

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### СВЯЗЬ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И NDVI УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАСУШЛИВОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ВОЛГОГРАДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ)

© 2021 г. С. С. Шинкаренко<sup>a, b, \*</sup>, О. Ю. Кошелева<sup>a</sup>, О. А. Гордиенко<sup>a</sup>,  
А. А. Дубачева<sup>c</sup>, Р. С. Омаров<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН,  
Волгоград, Россия

<sup>b</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup>Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

\*E-mail: [shinkarenkos@vifanc.ru](mailto:shinkarenkos@vifanc.ru)

Поступила в редакцию 19.03.2021 г.

По данным продуктов MODIS определены и сопоставлены значения температуры земной поверхности и NDVI для территории Волгоградской агломерации. По снимкам Sentinel-2 проведено ландшафтное зонирование агломерации с выделением 5 категорий земель, которые различаются соотношением площадей запечатанных поверхностей, озелененных поверхностей и водоемов, в том числе внутри границ административно-территориальных единиц. Построена карта пространственного распределения ландшафтных зон по территории Волгоградской агломерации и установлена площадь каждой категории земель. Установлены коэффициенты корреляции и их сезонное варьирование для связи дневной, ночной и среднесуточной температуры с NDVI. Выявлены особенности взаимосвязи NDVI с температурой поверхности для различных категорий земель и в пределах отдельных муниципальных образований. Анализ показал, что самая слабая связь между температурой поверхности и NDVI наблюдается в муниципальных образованиях, на территории которых преобладает богарная пашня и пустыри, а наиболее сильная – у самых озелененных площадей. Исследование показало, что если в площади преобладает застройка, то независимо от состояния растительного покрова, эффект городского острова тепла проявляется в ночное время. Для участков с преобладанием озеленения связь NDVI и температуры поверхности практически не выражена, только летом наблюдается охлаждающее действие растительности.

**Ключевые слова:** температура земной поверхности, MODIS, Волгоград, агломерация, городской остров тепла, подстилающая поверхность, запечатанность почв, озеленение

**DOI:** 10.31857/S0205961421040084

#### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мир переживает беспрецедентную волну урбанизации, которая с точки зрения ландшафта проявляется как процесс трансформации землепользования и почвенно-растительного покрова. Замена естественного ландшафта на искусственный привела к изменению поверхностного излучения, процессов теплопоглощения и теплоотдачи. Эти изменения формируют городской остров тепла (urban heat island, ГОТ), который в ряде случаев может выступать как серьезная экологическая проблема, так как приводит к ухудшению качества воздуха, увеличению загрязнения окружающей среды, образованию «острова сухости», создает угрозу физическому здоровью и качеству жизни горожан (Горлач и др., 2017; Крицук и др., 2019).

Установлено, что величина температуры земной поверхности (Land Surface Temperature – LST) зависит от пространственных свойств подстилающей поверхности, в частности от типа землепользования, степени запечатанности поверхности и площади озеленения (Yuan, Bauer, 2007; Yang et al., 2017; Шинкаренко и др., 2020; Кошелева и др., 2021). Индикаторами наличия и плотности зеленой растительности являются вегетационные индексы, которые успешно используются для мониторинга сезонной растительной активности. Наиболее известным и часто используемым в научных исследованиях является нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), определяющий фотосинтетическую активность растительного покрова по данным отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра (Шевырных и др., 2012; Статакис и др.,

2012; Шарый и др., 2020). Результаты многочисленных зарубежных исследований показывают, что существует ярко выраженная отрицательная корреляция между NDVI и температурой земной поверхности (Weng et al., 2004; Zhang X. et al., 2010; Zhang Y. et al., 2012; Adulkongkaew et al., 2020). Это дает основания сформулировать один из главных постулатов: для управления эффектом теплового острова в городах следует учитывать соотношение типов подстилающей поверхности и, в первую очередь, озелененных и неозелененных пространств. Авторы одного из исследований (Adulkongkaew et al., 2020) на примере Бангкока доказывают, что, увеличив полог древесной растительности до 20%, а площадь низового озеленения (газоны, кустарники, рисовые поля) до 40% застройки, можно значительно уменьшить LST городской территории. К сожалению, подобные показатели озеленения городов засушливых регионов России вряд ли достижимы, однако нельзя отрицать тот факт, что температура земной поверхности может быть эффективно смягчена за счет использования зеленых насаждений, общественных парков и водоемов.

