

УДК 528.77; 551.584.2

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-183-195

М.И. Варенцов¹, М.Ю. Грищенко², П.Г. Михайлюкова³

ИЗУЧЕНИЕ ОСТРОВА ТЕПЛА МОСКВЫ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И МЕЗОКЛИМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

На примере Московского региона проведено детальное сравнение термического режима сильно урбанизированной территории по данным наблюдений и разномасштабных космических снимков. Для летнего сезона показаны принципиальные различия в характеристиках пространственной изменчивости LST (land surface temperature, температура земной поверхности) и температуры воздуха в дневное время суток. Показано, что взаимосвязь между полями этих величин практически отсутствует, в первую очередь для урбанизированных территорий, для которых ярко выражен эффект острова тепла в поле LST, и практически не выражен в поле температуры воздуха. Однако, для зимнего сезона выявлены отдельные случаи с более ярко выраженной связью между этими величинами. Полученные результаты подтверждены независимым образом по результатам численных экспериментов с моделью COSMO и параметризацией TERRA_URB с шагом расчетной сетки 1 км. При этом показана перспективность использования снимков высокого пространственного разрешения для верификации модели: они позволили получить выводы о выборе оптимальной конфигурации модельных настроек. И для летнего, и для зимнего сезонов произведено сравнение космических данных высокого пространственного разрешения Landsat с данными низкого пространственного разрешения MODIS. Показано, что несмотря на в целом неплохое согласие между двумя видами данных, в отдельных случаях между ними имеют место существенные расхождения, связанные с различиями используемых значений коэффициента излучения и другим факторами, требующими более детального анализа в дальнейших исследованиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климат города, географическое дешифрирование, Москва, Landsat, MODIS, COSMO.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 1 стр. 4, 119234, Москва, Россия; Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер. д. 3, Москва, Россия; Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1, Москва, Россия, 123376;
e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия; Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", факультет географии и геоинформационных технологий, Покровский бульвар, 11, 109028, Москва, Россия; *e-mail:* m.gri@geogr.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail:* p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru

Mikhail I. Varentsov¹, Mikhail Y. Grischenko², Polina G. Mikhaylyukova³

STUDYING MOSCOW URBAN HEAT ISLAND USING SATELLITE IMAGES AND MESOSCALE CLIMATIC MODELLING

ABSTRACT

Using the example of the Moscow region, a detailed comparison of the thermal regime of a highly urbanized territory was carried out according to in-situ data and different-scale satellite images. For the summer season, fundamental differences in the characteristics of the spatial variability of LST and air temperature in the daytime are revealed. It is shown that the relationship between the fields of these quantities is practically absent, primarily for urbanized territories, for which the effect of the heat island in the LST field is pronounced, and is practically not expressed in the air temperature field. However, for the winter season, some cases were identified with a more pronounced relationship between these values. The results obtained are independently confirmed by the results of numerical experiments with the COSMO model and the TERRA_URB parameterization with a 1 km grid step. At the same time, the prospects of using high spatial resolution images for model verification are shown: they made it possible to draw conclusions about the choice of the optimal configuration of model settings. For both summer and winter seasons, a comparison was made of high spatial resolution satellite data from Landsat with low spatial resolution data from MODIS. It is shown that, in spite of the generally good agreement between the two types of data, in some cases there are significant discrepancies between them due to differences in the values of the emissivity used and other factors that require more detailed analysis in further studies.

KEYWORDS: city climate, geographical images interpretation, Moscow, Landsat, MODIS, COSMO.

ВВЕДЕНИЕ

Москва является крупнейшим мегаполисом Европы. Для неё, как и для других крупных городов, характерно формирование своеобразного городского местного климата и ярко выраженного городского острова тепла [Oke et al., 2017]. Далеко не все особенности городского климата Москвы хорошо изучены, несмотря на значительную актуальность этой проблемы. Тем не менее, острову тепла Москвы и другим местным климатическим особенностям посвящено значительное число работ [Климат..., 1969; Климат..., 2017; Lokoshchenko et al., 2017; Kuznetsova et al., 2017; Varentsov et al., 2019], в отличие от большинства других российских городов. Это обстоятельство, в сочетании с достаточно хорошей оснащённостью города гидрометеорологическими данными, позволяет рассматривать Москву в нашем исследовании как базовый модельный город для отработки методов и закономерностей.

¹ M.V. Lomonosov MSU, Research Computing Center, Leninskiye Gory, 1-4, 119991, Moscow, Russia; A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, 3 Pyzhyovskiy Pereulok, 119017 Moscow, Russia; Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, 13/1, Bolshoy Predtechenskiy Pereulok, 123376 Moscow, Russia;

e-mail: mikhail.varentsov@srcc.msu.ru

² M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Pokrovsky blvd, 11, 109028, Moscow, Russia;

e-mail: m.gri@geogr.msu.ru

³ M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography, Leninskiye Gory, 1, 119991, Moscow, Russia,

e-mail: p.mikhaylyukova@geogr.msu.ru

Климат Москвы умеренно-континентальный, с четко выраженной сезонностью. Средняя многолетняя годовая температура за период 1971–2020 гг. по данным Метеорологической обсерватории МГУ составляет 6,0°C. Среднее количество осадков 714 мм за период 1981–2010 гг. Меньше всего осадков выпадает марте-апреле (38–39 мм за период 1981–2010 гг.), больше всего – летом и в начале осени. Относительная влажность ниже всего в мае (64%), выше – в декабре (85%). Средняя температура самого жаркого месяца (июль) составляет 19,9°C за период 1991–2020 гг. Средняя температура самого холодного месяца (январь) составляет –6,2°C за период 1991–2020 гг. [World Meteorological..., 2019].

Для Москвы характерна комбинация застройки различных типов и исторических периодов, которая является предметом отдельного исследования [Грищенко и др., 2020] и в значительной степени обуславливает характерные черты местного климата города. На климат Москвы значительное влияние оказывает и комплекс городских зелёных зон. Районы города озеленены в разной степени: для центра города характерно практически полное отсутствие зелёных насаждений; в новых районах массовой жилой застройки озеленение подчас не справляется с возложенными на него рекреационными и средообразующими задачами как в силу небольшого возраста высаживаемых деревьев, так и в связи с высокой плотностью населения.

