

УДК 551.524.3

Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе

Е.М. Ладохина¹, К.Г. Рубинштейн^{1,2}, В.Ю. Цепелев³

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

*³Российский государственный гидрометеорологический университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
ladohina@meteo.nw.ru*

Проанализированы ряды срочных метеорологических наблюдений за температурой воздуха в Санкт-Петербурге и на станциях Ленинградской области за период 1994–2018 гг. Выявлено наличие теплового возмущения на территории Санкт-Петербурга, составляющее $1,13^{\circ}$. Апробирована методика полуэмпирической модели интерполяции для расчета интенсивности температурных возмущений антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге, основанная на восстановлении температуры невозмущенной мегаполисом местности, с помощью алгоритмов двумерной интерполяции. Для валидации результатов использована методика оценки разности температур большого города и пригородной станции. На основе результатов расчетов интенсивности острова тепла по двум методикам предложен критерий обнаружения и анализа интенсивности острова тепла. Показано, что наибольшие значения интенсивности острова тепла достигаются зимой, в феврале максимальные значения достигают $6,4^{\circ}$, средние – $3,0^{\circ}$. Показано также, что интенсивность острова тепла в Санкт-Петербурге имеет суточный ход: наибольшие и максимальные средние значения интенсивности приходятся на полночь и достигают $2,9^{\circ}$ и $5,2^{\circ}$ соответственно, наименьшие – на полдень и достигают $2,3^{\circ}$ и $3,8^{\circ}$ соответственно.

Ключевые слова: тепловое возмущение атмосферы мегаполиса, антропогенное воздействие на атмосферу, пространственная интерполяция данных наблюдений

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-109-125>

Identification of periods with maximum heat island intensity in St. Petersburg for the validation of numerical weather forecasts

E.M. Ladohina¹, K.G. Rubinshtein^{1,2}, V.Y. Tsepelev³

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

²The Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

*³Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia
ladohina@meteo.nw.ru*

The series of routine meteorological observations of air temperature in St. Petersburg and at Leningrad region stations for the period 1994-2018 are analyzed. The air temperature perturbation in St. Petersburg equal to 1.13° is detected. The method of the semiempirical interpolation model for the calculation of intensity of anthropogenic temperature

perturbations in St. Petersburg is tested. The method is based on the retrieval of temperature in undisturbed areas using the algorithms of two-dimensional interpolation. The results are validated by the method for estimating the temperature difference between the big city and the suburban station. A criterion is developed for the detection and analysis of heat island intensity based on the results of its calculation by two methods. It is found that the highest values of heat island intensity are reached in winter, in February: the maxima reach 6.4° , the average values reach 3.0° . The intensity of the heat island in St. Petersburg is characterized by daily variations: the greatest maximum and average values are observed on midnight and reaches 2.9° and 5.2° , respectively, and the smallest ones are detected on noon and reaches 2.3° and 3.8° , respectively.

Keywords: metropolis air temperature perturbation, anthropogenic impact on the atmosphere, spatial interpolation of observational data

Введение

Наличие особых режимов температуры, ветра и влажности в крупных городах отмечалось еще в середине XIX века [6], и с тех пор города росли и рос эффект их влияния на окружающую атмосферу. На эту тему было опубликовано множество отечественных, например [1–4, 8], и зарубежных [17–20] работ по исследованию городского острова тепла (ОТ) и его воздействию на локальный климат. При этом развитие методов наблюдений и анализа характеристик погоды позволило сформировать новые подходы к изучению ОТ.

До начала компьютеризации исследование ОТ проводилось по данным наземных измерений на метеорологических станциях, и во многих исследованиях этот подход применяется до сих пор, поскольку позволяет дать адекватную количественную оценку интенсивности острова тепла. С развитием вычислительной техники и появлением спутниковой метеорологии появились новые методы изучения феномена ОТ: на основе численного моделирования [2, 17], спутникового [3] и других методов косвенного зондирования атмосферы [9]. В нашей статье приведем краткий обзор работ, посвященных исследованию климатического режима в крупных городах по данным наземных наблюдений на метеорологических станциях.

Цель этой работы – определить периоды наиболее интенсивных проявлений острова тепла в Санкт-Петербурге для дальнейшего использования количественных характеристик этих особенностей при валидации численного прогноза погоды для города. В большинстве исследований теплового влияния мегаполиса по данным наземных измерений за проявление городского острова тепла принимают положительную разность температуры между центральной частью города и его пригородами. Однако неоднородности в поле температуры на территории города могут возникать не только в результате антропогенного воздействия, но и по естественным причинам. Возникновение ситуаций, при которых вариации температуры воздуха из-за особенностей микроклимата и орорафии местности ошибочно принимают за проявление антропогенного

воздействия [4], усложняет проблему выделения из множества факторов, определяющих пространственные изменения температуры воздуха, воздействия именно городской среды [19]. В нашей работе, как будет показано ниже, мы предприняли усилия для преодоления этого недостатка.

Материалы и методы исследования

В России основная часть работ по тематике анализа ОТ относится к исследованию климатического режима Москвы и Московского региона [1, 12, 16 и др.]. Этому есть несколько объективных причин: а) Москва самый большой по площади и численности населения город в России; б) территорию мегаполиса и его окрестности покрывает наиболее густая сеть метеорологических станций [12]. Количественные оценки среднегодовой интенсивности острова тепла в Московском регионе в вышеуказанных работах достаточно близки, несмотря на различия в размерах выборок и использовании данных измерений на разных пригородных станциях. Среднегодовая разность значений температуры между центром Москвы и его пригородами составляет порядка $2,3^{\circ}$. При оценке межсезонного показателя ОТ в исследованиях за более ранний период (1970–1990 гг.) приводятся данные, указывающие на большую интенсивность ОТ в осенне-зимний сезон, а за более поздний период (2012–2016 гг.) – в весенне-летний сезон. Во всех исследованиях при оценке суточной изменчивости отмечается, что усиление интенсивности ОТ в Москве приходится на ночные часы. Физические обоснования этого явления известны достаточно давно и связаны с разницей скоростей выхолаживания воздуха над территорией мегаполиса и пригородов [15].

