

УДК 551.524.3+551.588.7 (470.311)

## ТЕПЛОВОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ МЕГАПОЛИСА НА ФОНЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Н.Е. Брусова, И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва  
nbrusova@list.ru*

По данным наблюдений в 2012–2016 гг. на 20 метеостанциях в Москве и Московской области анализируется пространственная и временная изменчивость теплового возмущения, вносимого Московским мегаполисом в поле приземной температуры. Показано, что границы теплового возмущения зависят от сезонных изменений источников антропогенного тепла в мегаполисе. Тепловая аномалия мегаполиса в поле приземной температуры характеризуется выраженной внутрисуточной динамикой, ночью достигая максимальных величин. Установлено, что в среднем за месяц в центре мегаполиса во все сезоны теплее, чем в регионе, на 2,5–4,3 °С и теплее, чем на городской периферии и в ближних пригородах, на 2–2,8 °С, осенью – на 1–2 °С. Днем тепловая аномалия мегаполиса в региональном поле приземной температуры значительно слабее и составляет 0,7–1,5 °С.

*Ключевые слова:* городской остров тепла, тепловое возмущение, пространственная и сезонная изменчивость.

### Введение

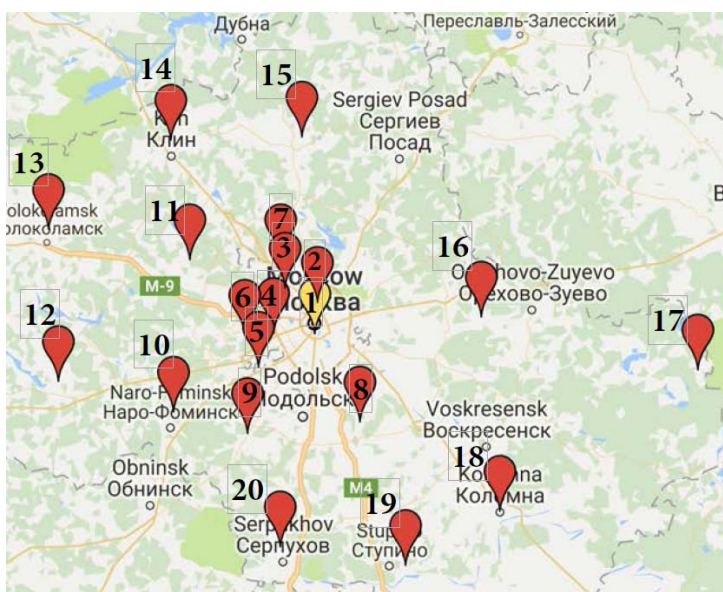
Быстрый рост и развитие инфраструктуры больших городов приводят к необходимости углубленного изучения процессов в городской атмосфере для выявления и оценки антропогенного вклада в формирование особого метеорологического режима в городе. Одним из ярких примеров антропогенного влияния на климат города может служить более высокая температура воздуха в городе по сравнению с окружающей территорией и образование так называемого городского острова тепла (ГОТ), при этом каждый мегаполис уникален своим сочетанием физико-географических и урбанистических характеристик. Анализ антропогенного вклада в тепловой режим городов, установление количественных характеристик ГОТ и его изменчивость в широком географическом диапазоне представлены в большом количестве зарубежных научных публикаций [12–20]. В последние годы разными авторами опубликованы и результаты исследования городского острова тепла в Москве [7–11], но, по нашему мнению, оценить антропогенную составляющую по приведенным показателям затруднительно из-за отсутствия ссылок на методы отбора данных для анализа ГОТ [2, 6].

В исследованиях городского острова тепла в основном используются данные наблюдений приземной температуры на метеорологических станциях [4, 8–10], реже – на высотных мачтах и телебашнях [7], и микроволновых измерений температуры профилимерами [3, 11]. В публикациях [1, 5, 14] представлены результаты анализа теплового поля мегаполиса по данным спутниковых измерений.

В настоящей статье обсуждаются характеристики вносимого мегаполисом возмущения на фоне региональной температуры, что важно и для установления антропогенной составляющей теплового режима мегаполиса, и для верификации расчетов численных моделей атмосферы с высоким пространственным разрешением.

### Использованные данные, методы анализа

В работе использованы данные стандартных метеорологических измерений температуры за 8 сроков и суточных экстремумов (минимальная и максимальная температура за сутки) за период 01.01.2012 – 31.12.2016 на 20 метеостанциях Московского региона (рис. 1), названия станций – в табл. 1.



**Рис. 1.** Расположение станций наблюдений в Московском регионе, данные которых использованы в работе (название станций – в табл. 1).

