балчуг и на региональных станциях зависит от того, какая МС (в нашем случае Коломна или Кашира) будет выбрана в качестве фоновой для сравнения.

Другой пример влияния на локальный термический режим местной циркуляции, обусловленной орографическими особенностями и меняющимся от зимы к лету состоянием водной поверхности, показывает МС Тушино, расположенная на северо-западе Москвы, на береговом склоне Бутаковского залива Химкинского водохранилища (высота 167 м н. у. м.). На рис. 2 приведены разности температур Балчуг—Тушино и Балчуг—ВДНХ. Отметим, что МС ВДНХ находится на расстоянии ~10 км к северу от МС Балчуг, а МС Тушино — чуть меньше 20 км на северо-западе города. В среднем за год между Тушино и ВДНХ различий в температуре практически нет. При этом ночью в холодный сезон в районе Тушино температура ниже, чем в районе ВДНХ (рис. 2), и это, по-видимому, лишь частично связано с более высокой степенью «урбанизованности» окрестностей МС ВДНХ. Снежный покров (в Москве чаще всего в декабре—марте) выравнивает теплофизические свойства подстилающей поверхности, поэтому основные различия между периферийными городскими станциями можно объяснить проявлением орографического эффекта. Последний выражается в более низкой температуре воздуха

в речной долине, где расположена МС Тушино, из-за накопления выхолаженного воздуха [14, 15]. Благодаря данному механизму разность температур между этой окраиной города и центром, служащая мерой ГОТ, оказывается усиленной орографическим эффектом.

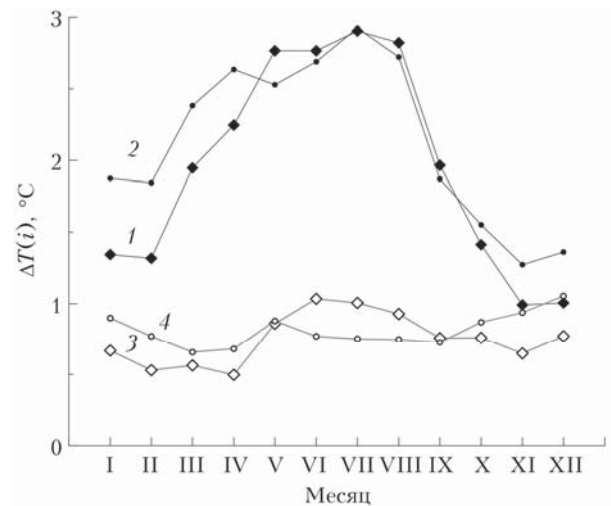


Рис. 2. Годовой ход разности температур на МС Балчуг и ВДНХ (1, 3); Балчуг и Тушино (2, 4) (1, 2 — среднемесячные минимальные, 3, 4 — среднемесячные максимальные значения за 2012–2016 гг.)

На этой же МС Тушино существенную роль в термическом режиме в летнее время играет водохранилище. Его тепляющее влияние на прилегающие городские территории в ночное время проявляется в меньшей по сравнению с другими городскими станциями $\Delta T(\text{Балчуг—Тушино})_{\min}$ с мая по сентябрь, когда речная вода днем накапливает тепло и отдает его воздуху ночью (рис. 2). Не вызывает сомнений, что термический режим МС Тушино, которую часто называют «островом холода Москвы», является специфическим по отношению к основной территории города, но, по-видимому, типичным для микроклимата других московских районов, также расположенных в речных долинах или вблизи каналов.

Надо признать, что из-за редкой наблюдательной сети фиксировать орографические эффекты трудно. Предполагая существенную роль микроциркуляции в формировании термического режима отдельных районов Московского мегаполиса, продемонстрируем ее проявление в данных наблюдений на Воробьевых горах, на северном склоне которых расположена Метеорологическая обсерватория МГУ им. М.В. Ломоносова (МО МГУ). Там же находится автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы МГУ (АСКЗА) «Мосэкомониторинг». Территория МО МГУ почти на 70 м выше уреза Москвы-реки. Резкий перепад высот, безусловно, создает благоприятные условия для появления в ночное время стоковых явлений, которые в тихую ясную погоду препятствуют сильному выхолаживанию; зимой территория МГУ остается теплее многих районов города, в частности ВДНХ и Тушино [1, 7].

