Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS

С. С. Шинкаренко [1,2,3], О. Ю. Кошелева [2], О. А. Гордиенко [2,3], А. А. Дубачева [3], Р. С. Омаров [2,3]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
[2] *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*
[3] *Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062, Россия*
E-mails: shinkarenkos@vfanc.ru, olya_ber@mail.ru

В статье представлены результаты изучения влияния площади озеленения и экранирования (запечатанности) на температуру поверхности города. В качестве объекта исследования выбрана территория Волгоградской агломерации общей площадью 2,26 тыс. км^2: города Волгоград, Волжский и Краснослободск, а также прилегающие к ним территории городских и сельских поселений. Источником данных стал информационный продукт температуры поверхности земли MODIS, 8-дневные данные MOD11A2 (около 10 % данных — MYD11A2). На территории агломерации выделено четыре типа подстилающей поверхности: водные объекты, экранированные и озеленённые поверхности, пустыри и богарные пашни. Определена степень запечатанности почв и озеленения в границах административных единиц. Установлены различия между отдельными типами подстилающей поверхности в разное время суток. Днём наибольшая температура наблюдается на пустырях и богарных сельскохозяйственных полях, а водные объекты, орошаемые угодья и запечатанные поверхности характеризуются более низкой температурой. Выявлена положительная высокая связь ($r = 0{,}80$) между максимальной дневной температурой и площадью пустырей, отрицательная высокая ($r = -0{,}72$) — между максимальной дневной температурой и площадью водоёмов. Ночью, наоборот, прогревшиеся за день застройки, асфальтобетонные покрытия и водные объекты имеют более высокую температуру поверхности, установлена высокая связь ($r = 0{,}69$) между максимальной ночной температурой и площадью запечатанных поверхностей. Рассмотрено распределение теплового поля в разрезе муниципальных образований Волгоградской агломерации. Максимальная температура в дневное время наблюдается на территории муниципальных образований, которые на 80–90 % состоят из богарных сельскохозяйственных земель, пастбищ и пустырей. В наиболее застроенных районах Волгограда городской остров тепла особенно интенсивно проявляется в ночное время. Для среднемноголетней среднесуточной температуры установлена сильная отрицательная связь с площадью озеленения ($r = -081$), средняя положительная — с площадью пустырей ($r = 0{,}61$) и средняя отрицательная связь — с площадью водоёмов ($r = -0{,}43$). Для определения оптимального соотношения в городе различных типов поверхностей показаны регрессионные зависимости температуры от соотношения озеленённых, застроенных и незастроенных площадей (пустырей). Установлен линейный характер зависимости среднесуточной температуры от отношения зелёных зон к сумме застроенных и незастроенных поверхностей с коэффициентом корреляции $r = 0{,}95$.

Ключевые слова: дневная температура поверхности, ночная температура поверхности, MODIS, Волгоград, агломерация, тепловой остров, подстилающая поверхность, запечатанность почв, озеленение

Одобрена к печати: 10.08.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-125-141

Введение

Прогнозируемое глобальное потепление на Земле закономерно приведёт к усилению эффекта «городского острова тепла» (*англ.* urban heat island — UHI, увеличение температуры воздуха в городе по сравнению с окружающей его местностью), который представляет собой совокупность ареалов повышенной температуры над городами и крупными промышленными зонами, образующихся в результате повышенного выброса в атмосферу тепловой энергии.

Интенсивность городского острова тепла (*англ.* urban heat island intensity) определяется как разница температуры воздуха между центром города и пригородами — периферийными областями с редкой застройкой или с отсутствием таковой (Voogt, Oke, 2003). Увеличение зон перегрева поверхности урбанизированной среды, в свою очередь, негативно скажется на комфортности проживания людей и работе городского хозяйства. В частности, перегрев поверхности городской среды может создавать угрозу работе автотранспорта. Так, в исследовании В. И. Горного с соавторами (2016) на примере Санкт-Петербурга установлено, что в городе в условиях летнего повышения температуры вполне реален риск размягчения дорожного битума (вероятность этого составляет 10–40 %). Наибольшему риску подвержены территории промышленной зоны, а также перекрёстки крупных магистралей. С. Г. Крицук с соавторами (2019) считают, что наименьшим риском перегрева поверхности городской среды характеризуются рекреационные зоны и спальные районы, застроенные в 50–60-х гг. XX в. На примере г. Волжского было установлено (Зимовец, 2016), что кварталы старой и новой застройки имеют примерно одинаковые площади под зданиями, сооружениями (18–25 %) и дорогами (28–35 %), но сильно различаются по площади озеленения: в кварталах старой застройки она составляет в среднем 35–45 %, в кварталах новой застройки не превышает 20 %. Для Воронежа был получен отрицательный коэффициент корреляции ($r = -0{,}90$) зависимости температуры подстилающей поверхности от доли озеленения (Попова, 2018). Зависимость температурного контраста от площади зелёных насаждений особенно заметна при озеленённости 20–50 %. При уровне озеленения в 0–20 % величина температурного перепада максимальна и почти не зависит от площади открытой поверхности. Оптимальные условия для проникновения чистого воздуха и благоприятный тепловой режим в условиях городской застройки отмечены, когда открытая озеленённая поверхность составляет 50–60 % от площади микрорайона (Почва..., 1997). Таким образом, в очередной раз был подтверждён «смягчающий» вклад зелёных насаждений в формирование городского острова тепла. В связи с этим некоторые авторы (Горный и др., 2016) считают, что при оценке теплового острова значения восстановленной по результатам спутниковых съёмок температуры транспортных магистралей, включающих дорожное покрытие и зелёные насаждения по краям, могут оказаться заниженными по сравнению с однородным асфальтом. Вместе с тем на сегодняшний день использование разносезонных рядов космических снимков представляется неотъемлемой информационной основой практически любого исследования тепловых аномалий урбанизированных территорий как в России (Балдина, Грищенко, 2014; Варенцов и др., 2014; Дубровская, 2017; Константинов и др., 2015; Погорелов, Липилин, 2016; Тронин и др., 2017), так и в других странах (Giannopoulou et al., 2010; Hardin et al., 2018; Imhoff et al., 2010; Peng et al., 2011). В отличие от локальных измерений на метеорологических станциях инфракрасные изображения городов со спутников позволяют одновременно охватить значительную площадь. В районах, плохо охваченных метеорологическими наблюдениями, тепловые снимки со спутника становятся фактически единственным способом обнаружения городского острова тепла (Демин, 2019).

Среди факторов, влияющих на интенсивность острова тепла и которыми в той или иной мере способен управлять человек, можно выделить два с взаимно противоположным влиянием: долю экранированных поверхностей и долю зелёных насаждений. В умеренном климате экранированные (запечатанные) поверхности города, включая промышленные пояса, транспортные магистрали, жилые и общественные здания, могут подвергаться существенному перегреву в летнее время, что потребует от каждого региона разработки необходимого минимума мер по обеспечению биоклиматической комфортности застройки (Мягков, 2019), основным механизмом которой становится увеличение озеленённых поверхностей. Поэтому цель настоящего исследования заключается в определении закономерностей влияния площади озеленения и запечатанности поверхности асфальтобетонными покрытиями (в том числе зданиями и сооружениями) на температуру поверхности города, расположенного в засушливой сухостепной зоне Российской Федерации. Под «запечатанностью» или «экранированием» почв подразумевается процесс удаления верхних почвенных горизонтов и перекрытие оставшейся части профиля различными твёрдыми непроницаемыми материалами (Гордиенко и др., 2019).

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана территория Волгоградской агломерации, расположенная в юго-восточной части Европейской России. Согласно Стратегии социально-экономического развития Волгоградской обл. до 2025 г., территория Волгоградской агломерации включает города Волгоград, Волжский, Краснослободск, рабочий посёлок Городище, посёлки городского типа Светлый Яр и Средняя Ахтуба. Соответственно, в район исследований вошли не только указанные муниципальные образования, но и смежные административные единицы:

- районы Волгограда (с севера на юг — Тракторозаводский, Краснооктябрьский, Центральный, Дзержинский, Ворошиловский, Советский, Кировский, Красноармейский);
- правобережные земли, прилегающие к границам города: Городищенское и Ерзовское городские поселения, Орловское, Краснопахаревское и Царицынское сельские поселения Городищенского района, а также Кировское сельское поселение Светлоярского района;
- левобережные земли: города Волжский и Краснослободск, рабочий посёлок Средняя Ахтуба, сельские поселения Среднеахтубинского района (Ахтубинское, Кировское, Фрунзенское, Куйбышевское, Клетское).