Для исследования использованы средние суточные максимумы и минимумы температуры на каждой из 20 станций ( $i$ ) (соответственно,  $T(i) \max$ ,  $T(i) \min$ ), рассчитанные средние за месяц значения приземной температуры  $T(i)$ , а также разности температур в центре Москвы и на

станциях региона  $\Delta T(i) = T(\text{Балчуг}) - T(i)$ . Средние суточные температуры рассчитаны по значениям суточного максимума и минимума. Предварительно проведено сравнение среднесуточной температуры за период на станции ВДНХ, вычисленной по данным наблюдений за восемь сроков и как среднее значение суточных экстремумов. Установлено, что разница в расчетах средней суточной температуры по двум способам составила менее  $0,1^\circ\text{C}$ , т. е. для данного исследования выбор методики вычислений среднесуточной температуры не имеет существенного значения.

**Таблица 1.** Станции наблюдений в Московском регионе, их высота над уровнем моря

№	Название метеостанции	Высота над уровнем моря, м	№	Название метеостанции	Высота над уровнем моря, м
1	Балчуг (Москва)	125	11	Ново-Иерусалим	159
2	ВДНХ (Москва)	147	12	Можайск	184
3	Тушино (Москва)	167	13	Волоколамск	196
4	Немчиновка	177	14	Клин	166
5	Внуково	209	15	Дмитров	178
6	Подмосковная	169	16	Павловский Посад	134
7	Шереметьево	192	17	Черусти	127
8	Домодедово	167	18	Коломна	112
9	Михайловское	189	19	Кашира	219
10	Наро-Фоминск	190	20	Серпухов	164

В тексте используются сокращения и определения: МО – Московская область; ст. – метеостанция; регион – территория Московской области за границами городской агломерации; городская агломерация – Москва в границах старой Москвы и ближние пригороды в пределах 10–15 км от Московской кольцевой дороги; городская периферия – удаленные от центра районы Москвы (представлена данными метеостанций ВДНХ, МГУ и Тушино).

### Сравнение температуры с климатической нормой

Для оценки репрезентативности выбранного периода проведено сравнение средней за 2012–2016 гг. температуры с климатической нормой (далее – норма) – средней многолетней температурой за период 1961–1990 гг. на 12 станциях Московского региона. Для каждой из этих станций рассчитана средняя за месяц температура и ее отклонение от нормы  $\Delta T(i)_n = T(i)_{\text{ср}} - T(i)_n$ . Согласно расчетам, усредненная по всем станциям средняя годовая температура превысила климатическую норму в рассматриваемый период на  $1,7^\circ\text{C}$  (табл. 2). Различия в отклонениях от нормы между станциями небольшие (в основном  $0,2^\circ\text{C}$ ),

наименьшие отклонения наблюдаются на крайнем востоке и северо-западе области (Черусти –  $\Delta T(i)_{н} \approx 1,3$  °С; Волоколамск –  $\approx 1,5$  °С), а наибольшие положительные отклонения от нормы ( $\approx 1,8$  °С) на станциях юго-западного и юго-восточного секторов региона (Можайск, Наро-Фоминск, Кашира, Коломна, Павловский Посад).

Не исключено, что большие отклонения от нормы частично связаны с интенсивным ростом городской инфраструктуры в последние десятилетия, соответственно с возрастанием антропогенной составляющей в тепловом режиме этих городов. Безусловно, это предположение нуждается в дальнейшей проверке, учитывая, что микроклиматические эффекты, как справедливо отмечено в [2], могут по-разному проявляться при различных типах макроциркуляционных процессов. В пользу этого предположения свидетельствуют и сезонные особенности отклонений от нормы. Можно заметить, что на общем фоне положительной аномалии в холодный сезон различия  $\Delta T(i)_{н}$  между станциями в основном меньше 1 °С, а летом увеличиваются до 1,5 °С.