Целью данного исследования является оценка взаимосвязи сезонных изменений NDVI и температуры земной поверхности для определения эффекта теплового острова на территориях, покрытых и непокрытых растительностью в условиях засушливого климата юга России.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Волгоградская агломерация занимает площадь около 2.3 тыс. км<sup>2</sup>, располагаясь по обоим берегам Волгоградского водохранилища и захватывая северную часть Волго-Ахтубинской поймы. В границы агломерации, помимо самого Волгограда, входят города Волжский и Краснослободск, рабочий поселок Городище, поселки городского типа Светлый Яр и Средняя Ахтуба, а также ряд смежных административных единиц (городских и сельских поселений). В ходе классификации композитных изображений Sentinel-2 за 2018 г., проведенной в более ранних исследованиях (Гордиенко и др., 2019; Шинкаренко и др., 2020), установлено, что значительную часть (59.2%) в пределах Волгоградской агломерации занимают сельскохозяйственные угодья и пустыри. Остальная территория распределена между застройкой (14.0%), озелененными пространствами, к которым относятся пойменные леса о. Сарпинский и Волго-Ахтубинской поймы, а также искусственно созданный защитный лесной пояс на западе Волгограда (20.9%), и водными объектами (5.9%).

Климат рассматриваемой территории можно охарактеризовать как умеренно континентальный засушливый, с продолжительным и жарким летом и холодной неустойчивой зимой. Средне-

годовая температура воздуха в Волгограде составляет 8.8°C (Сажин и др., 2017). Активный ветровой режим и ярко выраженный перепад в рельефе (холмистый в правобережье, равнинный – в левобережной) формируют в приземном слое атмосферы аналогично горно-долинной циркуляции, которая приводит к большому различию температур воздуха между повышенными и пониженными участками и образованию зон застоя (Омаров и др., 2020).

### ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных для определения температуры земной поверхности послужили 8-дневные продукты MOD11A2 и MYD11A2 радиометра MODIS (спутники Terra и Aqua соответственно, соотношение использованных данных – 90 на 10%) разрешения около 0.01° (<https://search.earthdata.nasa.gov>). Для определения NDVI использованы 16-дневные композиты MOD13Q1 (спутник Terra) разрешения около 250 м. Выбор источников данных обусловлен высоким временным разрешением данных и практически непрерывным архивом с 2000 г. по настоящее время. Данные MODIS LST в отличие от снимков более высокого разрешения Landsat, хоть и не позволяют в полной мере выявить внутреннюю структуру ГОТ, но доступны также и на ночное время, что особенно важно для изучения эффекта ГОТ, который наиболее выражен именно ночью (Шинкаренко и др., 2020). Данные MODIS LST достаточно хорошо соотносятся с данными инструментальных измерений температуры (Константинов и др., 2015).

На первом этапе данные были сконвертированы в формат GeoTIF и перепроецированы из синусоидальной проекции в WGS 84/UTM (зона 38N) в пакетном режиме средствами утилиты MODIS Reprojection Tool. Далее был проведен анализ качества данных, и выбраны безоблачные сцены на район исследований. Выбирались снимки тех лет, для каждого из которых имеется не менее 15 ночных и дневных композитов на каждую дату и не менее 25 безоблачных суток за год. В итоге для исследования были отобраны 10 лет: 2003, 2005, 2007–2010, 2012, 2014, 2018, 2019 гг. Тепловое поле агломерации изучается нами только в теплое полугодие, с конца марта по середину ноября из-за частой и плотной облачности в остальной период и, следовательно, отсутствия качественных изображений. Среднее время пролета спутником Terra над районом исследований днем – 11 ч, а ночью – 22 ч; спутника Aqua днем – 13 ч, ночью – 1 ч по местному времени (Local solar time). Геоинформационная обработка снимков осуществлялась в программе QGIS.