Общая площадь Волгоградской агломерации в выделенных границах составила 2,26 тыс. км^2. Административные границы Волгограда включают не только урбанизированные территории и парки, но также значительные площади дачных массивов, богарных и орошаемых пашен, пустырей. Например, в функциональную зону озеленённых территорий рекреационного назначения в пределах Советского и Кировского районов Волгограда фактически входит более 15 тыс. га богарной и орошаемой пашни, а также около 7 тыс. га пустырей и залежей (Гордиенко и др., 2019).

Территория агломерации расположена в трёх геоморфологических районах, которые разрезаны долиной р. Волги: Приволжской и Ергенинской возвышенностях (правобережье) и на Прикаспийской низменности (левобережная часть).

Климат рассматриваемой территории — континентальный, характеризующийся жарким сухим летом и холодной малоснежной зимой. В различные годы может выпадать от 250 до 550 мм осадков. Средняя температура июля достигает отметки +24,5 °C, января — отметки –6,1 °C. На первые два десятилетия XXI в. пришлось несколько абсолютных температурных максимумов: в 2007 г. (январь и май), 2010 г. (август, сентябрь и ноябрь), 2011 г. (июль) и 2012 г. (апрель, июнь, декабрь). Существенное (смягчающее) влияние на климат агломерации, особенно левобережной её части, оказывает Волго-Ахтубинская пойма: за счёт более интенсивного испарения с поверхности многочисленных водоёмов относительная влажность в пойме в тёплый сезон на 10–12 % выше окружающего степного пространства.

Материалы и методы

Источником данных для исследований стал информационный продукт температуры поверхности земли (Land Surface Temperature — LST) MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Использовались преимущественно 8-дневные данные MOD11A2 (около 10 % данных — MYD11A2) версии 6 с разрешением около 0,01°. Волгоградская агломерация охватывается двумя гранулами MODIS: h20v04 и h21v04 (https://search.earthdata.nasa.gov). Среднее время пролёта спутника Terra над районом исследований днём — 11:00 LST (*англ.* local solar time, местное солнечное время), а ночью — 22:00 LST; спутника Aqua днём — 13:00 LST, ночью — 01:00 LST. Именно около полуночи, как правило, наблюдается максимальная интенсивность городского острова тепла (Giannopoulou et al., 2010; Hardin et al., 2018). Данные MODIS достаточно широко применяются для исследований особенностей этой тепловой аномалии (Schwarz et al., 2011; Zhou et al., 2014).

На первом этапе данные были конвертированы в формат GeoTIF и перепроецированы из синусоидальной (равновеликой) проекции WGS-84 в универсальную поперечную проекцию Меркатора (UTM Universal Transverse Mercator) (зона 38N) в пакетном режиме средствами утилиты MODIS Reprojection Tool. Далее был проведён анализ качества данных и выбраны безоблачные композитные изображения на район исследований. В холодное полугодие из-за частой и плотной облачности данных практически нет, поэтому было принято решение исследовать тепловое поле агломерации в тёплое полугодие: с 31 марта по 9 ноября. Выбирались годы, для каждого из которых имеется не менее 15 ночных и дневных композитов на каждую дату и не менее 25 безоблачных суток за год: 2003 г., 2005, 2007–2010, 2012, 2014, 2018 и 2019 гг. По этой причине анализировались максимальная и средняя за период дневная и ночная температура. Для каждого года определялась максимальная дневная, ночная и среднесуточная температура и даты наблюдения, после чего производилось усреднение за весь период исследований. Среднесуточная температура по метеостанции Волгоград приводится по данным Автоматизированной информационной системы обработки режимной информации (АИСОРИ) Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (http://aisori.meteo.ru/ClimateR).

Слой административных границ создан по данным Open Street Map (data.nextgis.com). Геоинформационная обработка осуществлялась в программе QGIS, статистический анализ выполнен в Microsoft Office Excel. Данные MODIS подходят для анализа термического режима однородных территорий (Савельев и др., 2017), при этом имеют лучшее временное разрешение по сравнению с данными более высокого пространственного разрешения (например, Landsat). Данные Landsat TM, ETM+, OLI не подходят для настоящего исследования по нескольким причинам. Во-первых, архив данных не охватывает полностью весь период исследований. Во-вторых, съёмка указанными системами проводится исключительно в дневное время (около 10:50 UTC+3), что не соответствует времени максимального дневного прогрева. В то же время наибольший дискомфорт для жителей приносит именно ночное проявление городского острова тепла. Кроме того, периодичность съёмки Landsat на территорию исследования — 16 дней. Из-за этого время максимального прогрева может быть попросту не захвачено, к тому же погодные условия могут вносить существенный уровень неопределённости при установлении дней максимального температурного контраста урбанизированной территории и анализе поля температуры. В то же время требуются безоблачные данные, которые отсутствуют у Landsat-8, например летом 2019 г., а в другие годы могут не попадать на наиболее жаркий период. По этим причинам необходим многолетний однородный непрерывный массив данных, каковым оказался архив информационного продукта MOD11A2. Предпочтение в работе отдавалось данным со спутника Terra из-за большего количества безоблачных дневных и ночных композитов на каждую дату: 476 у Terra против 388 у Aqua за 2002–2019 гг.

Территорию агломерации нельзя считать однородной, поэтому были учтены особенности подстилающей поверхности. Контролируемая классификация типов подстилающей поверхности произведена по спутниковому снимку Sentinel-2 (тайлы T38UMU и T38UMV за 11 августа 2018 г.) с помощью модуля Semi Automatic Classification Plugin для QGIS. Использовалась комбинация с включением инфракрасного канала (8-5-4) с разрешением 10 м. Выделялись следующие классы: 1) водные объекты; 2) экранированные поверхности (запечатанный почвенный покров — асфальтобетонное покрытие, здания и сооружения и т. п.); 3) озеленение и орошение (древесные и кустарниковые насаждения, орошаемые сельскохозяйственные угодья, газоны); 4) пустыри и богарные пашни. Дата использованного спутникового снимка была подобрана с учётом максимальной дифференциации выделенных типов подстилающей поверхности. В августе заканчивает вегетацию травянистая растительность на пустырях и богарных пашнях, благодаря этому точно выделяется древесно-кустарниковая растительность и орошаемые земли. Достоверность классификации по индексу Каппа составила 0,89.

Далее все растровые данные были преобразованы в векторный формат с внесением в таблицу атрибутов значений температуры поверхности и площадей различных типов подстилающей

поверхности. Пиксели с одинаковыми координатами MODIS абсолютно совпадают, поэтому разновременные данные фактически относятся к одной и той же территории. На основе пространственного соединения объединены атрибуты температуры по регулярной сетке, соответствующей размерам ячеек растров MODIS, площадей участков различных типов подстилающей поверхности и административные границы. Таким образом, каждый пиксель MODIS получил следующие атрибуты: дневная, ночная и среднесуточная температура на каждую дату; среднемноголетние значения максимальной дневной, ночной и среднесуточной температуры поверхности и даты их наблюдения; доли пикселя, занятые запечатанными поверхностями, водными объектами, пустырями и озеленёнными участками (в озеленение включены древесно-кустарниковые насаждения, сады, газоны и орошаемые земли, поскольку в условиях агломерации газоны и значительная часть древесно-кустарниковой растительности не могут существовать без полива). Средневзвешенные значения температуры поверхности в административных границах определялись арифметическим взвешиванием с использованием площади в качестве веса (так как при пересечении пикселей MODIS слоем-маской административных границ площади граничных пикселей изменились, то нельзя использовать количество или частоту пикселей с тем или иным значением):