**Таблица 2.** Отклонение средней температуры от климатической нормы  $\Delta T(i)_{н}$  за 2012–2016 гг.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
ВДНХ	1,5	3,5	1,2	1,4	2,3	1,3	1,7	2,4	1,6	0,2	1,6	2,1	1,7
Н. Фоминск	1,9	4,1	1,7	1,3	2,3	1,1	1,7	2,3	1,8	0,4	1,5	1,9	1,8
Н. Иерусалим	1,6	4,2	1,4	1,0	1,9	0,7	1,3	1,9	1,5	0,3	1,7	2,1	1,6
Можайск	1,5	4,2	1,7	1,6	2,2	1,2	1,8	2,2	1,7	0,4	1,6	1,9	1,8
Волоколамск	1,2	3,8	1,2	1,3	2,1	0,7	1,5	1,8	1,5	0,1	1,1	1,8	1,5
Клин	1,1	3,8	0,9	1,2	2,3	1,1	1,5	1,9	1,6	0,3	1,4	1,9	1,6
Дмитров	1,3	3,9	1,1	1,3	2,4	1,2	1,5	2,1	1,7	0,4	1,6	2,3	1,7
П. Посад	1,7	4,1	1,8	1,4	2,4	1,1	1,5	2,2	1,7	0,6	1,6	2,2	1,8
Черусти	1,2	3,8	1,2	0,9	1,5	0,4	0,3	1,1	1,1	0,5	1,6	1,9	1,3
Кашира	1,5	3,7	1,8	1,6	2,4	1,1	1,6	2,2	1,4	0,5	1,4	1,8	1,8
Коломна	1,6	4,4	2,0	1,5	2,5	1,1	1,3	2,2	1,6	0,6	1,5	1,9	1,8
Серпухов	1,5	3,8	1,7	1,2	2,1	1,0	1,5	2,0	1,3	0,2	1,5	1,8	1,6
<b>Среднее</b>	1,5	3,9	1,5	1,3	2,2	1,0	1,4	2,0	1,5	0,4	1,5	2,0	1,7

Тот факт, что ст. ВДНХ не вошла в список станций с максимальным «потеплением», по-видимому, объясняется наличием антропогенной составляющей в термическом режиме Москвы в период расчета климатических норм (в 1961–1990 гг. Москва уже была крупнейшим индустриальным центром).

В табл. 2 видно, что наибольшие превышения нормы пришлись на февраль: среднее по станциям Московской области отклонение составило почти 4 °С как следствие «теплых» февралей из-за аномальной крупномасштабной циркуляции. В табл. 3 приводятся температурные

данные в Москве на станции ВДНХ и МО (усредненная по 11 станциям, табл. 2) в феврале в последние 5 лет.

Поскольку период метеонаблюдений демонстрирует достаточную степень однородности рядов данных наблюдений температуры в сравнении с климатическими нормами, можно считать его репрезентативным для изучения теплового влияния мегаполиса.

**Таблица 3.** Температура на станции ВДНХ Т(ВДНХ) и усредненная по 11 станциям Московского региона Т(МО) и ее отклонение от нормы  $\Delta T_n$  в феврале 2012–2016 гг.

Характеристика		Климат. норма	2012	2013	2014	2015	2016
Температура	Т(МО)	-8,9	-12,8	-4,7	-2,8	-2,9	-1,1
	Т(ВДНХ)	-7,6	-12,1	-3,5	-2,0	-2,3	-0,6
Отклонение от нормы	среднее $\Delta T_n$ (МО)		-3,9	4,2	6,1	6,0	7,8
	$\Delta T_n$ (ВДНХ)		-4,5	4,1	5,6	5,3	7,0

### Региональные особенности температурного режима

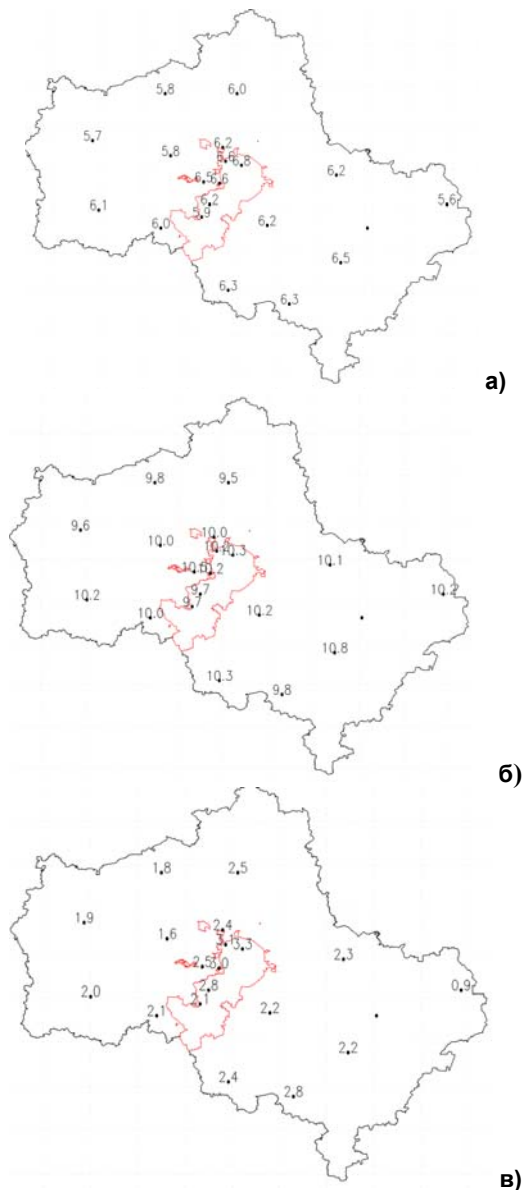
Изучение региональных особенностей поля температуры имеет целью установить факторы их формирования, а также выявить станции с достаточно однородным термическим режимом и станции, где микроциркуляции в сложных формах рельефа или на границе вода – суша существенно влияют на локальный климат и не должны использоваться для оценки тепловой аномалии мегаполиса [2, 6].