Но есть и другого рода орографические эффекты в сложной структуре микроциркуляции, а именно натекание воздуха из речной долины на наветренный склон. Косвенным показателем и индикатором такого явления могут служить измеряемые на АСКЗА МГУ концентрации загрязняющих веществ, в частности угарного газа (СО), нехарактерные всплески которых время от времени фиксируются на Воробьевых горах, связанные с переносом загрязненного воздуха из центра и восточного сектора Москвы [16]. На рис. 3 показан резкий рост концентрации СО на АСКЗА МГУ ночью 15 марта 2015 г. в отсутствие рядом значительных источников его эмиссии. Учитывая общее направление переноса (из восточного сектора) и более ранние пики СО в центре Москвы (АСКЗА Спиридоновка) и на ближайших АСКЗА Шаболовка и Черемушки, можно предположить, что у подножия Воробьевых гор в низине Лужников (в условиях радиационной инверсии величиной 2–4 °С в нижнем 200-метровом слое) некоторое время происходило скопление загрязненного воздуха. Рост концентраций СО на АСКЗА МГУ начался с 18:00 14 марта синхронно с повышением уровня СО на других станциях. Очевидно, вынуждающим механизмом натекания загрязненного воздуха на Воробьевы горы стала динамическая турбулентность. С 23:00 до 02:00 на АСКЗА МГУ наблюдался пик загрязнения, превысивший характерный для станции уровень СО почти

в 5 раз (рис. 3, *a*). Понижение концентрации СО здесь началось при смене ветра на северный (рис. 3, *b*); до 09:00 концентрация была примерно такая же, как в центре города (АСКЗА Спиридоновка), отражая степень загрязнения воздуха, пришедшего в это время уже из северо-западного сектора Москвы. Обращают на себя внимание ранние и не связанные с утренним трафиком пики СО на АСКЗА Шаболовка и Черемушки, на расстоянии около 4 км от Лужнецкой поймы (рис. 3, *a*). По-видимому, на этих станциях, как и ночью на АСКЗА МГУ, фиксировался шлейф загрязнений из удаленных от станций городских районов.

Описанный выше случай — из числа редко наблюдаемых в силу необходимости особого сочетания многих атмосферных параметров. Последний эпизод аномального по времени и уровню загрязнения на АСКЗА МГУ зафиксирован ночью 9 января 2017 г.: в инверсионных условиях при ослаблении северо-восточного ветра концентрация СО (маркер общего загрязнения воздуха) увеличилась до $2,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (15 марта 2015 г. — до $2,3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$). Не вызывает сомнения, что изучение таких эпизодов важно и для понимания физики явлений, и для интерпретации численного прогноза загрязнения, имея в виду, что пространственное разрешение современных химических транспортных моделей еще не позволяет учитывать орографические эффекты в масштабе города.