Из-за того, что данные LST 8-дневные, а данные NDVI – 16-дневные, был произведен пере-

**Таблица 1.** Критерии выделения категорий земель в пределах Волгоградской агломерации

Категория		Типы земель	Площадь элемента в каждой категории, %		
			запечатано	озеленено	водоемы
I	Застроенные слабоозелененные	Жилая и производственная застройка	10–90	0–30	0–25
II	Застроенные озелененные	Индивидуальная жилая застройка, СНТ	10–90	30–80	0–25
III	Незастроенные слабоозелененные	Пустыри, сельскохозяйственные угодья	0–10	0–30	0–25
IV	Незастроенные озелененные	Волго-Ахтубинская пойма, крупные парки и лесопарки	0–10	30–100	0–25
V	Водные объекты и берега	Волгоградское водохранилище, р. Волга, крупные протоки	0–10	0–10	75–100

расчет LST в 16-дневные, посредством усреднения двух соседних значений. После этого были рассчитаны средние значения на каждую дату с 16-дневным интервалом (7.04.–23.04.–9.05. и т.д.) за все исследуемые годы. Затем рассчитана корреляция между температурой поверхности и NDVI по регулярной сетке, соответствующей размерам ячеек растров (пикселей) MODIS на каждую дату исследуемых лет.

Для определения категорий оцениваемых земель использован принцип ландшафтного зонирования, согласно которому возможно установление ландшафтного назначения планировочных единиц территории города посредством указания типа организации поверхности земли, характеризующего соотношением площадей застроенных и незастроенных поверхностей, с растительным покровом и без (Колбовский, 2008). Процедура ландшафтного зонирования агломерации осуществлялась по спутниковому снимку Sentinel-2 (тайлы T38UMU и T38UMV за 11 августа 2018 г.). В качестве территориальной единицы для оценки выступила ячейка растра MODIS. В пределах каждой ячейки выделялось 5 категорий земель, различающихся соотношением площадей запечатанных поверхностей (здания, дороги, участки под асфальтобетонным покрытием, такие как площади, тротуары, автостоянки, гаражи и т.д.), озелененных поверхностей и водоемов. В результате были установлены диапазоны площадей этих трех элементов, характерные для каждой категории (табл. 1).

Водные объекты, как и запечатанные поверхности, снижают NDVI. По этой причине пятая категория не анализировалась, т.к. наличие водоемов вносит существенную неопределенность при оценке роли озеленения в формировании эффекта городского острова тепла.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что сезонный ход температуры поверхности города повторяет ход среднесуточных температур воздуха (Кошелева и др., 2021). Многочисленные исследования также показывают, что существует сильная линейная зависимость между LST и долей непроницаемой поверхности и менее сильная и отрицательная связь между LST и долей растительности, выражаемой посредством нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Yuan, Bauer, 2007).

В табл. 2 представлены результаты подсчета площади каждой категории. В целом, анализ показывает, что озеленение Волгоградской агломерации в среднем составляет до 30%, следовательно, в структуре земель преобладают “слабоозелененные” категории (68% территории агломерации). Среди всех категорий наибольшую площадь занимает III – богарная пашня и пустыри.

Распределение территории Волгоградской городской агломерации и сопредельных территорий по пяти ландшафтным категориям земель по степени озеленения и запечатанности показано на рис. 1.