По данным наблюдений в 2012–2016 гг. рассчитана средняя годовая температура на станциях  $T_g(i)$  Московского региона, а также средняя за год по измерениям минимальной ( $T_g(i) \min$ ) и максимальной ( $T_g(i) \max$ ) за сутки температуры.

На большей части Московской области фон средней за год температуры достаточно однороден:  $T_g = 6,1 - 6,3$  °С, в северо-западном секторе –  $5,7 - 6,0$  °С (рис. 2). Самая низкая температура – на ст. Черусти (5,6 °С), самая высокая температура – на ст. Коломна (6,5 °С), т. е. разность между региональными станциями с самой низкой и самой высокой температурой в среднем за год чуть меньше 1 °С. Средняя годовая усредненная по данным городских станций температура в рассматриваемый период равна 7,2 °С, что на 0,8 °С больше средней температуры в ближних пригородах ( $T_g = 6,4$  °С).

Усредненная за период 2012–2016 гг. дневная температура в Московской области находилась в интервале 10,0–10,3 °С (рис. 2б). Наименьшими ее значения были на северо-западе МО:  $T_g \max = 9,5 - 9,8$  °С, а также на ст. Кашира – юг области. Наибольшая

средняя за год дневная температура  $T_g(i) \max = 10,8 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдалась на ст. Коломна (юго-восток области), это всего на  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  ниже, чем в центре города на ст. Балчуг, и на  $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$  выше, чем средняя дневная температура в ближних пригородах.



**Рис. 2.** Усредненная за год температура (а), по данным максимальной за сутки температуры (б), по данным минимальной за сутки температуры (в), 2012–2016 гг.

Усредненная за период ночная температуры Москвы на  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше, чем на большей части области, и на  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  – чем в ближних пригородах (рис. 2в). Вне границ городской агломерации усредненная  $T_{\text{г min}}$  находится в интервале  $2,0\text{--}2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на северо-западе МО –  $1,6\text{--}1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Самой низкой в регионе была средняя ночная температура на ст. Черусти ( $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Эта станция расположена ниже остальных региональных станций (127 м н.у.м.) в болотистой местности, что способствует сильному ночному выхолаживанию. (Заметим, название «Черусти» по распространённой версии происходит от тюркского слова *чаруса*, означающего «болото».) Одна из низких в регионе средняя ночная температура оказалась также на ст. Ново-Иерусалим ( $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Самые теплые ночи в регионе характерны для ст. Кашира ( $T_{\text{г(i) min}} = 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), здесь температурная аномалия создается орографическим эффектом: станция расположена на высоком берегу р. Оки на высоте 219 м н.у.м, где стоковые ночные ветры, как отмечалось в [2], препятствуют скапливанию холодного воздуха.

На основании анализа усредненной за период температуры видно, что термический режим на некоторых станциях МО имеет специфические особенности, не характерные для региона в целом, поэтому использование данных от этих станций при оценке теплового влияния мегаполиса может привести к недостоверным результатам.

### Сезонная изменчивость температуры в регионе

Для поля средней годовой температуры МО характерно наличие направленного с северо-запада на юго-восток градиента температуры, который составляет примерно  $0,5\text{--}0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (здесь и ниже подразумеваем модуль градиента). Эта характеристика поля приземной температуры устойчивая: вектор градиента температуры практически не меняет направления, и сезонные колебания свойственны только значению градиента. В холодный сезон градиент уменьшается до  $0,3\text{--}0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , летом и в мае возрастает примерно до  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; т. е. температурные контрасты на территории МО от зимы к лету увеличиваются, осенью резко убывают; и как следствие, наиболее сглаженным поле температуры бывает осенью и в декабре, максимально контрастным – летом.