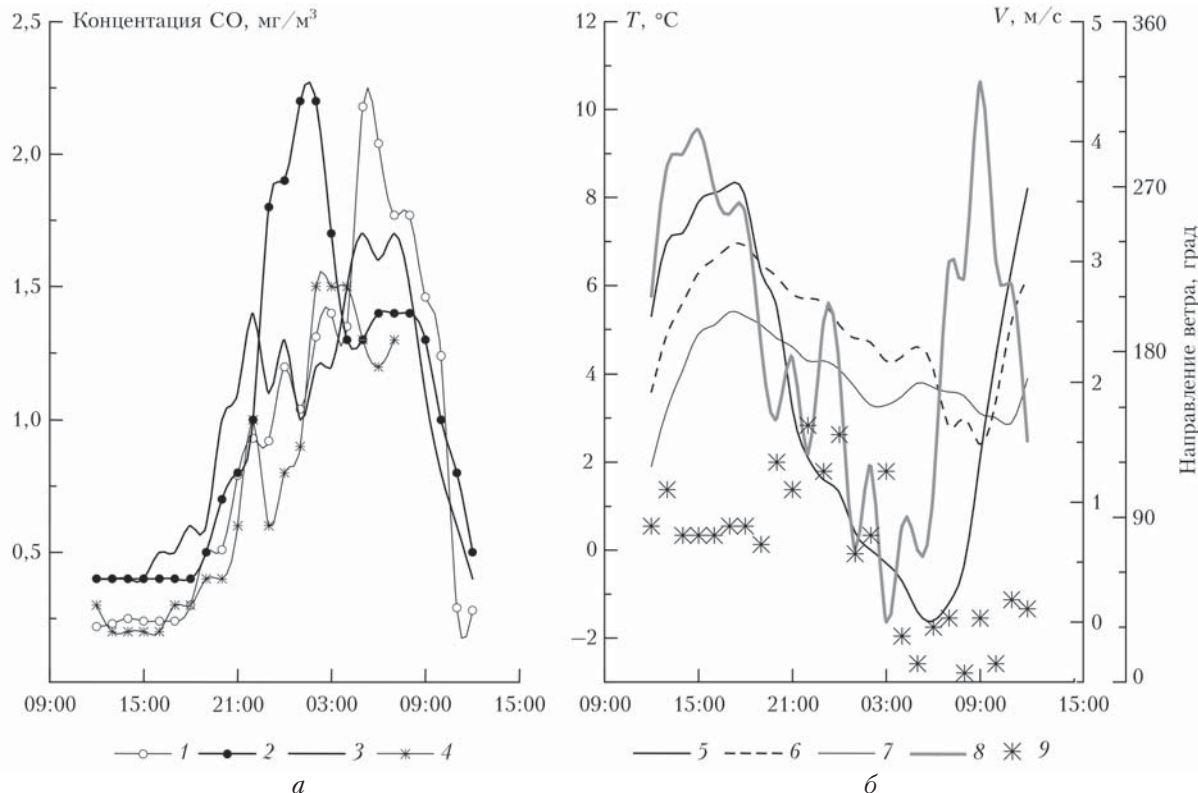


Рис. 3. Вариации СО (*a*) на АСКЗА Шаболовка (1), МГУ (2), Черемушки (3), Спиридоновка (4) и метеорологических параметров на телебашне Останкино (*b*) 14–15 марта 2015 г. (5–7 — температура воздуха на высоте 2, 128 и 253 м соответственно, 8–9 — скорость и направление ветра на высоте 85 м)

Объективный выбор МС для расчетов ГОТ

Довольно распространено мнение, что небольшие вариации высоты метеорологической площадки (в пределах нескольких десятков метров) не оказывают существенного влияния на распределение температуры воздуха. Однако это утверждение неверно. В работе [17] сообщается, что в условиях сильно выровненного участка протяженностью ~500 м с перепадом высот 20 м разность минимальных температур при ясной штилевой погоде во все сезоны превышала 5–6 °С, достигая 9 °С. Согласно исследованиям Т.В. Покровской, в Ленинградской области наибольшие разности между холмом и низинами составляли 5,6 °С при относительной разности высот 40 м [14]. По данным Н.С. Темниковой, на Видземской возвышенности в Латвии понижения температуры в долине по сравнению с вершиной холма иногда достигали 6 °С при разности высот 16–25 м [18].

Эти естественные аномалии температуры, обусловленные рельефом, по величине вполне сопоставимы с характерными значениями ГОТ крупнейших мегаполисов мира [19, 20], а следовательно, не должны игнорироваться при установлении физических причин возникновения пространственных неоднородностей температуры в городе и его окрестностях.

Важность учета микроклиматических особенностей при определении антропогенного ГОТ отмечается в целом ряде публикаций [3, 8]. В работах [15, 21] это было наглядно продемонстрировано на примере г. Апатиты. Небольшой по размерам, этот город почти целиком разместился на верхней части

обширного холма, который на 50–70 м возвышается над окружающей местностью. Благодаря стоку выхолаженного воздуха зимой и ночью летом центральная часть города оказывается теплее своих периферийных районов и пригородов, находящихся на несколько десятков метров ниже. Зафиксированы случаи, когда разность температур между центром города и пригородами достигает 10–15 °С зимой и 5–8 °С летом [15]. Тем не менее во все сезоны она не выходит из диапазона естественной микроклиматической изменчивости температуры воздуха в холмистой местности, что дает основание утверждать, что оценка ГОТ по разности температур на городской и фоновых МС не отражает величину реального техногенного воздействия.