Для всех пикселей MODIS LST характерна высокая положительная значимая связь дневной температуры с NDVI в период 7–23 апреля ( $r = 0.71–0.75$ ,  $\alpha < 0.001$ ), далее коэффициент корреляции постепенно снижается. После 10 июня связь между NDVI и дневной LST отсутствует, только в октябре опять появляется умеренная положительная связь. Одновременно со снижением взаимосвязи дневной температуры поверхности растет отрицательная связь NDVI и ночной LST, достигая значений  $r = -0.7$  ( $\alpha < 0.001$ ). Среднесуточная температура поверхности характеризуется умеренной положительной связью с NDVI весной с 7 апреля по 9 мая ( $r = 0.6–0.7$ ,  $\alpha < 0.001$ ) и умерен-

**Таблица 2.** Категории ландшафтного зонирования территории Волгоградской агломерации

Категория		Площадь категории	
		га	%
I	Застроенные слабоозелененные	74890	33.2
II	Застроенные озелененные	12226	5.4
III	Незастроенные слабоозелененные	78608	34.8
IV	Незастроенные озелененные	50991	22.6
V	Водные объекты и берега	9056	4.0
ИТОГО:		225771	100.0

ной положительной связью в октябре ( $r = -0.7-0.6$ ,  $\alpha < 0.001$ ). В остальное время связь слабая, а в период максимального прогрева в конце июля—начале августа отсутствует.

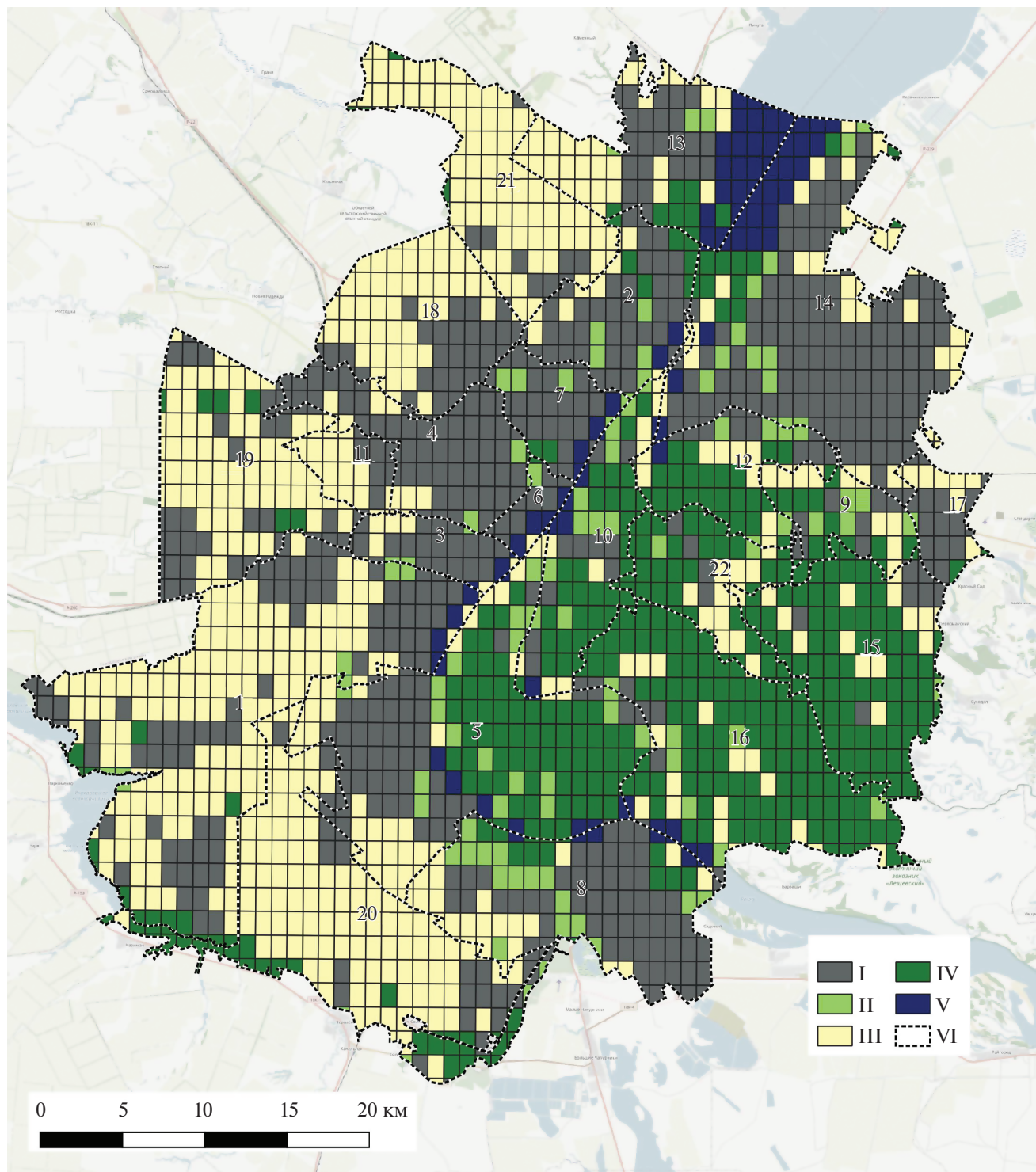
При этом для разных типов земного покрова динамика NDVI существенно отличается. Для естественных зональных сообществ характерно два пика вегетации — весной и осенью с существенным снижением в середине лета в связи с особенностями фенологического развития (Шинкаренко, Барталев, 2020). У интразональных ландшафтов речных пойм, балок, орошаемых земель, городских насаждений и газонов один максимум, который приходится на летний период. Поэтому при анализе связей NDVI и LST важно учитывать структуру земного покрова территории. Оценка связи NDVI с температурой поверхности для различных категорий земель дает следующую картину (рис. 2).