Несмотря на сравнительно активный вывод промышленных предприятий за границы Москвы с целью освобождения территорий для формирования жилых и общественно-деловых пространств, промышленные зоны продолжают играть важную роль в формировании городского климата, в первую очередь, как территории, для которых характерна низкая степень озеленения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа по Москве была направлена на сопоставление данных о температуре, полученных по спутниковым снимкам высокого (серия спутников Landsat, 60 м и 100 м) и низкого (съёмочная система MODIS, 1000 м) пространственного разрешения, данных контактных наблюдений за температурой воздуха и результатов регионального климатического моделирования. Сперва осуществлён отбор сцен со спутников серии Landsat, т.к. частота пролёта этих спутников над Москвой меньше. Для анализа выбрано 10 снимков Landsat, включая 10 снимков за теплые сезоны 2018 и 2019 гг. и 5 снимков за холодные сезоны 2017–2020 гг. Затем для этих же дат проанализированы снимки съёмочной системы MODIS (спутники Terra и Aqua), время пролёта которых над Москвой наиболее близко к времени пролёта спутников Landsat (разница во времени между пролётами спутников составляет до 40 минут). Для всех снимков осуществлён отбор данных о температуре земной поверхности – для снимков съёмочной системы MODIS такой отбор описан в статье [Varentsov et al., 2019]; для снимков со спутников серии Landsat методика расчёта температуры земной поверхности описаны в статье [Грищенко и др., 2019]. Снимки съёмочной системы MODIS поставляются конечному пользователю по итогам предобработки, которая включает выделение облаков и исключение соответствующих им пикселей из дальнейшего анализа. Такая предобработка отсутствует для снимков со спутников серии Landsat, поэтому исключение пикселей, соответствующих облакам, произведено вручную, что определило наличие нижнего порога значений, который хорошо виден на графиках на рис. 1.

Проведена работа по подготовке данных наблюдений в Московском регионе, необходимых для сравнения со значениями LST (land surface temperature, температура земной поверхности) для выбранных дат. База данных наблюдений на метеостанциях Московского региона, поддерживаемая авторами (см. описание в [Климат..., 2017], наполнена данными, полученными из различных источников, включая архив метеорологической обсерватории

МГУ, данные с веб-сайта «Погода и климат» (pogodaiklimat.ru), архив Гидрометцентра России. В базу данных были также включены данные наблюдений на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг». Впрочем, они не использовались при сравнении с космическими данными, так как ранее было показано, что наблюдения температуры воздуха на АСКЗА для дневных условий подвержены значительным погрешностям [Климат Москвы..., 2017].

Для дополнительного подтверждения полученных результатов проведена серия численных экспериментов с моделью COSMO и параметризацией TERRA_URB [Wouters et al., 2016] с шагом расчетной сетки 1 км. Расчеты проводились для января 2017 г., января 2017 г. и июня 2019 г. в режиме динамической детализации (даунскейлинга) полей глобального метеорологического анализа по модели ICON с шагом сетки 13 км. Для расчетов использовались суперкомпьютеры «Ломоносов-2» МГУ и Cray-XC40 Росгидромета. Важно отметить, что в расчетах сравнивались различные способы задания внешних параметров городской среды в модели: способы их задания по используемым в модели по умолчанию грубым глобальным базам данных (эксперимент DEF); на основе концепции локальных климатических зон по методологии WUDAPT [Bechtel et al., 2015] (эксперименты LCZ), либо на основе совместного ГИС-анализа данных о застройке OpenStreetMap, данных о растительности и типах земельного покрова (эксперименты REF). Более подробно методика моделирования и задания параметров городской среды описана в работе [Varentsov et al., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для Московского региона путем сравнения значений LST, полученных по космическим данным высокого пространственного разрешения со снимков со спутников серии Landsat, космическим данным низкого пространственного разрешения съёмочной системы MODIS и данных метеорологических наблюдений в Москве и окрестностях, показаны выраженные различия между взаимосвязью LST и температурой воздуха в летний и зимний период. Летом пространственная структура полей LST и температуры воздуха в дневное время суток (для которого доступны снимки со спутников серии Landsat) принципиально различается и практически не скоррелирована. Эффект городского острова тепла Москвы ярко выражен в поле LST (различия температуры между городом и фоном достигают десятков °C), но практически не выражен в поле температуры воздуха. Для зимы же, по крайней мере на примере большинства рассмотренных случаев, выявлена более тесная связь между пространственной изменчивостью рассматриваемых параметров.

В рамках верификации данных высокого пространственного разрешения со спутников серии Landsat произведено их сравнение с данными низкого пространственного разрешения съёмочной системы MODIS. Для этого данные LST высокого разрешения Landsat были осреднены в пределах ячеек сетки MODIS (в каждую ячейку MODIS попадало до 960 пикселей снимка Landsat). Сравнение проводилось для территории площадью около 10 000 км², ограниченной координатами 55,35–56,07 с.ш. и 36,68–38,73 в.д. и включающей основную часть Московской агломерации и значительные по площади незастроенные территории. Такая же территория использовалась в работе [Varentsov et al., 2019]. В зависимости от условий облачности, для такой территории было доступно от 2700 до 12 000 значений LST по сетке MODIS для каждой из сцен.