Чтобы оценить антропогенный вклад в увеличение температуры воздуха в городе, необходимо сравнить температуры на МС со схожим микроклиматом. И хотя это может оказаться сложным из-за редкой гидрометеорологической сети станций, такая процедура позволяет исключить из анализа станции с выраженными индивидуальными микроклиматическими особенностями и не принять за ГОТ другие явления.

Воспользуемся методом сопряженного анализа, который заключается в сравнении характеристик термического режима с разной чувствительностью к условиям микроклимата [1]. На рис. 4 показана связь средних за месяц максимальной и минимальной температур в июле (по расчетам 2012–2016 гг.) на станциях Московского региона, включая городские и фоновые МС; метеостанции с похожими ландшафтом и формами рельефа группируются вдоль одной прямой.

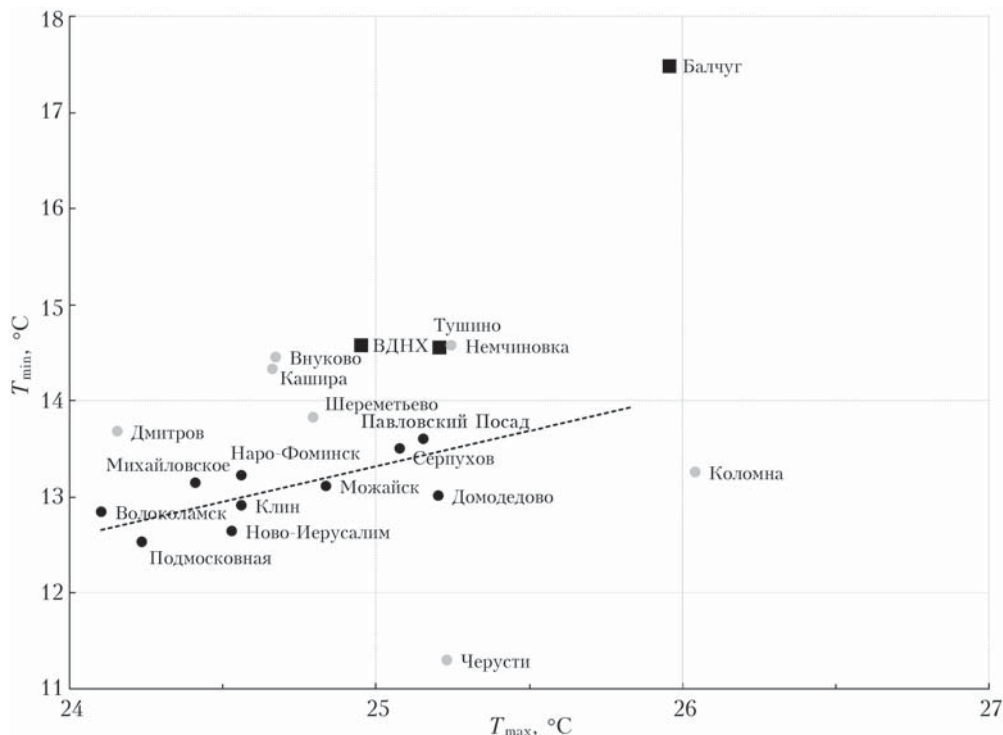


Рис. 4. Связь средней максимальной и средней минимальной температур воздуха за июль

Среди МС можно выделить две группы: 1) Павловский Посад, Домодедово, Наро-Фоминск, Можайск, Волоколамск, Клин, Серпухов, Ново-Иерусалим, Михайловское, Подмосковная; 2) Немчиновка, Внуково, Тушино, Шереметьево, Кашира, Дмитров. Как показал анализ топографических карт, МС группы 1 расположены на довольно выровненных участках, все они находятся на расстоянии более 40 км от Москвы, т.е. не подвержены тепловому влиянию мегаполиса. Следовательно, они в лучшей степени подходят для климатологического сравнения и выявления антропогенного сигнала. В группу 2 попали городские и пригородные МС, т.е. станции внутри городской агломерации, с разной степенью антропогенного влияния мегаполиса. Две фоновые станции группы 2 (Кашира и Дмитров) имеют специфические особенности — они расположены в верхних частях холмов и на их термический режим влияют стоковые течения холодного воздуха. МС Внуково и Шереметьево находятся на возвышенных участках с усиленным турбулентным обменом. ГОТ, оцененный с использованием данных МС Кашира, Дмитров, Внуково и Шереметьево, имеет меньшую величину в ночное время.