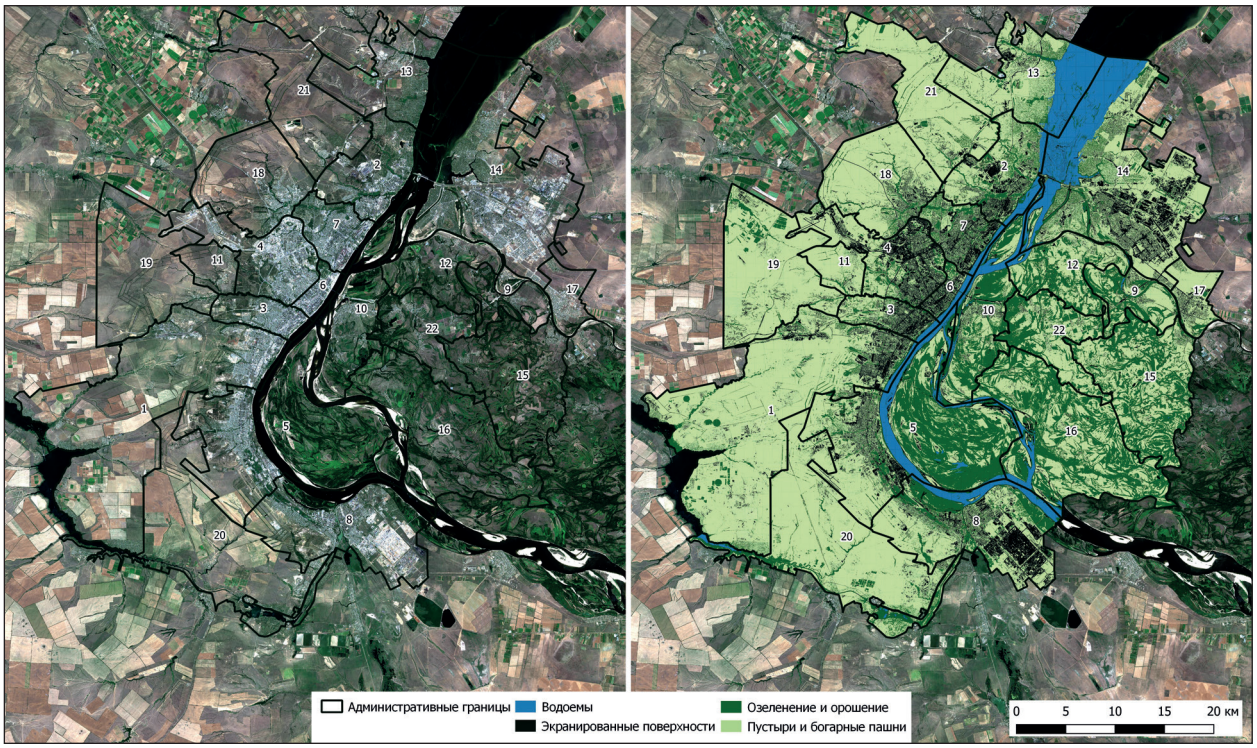
$$\overline{\mathrm{LST}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \mathrm{LST}_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i},$$

где: $\overline{\mathrm{LST}}$ — средневзвешенное значение температуры поверхности; S_i — площадь i-й ячейки; LST_i — значение температуры поверхности в i-й ячейке.

Результаты и обсуждение

Роль подстилающей поверхности в формировании теплового острова над городом — одна из ключевых. Большая концентрация поверхностей, запечатанных плотными покрытиями, в том числе зданиями и сооружениями, — это именно то, что отличает город от прилегающих естественных ландшафтов. В современных городах степень запечатанности поверхности очень высока, достигая в отдельных функциональных зонах 50–90 % (Гордиенко и др., 2019; Ермакова, Мартыненко, 2011; Кулик и др., 2015; Савин, 2013). Напротив, доля озеленённых поверхностей в городах сухостепной зоны может принимать высокие значения только в случае нахождения в границах города крупного лесного массива. На спутниковом снимке Sentinel-2 хорошо различимы запечатанные поверхности правобережной части агломерации — Волгоград — и северной части левобережья — Волжский (*рис. 1*, см. с. 130). Центральную и юго-восточную часть агломерации занимает озеленённое пространство о. Сарпинский и Волго-Ахтубинской поймы (Рулев и др., 2017). Восточная часть агломерации занята преимущественно небольшими сельскими населёнными пунктами, сельскохозяйственными угодьями (богарными и орошаемыми) и незастроенным пространством (пустыри, крутые склоны, земли лесного фонда и т. д.).

В результате классификации композитных изображений Sentinel-2 определены площади основных типов подстилающей поверхности (*рис. 2*, см. с. 130). Большую часть в пределах Волгоградской агломерации занимают сельскохозяйственные угодья и пустыри — 59,2 % от всей площади. На долю озеленённых территорий приходится 20,9%, на застроенные — 14 % и на водные объекты — 5,9 %. Наиболее запечатанными оказались поверхности районов Волгограда Тракторозаводского (24,2 %), Ворошиловского (33,0 %), Дзержинского (37,4 %), Центрального (45,2 %), Краснооктябрьского (39,4 %) и Красноармейского (26,6 %), а также г. Волжский (23,9 %). Это связано прежде всего с тем, что в данных районах наиболее развита дорожно-транспортная сеть, сконцентрированы основные промышленные и жилые объекты, проживает большая часть населения агломерации.



а *б*

Рис. 1. Спутниковый снимок Sentinel-2 от 11.08.2018 Волгоградской агломерации (*а*) и результат классификации по типам подстилающей поверхности (*б*); номера районов Волгограда и муниципальных образований см. в *табл. 2*

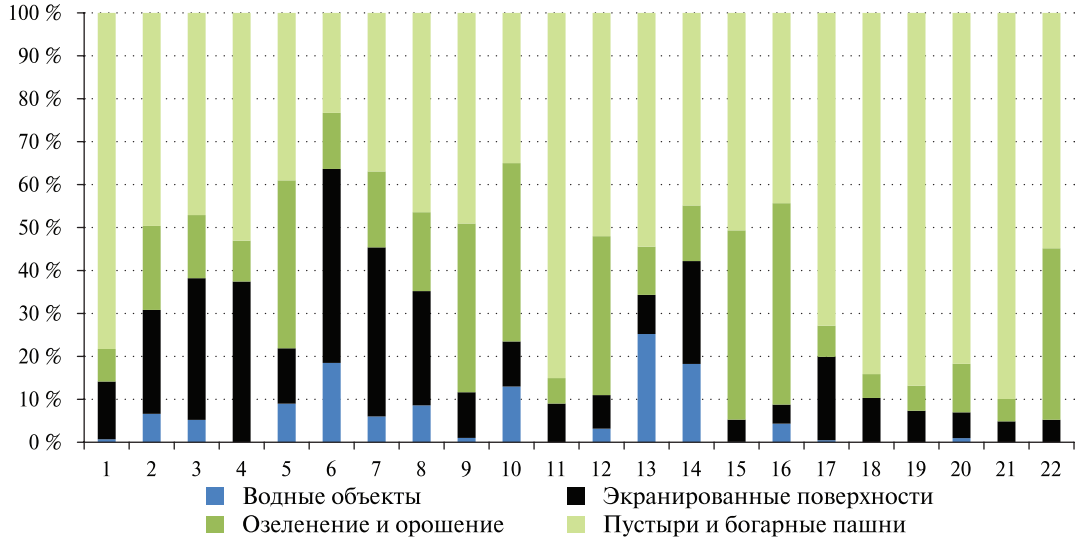


Рис. 2. Распределение площадей административных районов и муниципальных образований по типам подстилающей поверхности (номера см. в *табл. 2*)

Почвенный покров Советского (13,5 %) и Кировского (12,9 %) районов города, а также сельских поселений вследствие малой плотности застройки и отсутствия промышленных объектов запечатан в наименьшей степени. К наиболее озеленённым можно отнести Ахтубинское, Кировское, Куйбышевское сельские поселения Среднеахтубинского района, а также г. Краснослободск, что в первую очередь связано с наличием в пределах муниципальных образований лесов и лугов Волго-Ахтубинской поймы. Степень озеленения Центрального района города, который имеет самый высокий уровень запечатанности поверхности, составляет

всего 13,0 %. Отдельно стоит выделить высокую степень озеленения Кировского района — 39,1 % из-за вхождения в его границы о. Сарпинский.

Анализ и картографирование среднемноголетней максимальной температуры по данным MODIS позволяет увидеть локализацию положительных тепловых аномалий в пределах агломерации, которые и считаются тепловыми островами. При сглаживании микроклиматических неоднородностей отдельных участков, неизбежно возникающем при осреднении температуры по площади (Демин, 2019), всё же прослеживается приуроченность тепловых аномалий (ареалов с максимальной температурой) к определённым типам подстилающей поверхности. Особенно это становится заметным при сравнении дневных и ночных снимков.

На *рис. 3* показано распределение по территории агломерации ареалов среднемноголетней дневной максимальной температуры. Достаточно ярко выражены температурные градиенты: наибольшие перепады дневной максимальной температуры характерны для прибрежных участков. В большей степени это выражено вдоль берега Волги и Волгоградского водохранилища, в меньшей — вдоль берегов водохранилищ Волго-Донского судоходного канала (Варваровского и Береславского). Разница температуры в зоне влияния водоёмов и на удалении от них достигает 5–7 °С. Это подтверждается натурными наблюдениями, проведёнными в Волгограде в середине 80-х гг. прошлого века. Причём разница тем больше, чем меньше облачность (Филатов, 1986). Поскольку выбирались безоблачные данные, то влияние бризов на температуру города выражено наиболее ярко.