Поскольку цель данной работы – поиск периодов ОТ наибольшей интенсивности в Санкт-Петербурге, обратимся к исследованиям предыдущих лет, посвященных сравнению параметров острова тепла Москвы и Санкт-Петербурга. Согласно [5, 13, 14], в Санкт-Петербурге наблюдается рост среднегодовой температуры, среднегодовая разность значений температуры между центром мегаполиса и его пригородами, осредненная за 20 лет, на 1° меньше, чем в Москве, и составляет порядка $1,2^{\circ}$. Периоды наибольшей интенсивности ОТ наблюдаются в обоих городах в зимний сезон. Интенсивность ОТ зимой в Санкт-Петербурге выше на $0,3^{\circ}$, чем летом; в Москве – на $0,4^{\circ}$. Проявление локальных климатических особенностей мегаполиса, в том числе острова тепла, наиболее хорошо выражено в малооблачную и безветренную погоду [7]. Поскольку почти в течение всего года в Санкт-Петербурге наблюдается преобладание циклонической циркуляции [6] со сложными погодными условиями, при которых локальные климатические особенности проявляются в меньшей степени, среднегодовая разность значений температуры между центром Санкт-Петербурга и его пригородами меньше, чем в Москве. Эффект сглаживается также близостью Финского залива.

Методика поиска ОТ на основании разности температур между центром мегаполиса и пригородами проста и относительно эффективна. Однако поиск случаев ОТ значительной интенсивности подразумевает использование срочных данных, в связи с чем погодные аномалии на пригородных станциях могут исказить поле температуры невозмущенной мегаполисом местности и привести к неверной оценке интенсивности ОТ. Чтобы избежать подобных результатов, а также исключить влияние микроклиматических особенностей местности на точность оценки интенсивности ОТ, необходимо как можно более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности. Эта задача была решена с помощью полуэмпирической модели интерполяции (ПМИ) [14], которая работает по следующему алгоритму. Выбирается несколько станций, окружающих большой город, и «сателлитная» станция, по данным с которой рассчитываются параметры интерполяционных формул, и анализируется точность алгоритма интерполяции.

Результатом работы интерполяционного алгоритма является восстановленное поле значений «виртуального аналога» станции большого города (далее – «виртуальной» станции), интерпретируемое как поле температуры в точке расположения городской станции, если бы мегаполиса не существовало. На последнем этапе находится разность между температурой на реальной станции и «виртуальной».

В исследовании по оценке нарушения естественного климатического режима в мегаполисе с помощью ПМИ [14] для уменьшения веса метеоэлемента в интерполяционной формуле использована экспоненциальная зависимость (1) с двумя весовыми коэффициентами (n, ρ). В данной работе, в связи с необходимостью обработки значительного объема данных, расчет интерполяционной формулы с двумя весовыми коэффициентами потребовал бы неоправданно больших затрат вычислительных и временных ресурсов. В связи с этим была произведена замена экспоненциальной зависимости на квадратичную (2) с одним весовым коэффициентом (ρ). За приемлемый минимум невязки принято значение $0,15^\circ$.

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M Y_{ij,k} \exp\left[-(r_{ok}/\rho_{ij})^{n_{ij}}\right]}{\sum_{k=1}^M \exp\left[-(r_{ok}/\rho_{ij})^{n_{ij}}\right]} - Y_{ij,0} \right| = \min, \quad (1)$$

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M Y_{ij,k} (r_{ok}/\rho_{ij})^2}{(r_{ok}/\rho_{ij})^2} - Y_{ij,0} \right| = \min, \quad (2)$$

где $Y_{ij,k}$ – значение температуры на пригородной станции; $Y_{ij,0}$ – значение температуры на «сателлитной» станции; M – количество пригородных станций; r_{ok} – мера расстояния.

В работе использована евклидова мера расстояния:

$$r_{ok} = \sqrt{\sum_{k=1}^M (x_k - y_k)^2} . \quad (3)$$

Согласно [14], «спутниковая» станция должна располагаться вне зоны влияния мегаполиса, на расстоянии 50–150 км от него, а также не на подветренной по отношению к мегаполису стороне. Оптимальным решением является выбор нескольких «спутниковых» станций. Выбор пригородных станций мегаполиса производится таким образом, чтобы значения исследуемой метеорологической характеристики на этих станциях были согласованы со значениями на «спутниковой» станции [11, 14], а для этого требуется оценить их репрезентативность. Оценка репрезентативности выборки производится путем анализа отклонений значений среднемесячных и среднегодовых температур за исследуемый период от климатической нормы – историческими усредненными значениями температуры за базовый 30-летний период [1]. В работе был использован период осреднения 1981–2010 гг., утвержденный Всемирной метеорологической организацией в качестве базового периода.

Приняв во внимание рекомендации к подбору станций, а также исходя из доступных для исследования данных наблюдений, было выбрано 15 станций Ленинградской области (далее – пригородных станций) для оценки их репрезентативности (рис. 1). Были проанализированы все данные срочных наблюдений за период с 1994 по 2018 г. Длина рядов составляет порядка 73000 значений.