Результаты сравнения показали, что теснота связи между двумя видами данных непостоянна и сильно варьирует во времени. Коэффициент корреляции R меняется 0,3 до 0,88 для летних сцен, от 0,64 до 0,93 для зимних сцен, со средними значениями 0,63 и 0,73 для лета и зимы соответственно. Графики на рис. 1 показывают примеры случаев

с более или менее тесной связью. Во всех случаях LST по данным Landsat несколько завышена относительно данных MODIS (в среднем на 1 К), особенно для урбанизированных территорий (рис. 2). Отчасти это можно объяснить использованием разных значений коэффициента изучения: так, по данным MODIS (растры emis31, emis32 продукта MOD11A1) он всегда больше 0,97, тогда как в расчете LST по данным Landsat используются меньшие значения. С учетом имеющихся литературных данных об излучательной способности для различных типов поверхностей [Oke et al., 2017], значения по данным MODIS представляются менее реалистичными, по крайней мере для урбанизированных территорий. Полученный результат демонстрирует неопределенность в оценке LST по спутниковым данным, устранение которой требует дальнейших детальных исследований.

Сравнение данных LST с данными наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях Росгидромета и АСКЗА Мосэкомониторинга подтвердило сделанное ранее предположение о принципиально различном характере взаимосвязи между температурой воздуха и поверхности в дневное время суток летом и зимой [Varentsov et al., 2019]. Для летнего сезона связь между двумя видами данных практически отсутствует, что показывают примеры для отдельных сцен на рис. 3 (а, б, в). На фоне изменчивости LST в десятки °С в пределах региона исследования (главным образом за счет различий между городскими и загородными территориями) изменчивость температуры не превышает первых °С. Зимой взаимоотношение двух величин кардинально отличаются от летних. Для всех зимних сцен порядок разброса значений температуры воздуха и LST оказывается соизмерим, и в некоторых случаях выявлена пространственная значимая взаимосвязь между этими величинами (например, рис. 3 г, е), хотя в других случаях связь отсутствует (например, рис. 3д). Один из наиболее ярких примеров взаимосвязи между двумя величинами демонстрирует случай 7 января 2017 г. на фоне аномально холодной погоды (рис. 3). В остальных зимних случаях, даже при отсутствии значимой корреляции по всей выборке данных, взаимосвязь прослеживается для отдельных групп точек. Тем не менее, приведенные примеры наглядно показывают, что взаимосвязь между температурой воздуха и поверхности в условиях мегаполиса даже в зимних условиях достаточно сложная и не может быть описана простыми регрессионными зависимостями.

Принципиально новым результатом стало сравнение LST по данным Landsat с данными контактных наблюдений температуры поверхности почвы. К сожалению, получить такие данные удалось только по двум метеостанциям в пределах региона исследования – для МГУ и ВДНХ. По итогам сравнения показано, что в данном случае согласована только временная динамика для отдельно взятых точек измерений, а не пространственные различия температуры между точками (рис. 4). Это не удивительно, так как на метеорологических станциях и постах термометры для измерения температуры поверхности почвы устанавливаются на открытой площадке размером 4 × 6 м [Наставление..., 1985]. Предварительно с площадки удаляют растительный покров и взрыхляют ее. Не удивительно, что поверхность вспаханных оголенных площадок на метеорологических станциях в дневные часы сильно перегрета и не отражает реальную температуру поверхности окружающей станции [Локощенко и др., 2020]. Соответственно, измеренная температура поверхности почвы не характеризует температуру окружающей поверхности, регистрируемую по снимкам Landsat.

Для интерпретации различий между температурой воздуха и поверхности использовались результаты численных экспериментов серии REF1. Детальная верификация по данным наблюдений на метеостанциях и АСКЗА ранее показала, что способ задания параметров городской среды в данном эксперименте позволяет получить наиболее адекватные результаты по сравнению с двумя другими, рассмотренными в работе [Varentsov et al., 2020].

Это же показали и результаты сравнения воспроизведенных моделью значений температуры поверхности со средними по ячейкам расчетной сетки значениями LST по данным Landsat, что иллюстрирует пример на рис. 5. Данный пример демонстрирует ценность космических температурных данных высокого пространственного разрешения для верификации результатов детализированного метеорологического и климатического моделирования для урбанизированных территорий, особенно в условиях дефицита данных контактных наблюдений.

Сопоставление значений температуры поверхности, воспроизведенных моделью, со средними по ячейкам расчетной сетки значениями LST по данным Landsat для летнего сезона показало разумное согласие по средним значениям и порядку характерной пространственной изменчивости (в том числе по разности температуры поверхности между городом и фоном), что иллюстрируют примеры на рис. 6. При это какая-либо связь между LST и воспроизводимой моделью температурой воздуха отсутствует. Для зимы же закономерности пространственного распределения температуры воздуха и поверхности по модели близки, и показывают примерно одинаковый уровень согласия с данными Landsat. При этом, для рассмотренных зимних сцен имеет место систематическое смещение результатов модельной температуры поверхности и воздуха относительно данных Landsat. Оно выражено, в том числе, в существенном занижении интенсивности поверхностного острова тепла в модели (рис. 6 в, г).

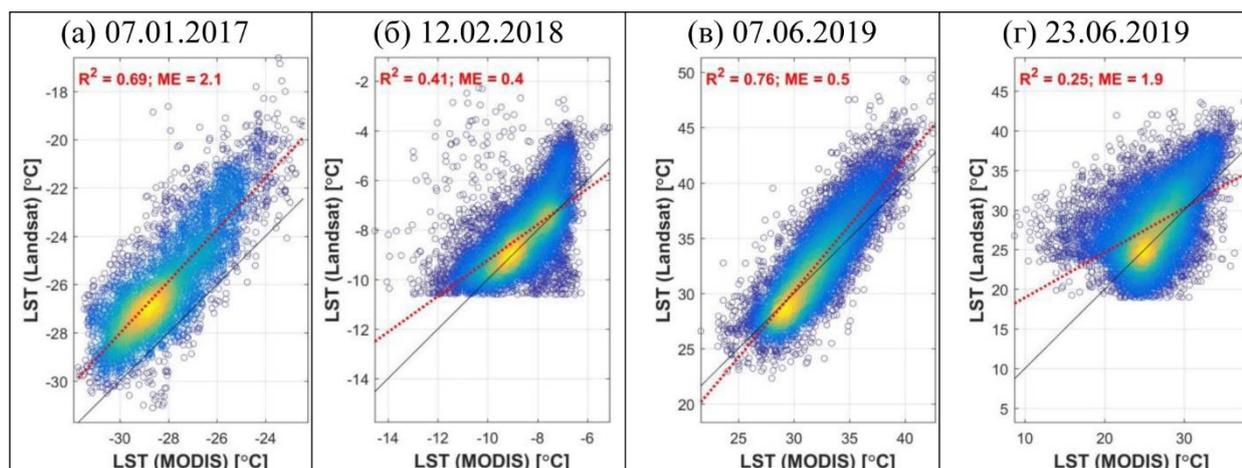


Рис. 1. Сравнение значений LST по данным Landsat и MODIS для двух зимних (а, б) и двух летних (в, г) сцен. Значения LST по данным Landsat осреднены по ячейкам сетки MODIS. Красной линией показан линейный тренд. Приведены коэффициенты детерминации тренда (R^2), средняя ошибка (ME), уравнение линейного тренда