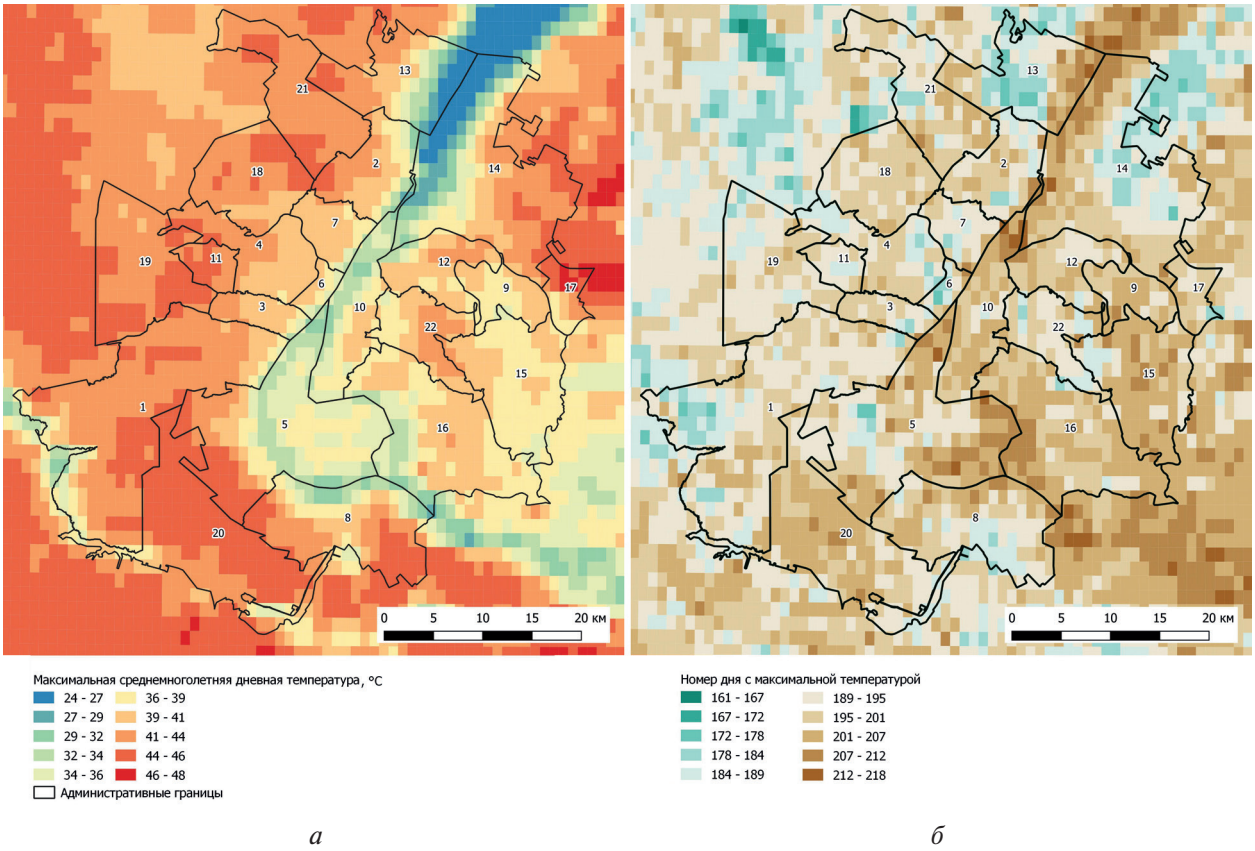


Рис. 3. Среднемноголетняя максимальная дневная температура (*а*) и среднемноголетняя дата максимальной дневной температуры (*б*) (номера см. в *табл. 2*)

Более низкой дневной температурой характеризуются водные объекты и Волго-Ахтубинская пойма, а также запечатанные поверхности Волгограда и орошаемые массивы. Наибольшая температура наблюдается на пустырях и богарных сельскохозяйственных полях. В случае с водными объектами и озеленёнными площадями причина более низкой температуры очевидна: большая теплоёмкость воды, транспирация растительности и затенённость

поверхности кронами деревьев. Более низкая дневная температура запечатанных поверхностей по сравнению с пустырями, на наш взгляд, может быть вызваны двумя причинами. Во-первых, во время пролёта спутника (примерно 11:00) площадь застроенных территорий ещё не прогревается до максимума, поскольку солнце только приближается к зениту. Кроме того, из-за высокой рельефоидности многоэтажной застройки при низкой высоте солнца значительные площади заняты тенями зданий и в утренние часы не успевают прогреться (Ле Минь Туан и др., 2019; Попова, 2018). Также если при выполнении космической тепловой съёмки визирование производится не в надир, то в мгновенное поле зрение сканера кроме крыш и дорог попадают и стены домов, характеризующиеся высокой тепловой инерцией (Горный и др., 2017). Во-вторых, этому может способствовать географическое положение Волгограда, основная часть жилой и промышленной застройки которого как бы «зажата» между крутыми склонами Приволжской возвышенности с востока и акваторией Волги с запада. Ярко выраженный холмистый рельеф с одной стороны и влияние крупной реки — с другой создают в приземном слое атмосферы города столкновение горно-долинного и бризового типов циркуляции, что в итоге приводит к большему различию температуры воздуха между повышенными и пониженными участками (Омаров и др., 2020). Изменение параметров микроклимата под влиянием реки возможно в зоне 2,5–3 км на незастроенных территориях, для застройки зона влияния снижается в 1,5–2 раза (Филатов, 1986). Пустыри же в возвышенной западной части агломерации равномерно нагреваются при любых солнечных зенитных углах и ко времени пролёта спутника имеют большую температуру. Вышеизложенное подтверждается статистически значимыми коэффициентами корреляции (*табл. 1*).

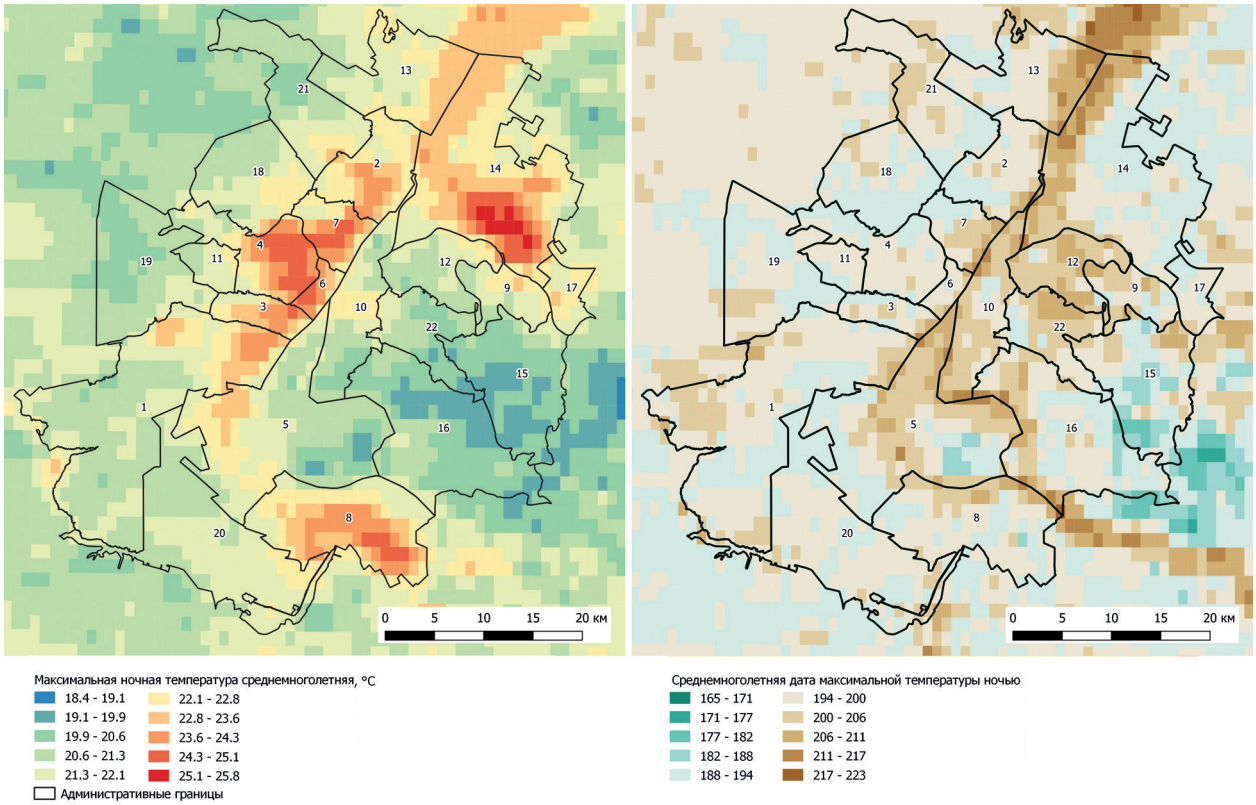
Таблица 1. Коэффициенты корреляции (*r*) среднемноголетней дневной и ночной температуры и среднемноголетней максимальной дневной и ночной температуры с долей площадей различных типов подстилающей поверхности по пикселям MODIS и их значимость (α)