**Первая категория.** Весной наблюдается очень слабая значимая прямая связь для дневных температур и такая же обратная связь для ночных. Здесь большую роль играет застройка, так как площадь озеленения небольшая, до 30%. Наблюдается увеличение весной дневной температуры на фоне роста NDVI и постепенного прогрева зданий и бетона, который требует времени. И, кроме того, в начале вегетации NDVI растет, как и температуры воздуха и земной поверхности. В данном случае рост LST и NDVI вызван именно ростом температур воздуха, поэтому это процессы одного направления. Очень характерно, что летом наблюдается заметная отрицательная связь между NDVI и LST днем, а ночью связь вообще отсутствует. Отсюда можно сделать вывод: если большую часть площади занимает застройка, то состояние зеленых насаждений не определяет ночную температуру воздуха. Именно доля запечатанной

поверхности в период максимального прогрева в большей мере определяет проявление эффекта городского острова тепла в ночное время, что согласуется с полученными ранее результатами (Шинкаренко и др., 2020). В дневное же время зеленая растительность оказывает охлаждающее действие, которое характеризуется умеренной отрицательной связью NDVI и LST. В конце лета и начале осени отмечена слабая отрицательная связь NDVI и дневных температур, которая сходит на нет к середине октября, когда растительность заканчивает вегетацию.

**Вторая категория.** Здесь уже отмечается высокая положительная связь дневной температуры и NDVI. Объясняется это тем, что на землях данной категории больше доля зеленой растительности, поэтому и наблюдается более существенный рост NDVI в начале вегетационного сезона на фоне роста температур воздуха и поверхности. Все это вызвано исключительно погодными условиями, и напрямую NDVI и LST весной между собой не связаны. Для данной категории характерно отсутствие связи между NDVI и LST днем и наличие заметной отрицательной связи в ночное время летом и осенью. При значительной доле площади озеленения состояние насаждений снижает проявление эффекта городского острова тепла в ночное время даже при большой доле запечатанных поверхностей.