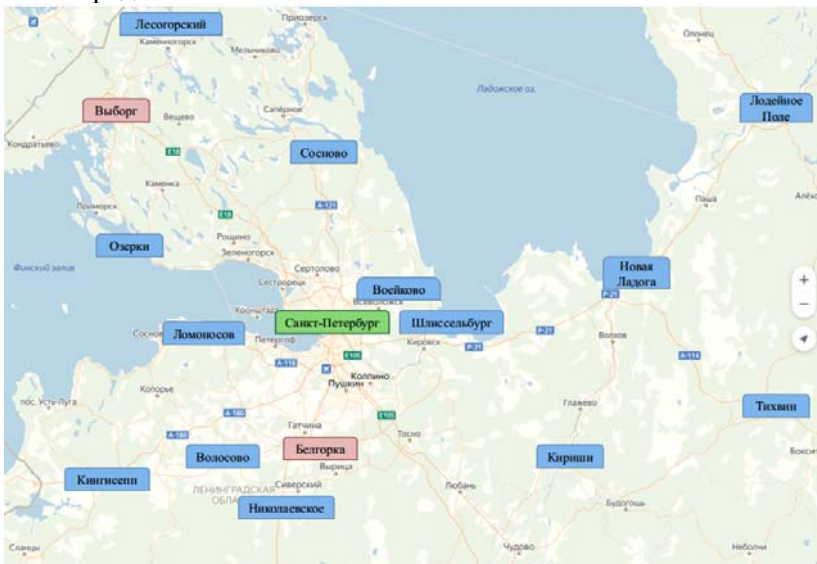


Рис. 1. Станции Ленинградской области, для исследования ОТ; красные – «спутниковые» станции, зеленая – «виртуальная».
Fig. 1. Stations of the Leningrad region for the research of the Urban Heat Island (UHI); «satellite» stations are colored in red, the «virtual» station – in green.

Согласно результатам расчета отклонений среднемесячной температуры от климатической нормы (таблица), большую часть года среднемесячные значения температуры на станциях соответствуют климатической норме, отклонения более 1° наблюдаются в осенне-зимний период, наибольшие превышения нормы отмечены в декабре. Отклонение осредненной по всем пригородным станциям средней годовой температуры от климатической нормы составляет $+0,4^\circ$. Для 8 исследуемых станций отклонение средней годовой температуры от климатической нормы превышает эту величину на $0,1^\circ$, для остальных – равно осредненной величине. Таким образом, наблюдения за температурой воздуха достаточно однородны в сравнении с климатической нормой, а значит, данные репрезентативны и могут быть использованы для исследования термического режима Ленинградской области.

Таблица. Отклонение среднемесячной температуры за 1994–2018 гг. от климатической нормы

Table. The deviation of the average monthly temperature from the climatic norm for 1994-2018.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Лесогор.	0,4	0,4	0,0	0,4	0,3	0,5	0,1	0,6	0,8	0,1	1,0	1,0	0,5
Выборг	0,5	0,4	0,1	0,6	0,6	-0,1	0,2	0,8	0,9	0,0	0,9	1,2	0,5
Л. Поле	0,4	0,3	-0,3	0,7	0,4	-0,2	0,3	0,5	0,7	0,0	1,0	1,0	0,4
Сосново	0,4	0,4	0,0	0,8	0,6	0,1	0,2	0,7	0,9	0,2	1,0	1,0	0,5
Н. Ладога	0,3	0,2	-0,2	0,6	0,5	0,0	0,2	0,6	0,8	0,1	0,8	1,0	0,4
Озерки	1,2	1,3	-0,3	-0,1	-0,3	-0,2	0,2	0,7	0,8	0,1	0,9	1,1	0,5
Воейково	1,5	-0,2	0,1	0,4	0,1	-0,1	-0,3	0,4	1,0	0,4	1,0	1,0	0,5
Шлисс.	0,3	0,3	0,0	0,7	0,5	0,1	0,3	0,6	0,8	0,0	0,9	1,0	0,4
Ломоносов	0,4	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	-0,3	-0,1	0,3	-0,6	1,5	1,6	0,5
Тихвин	0,3	0,3	-0,2	0,8	0,4	-0,1	0,3	0,6	0,8	0,1	1,0	1,0	0,5
Кингисепп	0,1	0,2	0,0	0,6	0,5	0,4	0,3	0,0	0,4	-0,2	1,2	1,5	0,4
Волосово	0,3	0,4	0,1	0,6	0,4	0,0	0,1	0,6	0,8	-0,4	1,0	1,5	0,4
Белогор.	1,2	1,3	1,2	0,9	-1,1	-0,8	-0,9	0,3	0,8	-0,3	1,0	1,3	0,4
Кириши	0,9	-0,2	0,2	1,1	0,4	0,3	0,2	0,5	0,5	-0,4	1,1	1,2	0,5
Николаев.	0,5	0,8	0,7	-0,3	-0,5	0,0	0,3	0,4	0,7	-0,1	0,9	0,9	0,4
Среднее	0,6	0,4	0,1	0,6	0,2	0,0	0,1	0,5	0,7	-0,1	1,0	1,1	0,4

В качестве данных, отражающих температурный режим мегаполиса, были использованы срочные измерения с объединенной метеорологической станции Петроградского района Санкт-Петербурга («ОГМС Санкт-Петербург»). Средняя годовая температура на станции за исследуемый период превышает осредненную по всем пригородным станциям

среднюю годовую температуру на $1,13^\circ$, что согласуется с оценками в исследованиях предыдущих лет и подтверждает наличие теплового возмущения в городе.

Согласно исследованию [6], в Санкт-Петербурге преобладают ветры западных, юго-западных направлений, поэтому «сателлитные» станции, как менее подверженные влиянию города, должны располагаться западнее или южнее Санкт-Петербурга. Для исследования влияния антропогенных факторов на поле значений температуры (и других метеоэлементов) в Санкт-Петербурге традиционно выбирается пригородная метеостанция Белогорка, кроме нее в данной работе были использованы данные наблюдений на станции Выборг. Для удобства изложения результатов введем обозначения систем «Санкт-Петербург – Белогорка» (СБ) и «Санкт-Петербург – Выборг» (СВ), указывающие на то, данные какой «сателлитной» станции были использованы при расчетах интенсивности острова тепла.