Хорошо видно (рис. 4), что МС Коломна и Черусти оказались далеко от обеих групп, что указывает на значительную роль локальных факторов в формировании температурного режима на этих МС. МС Коломна, как уже было сказано, расположена в широкой речной долине южной ориентации, а МС Черусти находится в небольшой депрессии, в которой накапливается холодный воздух. Эти региональные МС не должны использоваться для оценок ГОТ.

Метеостанция Балчуг в центре Москвы представляет явный «выброс» на рис. 4, подтверждая, что термический режим на этой МС формируется под воздействием факторов, вызванных поступлением в атмосферу антропогенного тепла мегаполиса [2, 7, 19].

Заметим, что разброс температуры внутри групп возникает за счет так называемых вторичных неоднородностей подстилающей поверхности [22], а также различий окружающего ландшафта (тип растительности, близость к водоему и т.д.). По-видимому, минимизировать влияние таких природных эффектов при изучении ГОТ можно, привлекая к сравнению наибольшее из возможных число однотипных фоновых гидрометеорологических станций.

Расчет величины ГОТ ($\Delta T_{\text{ГОТ}}$)

Характеристики ГОТ принято определять по наблюдениям минимальных (как правило, ночных) и максимальных (дневных) за сутки температур [4, 6]. В отличие от среднесуточных температур, эти параметры чувствительны к условиям микроклимата; в наибольшей степени это касается минимальной температуры.

Используя результаты сопряженного анализа термического режима, рассчитана средняя за месяц величина ГОТ ($\Delta T_{\text{ГОТ}}$), стандартное отклонение по

данным всех станций и по рекомендованным для расчетов ГОТ станциям группы 1 (рис. 5). В полном соответствии с классическими представлениями о «размывании» ГОТ в дневное время из-за интенсивного турбулентного перемешивания различия между значениями $\Delta T_{\text{ГОТ}}$, одно из которых рассчитано по всем МС области, а другое — по МС со схожим микроклиматом, оказались небольшими (рис. 5, а). Днем зимой и летом в Москве $\Delta T_{\text{ГОТ}} \approx 1,0-1,3$ °С, в переходные сезоны $\Delta T_{\text{ГОТ}} \approx 0,5-0,8$ °С. Но все-таки можно заметить, что с мая по август $\Delta T_{\text{ГОТ}}(t)$ увеличивается за счет исключения из расчетов ГОТ МС, находящихся под влиянием мегаполиса, и МС с выраженными микроклиматическими особенностями.