Fig. 1. Comparison of LST values according to Landsat and MODIS data for two winter (a, б) and two summer (в, г) scenes. LST values from Landsat data are averaged over MODIS grid cells. Red line indicates a linear trend. Trend determination coefficients, mean error (ME) and trend equations are given

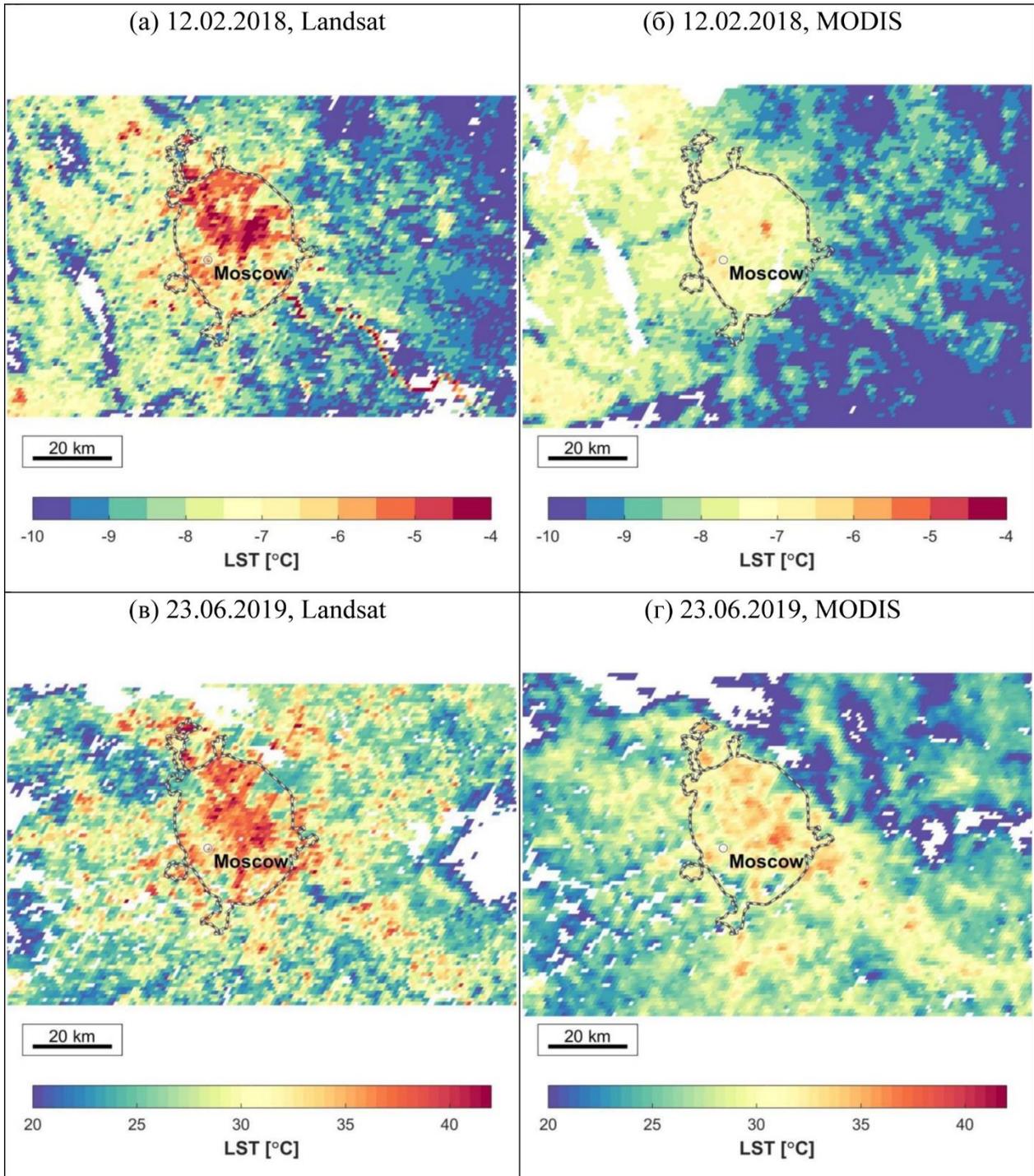


Рис. 2. Сравнение значений LST по данным Landsat и MODIS для зимней (а, б) и летней (в, г) сцен. Значения LST по данным Landsat осреднены по ячейкам сетки MODIS

Fig. 2. Comparison of LST values according to Landsat and MODIS data for winter (a, б) and summer (в, г) scenes. LST values from Landsat data are averaged over MODIS grid cells