При расчете интенсивности ОТ с помощью ПМИ минимум функционала (2) был достигнут примерно в 97 % случаев, что является достаточным для наблюдения высокоинтенсивных температурных возмущений антропогенного происхождения, а также является еще одним подтверждением репрезентативности данных наблюдений. В небольшом количестве случаев использование неосредненных данных привело к расчету весового коэффициента ρ по аномальным значениям температуры на «сателлитной» станции. Как следствие, коэффициент ρ , при котором было достигнуто точное решение минимизации функционала (2) в методике ПМИ, был подобран так, чтобы подстроить значения температуры на пригородных станциях под аномальное значение на «сателлитной» станции. При использовании такого значения ρ для расчета температуры на «виртуальной» станции получались неправдоподобные значения. Такие выбросы отслеживались и отфильтровывались после ранжирования результатов работы алгоритма. Значения интенсивности ОТ, полученные с использованием полуэмпирической модели интерполяции, были сопоставлены со значениями температурных возмущений (Δt), рассчитанных по методике оценки разности температур большого города ($t_{\delta z}$) и «сателлитной» станции (t_{cc}).

$$\Delta t = t_{\delta z} - t_{cc}. \quad (4)$$

Результаты

На рис. 2 в виде графиков временного хода представлены результаты расчета интенсивности ОТ методами полуэмпирической модели интерполяции (*virt*) и разности температур (*delta*) для систем СБ и СВ. Для анализа интенсивности ОТ были введены два независимых критерия его наличия: $delta > 2^\circ$ и $virt > 2^\circ$. В качестве нижнего предела использовалось значение интенсивности ОТ, равное 2° , что позволило исключить

Чтобы определить периоды максимальной интенсивности теплового возмущения мегаполиса, был проанализирован сезонный ход значений интенсивности ОТ по трем критериям с помощью диаграмм размаха, или «ящиков с усами» (рис. 3). Нижней границей «усов» служит разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний, верхней – сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний.

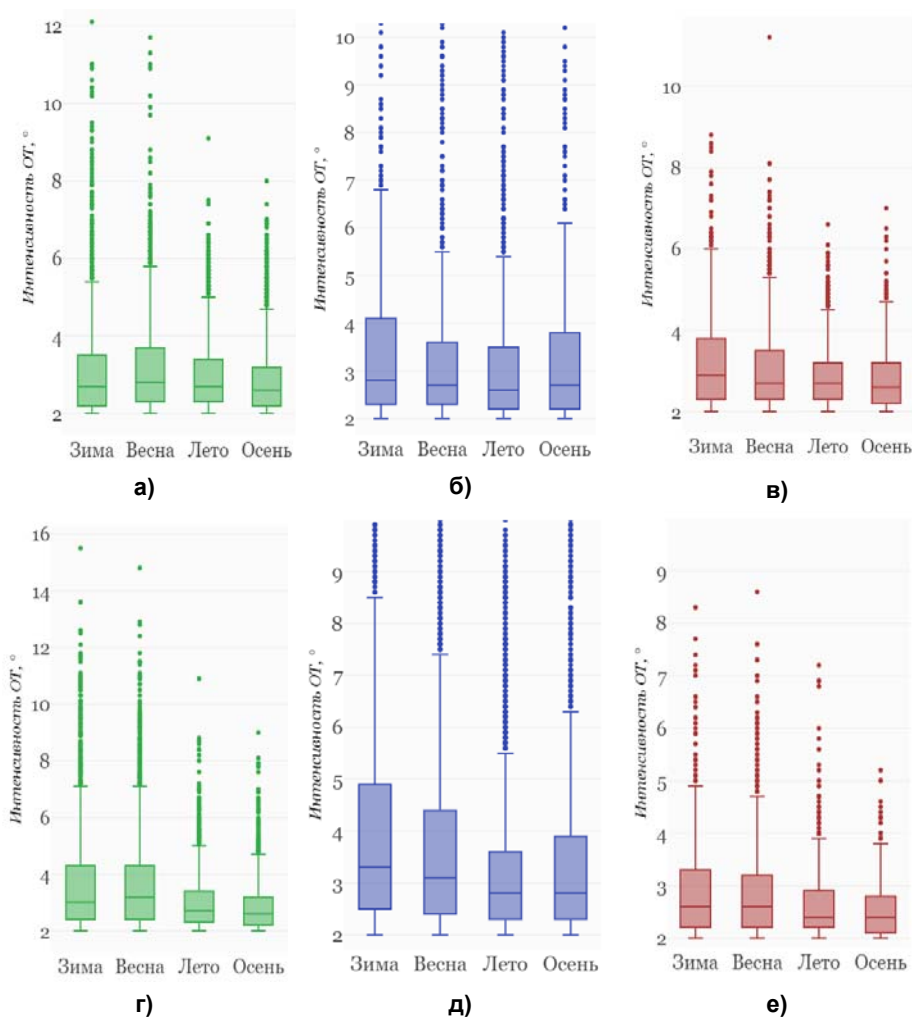


Рис. 3. Диаграммы размаха сезонного хода значений интенсивности ОТ для системы СБ (а, б, в) и системы СВ (г, д, е) по критериям $\Delta > 2^\circ$, $virt > 2^\circ$, $\Delta > (virt > 2^\circ)$ соответственно.

Fig. 3. Box-and-whiskers plots of the seasonal time course of UHI intensity values for St. Petersburg – Belogorka (SB) system (а, б, в) and for St. Petersburg – Vyborg (SV) system (г, д, е) according to $\Delta > 2^\circ$, $virt > 2^\circ$, $\Delta > (virt > 2^\circ)$ criteria respectively.