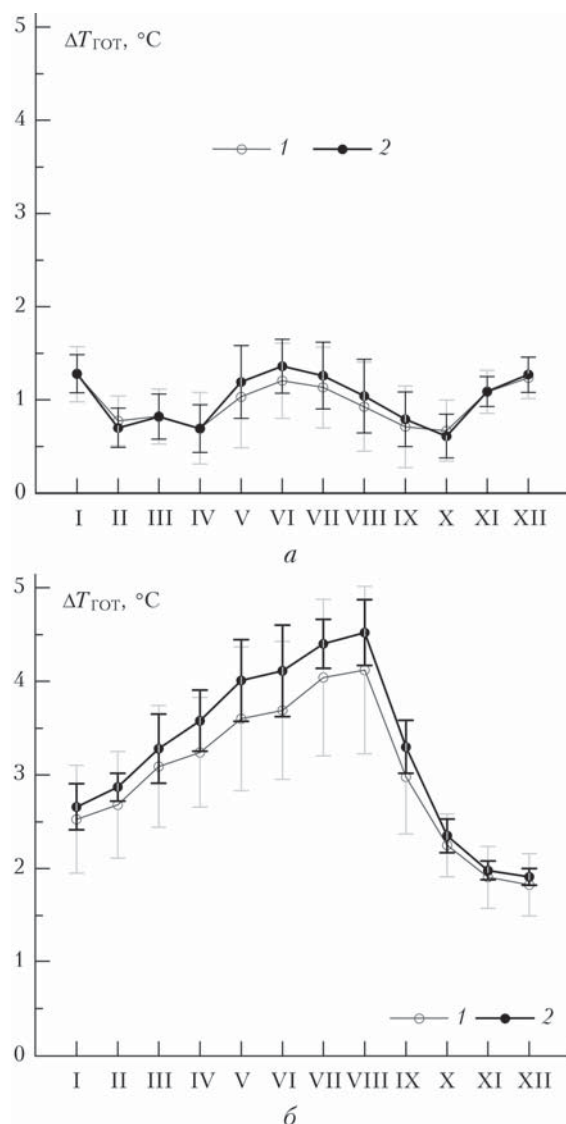


Рис. 5. Дневные (а) и ночные (б) ГОТ, рассчитанные по всем МС (1) (вертикальные серые отрезки — стандартное отклонение) и по МС со схожим типом расположения (2) (вертикальные черные отрезки — стандартное отклонение) за 2012–2016 гг.

Сильнее выражен орографический эффект в ночных наблюдениях температуры. Как видно на рис. 5, б, благодаря исключению МС с более

интенсивным турбулентным обменом, обеспечивающим более высокую температуру (верхние части холмов), ночной ГОТ увеличился (с апреля по август примерно на 0,5 °С). Но нам важнее тот факт, что за счет использования МС с достаточно однородным микроклиматом существенно уменьшилась дисперсия в оценках ГОТ (в 1,5–4,0 раза). Это свидетельствует о большей надежности полученных количественных оценок в Москве. В городах с менее выраженными ГОТ такая предварительная типизация МС по местоположению позволит понизить микроклиматический «шум», что будет способствовать корректному обнаружению антропогенного сигнала.

Заключение

По данным наблюдений приземной температуры на 20 станциях в Московском регионе проведен сравнительный анализ температурного режима и установлено, что часть городских и фоновых станций имеет выраженные микроклиматические особенности, способные существенно повлиять на расчеты величины ГОТ. Наибольшие отклонения от фоновых условий наблюдаются на метеостанциях, расположенных в холмистой местности со значительным перепадом высот, в долинах рек и вблизи водохранилищ, в закрытых склонами понижениях рельефа.

Орографический эффект проявляется в более высокой ночной температуре на расположенных на вершинах холмов станциях (МС Кашира, АСКЗА МГУ) и более низкой минимальной температуре на станциях в речных поймах и окруженных склонами низинах (МС Тушино, Ново-Иерусалим, Клин, Черусти).

Для обнаружения локальных эффектов использовалось сравнение минимальных температур на станциях с выраженными орографическими неоднородностями. В отдельных случаях в качестве маркеров орографической микроциркуляции были взяты концентрации угарного газа. Особая структура микроциркуляции на территории с большими перепадами высот (Воробьевы горы в Москве) зафиксирована и описана по данным измерений концентрации СО на городских станциях мониторинга. Показано, что пиковые концентрации СО в районе МГУ наблюдаются при натекании на склон загрязненного в удаленных городских районах воздуха при слабых северо-восточных ветрах в условиях температурной инверсии.

Сделано предположение, что расположенная на юго-востоке региона МС Коломна, где в теплый сезон дневная температура больше, чем на многих станциях Московской городской агломерации, относится к другой климатической зоне, но также признается, что ее расположение в речной долине южной ориентации обеспечивает более сильный, чем на соседних станциях, прогрев приземного воздуха.

Наиболее благоприятными метеорологическими условиями для обнаружения орографических эффектов являются ситуации с ослабленным турбулентным переносом в нижних слоях атмосферы в сочетании с устойчивой термической стратификацией в ночное время.