Показатель температуры	Водоёмы		Экранированные поверхности		Озеленение и орошение		Пустыри	
	r	α	*r*	α	*r*	α	*r*	α
Дата дневного максимума	0,37	0,001	–0,27	0,001	0,23	0,001	–0,29	0,001
Дата ночного максимума	0,64		–0,03	0,104	0,02	0,382	–0,43	
Дневной максимум	–0,72		0,07	0,006	–0,44	0,001	0,80	
Ночной максимум	0,21		0,69	0,001	–0,37		–0,23	
Средняя дневная	–0,76		0,10		–0,36		0,75	
Средняя ночная	0,53		0,55		–0,15		–0,54	

Между максимальной дневной температурой и площадью пустырей наблюдается положительная высокая связь ($r = 0{,}80$), а с площадью водоёмов и озеленения — отрицательная высокая ($r = -0{,}72$) и слабая ($r = -0{,}44$) соответственно. Между датами с максимальной дневной температурой и свойствами подстилающей поверхности нет устойчивой связи. Слабая положительная корреляция имеется только с долей площади водных объектов. Это объясняется большим периодом времени, которое требуется для прогревания воды: соответственно, дата с максимальной температурой смещается на более поздний срок. В целом средневзвешенная максимальная температура имеет очень высокую положительную связь с годовым максимумом температуры воздуха ($r = 0{,}92$), также как и дата наблюдения максимальной температуры поверхности с днём максимальной температуры воздуха ($r = 0{,}91$). Среднемноголетняя дневная температура в целом также связана с характеристиками подстилающей поверхности, как и максимальная. Но связь с температурой воздуха более слабая ($r = 0{,}71$).

В ночное время в отличие от дневного более высокую температуру имеют именно запечатанные поверхности ($r = 0{,}69$) и водные объекты (*рис. 4а*, см. с. 133). Карта ночной температуры выглядит «классически» для городского острова тепла: градиент температуры направлен

к районам с наиболее плотной застройкой (Демин, 2019). Площади озеленения слабо влияют на ночной максимум температуры ($r = -0{,}37$), тем не менее в Волго-Ахтубинской пойме ночные максимумы самые низкие.



а *б*

Рис. 4. Среднемноголетняя максимальная ночная температура (*а*) и среднемноголетняя дата максимальной ночной температуры (*б*) (номера см. в *табл. 2*)

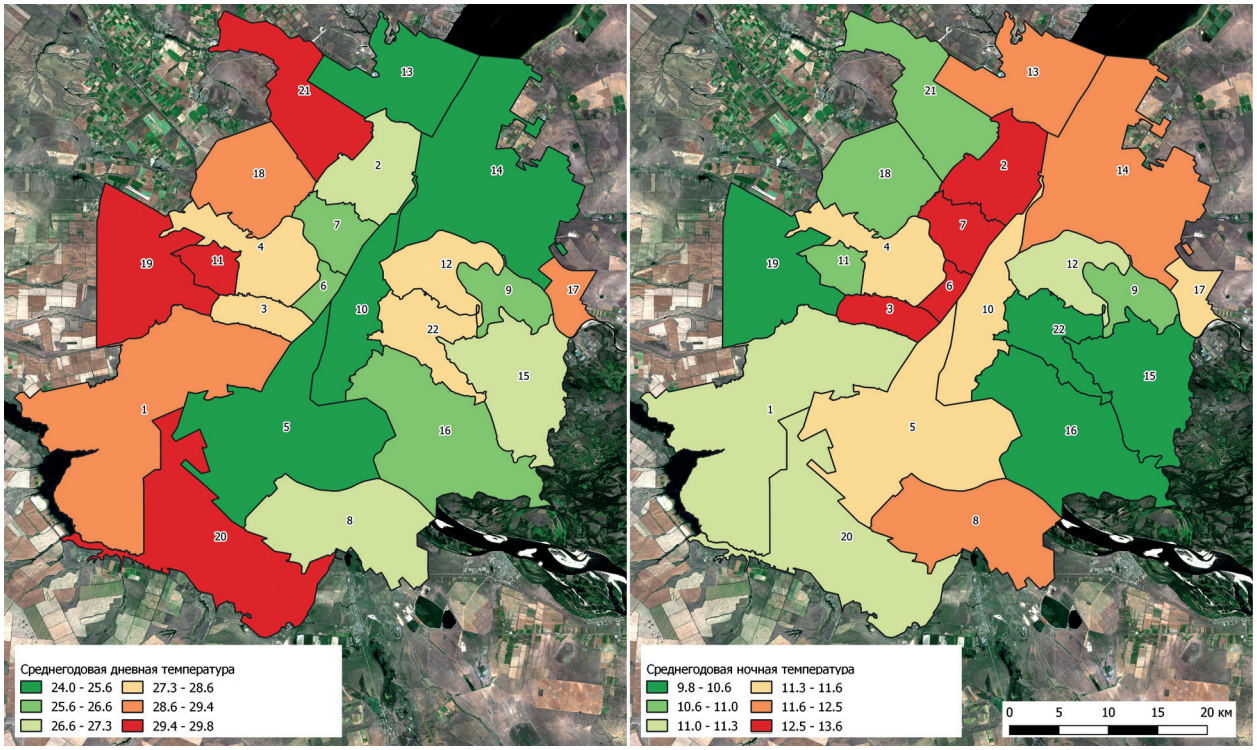
Застройка и асфальтобетонные покрытия в течение дня аккумулируют тепло и отдают его в ночное время. Кроме этого, возможно влияние теплосетей горячего водоснабжения в густонаселённых районах.

Площадь водоёмов в большей степени определяет дату наблюдения максимальной ночной температуры, чем дневной ($r = 0{,}64$). Среднемноголетняя ночная температура поверхности имеет более сильную положительную связь с долей площади водных объектов ($r = 0{,}53$) и отрицательную — с долей площадей пустырей ($r = -0{,}54$). Ночная температура поверхности имеет сильную связь ($r = 0{,}86$) с температурой воздуха.

При достаточно устойчивых погодных условиях интенсивность острова тепла имеет чётко выраженный суточный ход с максимумом через несколько часов после захода солнца и минимумом в середине дня. Особенно заметно разница температур между городом и сельской местностью нарастает после захода солнца, так как город остывает значительно медленнее. В течение ночи разница температур выравнивается, после восхода солнца сельская местность с большой долей сельскохозяйственных земель и малой площадью искусственных поверхностей прогревается более интенсивно (Попова, 2018).

В среднем даты ночной максимальной температуры наступают раньше дневных (см. *рис. 3б*, *4б*). В Волго-Ахтубинской пойме разница может достигать 2–3 недель: даты дневных максимумов приходятся на вторую-третью декаду июля, ночных — на конец июня. Пространственное распределение даты наступления ночного максимума характеризуется меньшей «пестротой» по сравнению с дневным. Для пойменных ландшафтов также минимальна разница средних дневных и ночных температур: до 15–17 °С.

Для принятия решений по выбору градостроительных мероприятий важно определить особенности теплового режима в разрезе единиц административно-территориального деления. Для этого были подсчитаны средневзвешенные значения среднегодовой и среднемноголетней максимальной дневной и ночной температуры для муниципальных образований и административных районов Волгоградской агломерации (*рис. 5*).



а *б*

Рис. 5. Средневзвешенная дневная (*а*) и ночная (*б*) температура по административным районам и муниципальным образованиям, °С

Наибольшая дневная температура отмечена на территории Царицынского, Краснопахаревского, Кировского и Орловского сельских поселений, городских поселений Средняя Ахтуба и Городищенского. Площадь этих муниципальных образований на 80–90 % состоит из богарных сельскохозяйственных земель, пастбищ и пустырей. Меньшая дневная температура — в прибрежных Центральном и Кировском районах Волгограда, а также городском поселении Краснослободск и г. Волжском. В ночное время, наоборот, наибольшая температура наблюдается в наиболее застроенных районах города: Ворошиловском, Центральном, Краснооктябрьском и Тракторозаводском. Это связано с преобладанием многоэтажной застройки: увеличение высоты зданий при меньшей ширине улиц приводит к снижению скорости охлаждения городской среды по сравнению с сельской местностью (Шукуров, 2006). Самая низкая ночная температура — в Волго-Ахтубинской пойме, где до 40–50 % занято лесами и заливными лугами при минимальной доле экранированных поверхностей (не более 5–7 %). Как видно из *табл. 2*, даты максимальной температуры поверхности практически во всех административно-территориальных единицах приходятся на вторую декаду июля (13–21 июля), как и максимумы температуры воздуха (13 июля – 14 августа).