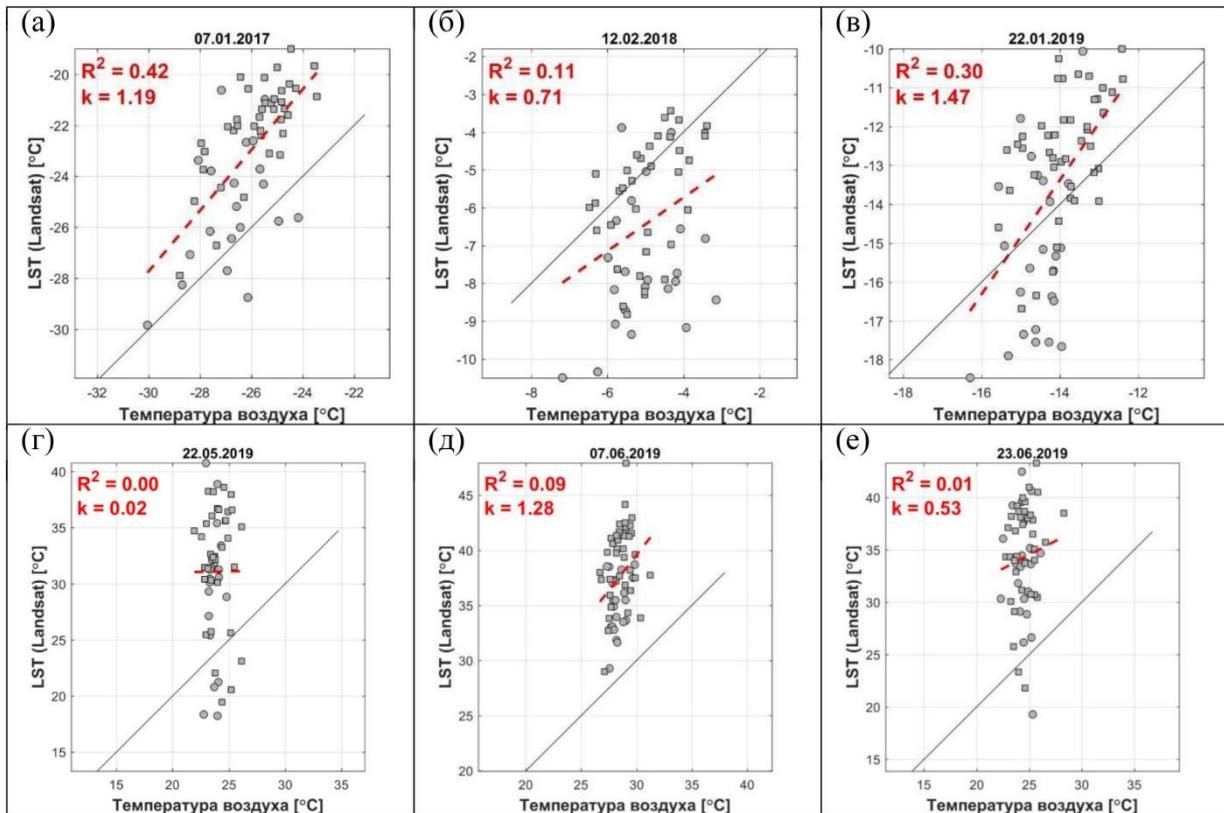


Рис. 3. Сравнение LST и температуры воздуха по данным измерений метеостанций и АСКЗА для отдельных зимних (а – в) и летних (г – е) сцен Landsat

Fig. 3. Comparison of LST and air temperature according to the data of meteorological stations and ASKZA measurements for specific winter (a – в) and summer (г – е) Landsat scenes

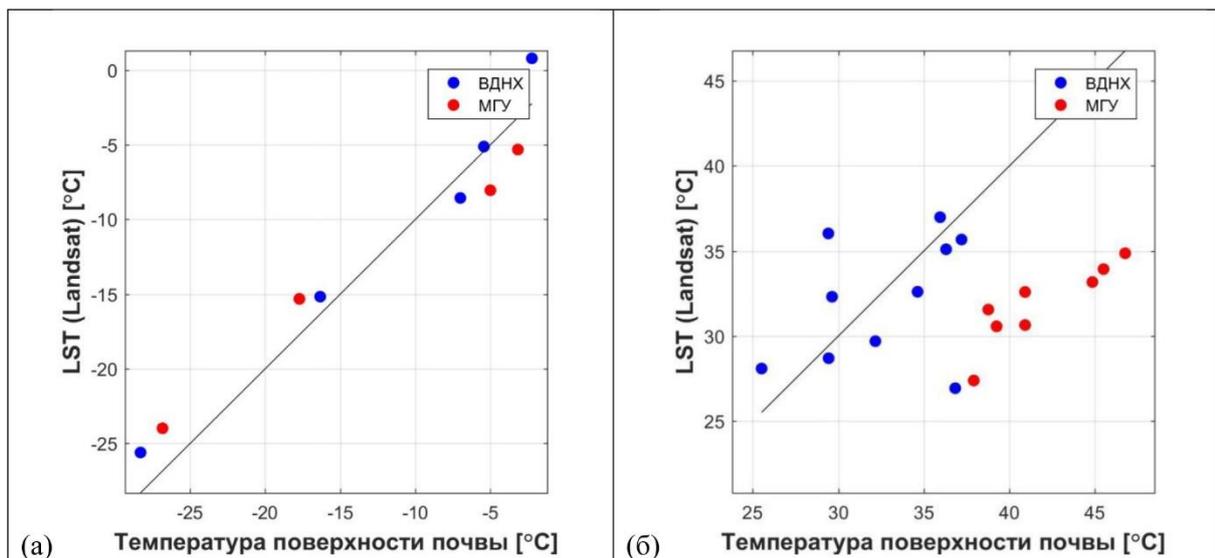


Рис. 4. Сравнение LST и измеряемой контактным образом температуры поверхности на метеостанциях ВДНХ и МГУ для всех рассмотренных зимних (а) и летних (б) сцен Landsat

Fig. 4. Comparison of LST and surface temperature in-situ measurements at VDNKh and Moscow State University meteorological stations for all considered winter (a) and summer (б) Landsat scenes