В отдельные месяцы и в среднем за год наибольшая температура в регионе наблюдается на городской ст. Балчуг (табл. 4), что качественно совпадает с данными наблюдений еще в конце прошлого века [4]. Хотя не исключено, что Балчуг – не самое теплое место в Москве. Подтвердить это могли бы наблюдения в юго-восточной преимущественно подветренной территории мегаполиса, но сетевые наблюдения там не проводятся. За отсутствием других данных и как принято во всех публикациях, посвященных изучению ГОТ в Москве [4, 6, 7], ст. Балчуг принимается как центр городского острова тепла, а разность

температур между Балчугом и областными станциями может характеризовать максимальное тепловое возмущение, вносимое мегаполисом в поле приземной температуры.

Средняя за период 2012–2016 гг. температура на Балчуге составила 8,2 °С (табл. 4), что выше средней температуры «самой теплой» станции МО (Коломна) и «самой холодной» (Волоколамск) на 1,7 и 2,5 °С соответственно. На ст. Балчуг в среднем за год примерно на 1,5 °С теплее, чем на городской периферии (ВДНХ, Тушино, Немчиновка), и теплее, чем в ближних пригородах (Внуково, Шереметьево, Домодедово), примерно на 2 °С. Заметим, что на ст. Домодедово средняя температура немного ниже, чем на ст. Внуково и ст. Шереметьево; по-видимому, более удаленная от Москвы ст. Домодедово (примерно на 10 км) в меньшей степени испытывает тепловое влияние мегаполиса. Также следует обратить внимание на температуру на ст. Немчиновка (вблизи МКАД); ее, вероятно, следует теперь относить к городским станциям, учитывая, что большую часть года температура в Немчиновке близка и даже немного превышает температуру на городской станции Тушино.

**Таблица 4.** Средняя температура на станциях за период 2012–2016 гг.

№	Станция	Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Балчуг	8,2	-6,7	-3,2	0,4	8,4	17,1	19,7	22,0	20,6	13,8	6,3	1,3	-3,0
2	ВДНХ	6,8	-7,7	-4,1	-0,8	7,1	15,3	17,8	20,1	18,7	12,5	5,2	0,5	-3,9
3	Тушино	6,6	-8,1	-4,4	-1,1	6,8	15,4	17,9	20,1	18,8	12,5	5,1	0,2	-4,2
4	Немчиновка	6,6	-8,0	-4,3	-1,0	6,9	15,4	17,8	20,1	18,7	12,4	5,1	0,1	-4,2
5	Внуково	6,2	-8,4	-4,8	-1,4	6,5	15,0	17,4	19,8	18,4	12,1	4,7	-0,3	-4,6
6	Шереметьево	6,2	-8,5	-4,6	-1,6	6,3	14,8	17,3	19,6	18,2	12,1	4,8	0,0	-4,5
7	Домодедово	6,2	-8,6	-4,9	-1,7	6,4	14,6	17,1	19,5	18,3	12,1	5,1	0,0	-4,4
8	Михайловская	5,9	-8,6	-5,1	-1,8	6,2	14,5	16,8	19,0	17,8	11,9	4,9	-0,2	-4,7
9	Н. Фоминск	6,0	-8,4	-4,7	-1,5	6,3	14,6	16,8	19,1	17,8	11,9	4,8	-0,2	-4,6
10	Н.Иерусалим	5,8	-8,7	-4,8	-1,9	5,8	14,0	16,4	18,9	17,4	11,6	4,7	-0,2	-4,6
11	Можайск	6,1	-8,6	-4,6	-1,5	6,5	14,4	16,9	19,2	17,8	12,0	4,9	-0,1	-4,5
12	Волоколамск	5,7	-9,0	-4,9	-1,9	6,2	14,2	16,3	18,7	17,3	11,7	4,6	-0,4	-4,6
13	Клин	5,8	-9,1	-4,7	-2,1	6,1	14,3	16,7	19,0	17,5	11,8	4,7	-0,3	-4,6
14	Дмитров	6,0	-9,0	-4,7	-1,8	6,4	14,7	17,0	19,2	17,9	12,0	4,6	-0,4	-4,7
15	П-Посад	6,2	-8,7	-4,8	-1,5	6,7	15,1	17,5	19,6	18,3	12,2	5,0	-0,3	-4,7
16	Черусти	5,6	-9,5	-5,5	-2,2	6,4	14,3	16,7	18,5	17,2	11,7	4,6	-0,5	-5,3
17	Кашира	6,3	-8,7	-5,2	-1,6	6,9	15,4	17,6	19,8	18,6	12,3	5,0	-0,4	-4,9
18	Коломна	6,5	-8,7	-5,0	-1,5	7,0	15,5	17,9	20,0	18,7	12,6	5,3	0,0	-4,6
19	Серпухов	6,3	-8,3	-4,7	-1,3	6,8	15,0	17,3	19,5	18,2	12,2	5,1	0,1	-4,4



В табл. 5 приводится усредненная температура по станциям за пределами городской агломерации (ст. 8–19, без ст.16, табл. 1) и по сгруппированным в сектора станциям. Отдельно выделены городская периферия (ст. 2–4), ближний пригород (ст. 5–7), северный и северо-западный сектор Московской области (ст. 10–14), юго-западный, южный и юго-восточный сектор (8, 9, 17–19).