Хорошо видно, что для обеих систем как средние, так и максимальные значения интенсивности ОТ, отобранные по второму и третьему критериям, наблюдаются зимой, а минимальные – летом. Зимой среднее значение интенсивности ОТ по второму критерию для СВ составляет $3,3^\circ$, максимальные достигают $8,5^\circ$; для СБ среднее значение – $2,8^\circ$, максимальные достигают $6,8^\circ$. По комбинированному критерию зимой для СВ средние и максимальные значения интенсивности ОТ ниже, чем по второму, и составляют $2,6^\circ$ и $4,9^\circ$ соответственно. Для СБ по комбинированному критерию максимальное значение интенсивности также ниже, чем по второму и составляет $6,0^\circ$, а среднее выше на $0,1^\circ$. Летом по второму критерию для СВ средние и максимальные значения интенсивности ОТ составляют $2,6^\circ$ и $5,4^\circ$ соответственно, по комбинированному – $2,7^\circ$ и $4,5^\circ$ соответственно.

При более детальном рассмотрении каждого зимнего месяца с помощью построения диаграмм размаха обнаружено, что по комбинированному критерию наибольшие средние и максимальные значения интенсивности ОТ для систем СБ и СВ отмечаются в феврале. Максимальные значения для СБ и СВ достигают $6,4^\circ$ и $4,9^\circ$ соответственно; средние – $3,0^\circ$ и $2,6^\circ$ соответственно.

Пример проявления ОТ значительной интенсивности в феврале 2011 г. приведен на рис. 26, г. Интенсивность ОТ, рассчитанная по методу разностей, максимальна 21 февраля для системы СВ и 22 февраля для системы СБ и составляет 13° и 14° соответственно. Эти значения характеризуют интенсивность теплового возмущения, возникшего в результате совместного влияния микроклиматических и антропогенных факторов. Наложение результатов расчета интенсивности ОТ с использованием ПМИ позволяет выявить, что интенсивность антропогенного теплового возмущения 21–22 февраля составляет порядка 5° , а максимум интенсивности антропогенного теплового возмущения для обеих систем приходится на 25 февраля (18 ч ВСВ) и равен $7,5^\circ$. По данным станции «ОГМС Санкт-Петербург» в ночь с 21 на 22 февраля в городе наблюдалась безветренная погода, более 90 % неба было закрыто слоисто-кучевыми облаками, город находился в области высокого давления (1035 гПа). Вечером 25 февраля, в период максимума интенсивности ОТ, на станции наблюдался слабый ветер (2 м/с), высокое атмосферное давление (1038 гПа) и отсутствие облаков.

Для валидации краткосрочного численного прогноза погоды в городе важно установить точную дату максимума антропогенного возмущения поля температуры и наблюдавшиеся при этом метеорологические условия. В данном примере метеорологические условия в день наблюдения максимума интенсивности ОТ, рассчитанного с помощью ПМИ, отличаются от метеорологических условий в день наблюдения максимума интенсивности острова тепла, рассчитанного по методу разностей.

При использовании разных критериев поиска ОТ было получено разное количество случаев его проявления за весь исследуемый период. Число случаев температурного возмущения, полученное с использованием критерия II, одинаково для обеих систем (разница составляет менее 1 тыс. случаев) и равно 11,5 тыс. Наибольшее количество случаев (порядка 17,5 тыс. для системы СБ и 15 тыс. для системы СВ) получено по критерию II, наименьшее – по комбинированному критерию III (7 тыс. для СБ и 3 тыс. для СВ). В случае применения критерия III количество ОТ для СБ более чем в 2 раза превышает их число для СВ. Для корректной работы комбинированного критерия обнаружения ОТ необходимо, чтобы результаты расчетов интенсивности ОТ методом разностей и с помощью ПМИ были взаимосвязаны, т. е. чередование максимальных и минимальных интенсивностей ОТ, рассчитанных по обоим методам, должно быть согласованным.

Количественную оценку степени связанности двух случайных величин отражает коэффициент корреляции. Сравнение коэффициентов корреляции между значениями интенсивности ОТ, рассчитанными двумя методами для систем СБ и СВ, позволит установить, по данным какой именно «спутниковой» станции удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности.

Применение линейных методов статистического анализа возможно только для непрерывных рядов данных, подчиняющихся закону нормального распределения. Ввиду фильтрации выбросов, а также из-за пропусков в данных наблюдений, ряды результирующих характеристик (расчетов интенсивности ОТ методом разностей и с помощью ПМИ) являлись неполными, поэтому были произведены дополнительные действия для их подготовки к статистическому анализу.

Для оценки принадлежности распределения к нормальному закону необходимо при наличии пропуска в рядах результирующих характеристик за какой-либо срок полностью исключить весь день из анализа. Согласно [15], интенсивность ОТ имеет суточный ход: для большинства городов днем наблюдается минимум интенсивности ОТ, а вечером или ночью – максимум. Чтобы сохранить зависимость интенсивности ОТ от суточного хода и не исключать большое количество дней из-за пропусков одного из восьми сроков наблюдений, для обеих систем были построены диаграммы размаха интенсивности ОТ, отобранных по первому и второму критериям, для восьми сроков наблюдения (рис. 4).

Анализ диаграмм позволил выбрать два срока, для которых наблюдается наибольшая и наименьшая интенсивность ОТ. В полдень (12 ч ВСВ) для системы СБ по обоим критериям наблюдаются наименьшие средние и максимальные значения интенсивности ОТ, а для системы СВ – наибольшие. В ночные часы в интервале с 21 до 03 ч ВСВ для системы СБ наблюдаются наибольшие средние и максимальные значения интенсивности ОТ, а для системы СВ – наименьшие.