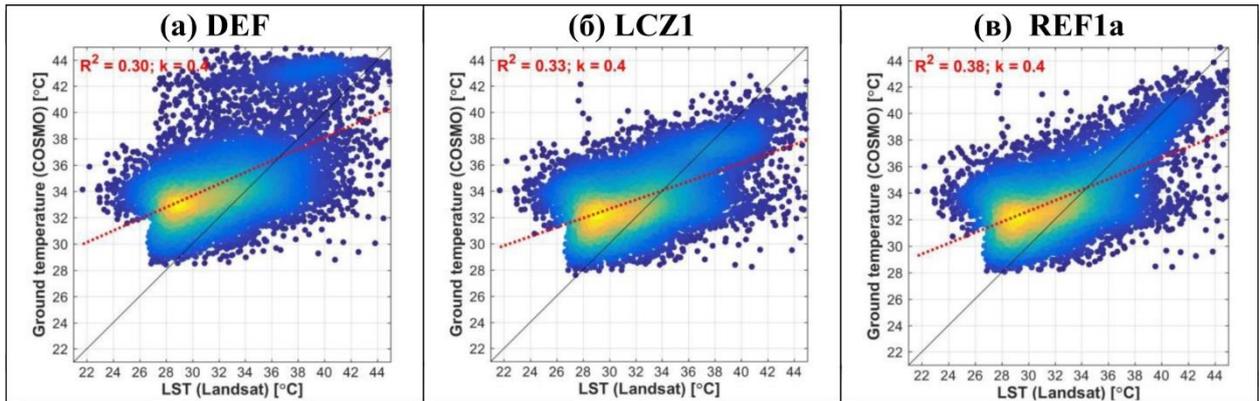


Рис. 5. Пример сравнения LST по данным Landsat за 6 июня 2019 г. с результатами расчетов по модели COSMO для экспериментов DEF, LCZ1 и REF1a с различными способами задания параметров городской среды

Fig. 5. An example of comparing LST according to Landsat data for June 6, 2019 with the results of calculations using the COSMO model for experiments DEF, LCZ1 and REF1a with different methods of setting the parameters of the urban environment

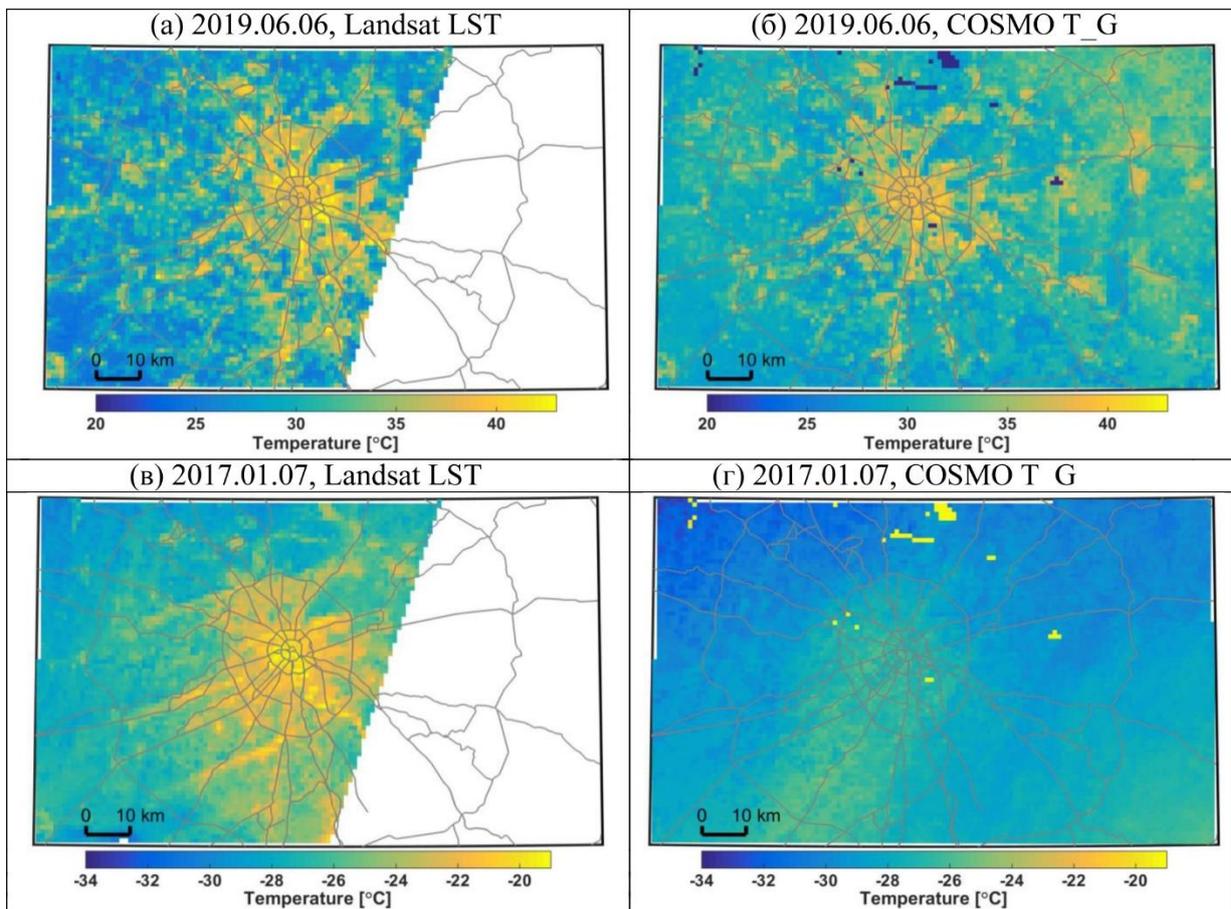


Рис. 6. Пример сравнения LST по данным Landsat (а, в) со значениями температуры поверхности по данным расчетов модели COSMO для эксперимента REF1a из статьи (Varentsov et al., 2020) (б, г) для летних и зимних условий

Fig. 6. An example of comparing LST according to Landsat data (a, в) with surface temperature values according to the calculations of the COSMO model experiment REF1a from (Varentsov et al., 2020) (б, г) for summer and winter conditions.