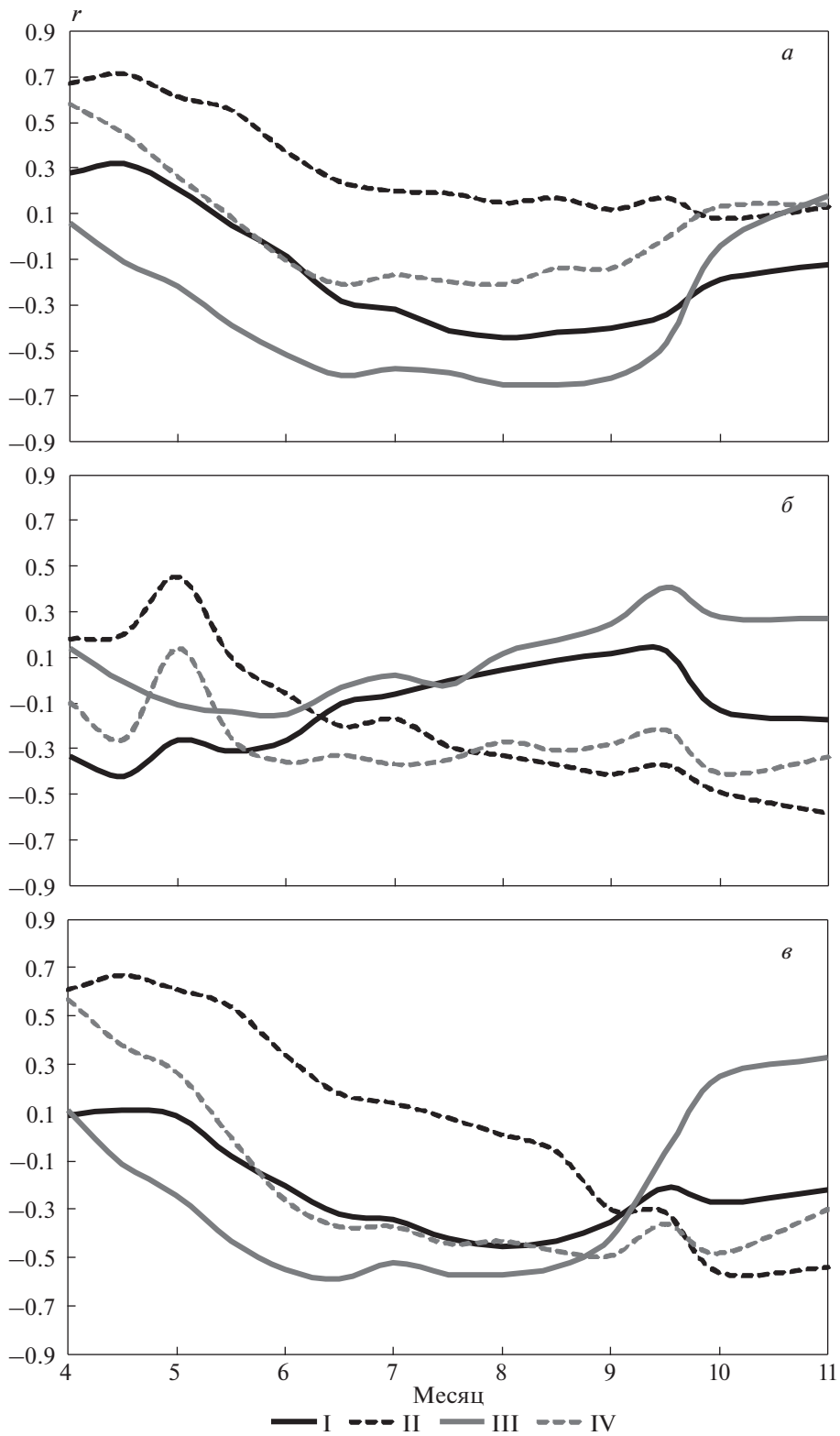
**Третья категория.** На пустырях и богарной пашне покров представлен в основном однолетней растительностью либо зональными сообществами. Из-за того, что растительность еще не набрала достаточную массу в начале вегетационного сезона, дневная температура весной практически не связана с NDVI. А вот летом у дневных температур высокая отрицательная связь с NDVI: чем больше зеленой растительности, тем ниже темпе-



**Рис. 1.** Распределение исследуемой территории по категориям озеленения и запечатанности (I–V – категории, VI – границы муниципальных образований и административных районов), номера 1–22 – номера районов Волгограда и муниципальных образований (см. в табл. 3).