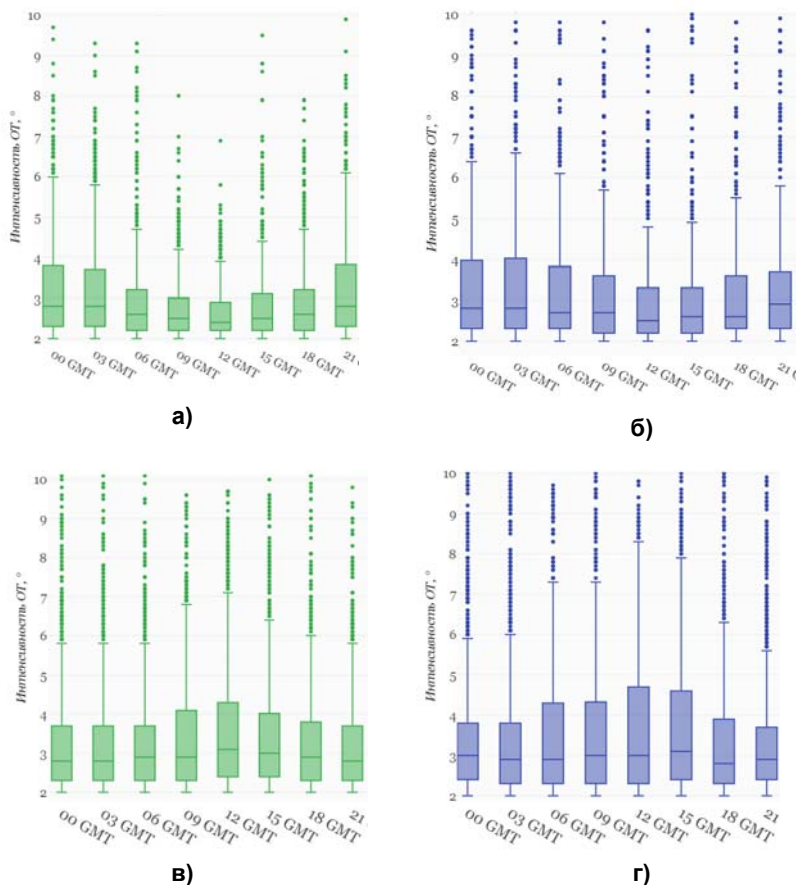


Рис. 4. Диаграммы размаха суточного хода значений интенсивности ОТ для систем СБ (а, б) и СВ (в, г) по критериям I и II соответственно.

Fig. 4. Box-and-whiskers plots of the daily time course of UHI intensity values for SB (а, б) and SV systems (в, г) by $\delta > 2^\circ$, $\text{virt} > 2^\circ$ criteria respectively.

Таким образом, проверка на нормальность ряда была проведена для результатов расчетов интенсивности ОТ методом разностей и с помощью ПМИ за сроки 00 и 12 ч ВСВ. При наличии пропуска за какой-либо срок, весь день полностью исключался из анализа. Были построены квантильные графики, где по оси X отложены значения, взятые из стандартного нормального распределения, а по оси Y – ранжированные от минимального к максимальному результаты расчетов интенсивности ОТ методом разности или с помощью полуэмпирической модели интерполяции [10].

Анализ графиков показал, что распределение результатов расчетов интенсивности ОТ по обоим методам, несмотря на большой объем выборки, не подчинено нормальному закону, поэтому корреляционный анализ был проведен путем расчета коэффициента ранговой корреляции

Спирмена (r_s). Для СБ выявлена сильная корреляционная связь ($r_s = 0.69$) между результатами расчетов по двум критериям, а для СВ – слабая корреляционная связь ($r_s = 0.28$). Статистическая значимость коэффициентов корреляции для обеих систем составляет 99 %. Таким образом, по данным «спутниковой» станции Белогорка удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности для корректного использования комбинированного критерия обнаружения ОТ. Наибольшие, как средние, так и максимальные значения интенсивности ОТ, наблюдаются зимой и составляют $2,9^\circ$ и $6,0^\circ$ соответственно, а наименьшие – летом, $2,7^\circ$ и $4,5^\circ$ соответственно. Для демонстрации эффективности использования полуэмпирической модели интерполяции при фильтрации микроклиматических колебаний обратимся к графикам временного хода значений интенсивности ОТ за ноябрь 2014 г. (рис. 5).