В табл. 5 видно, что городская периферия во все месяцы теплее пригородов на 0,3–0,5 °С. В пригородах температурный фон в течение года практически совпадает ( $\pm 0,1$  °С) со средней температурой юго-западного, юго-восточного и южного секторов, мало отличается и северного и северо-западного сектора в период сентябрь – апрель (теплее на 0,2–0,3 °С), но в мае и летние месяцы пригород теплее на 0,5–0,8 °С. Следовательно, оценивая тепловое возмущение мегаполиса с использованием станций только северного и северо-западного сектора, можно завязать его величину, а юго-западного, южного и юго-восточного сектора – занижить.

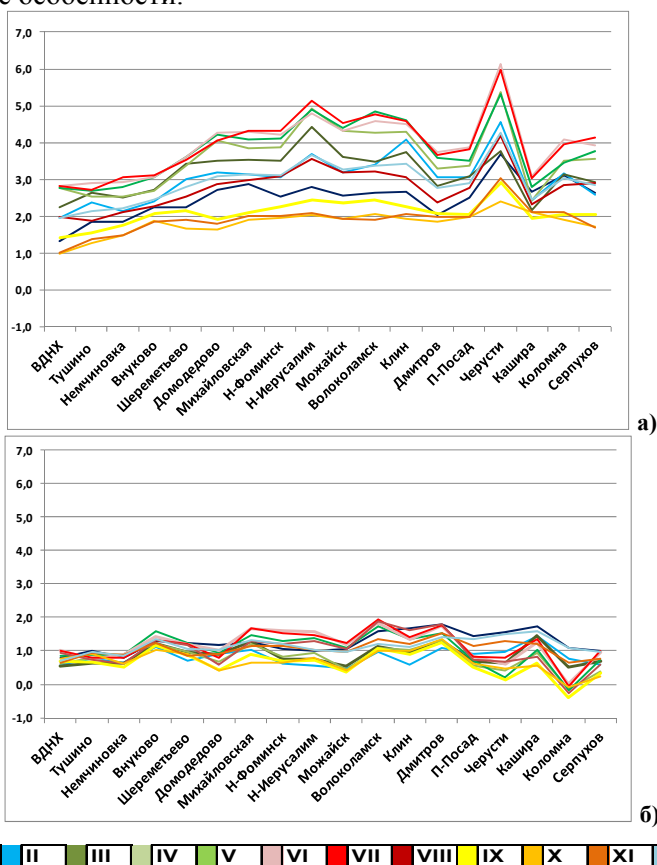
**Таблица 5.** Средняя температура по группам станций за период 2012–2016 гг.

Станции	Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Балчуг	8,2	-6,7	-3,2	0,4	8,4	17,1	19,7	22,0	20,6	13,8	6,3	1,3	-3,0
Городская периферия	6,7	-8,0	-4,3	-1,0	6,9	15,4	17,8	20,1	18,8	12,5	5,1	0,3	-4,1
Пригород	6,2	-8,5	-4,8	-1,6	6,4	14,8	17,2	19,6	18,3	12,1	4,9	-0,1	-4,5
С и СЗ сектор	5,9	-8,9	-4,7	-1,8	6,2	14,3	16,7	19,0	17,5	11,8	4,7	-0,3	-4,6
ЮЗ, Ю и ЮВ сектор	6,2	-8,5	-4,9	-1,5	6,6	15,0	17,3	19,5	18,2	12,2	5,0	-0,1	-4,6
Все загородные	6,0	-8,8	-4,9	-1,7	6,4	14,7	17,0	19,2	17,9	12,0	4,8	-0,2	-4,6
Градиент температуры СЗ →ЮВ	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>

Отметим, что в теплый период главными причинами образования наибольших в году температурных контрастов в регионе (с мая по август – максимальных) является неоднородность теплофизических свойств поверхности (на урбанизированных территориях больше теплоемкость и излучающая поверхность за счет асфальтовых дорожных покрытий и высотной застройки) и орографические эффекты. При наличии снежного покрова тепловая аномалия мегаполиса по сравнению с летом ослабевает, как в среднем и остров тепла в центре Москвы, который в отопительный сезон обеспечивается прямыми и скрытыми (сжигание топлива транспортом) выбросами тепла в атмосферу города. Сезонный минимум величины тепловой аномалии мегаполиса  $\Delta T(i)$  наблюдается в октябре-ноябре – в период активной атмосферной циркуляции с большой частотой и продолжительностью осадков [6].