Анализ теплового поля в разрезе муниципальных образований показывает несколько иную картину зависимости средневзвешенной температуры от свойств подстилающей поверхности, чем при сравнении по регулярной сетке (*табл. 3*). Дневная температура и площадь озеленения при этом имеют отрицательную среднюю связь для среднемноголетней температуры ($r = -0{,}54$) и среднемноголетней максимальной ($r = -0{,}64$). Также наблюдается более сильная

связь между площадью экранированных поверхностей и ночной температурой ($r = 0{,}91$). Для среднемноголетней среднесуточной температуры установлена сильная отрицательная связь с площадью озеленения ($r = -081$), средняя положительная — с площадью пустырей ($r = 0{,}61$) и средняя отрицательная — с площадью водоёмов ($r = -0{,}43$). Коэффициент корреляции среднесуточной температуры поверхности и воздуха равен 0,8.

Таблица 2. Среднемноголетние показатели температуры подстилающей поверхности

Районы Волгограда и муниципальные образования	Средняя дата дневного максимума	Средний дневной максимум, °C	Средняя дата ночного максимума	Средний ночной максимум, °C
1. Советский	194	41,9	196	21,6
2. Тракторозаводский	195	39,4	197	22,8
3. Ворошиловский	195	39,9	197	23,1
4. Дзержинский	194	41,2	196	23,2
5. Кировский	199	37,6	199	21,4
6. Центральный	191	37,7	199	23,7
7. Краснооктябрьский	194	39,0	199	23,3
8. Красноармейский	197	40,0	197	23,0
9. Ахтубинское	200	38,4	200	21,7
10. Краснослободск	201	35,5	202	21,4
11. Царицынское	194	43,5	195	21,7
12. Кировское (Среднеахтубинский р-н)	199	39,1	202	21,4
13. Ерзовское	193	37,1	200	22,2
14. Волжский	197	36,6	199	23,1
15. Куйбышевское	201	38,2	194	20,1
16. Клетское	201	37,7	197	20,3
17. Средняя Ахтуба	198	42,7	196	22,2
18. Городищенское	197	42,6	195	21,5
19. Краснопахаревское	194	43,3	196	20,8
20. Кировское (Светлоярский р-н)	199	43,3	196	21,6
21. Орловское	196	42,9	197	21,2
22. Фрунзенское	194	40,2	199	20,7

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (r) средневзвешенной дневной и ночной температуры, дневного и ночного максимумов температуры с долей площадей различных типов подстилающей поверхности по административно-территориальным единицам и их значимость (α)

Показатель температуры	Водоёмы		Экранированные поверхности		Озеленение и орошение		Пустыри	
	r	α	r	α	r	α	r	α
Дата дневного максимума	–0,23	0,307	–0,51	0,016	0,68	0,001	–0,11	0,616
Дневной максимум	–0,71	0,001	–0,17	0,445	–0,64	0,001	0,88	0,001
Дата ночного максимума	0,54	0,009	0,03	0,904	0,41	0,061	–0,53	0,010
Ночной максимум	0,46	0,032	0,91	0,001	–0,47	0,026	–0,40	0,066
Средняя дневная	–0,79	0,001	–0,21	0,336	–0,54	0,008	0,85	0,001
Средняя ночная	0,67	0,001	0,81	0,001	–0,36	0,082	–0,49	0,014

Из четырёх выделенных типов подстилающей поверхности при градостроительном планировании возможно изменять в значительных пределах площадь только трёх: экранированных и озеленённых поверхностей, а также пустырей. Поэтому необходим инструмент для определения лучшего соотношения этих площадей. На *рис. 6* показаны регрессионные зависимости температуры от соотношения озеленённых, застроенных площадей и пустырей. Для дневной температуры в числителе — только доля озеленения, для ночной — сумма озеленения и пустырей. Для среднесуточной температуры установлен линейный характер зависимости от отношения зелёных зон к сумме застройки и пустырей с коэффициентом корреляции $r = 0{,}95$:

$$T = -2{,}3388x + 20{,}338,$$

где T — температура поверхности, °C; x — отношение площади озеленения к сумме площадей запечатанных поверхностей и пустырей.

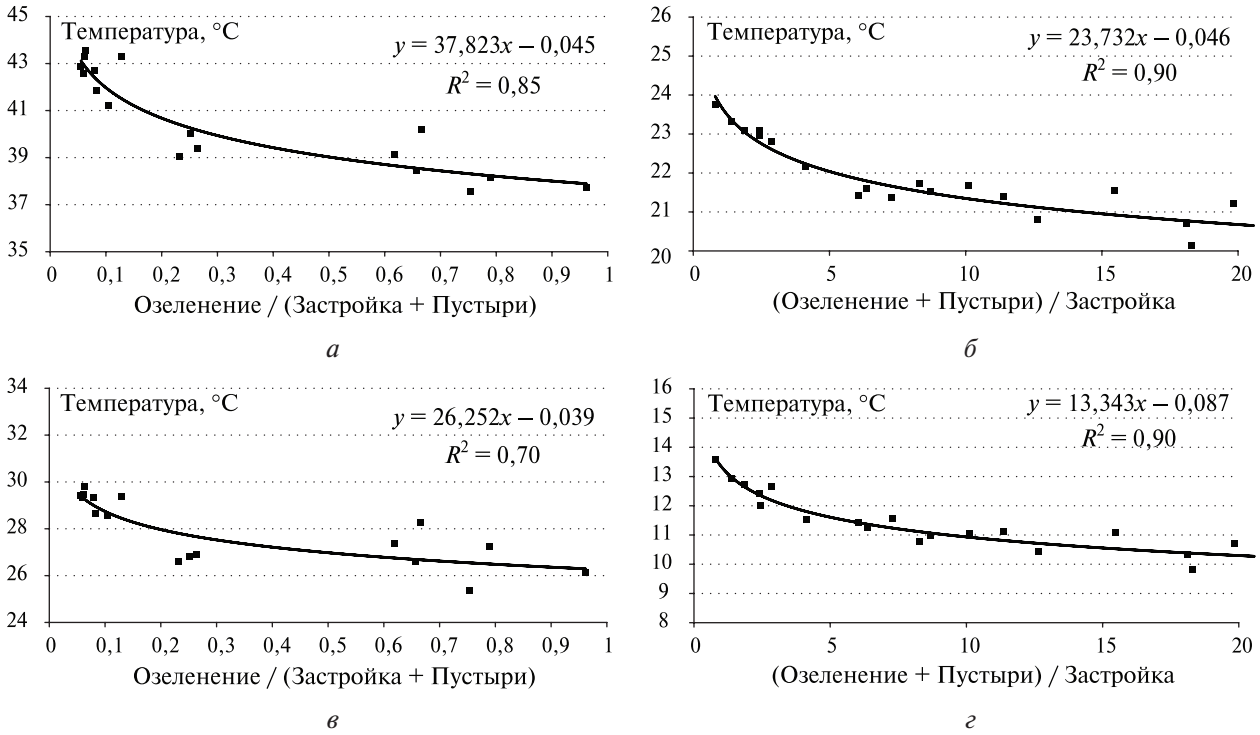


Рис. 6. Связи между среднемноголетней максимальной дневной температурой (*а*), среднемноголетней максимальной ночной (*б*), среднемноголетней дневной (*в*) и среднемноголетней ночной температурой (*г*) и отношением площадей разных типов подстилающей поверхности

Таким образом, полученные соотношения помогут учесть влияние различных типов подстилающей поверхности на температуру при составлении генеральных планов и других программ развития территории Волгоградской агломерации. В дальнейшем необходима доработка зависимостей с учётом ранжирования по геоморфологическим условиям (в первую очередь — экспозиции склонов), преобладающих направлений ветров и функционального зонирования. Эта работа потребует данных с более высоким пространственным разрешением, чем у использованных в настоящем исследовании информационных продуктов MODIS.

Заключение

Впервые в рамках тематических направлений журнала изучены особенности поверхностного городского острова тепла и влияние на его свойства подстилающей поверхности. Установлено, что максимальная температура днём в большей степени зависит от доли площади, занятой

пустырями и богарной пашней, чем от запечатанности почвенного покрова. Площадь запечатанных поверхностей, напротив, влияет на ночную температуру, делая городской остров тепла контрастным именно в ночное время. Озеленение и водоёмы способствуют снижению дневной температуры. Большое влияние на температурные градиенты оказывает акватория Волги, поток холодного воздуха с которой остужает поверхность города.

Проведённое исследование и полученные результаты позволяют утверждать, что города с высоким уровнем запечатанности почвенного покрова более уязвимы к изменению климата и нуждаются в надлежащих адаптационных мерах, таких как увеличение доли озеленённых территорий. Выявленные связи позволят эффективнее определять соотношение озеленённых и застроенных площадей для достижения более комфортных микроклиматических условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Волгоградской обл. в рамках проекта № 19-45-343001 с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса ВЕГА (Барталев и др., 2012).