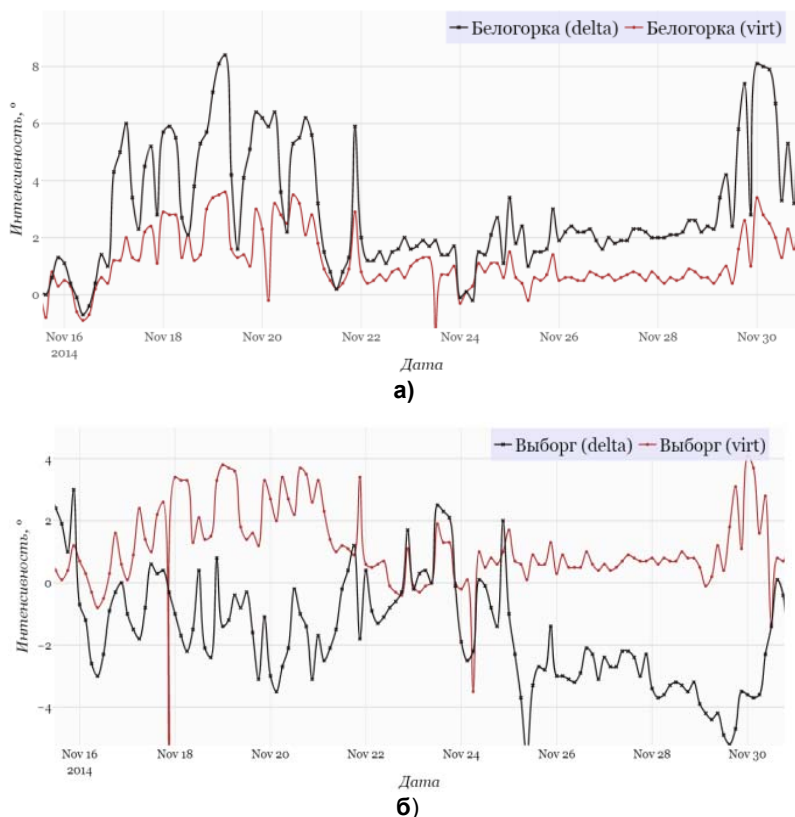


Рис. 5. Графики временного хода значений интенсивности ОТ, рассчитанных по методу разностей (*delta*) и с помощью ПМИ (*virt*), для ст. Белогорка (а) и ст. Выборг (б) за 11.2014 г.

Fig. 5. Charts of the time course of UHI intensity values calculated by the method of differences (*delta*) and by using SIM (*virt*), for Belogorka (a) and Vyborg (b) for 11.2014.

Для системы СБ 18–21 и 30 ноября интенсивность теплового возмущения, рассчитанная по методу разностей, составляла около 8° , а рассчитанная с помощью ПМИ была значительно меньше – около $3,5^\circ$. Для СВ по критерию I поиска ОТ тепловое возмущение в конце ноября не наблюдалось, а по критерию II его интенсивность совпадала со значениями для СБ ($3,5^\circ$). Поэтому даже при неудачном (основываясь на величине коэффициента корреляции) выборе «спутниковой» станции значения интенсивности ОТ, рассчитанные с использованием ПМИ, будут близки к истинным.

Тем не менее, обоснованный выбор «спутниковой» станции остается крайне важным, поскольку от него зависит количество случаев ОТ, которое будет найдено по комбинированному критерию. Если температура на «спутниковой» станции выше, чем на пригородных станциях, то тепловое возмущение не фиксируется (интенсивность ОТ по методу разностей будет меньше интенсивности ОТ, рассчитанной с помощью ПМИ). Из-за этой особенности для системы СВ по комбинированному критерию было найдено практически в два раза меньше случаев ОТ.

Заключение

Анализ значений средней годовой температуры в Санкт-Петербурге за период 1994–2018 гг. и значений средней годовой температуры, осредненной по всем пригородным станциям, позволил установить наличие теплового возмущения на территории Санкт-Петербурга с интенсивностью $1,13^\circ$. Этот результат количественно согласуется с исследованиями предыдущих лет.

Для расчета интенсивности температурных возмущений антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге использована методика полуэмпирической модели интерполяции. Характеризуя данную методику, необходимо отметить, что она позволяет:

1) воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности, учитывая значения температуры, полученные по данным измерений на всех имеющихся в распоряжении пригородных станциях с помощью алгоритма двумерной интерполяции;

2) исключить влияние микроклиматических особенностей местности на точность оценки интенсивности ОТ.

Помимо вышеуказанных преимуществ, методика ПМИ имеет следующие особенности: не во всех случаях удается достичь минимума невязки в результате работы интерполяционного алгоритма; даже при достижении минимума невязки в небольшом количестве случаев возникают неправдоподобные значения температуры на «виртуальной» станции. Поэтому была использована методика расчета интенсивности ОТ методом разностей и выработан комбинированный критерий, согласно которому температурное возмущение фиксировалось в случае, если значение интенсивности ОТ, полученное методом ПМИ, превышало 2° и было

меньше значения интенсивности ОТ, рассчитанного по методике разности температур.

В ходе анализа значений интенсивности ОТ, рассчитанных с использованием комбинированного критерия, были получены следующие результаты:

– интенсивность острова тепла в Санкт-Петербурге имеет суточный ход: наибольшие средние и максимальные значения интенсивности приходятся на 00ч ВСВ и достигают $2,9^\circ$, $5,2^\circ$ соответственно, а минимальные – на 12 ч ВСВ и достигают $2,3^\circ$, $3,8^\circ$ соответственно;

– в зимний сезон наибольшие значения интенсивности ОТ достигаются в феврале: максимальные значения – $6,4^\circ$, средние – $3,0^\circ$;

– интенсивность ОТ в Санкт-Петербурге имеет суточный ход: наибольшие средние и максимальные значения интенсивности приходятся на 00 ч ВСВ и достигают $2,9^\circ$ и $5,2^\circ$ соответственно, а минимальные – на 12 ч ВСВ и достигают $2,3^\circ$ и $3,8^\circ$ соответственно.

Численные эксперименты по краткосрочному прогнозу погоды в Санкт-Петербурге будут проведены для зимнего сезона, конкретно для февраля, а полученные в этом исследовании значения интенсивности ОТ за указанный период будут использованы для их валидации.

Данная работа является важным этапом выявления метеорологических особенностей Санкт-Петербурга для будущей валидации численного прогноза температуры. Наряду с изменениями температурного режима мегаполис оказывает значительное влияние на поле ветра и влажности характеристик. В дальнейшем для более полного представления о влиянии мегаполиса на поля метеорологических элементов следует рассмотреть степень воздействия мегаполиса на количество выпавших осадков на прилегающих к нему территориях и на скорость и направление воздушных потоков, пересекающих большой город.

Список литературы

1. Брусова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Тепловое возмущение мегаполиса на фоне региональной неоднородности поля приземной температуры // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 22-34.

2. Гаврилова Ю.В., Смышляев С.П., Махура А.Г. Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды // Ученые записки РГГМУ. 2010. Вып. 15. С. 107–116.