### Внутрисуточная изменчивость тепловой аномалии мегаполиса

В соответствии с внутрисуточной динамикой процессов теплообмена и интенсивности перемешивания в приземном атмосферном слое существенные изменения ото дня к ночи наблюдаются и в поле температуры: днем благодаря активной турбулентности региональные температурные контрасты выравниваются, ночью – увеличиваются за счет локальных орографических эффектов, а на территориях вблизи рек и водохранилищ в теплый сезон - под влиянием микроциркуляций «вода – суша» [2, 6]. Иллюстрацией служат рассчитанные отклонения максимальной и минимальной температуры на станциях от температуры на ст. Балчуг ( $\Delta T(i) \max$ ,  $\Delta T(i) \min$ ), представленные на рис. 3, где хорошо видно общее увеличение  $\Delta T(i) \min$  по сравнению с  $\Delta T(i) \max$ . Так же отчетливо проявляются сезонные колебания обеих характеристик и их локальные особенности.



**Рис. 3.** Средняя за месяц разность максимальной (а) и минимальной (б) температуры на ст. Балчуг и температуры на станциях региона за период 2012–2016 гг. Цветом обозначены месяцы: синие оттенки – зима, зеленые – весна, красные – лето, желтые – осень.

Показатель  $\Delta T(i) \max$  – пространственно мало изменчивая характеристика (рис. 3а). Наименьшее  $\Delta T(i) \max$  на городских и пригородных станциях (в течение года  $0,8\text{--}1,3\text{ }^\circ\text{C}$ ), также для него характерна слабая внутригодовая (сезонная) изменчивость. Для станций южного и юго-восточного сектора характерно уменьшение  $\Delta T(i) \max$  от зимы к лету, на северо-западе – наоборот. Обратим внимание, что в Коломне несколько месяцев в году  $T(i) \max$  практически равна (в отдельные месяцы даже выше)  $T(i) \max$  в центре Москвы на ст. Балчуг.

Ночью температурная аномалия мегаполиса значительно увеличивается, как и амплитуда сезонной изменчивости (рис. 3б). На станциях, расположенных за пределами пригородной зоны она колеблется в среднем от 2 до  $5\text{ }^\circ\text{C}$ . Для станций, расположенных в черте города и ближнем пригороде  $\Delta T(i) \min$  в среднем за год составляет  $2\text{--}2,8\text{ }^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о том, что они находятся в зоне теплового воздействия мегаполиса.

### Заключение

По данным наблюдений в 2012–2016 гг. на 20 метеостанциях в Москве и Московской области показано, что тепловое возмущение, вносимое московским мегаполисом в поле приземной температуры, характеризуется пространственной и временной изменчивостью.

Сезонные изменения теплового возмущения определяются увеличением в теплый сезон теплового излучения урбанистической поверхности, по-видимому, дающего больший эффект в образовании тепловой аномалии, чем потери и прямые выбросы тепла в холодный сезон при наличии снежного покрова. Как следствие сезонной динамики доминирующих источников антропогенного тепла в мегаполисе, границы теплового возмущения мегаполиса летом приближаются к контурам городской агломерации; в холодный период при наличии снежного покрова значимое тепловое возмущение обнаруживается в пределах городской территории (МКАД), ближние пригороды мало отличаются от удаленных станций региона.

Тепловой аномалии в поле приземной температуры, обусловленной воздействием мегаполиса, свойственна выраженная внутрисуточная динамика. Максимальных величин она достигает в ночное время: в течение года на городской периферии и в ближних пригородах ночью теплее, чем на большей части региона, в среднем за месяц на  $1,5\text{--}2,5\text{ }^\circ\text{C}$  (осенью – около  $1\text{ }^\circ\text{C}$ ), а в центральной части мегаполиса во все сезоны теплее, чем в регионе, на  $2,5\text{--}4,3\text{ }^\circ\text{C}$  и теплее, чем на городской периферии и в ближних пригородах, в среднем за месяц на  $2\text{--}2,8\text{ }^\circ\text{C}$  (осенью на  $1\text{--}2\text{ }^\circ\text{C}$ ). Днем тепловая аномалия мегаполиса в региональном поле приземной температуры значительно слабее и составляет  $0,7\text{--}1,5\text{ }^\circ\text{C}$ , а в летние месяцы температура в мегаполисе близка к температуре на юго-востоке МО.

Показано, что термический режим на части региональных станций имеет ярко выраженные особенности, что необходимо принимать во внимание для корректной оценки антропогенной составляющей ГОТ и потоков антропогенного тепла, например в численных моделях атмосферы с высоким пространственным разрешением.