Для исключения из расчетов антропогенной составляющей ГОТ в Москве данных наблюдений с выраженным локальным сигналом впервые апробирована процедура формального отбора станций на основе сопряженного анализа характеристик термического режима. Установлена и продемонстрирована эффективность применения предложенного способа объективного выбора станций для корректного расчета антропогенной составляющей ГОТ.

1. *Климат, погода, экология Москвы* / под ред. Ф.Я. Клинова. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 439 с.
2. *Матвеев Л.Т., Вершель Е.А., Матвеев Ю.Л.* Влияние антропогенных факторов на климат городов // Учен. зап. ПГМУ. 2011. № 17. С. 41–50.
3. *Grimmond S.* Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming // *Geogr. J.* 2007. V. 173. P. 83–88.
4. *Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Ottle C., Breon F., Nan H., Zhou L., Myneni R.* Surface urban heat island across 419 global big cities // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 46, N 2. P. 696–703.
5. *Дудорова Н.В., Белан Б.Д.* Оценка факторов, определяющих формирование городского острова тепла в г. Томск // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 5. С. 426–436.
6. *Mishra V., Ganguly A., Nijssen B., Lettenmaier D.* Changes in observed climate extremes in global urban areas // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10, N 2. P. 2–10.
7. *Кузнецова И.Н., Брусова Н.Е., Нахаев М.И.* Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 5. С. 49–61.
8. *Stewart I.D.* A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // *Int. J. Climatol.* 2011. V. 31, N 2. P. 200–217.
9. *Рубинштейн К.Г., Гинзбург А.С.* Оценки изменения температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка) // *Метеорол. и гидрол.* 2003. № 2 С. 29–38.
10. *Lokoshchenko M.A., Sorokina E.A.* Urban “heat island” in Moscow by satellite data // *Urban Clim.* 2014. V. 10. Part 3. P. 550–562.
11. *Константинов П.И., Грищенко М.Ю., Варенцов М.И.* Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область) // *Исслед. Земли из космоса.* 2015. № 3. С. 27–33.
12. *Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И.* Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.
13. *Мищенко З.А.* Биоклимат дня и ночи. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
14. *Микроклимат холмистого рельефа и его влияние на сельскохозяйственные культуры* / под ред. И.А. Гольдберг. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 246 с.
15. *Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В.* Влияние рельефа на формирование «острова тепла» в г. Апатиты // *Фунд. и прикл. климатология.* 2016. № 2. С. 95–106.
16. *Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Архангельская А.А., Зягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Лезина Е.А.* Сезонная и суточная изменчивость концентраций взве-

- шенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 473–482.
17. *Каушила К.А.* К вопросу о территориальном распределении и годовом ходе различий минимальной температуры воздуха, обусловленных рельефом // Тр. ГГО. 1970. Вып. 264. С. 90–96.
 18. *Гольцберг И.А.* Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 282 с.
 19. *Santamouris M.* Urban warming and mitigation: Actual status, impacts and challenges // Urban Climate Mitigation Techniques. London: Routledge, 2016. P. 1–26.
 20. *Zhou B., Lauwaet D., Hooyberghs H., Ridder K., Kropp J.* Assessing seasonality in the surface urban heat island of London // J. Appl. Meteorol. Climatol. 2016. V. 55. P. 493–505.
 21. *Демин В.И., Анциферова А.Р., Чаус О.М.* Влияние микроклиматических условий на расчеты городского острова тепла и тренды температуры в Мурманске // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 160–177.
 22. *Романова Е.Н., Мосолова Г.И., Берсенева И.А.* Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 246 с.

V.I. Demin, I.N. Kuznetsova, N.E. Brusova, M.I. Nakhaev, I.Yu. Shalygina, P.V. Zakharova. **Orographic effects on calculation of the urban heat island intensity.**

Using 20 meteorological stations in Moscow region as an example, it is shown that relief-induced microclimate differences affect the calculations of the intensity of urban heat island in Moscow. Microclimate parameters were investigated on the basis of comparison between the daily maximum and minimum air temperatures and the analysis of large-scale topographic maps. In some instances, variations in the carbon monoxide concentration were used as evidence of microclimate relevant air circulations. The outcomes of the study prove that the urban heat island needs to be investigated using data from rural and urban meteorological stations located in similar microclimate.