Литература

1. *Балдина Е. А.*, *Грищенко М. Ю.* Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. «География». 2014. № 3. С. 35–41.
2. *Барталев С. А.*, *Ершов Д. В.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
3. *Варенцов М. И.*, *Константинов П. И.*, *Самсонов Т. Е.*, *Репина И. А.* Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.
4. *Гордиенко О. А.*, *Манаенков И. В.*, *Холоденко А. В.*, *Иванцова Е. А.* Картографирование и оценка степени запечатанности почв города Волгограда // Почвоведение. 2019. № 11. Т. 52. С. 1383–1392.
5. *Горный В. И.*, *Лялько В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.*, *Тронин А. А.*, *Филиппович В. Е.*, *Станкевич С. А.*, *Бровкина О. В.*, *Киселев А. В.*, *Давидан Т. А.*, *Лубский Н. С.*, *Крылова А. Б.* Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съёмок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.
6. *Горный В. И.*, *Крицук С. Г.*, *Латыпов И. Ш.*, *Тронин А. А.*, *Киселев А. В.*, *Бровкина О. В.*, *Филиппович В. Е.*, *Станкевич С. А.*, *Лубский Н. С.* Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съёмок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 74–89.
7. *Демин В. И.* О роли антропогенных и естественных факторов в оценке городского острова тепла // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 25–33.
8. *Дубровская С. А.* Тепловая структура города Симферополя по результатам обработки мультиспектральных изображений // Успехи современного естествознания. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 72–77.
9. *Ермакова Е. В.*, *Мартыненко И. А.* Оценка влияния запечатанности поверхности почвенного покрова на распределение температуры поверхности в условиях города на примере юго-восточного округа г. Москвы // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2011. № 12(131). С. 68–70.
10. *Зимовец П. А.* Ландшафтное зонирование урбогеосистем города Волжского // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. «География. Геоэкология». 2016. № 3. С. 61–65.
11. *Константинов П. И.*, *Грищенко М. Ю.*, *Варенцов М. И.* Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 27–33.
12. *Крицук С. Г.*, *Горный В. И.*, *Латыпов И. Ш.*, *Павловский А. А.*, *Тронин А. А.* Спутниковое картирование риска перегрева поверхности городской среды (на примере Санкт-Петербурга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 34–44.
13. *Кулик К. Н.*, *Рулев А. С.*, *Кошелева О. Ю.* Почвенный покров урбанизированных территорий: идентификация и картографирование по космическим снимкам // Проблемы региональной экологии. 2015. № 3. С. 121–126.

14. *Ле Минь Туан*, *Шукуров И. С.*, *Нгуен Тхи Май*. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 3. С. 1–22.
15. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
16. *Мягков М. С.* Микроклимат и биоклиматическая комфортность традиционной арабской застройки // Архитектура и современные информац. технологии. 2019. № 4(49). С. 235–261.
17. *Омаров Р. С.*, *Шинкаренко С. С.*, *Кошелева О. Ю.* Геоморфологические особенности территории Волгограда как базовые характеристики, влияющие на «городской остров тепла» // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 1. С. 147–158.
18. *Погорелов А. В.*, *Липилин Д. А.* Тепловой «портрет» города Краснодара по данным спутниковых снимков // Вестн. Пермского нац. исследоват. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 4. С. 32–45.
19. *Попова И. В.* Методика геоэкологической оценки комфортности городской среды с учетом микроклиматических особенностей: дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2018. 198 с.
20. Почва. Город. Экология / под ред. Г. В. Добровольского. М.: Изд-во «Фонд за экономическую грамотность», 1997. 320 с.
21. *Рулев А. С.*, *Шинкаренко С. С.*, *Кошелева О. Ю.* Оценка влияния гидрологического режима Волги на динамику затопления острова Сарпинский // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. «Естественные науки». 2017. Т. 159. Кн. 1. С. 139–151.
22. *Савельев А. С.*, *Морозова О. Г.*, *Веселкова Н. С.* Термический режим поверхности водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 177–189.
23. *Савин И. Ю.* Картографирование экраноземов Московской агломерации по спутниковым данным Landsat // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 55–61.
24. *Тронин А. А.*, *Горный В. И.*, *Груздев В. Н.*, *Шилин Б. В.* Многолетние аэрокосмические наблюдения температуры земной поверхности Северо-Западного региона РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 73–96.
25. *Филатов О. А.* Микроклимат прибрежных территорий городских агломераций // Природа и хозяйственная деятельность в Нижнем Поволжье: сб. науч. тр. Волгоград: ВГПИ им. А. С. Серафимовича, 1986. С. 67–74.
26. *Шукуров И. С.* Исследование конвективных потоков в условиях многоэтажной застройки // Жилищное стр-во. 2006. № 9. С. 22–23.
27. *Giannopoulou K.*, *Santamouris M.*, *Livada I.*, *Georgakis C.*, *Caouris Y.* The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions // Pure and Applied Geophysics. 2010. V. 167. Iss. 11. P. 1433–1449.
28. *Hardin A. W.*, *Liu Y.*, *Cao G.*, *Vanos J. K.* Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast U. S. // Urban Climate. 2018. V. 24. P. 747–762.
29. *Imhoff M. L.*, *Zhang P.*, *Wolfe R. E.*, *Bounoua L.* Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114(3). P. 504–513.
30. *Peng S.*, *Piao S.*, *Ciais P.*, *Friedlingstein P.*, *Ottle C.*, *Bréon F.-M.*, *Nan H.*, *Zhou L.*, *Myneni R. B.* Surface urban heat island across 419 global big cities // Environmental Science and Technology. 2011. No. 46. P. 696–703.
31. *Schwarz N.*, *Lautenbach S.*, *Seppelt R.* Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European citieswith MODIS land surface temperatures // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 3175–3186.
32. *Voogt J. A.*, *Oke T. R.* Thermal remote sensing of urban climates // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 86. P. 370–384.
33. *Zhou D.*, *Zhao S.*, *Liu S.*, *Zhang L.*, *Zhu C.* Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 152. P. 51–61.

Analysis of the effect of soil sealing and landscaping on the thermal field of the Volgograd agglomeration from MODIS data

S. S. Shinkarenko [1,2,3], O. Yu. Kosheleva [2], O. A. Gordienko [2,3], A. A. Dubacheva [3], R. S. Omarov [2,3]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
[2] *Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS Volgograd 400062, Russia*
[3] *Volgograd State University, Volgograd 400062, Russia*
E-mails: shinkarenko@vfanc.ru, olya_ber@mail.ru

The paper presents the results of studying the influence of landscaping area and surface sealing on the surface temperature of the city. The research object is the territory of the Volgograd agglomeration with a total area of 2.26 thousand sq. km — the cities of Volgograd, Volzhsky and Krasnoslobodsk, as well as the adjacent territories of urban and rural settlements. The data source is the MODIS earth surface temperature information product, 8-day MOD11A2 data (about 10 % of the data is MYD11A2). There are 4 types of underlying surface on the territory of the agglomeration: water bodies, shielded and greened surfaces, wasteland and rain-fed arable land. The degree of soil sealing and landscaping within the borders of administrative divisions is determined. There are differences between different types of underlying surface at different times of the day. During the day, the highest temperatures are observed in vacant lots and rainfed agricultural fields, while water bodies, irrigated land and sealed surfaces are characterized by lower temperatures. A positive high relationship ($r = 0.80$) between the maximum daily temperature and the area of wasteland, a negative high ($r = -0.72$) one between the maximum daily temperature and the area of reservoirs were found. At night, on the contrary, buildings, asphalt concrete surfaces and water bodies that have warmed up during the day have a higher surface temperature, a high relationship ($r = 0.69$) was established between the maximum night temperature and the area of sealed surfaces. The distribution of the heat field in the context of municipalities of the Volgograd agglomeration was considered. Maximum daytime temperatures were observed on the territory of municipalities, which consist of 80–90 % of rain-fed agricultural land, pastures and wasteland. In the most built-up areas of Volgograd, the maximum effect of urban heat island was observed at night. For mean annual temperature, a strong negative relationship was established with the landscaping area ($r = -0.81$), the average positive with the area of vacant lots ($r = 0.61$), and the average negative relationship with the area of water bodies ($r = -0.43$). To determine the optimal ratio of different types of surfaces in the city, the regression dependences of temperatures on the ratio of green, built-up and undeveloped areas (wasteland) were shown. The linear nature of the dependence of average daily temperatures on the ratio of green zones to the sum of built-up and unbuilt surfaces with a correlation coefficient $r = 0.95$ was established.