Получены подтвержденные проведенным исследованием количественные доказательства того, что температурный режим на ст. Балчуг существенно отличается от городской периферии, а разность температуры между ст. Балчуг и региональными станциями является показателем максимума тепловой аномалии мегаполиса, а не «интенсивностью» ГОТ, как отмечают большинство исследователей.

*Поступила в редакцию 26.06.2017 г.*

#### Список использованных источников

1. Балдина Е.А., Константинов П.И., Гриценко М.Ю., Варенцов М.И. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2015. Специальный выпуск. С. 38-42.
2. Демин В.И., Кузнецова И.Н., Брусова Н.Е., Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Захарова П.В. Орографические эффекты в расчете городского острова тепла // Оптика атмосферы и океана. 2017. В печати.
3. Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А. Наземные микроволновые температурные профиломеры: потенциал и реальность // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 521-528.
4. *Климат, погода, экология Москвы* / Под ред. Ф.Я. Клинова. СПб: Гидрометиздат. 1995. 234 с.
5. Константинов П.И., Гриценко М.Ю., Варенцов М.И. Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область) // Исследование Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27-33.
6. Кузнецова И.Н., Брусова Н.Е., Нахаев М.И. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость // Метеорология и гидрология. 2017. №5. С. 49-61.
7. Локощенко М.А., Корнева И.А., Кочин А.В. и др. О высотной протяженности городского острова тепла над Москвой // Доклады РАН. 2016. Т. 466, № 2. С. 213-217.
8. Матвеев Л.Т., Вершель Е.А., Матвеев Ю.Л. Влияние антропогенных факторов на климат городов // Ученые записки РГГУ. 2011. № 17. С. 41-50.
9. Рубинштейн К.Г., Гинсбург 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.
10. *Справочник* эколого-климатических характеристик г. Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1. М.: Изд. МГУ, 2003. С. 182, 170-172.
11. Юшков В.П. Оценка пространственных неоднородностей температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, №11. С. 1012-1022.
12. Grimmond S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming // Geogr. J. 2007. Vol. 173. P. 83–88.

13. Fu P., Weng Q. A time series analysis of urbanization induced land use and land cover change and its impact on land surface temperature with Landsat imagery // *Remote Sens. Environ.*, 2016. Vol. 175, No. 15. P. 205-214.
14. Lokoshchenko M.A., Sorokina E.A. Urban 'heat island' in Moscow by satellite data // *Urban Climate*. 2014. No. 10, part 3. P. 550-562.
15. Mishra V., Ganguly A, Nijssen B., Lettenmaier D. Changes in observed climate extremes in global urban areas // *Environ. Res. Lett.* 2015. Vol. 10, No. 2. P. 2-10.
16. Nichol J., Fung W., Lam K., Wong M. Urban heat island diagnosis using ASTER satellite images and 'in situ' air temperature // *Atmos. Res.* 2009. Vol. 94. P. 276-284.
17. Peng S., Piao S., Ciais P. et al. Surface urban heat island across 419 global big cities // *Environ. Sci. Technol.* 2011. Vol. 46, No. 2. P. 696-703.
18. Sailor D., Georgescu M., Hart M. An Anthropogenic Heating Database for US Cities // *International association for urban climate*. 2016. No. 60. P. 6-10.
19. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // *Int J. Climatol.* 2011. Vol. 31, No. 2. P. 200-217.
20. Zhou B., Lauwaet D., Hooyberghs H. et al. Assessing seasonality in the surface urban heat island of London // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2016. Vol. 55. P. 493-505.

## SUMMARIES

**Thermal disturbance in the megapolis on the background of the regional surface air temperature variability** / Brusova N.E., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I. // *Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*. 2017. Vol. 365. P. 22-34.

The spatial and temporal variability of the thermal disturbance induced in the surface air temperature field owing to the Moscow megacity is analyzed using observations at 20 meteorological stations in Moscow and the Moscow region in 2012–2016. It is shown that the boundaries of thermal disturbance depend on the seasonal changes in urban heat sources in a megacity. The thermal anomaly of a megacity in the field of the surface air temperature is characterized by expressed intra-day dynamics, reaching the maximum at night. It is established that at all the seasons on average for the month the megacity center is warmer than the region by 2.5–4.3 °C and warmer than the urban periphery and the near suburbs by 2–2.8 °C, in autumn – by 1–2 °C. In the afternoon, the thermal anomaly of the megacity in the regional field of the surface air temperature is much weaker and is 0.7–1.5 °C.

*Keywords:* urban heat island, thermal disturbance, spatial and seasonal variability.