3. Горный В.И., Лялько В.И., Крижук С.Г. и др. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 176-191.

4. Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В. Влияние микроклимата на точность оценки городского «острова тепла» // Труды ГГО. 2017. Вып. 584. С. 74-93.

5. Карлин Л.Н., Ефимова Ю.В., Никифоров А.В. Некоторые климатические характеристики Санкт-Петербурга в эпоху глобального потепления // Ученые записки РГГМУ. 2005. № 1. С. 22-29.

6. Климат Ленинграда. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 252 с.

7. Климат Москвы в условиях глобального потепления. М.: Из-во МГУ, 2017. 288 с.

8. Кондратьев К.Я., Матвеев Л.Т. Основные факторы формирования острова тепла в большом городе // Доклады Академии Наук. Серия: Геофизика. 1999. Т. 367. № 2. С. 253-256.
9. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 389-400.
10. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
11. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. СПб.: РГГМУ, 2005. 327 с.
12. Матвеев Л.Т. Влияние большого города на метеорологический режим // Известия РАН. Серия географическая 2007. № 4. С. 97-102.
13. Матвеев Л.Т., Вершель Е.А., Матвеев Ю.Л. Влияние антропогенных факторов на климат городов // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 17. С. 41-50.
14. Менжулин Г.В., Павловский А.А. Комплексная методика расчета и оценки нарушений естественного климатического режима в мегаполисе Санкт-Петербург // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С. 154-173.
15. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 360 с.
16. 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.
17. Howard L. The Climate of London. London: Harvey and Darton, 1983. Vol 1.
18. Lin C.Y. et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan // Atmospheric Environment. 2008. Vol. 42, no. 22. P. 5635-5649.
19. Oke T.R., Maxwell G.B Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver // Atmospheric Environment. 1975. Vol. 9, no. 2. P. 191-200.
20. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // Int. J. Clim. 2011. Vol. 31, no. 2. P. 200-217.
21. Szymanowski M. Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland // Theoretical and Applied Climatology. 2005. Vol. 82 (3-4). P. 207-224.

References

1. Brusova N.E., Kuznetsova I.N., Nahaev M.I. Thermal disturbance in the megapolis on the background of the regional surface air temperature variability. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 22-34 [in Russ.].
2. Gavrilova Y.V., Smyshlyaev S.P., Mahura A.G.. A model study of the megacities effects to the regional aspects of weather. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2010, vol. 15, pp. 107-116 [in Russ.].
3. Gornyy V.I., Lyalko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A., Lubsky N.S., Krylova A.B. Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2016, vol. 13, no. 2, pp. 176-191. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-176-191 [in Russ.].
4. Demin V. I., Kozelov B. V., Elizarova N. I., Menshov Yu. V. Microclimate influence on accuracy of the estimation of urban heat island. *Trudy GGO [Proceedings of Voikov Geophysical Observatory]*, 2017, vol. 584, pp. 74-93 [in Russ.].
5. Karlin, L.N., Efimova, J.V., Nikiforov, A.V. Climatic characteristics of St. Petersburg in the period of global warming. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2005, no. 1, pp. 22-29 [in Russ.].
6. Klimat Leningrada [Climate of Leningrad]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1982, 252 p. [in Russ.].

7. Klimat Moskvy v usloviyah global'nogo potepleniya. Moscow, MSU publ., 2017, 288 p. [in Russ.].
8. Kondrat'ev K.YA., Matveev L.T. Osnovnye faktory formirovaniya ostrova tepla v bol'shom gorode. *Izvestiya AN. Seriya Geofizika*, 1999, vol. 367, no. 2, pp. 253-256. [in Russ.].
9. Kuznetsova I.N., Nahaev M.I. Sezonnnye osobennosti termicheskoy struktury nizhnih sloev atmosfery v moskovskom megapolise po dannym mikrovolnovykh izmereniy temperatury // 80 let Gidrometcentru Rossii. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 389-400 [in Russ.].
10. Malinin V.N. Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii. Saint Petersburg, RGGMU, 2008, 408 p. [in Russ.].
11. Matveev L.T., Matveev Yu.L. Oblaka i vihri – osnova kolebaniy pogody i klimata. Saint Petersburg, RGGMU, 2005, 327 p. [in Russ.].
12. Matveev L.T. Vliyaniye bol'shogo goroda na meteorologicheskii rezhim. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2007, no. 4, pp. 97-102 [in Russ.].
13. L.T. Matveev, E.A. Vershel, U.L. Matveev. The influence of anthropogenic factors on the climate in cities and towns. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2011, no. 17, pp. 41-50. [in Russ.].
14. Menzhulin G.V., Pavlovskii A.A. Combined technique for analysis of natural climate inflections by megacities: evaluations for Saint-Petersburg. *Uchenye zapiski RGGMU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2016, no. 43, pp. 154-173 [in Russ.].
15. Oke T.R. Klimaty pogranichnogo sloya. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1982, 360 p. [in Russ.].
16. Rubinshtein K. G., Ginzburg A. S. Estimation of Air Temperature and Precipitation Changes in Large Cities (by Example of Moscow and New York). *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, vol. 28, no. 2, pp. 20-26.
17. Howard L. The Climate of London. London: Harvey and Darton, 1983, vol 1.
18. Lin C.Y. et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmospheric Environment*, 2008, vol. 42, no. 22, pp. 5635-5649.
19. Oke T.R., Maxwell G.B Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, 1975, vol. 9, no. 2, pp. 191-200.
20. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Int. J. Clim.*, 2011, vol. 31, no. 2, pp. 200-217.
21. Szymanowski M. Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, vol. 82, no. 3-4, pp. 207-224.

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

Received by the editor 20.04.2020.