Keywords: day surface temperature, night surface temperature, MODIS, Volgograd, agglomeration, heat island, underlying surface, soil sealing, landscaping

Accepted: 10.08.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-125-141

References

1. Baldina E. A., Grishhenko M. Yu., Metodika deshifrirovaniya raznovremennykh kosmicheskikh snimkov v teplovom infrakrasnom diapazone (Interpretation of multi-temporal space imagery in thermal infrared band), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. "Geografiya"*, 2014, No. 3, pp. 35–41.
2. Bartalev S. A., Ershov D. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovogo servisa VEGA dlya resheniya razlichnykh zadach monitoringa nazemnykh ekosistem (Possibilities of Satellite Service VEGA Using for Different Tasks of Land Ecosystems Monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56.
3. Varentsov M. I., Konstantinov P. I., Samsonov T. E., Repina I. A., Izuchenie fenomena gorodskogo ostrova tepla v usloviyakh polyarnoi nochi s pomoshch'yu eksperimental'nykh izmerenii i distantsionnogo zondirovaniya na primere Noril'ska (Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 329–337.

4. Gordienko O. A., Manaenkov I. V., Kholodenko A. V., Ivantsova E. A., Kartografirovanie i otsenka stepeni zapechatannosti pochv goroda Volgograda (Mapping of soils and assessment of sealed areas in the city of Volgograd), *Pochvovedenie*, 2019, No. 11, Vol. 52, pp. 1383–1392.
5. 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., Lubskii N. S., Krylova A. B., Prognoz teplovoi reaktsii gorodskoi sredy Sankt-Peterburga i Kieva na izmenenie klimata (po materialam s″emok sputnikami EOS i Landsat) (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*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 176–191.
6. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Kiselev A. V., Brovkina O. V., Filippovich V. E., Stankevich S. A., Lubskii N. S., Teplofizicheskie svoistva poverkhnosti gorodskoi sredy (po rezul'tatam sputnikovykh s″emok Sankt-Peterburga i Kieva) (Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 74–89.
7. Demin V. I., O roli antropogennykh i estestvennykh faktorov v otsenke gorodskogo ostrova tepla (Role of anthropogenic and natural drivers in estimation of urban heat island), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 25–33.
8. Dubrovskaya S. A., Teplovaya struktura goroda Simferopolya po rezul'tatam obrabotki mul'tispektral'nykh izobrazhenii (Thermal structure of the Simferopol on the result of multispectral images processing), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. Nauki o Zemle*, 2017, No. 4, pp. 72–77.
9. Ermakova E. V., Martynenko I. A., Otsenka vliyaniya zapechatannosti poverkhnosti pochvennogo pokrova na raspredelenie temperatury poverkhnosti v usloviyakh goroda na primere yugo-vostochnogo okruga g. Moskvy (Estimation of influence of sealing of the soil surface on the surface temperature distribution in the city as an example South-East district of Moscow), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, No. 12(131), pp. 68–70.
10. Zimovets P. A., Landshaftnoe zondirovanie urbogeosistem goroda Volzhskogo (Landscape zoning of urban geosystems of Volzhsky city), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Geografiya. Geoekologiya"*, 2016, No. 3, pp. 61–65.
11. Konstantinov P. I., Grishchenko M. Yu., Varentsov M. I., Kartografirovanie ostrovov tepla gorodov Zapolyar'ya po sovmeshchennym dannym polevykh izmerenii i kosmicheskikh snimkov na primere g. Apatity (Murmanskaya oblast') (Mapping of Arctic cities urban heat island based on the composition of field meteorological measurements and satellite-derived imagery (example of Apatity, Kola Peninsula)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 3, pp. 27–33.
12. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Pavlovskii A. A., Tronin A. A., Sputnikovoe kartirovanie riska peregreva poverkhnosti gorodskoi sredy (na primere Sankt-Peterburga) (Satellite risk mapping of urban surface overheating (by the example of Saint Petersburg)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 34–44.
13. Kulik K. N., Rulev A. S., Kosheleva O. Yu., Pochvennyi pokrov urbanizirovannykh territorii: identifikatsiya i kartografirovanie po kosmicheskim snimkam (Soil cover of urban areas: identification and mapping on space images), *Problemy regional'noi ekologii*, 2015, No. 3, pp. 121–126.
14. Le Min' Tuan, Shukurov I. S., Nguen Thi Maj, Issledovanie intensivnosti gorodskogo ostrova tepla na osnove gorodskoi planirovki (A study case of urban heat island intensity based on urban geometry), *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*, 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 1–22.
15. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
16. Myagkov M. S., Mikroklimat i bioklimaticheskaya komfortnost' traditsionnoi arabskoi zastroiki (Microclimate and bioclimatic comfort of traditional Arab urban structure), *Architecture and Modern Information Technologies*, 2019, No. 4(49), pp. 235–261.
17. Omarov R. S., Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Geomorfologicheskie osobennosti territorii Volgograda kak bazovye kharakteristiki, vliyayushchie na gorodskoi ostrov tepla (Geomorphological features of the territory of Volgograd as basic characteristics that affect the city's heat island), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2020, No. 1, pp. 147–158.
18. Pogorelov A. V., Lipilin D. A., Teplovoi "portret" goroda Krasnodara po dannym sputnikovykh snimkov (Thermal "portrait" of the city of Krasnodar based on satellite images), *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2016, No. 4, pp. 32–45.

19. Popova I. V., *Metodika geoekologicheskoi otsenki komfortnosti gorodskoi sredy s uchetom mikroklimaticheskikh osobennostei*: *Diss. kand. geogr. nauk* (Method of geoecological assessment of comfort of the urban environment taking into account microclimatic features, Cand. georg. sci. thesis), Voronezh, 2018, 198 p.
20. *Pochva. Gorod. Ekologiya* (Soil. City. Ecology), Dobrovol'skii G. V. (ed.), Moscow: Izd. "Fond za ekonomicheskuyu gramotnost' ", 1997, 310 p.
21. Rulev A. S., Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Otsenka vliyaniya gidrologicheskogo rezhima Volgi na dinamiku zatopleniya ostrova Sarpinskii (Assessment of influence of hydrological regime of the Volga on dynamics of flooding on Sarpinsky island), *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta*, *Seriya "Estestvennye nauki"*, 2017, Vol. 159, No. 1, pp. 139–151.
22. Savel'ev A. S., Morozova O. G., Veselkova N. S., Termicheskii rezhim poverkhnosti vodoema-okhladitelya Berezovskoi GRJeS-1 po dannym MODIS (Thermal regime of the pond-cooler surface of Beryozovskaya GRES-1 from MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 177–189.
23. Savin I. Yu., Kartografirovanie ekranozemov Moskovskoi aglomeratsii po sputnikovym dannym Landsat (Sealed soils (ecranozems) mapping in Moscow agglomeration based on Landsat images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 5, pp. 55–61.
24. Tronin A. A., Gornyy V. I., Gruzdev V. N., Shilin B. V., Mnogoletnie aerokosmicheskie nablyudeniya temperatury zemnoi poverkhnosti Severo-Zapadnogo regiona RF (Long-term remote observations of land surface temperature of the North-Western region of Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 73–96.
25. Filatov O. A., Mikroklimat pribrezhnykh territorii gorodskikh aglomeratsii (Microclimate in the coastal areas of urban agglomerations), *Priroda i khozyaistvennaya deyatel'nost' v Nizhnem Povolzh'e*, Proc. Conf., Volgograd, VGPI im. A. S. Serafimovicha, 1986, pp. 67–74.
26. Shukurov I. S., Issledovanie konvektivnykh potokov v usloviyakh mnogoetazhnoi zastroiki (Study of convective flows in multi-storey buildings), *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2006, No. 9, pp. 22–23.
27. Giannopoulou K., Santamouris M., Livada I., Georgakis C., Caouris Y., The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions, *Pure and Applied Geophysics*, 2010, Vol. 167, Issue 11, pp. 1433–1449.
28. Hardin A. W., Liu Y., Cao G., Vanos J. K., Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast U. S., *Urban Climate*, 2018, Vol. 24, pp. 747–762.
29. Imhoff M. L., Zhang P., Wolfe R. E., Bounoua L., Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114(3), pp. 504–513.
30. Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Ottle C., Bréon F.-M., Nan H., Zhou L., Myneni R. B., Surface urban heat island across 419 global big cities, *Environmental Science and Technology*, 2011, No. 46, pp. 696–703.
31. Schwarz N., Lautenbach S., Seppelt R., Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European citieswith MODIS land surface temperatures, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 3175–3186.
32. Voogt J. A., Oke T. R., Thermal remote sensing of urban climates, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, pp. 370–384.
33. Zhou D., Zhao S., Liu S., Zhang L., Zhu C., Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 152, P. 51–61.