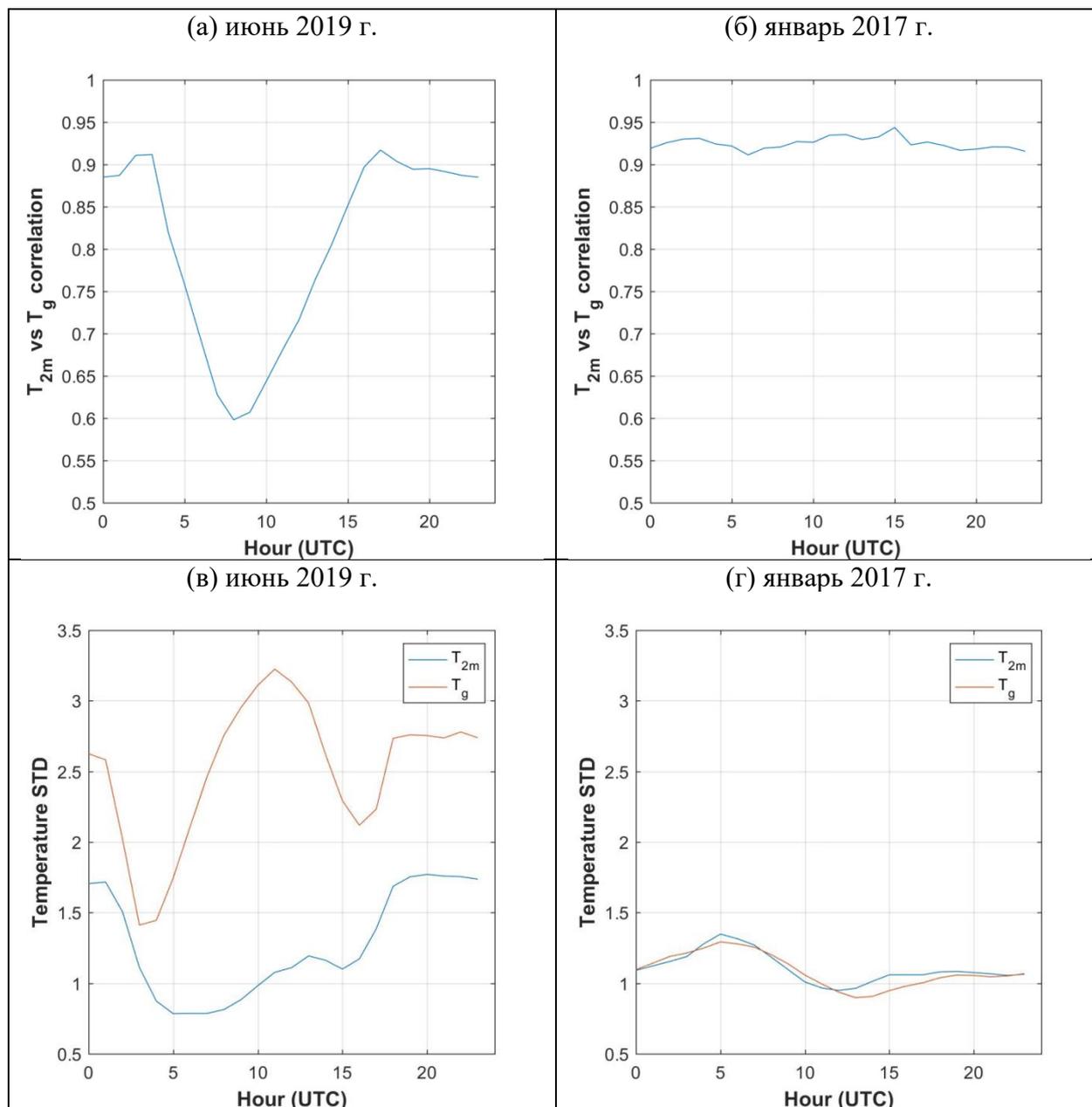


Рис. 7. Суточный ход коэффициента корреляции между пространственными полями температуры приземного воздуха (T_{2m}) и поверхности (T_g) по данным расчетов с моделью COSMO для июня 2019 г. (а) и января 2017 г. (б), а также стандартного отклонения этих величин (в, г)

Fig. 7. Diurnal variation of the correlation coefficient between the spatial fields of the surface air and surface temperature according to COSMO-CLM simulations for June 2019 (a) and January 2017 (б), and the standard deviation of these values (в, г)

ВЫВОДЫ

Можно предположить, что это связано с различием значений коэффициента излучения, используемых в модели и при обработке космических снимков, а также с неточностями модельной параметризации снежного покрова в городских условиях (в модели не учитывается уборка снега на городских улицах и крышах зданий).

Для понимания фундаментальных причин различий между температурным режимом по большей выборке данных (по результатам моделирования за январь 2017 г. и июнь 2019 г.) рассмотрен суточный ход динамики коэффициента корреляции между полями температуры поверхности и воздуха в Московском регионе, а также стандартного отклонения этих величин по данным расчетов с моделью COSMO. Для это использовались результаты модельных расчетов за 1 летний месяц (июнь 2019 г.) и 1 зимний месяц (январь 2017 г.) с временной дискретностью 1 час. Для каждого момента времени рассчитывался коэффициент пространственной корреляции между температурой воздуха и поверхности, определенных на расчетной сетке модели (200×200 ячеек с шагом 1 км). Также рассчитываются стандартные отклонения каждой из величин. Далее путем осреднения за период модельных расчетов строился суточный ход полученных статистических показателей, представленный на рис. 7. Такой вид анализа позволил наглядно проиллюстрировать принципиальную проблему использования космических данных LST для картографирования температуры воздуха: видно, что летом в дневное время суток коэффициент корреляции между двумя величинами падает до 0,6 (что соответствует коэффициенту тесноты связи $R^2 = 0,36$), а стандартное отклонение этих величин различается в 3 раза. Зимой же закономерности пространственной изменчивости этих величин связаны гораздо теснее. Таким образом, как показывают и примеры для арктических городов [Варенцов и др., 2021], использование космических температурных данных напрямую в задаче в климатического картографирования для урбанизированных территорий представляется перспективным именно для зимних условий.

Выполнено исследование наглядно продемонстрировало сложность и нелинейность связи городскими аномалиями температуры воздуха, регистрируемой на метеостанциях, и диагностируемой по спутниковым данным температурой поверхности (LST). Неоднозначность взаимосвязи этих величин связана с особенностями взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности, динамики пограничного слоя атмосферы и неоднородностью свойств подстилающей поверхности на различных масштабах. При работе со спутниковыми данными дополнительные источники неопределенности создает проблема точного определения излучательной способности различных типов поверхности. Таким образом, даже при использовании спутниковых снимков высокого разрешения, пространственная структура LST не будет однозначно отражать закономерности пространственного распределения аномалий температуры подстилающей поверхности. Тем не менее, опыт исследований для других регионов позволяет считать LST одним из предикторов в задачах картирования температуры воздуха и термического комфорта. Особую актуальность использование LST приобретает для зимнего периода, когда связь между температурой воздуха и поверхности существенно теснее, чем летом (что в данной работе показано с привлечением результатов моделирования). Параллельно, показана ценность данных LST высокого разрешения для верификации расчетов с региональной климатической модели COSMO с шагом сетки 1 км. В нашем исследовании использование спутниковых снимков Landsat позволило независимым образом подтвердить выводы об оптимальном способе задания параметров городской среды в модели, ранее полученные по результатам ее верификации по данным контактных измерений. В перспективе разрешение моделей прогноза атмосферы, применяемых для городских территорий в задачах прогноза погоды и исследования климата, будет повышаться, и использование детализированная спутниковая информация будет все более востребована для их верификации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Обработка и анализ спутниковых данных выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-05-

00715 А. Численные эксперименты с моделью COSMO проведены при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта 17-77-20070-П.

ACKNOWLEDGEMENTS

Processing and analysis of satellite data was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project 18-05-00715 А. Numerical simulations with COSMO model were funded by Russian Science Foundation, project No. 17-77-20070-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варенцов М.И., Грищенко М.Ю., Константинов П.И.* Сопоставление наземных и космических разномасштабных температурных данных на примере городов российской Арктики для зимних условий. Исследование Земли из космоса. 2021. № 1. С. 1–13.
2. *Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е.* Опыт определения площади городской застройки по космическим снимкам для задач метеорологического моделирования (на примере Москвы). ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 2. С. 298–312.
3. *Грищенко М.Ю., Чернулич К.К.* Исследование связи наземных и космических температурных данных на примере островов Врангеля и Кунашир. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 5. С. 566–575.
4. *Климат Москвы* (особенности климата большого города). Под ред. А.А. Дмитриев, Н.П. Бессонов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 323 с.
5. *Климат Москвы* в условиях глобального потепления. Под ред. А.В. Кислов. Москва: Издательство Московского университета, 2017. 288 с.
6. *Локощенко М.А., Енукова Е.А.* Остров тепла в московском регионе по спутниковым данным. Метеорология и гидрология. 2020. №7. С. 50–63.
7. *Наставление* гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 296 с.
8. *Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O.* Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2015. V. 4. P. 199–219.
9. *Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I.* Moscow Urban Heat Island: Detection, boundaries, and variability. Russ. Meteorol. Hydrol. 2017. V. 42. No 5. С. 305–313.
10. *Lokoshchenko M.A.* Urban Heat Island and Urban Dry Island in Moscow and Their Centennial Changes. J. Appl. Meteorol. Climatol. 2017. V. 56. No 10. С. 2729–2745.
11. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* Urban climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
12. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. Geogr. Environ. Sustain. 2019. V. 12. No 4. С. 74–95.
13. *Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.* Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. Atmosphere. 2020. V. 11. № 12. P. 1–31.
14. *World Meteorological Organization.* Weather. Climate. Water. URL: [http:// worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206](http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206) (дата обращения: 27.03.2021).
15. *Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., Lipzig N.P.M. van.* The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. No 9. P. 3027–3054.

REFERENCES

1. *Bechtel B., Alexander P.J., Böhner J., Ching J., Conrad O.* Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015. V. 4. P. 199–219.
2. *Climate of Moscow (Climate features of the big city)*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. 323 p. (in Russian).
3. *Climate of Moscow under global warming*. Moscow: Moscow University Press, 2017. 288 p.
4. *Grishchenko M.Y., Chernulich K.K.* Investigation of the relationship between ground-based and space temperature data on the example of the Wrangel and Kunashir islands. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"yemka*. 2019. V. 63. No 5. P. 566–575 (in Russian).
5. *Grishchenko M.Y., Sarychev E.Y., Varentsov M.I., Samsonov T.E.* Experience in determining the area of urban development from satellite images for the tasks of meteorological modeling (case study of Moscow). *InterKarto. InterGIS*. 2020. V. 26. No. 2. P. 298–312 (in Russian).
6. *Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I.* Moscow urban heat island: Detection, boundaries, and variability. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017. V. 42. No 5. P. 305–313 (in Russian).
7. *Lokoshchenko M.A.* Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017. V. 56. No 10. P. 2729–2745.
8. *Lokoshchenko M.A., Yenukova E.A.* Heat island in the Moscow region according to satellite data. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020. V. 7. P. 50–63 (in Russian)
9. *Manual for hydrometeorological stations and posts*. Vyp. 3, ch. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 296 p. (in Russian).
10. *Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A.* *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 509 p.
11. *Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M.* Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. *Atmosphere*. 2020. V. 11. No 12. P. 1–31.
12. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Konstantinov P.I.* Comparison of ground-based and satellite-based different-scale temperature data on the example of cities in the Russian Arctic for winter conditions. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2021. No 1. P. 1–13 (in Russian).
13. *Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019. V. 12. No 4. P. 74–95.
14. World Meteorological Organization. *Weather. Climate. Water*. URL: [http:// worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206](http://worldweather.wmo.int/en/city.html?cityId=206) (access: 27.03.2021).
15. *Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., Lipzig N.P.M. van.* The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. *Geosci. Model Dev*. 2016. V. 9. No 9. P. 3027–3054.