ратура. Растительность за счет притенения и транспирации оказывает охлаждающее действие. В то же время здесь может сказываться разнонаправленная динамика NDVI и температуры воз-

духа: из-за фенологических особенностей происходит снижение зеленой фитомассы растительности, в то время как температура воздуха остается высокой (Шинкаренко, Барталев, 2020).



**Рис. 2.** Связь NDVI с температурой поверхности для различных категорий земель (I–IV) Волгоградской агломерации (а – дневная, б – ночная, в – среднесуточная температура).

**Таблица 3.** Структура земель в муниципальных образованиях и административных районах Волгоградской агломерации (по данным Sentinel-2)

№	Название/Категория	Доля, %			
		вода	застройка	озеленение	пашня и пустыри
1	Советский район/I	0.7	13.5	7.6	78.2
2	Тракторозаводский район/I	6.6	24.2	19.6	49.6
3	Ворошиловский район/I	5.2	33.0	14.7	47.1
4	Дзержинский район/I	0.1	37.4	9.5	53.0
5	Кировский район/II	9.0	12.9	39.1	39.0
6	Центральный район/I	18.5	45.2	13.0	23.3
7	Краснооктябрьский район/I	6.0	39.4	17.7	36.9
8	Красноармейский район/I	8.6	26.6	18.4	46.4
9	Ахтубинское сельское поселение/II	1.0	10.6	39.3	49.1
10	г. Краснослободск/II	13.0	10.5	41.5	35.0
11	Царицынское сельское поселение/III	0.1	9.0	5.9	85.0
12	Кировское сельское поселение (Среднеахтубинский р-н)/IV	3.2	7.8	37.0	52.0
13	Ерзовское сельское поселение/III	25.2	9.1	11.2	54.5
14	г. Волжский/I	18.2	23.9	13.0	44.9
15	Куйбышевское сельское поселение/IV	0.1	5.2	44.1	50.6
16	Клетское сельское поселение/IV	4.3	4.4	46.9	44.3
17	рабочий поселок Средняя Ахтуба/III	0.5	19.4	7.3	72.8
18	Городищенское сельское поселение/III	0.1	10.3	5.6	84.0
19	Краснопахаревское сельское поселение/III	0.1	7.3	5.8	86.8
20	Кировское сельское поселение (Светлоярский район)/III	1.0	6.0	11.3	81.7
21	Орловское сельское поселение/III	0.1	4.8	5.2	89.9
22	Фрунзенское сельское поселение/IV	0.1	5.2	39.9	54.8

Для ночных температур влияния нет, так как пустыри быстро остывают в вечернее время (Шинкаренко и др., 2020).

**Четвертая категория** включает в себя естественные и искусственные лесные массивы, орошение, газоны и травянистую растительность в лучших условиях увлажнения – пойменные луга, балки и т.п. Городской остров тепла на этой категории земель практически не выражен. Здесь связь температуры поверхности и NDVI достаточно слабая. Наблюдается небольшое охлаждающее воздействие растительности летними ночами. Весной NDVI и LST увеличиваются одновременно на фоне роста температуры поверхности, с этим связана и заметная положительная связь этих показателей.

Для оценки связи температуры поверхности и NDVI в разрезе административно-территориального деления предварительно выявлено соотношение различных типов земель в каждом муниципальном образовании и административном

районе г. Волгограда (табл. 3).

В пользу связи температуры поверхности и NDVI, выраженной через связь NDVI и температуры воздуха, говорит анализ средневзвешенных значений NDVI и температуры поверхности по границам муниципальных образований. Самая слабая связь между этими показателями наблюдается в муниципальных образованиях, на территории которых преобладает богарная пашня и пустыри, а наиболее сильная – у самых озелененных площадей (рис. 3).

Таким образом, на богарной пашне и пустырях связь слабее – при росте температуры воздуха растительность в конце концов высыхает, соответственно NDVI снижается на фоне роста температуры летом. В то же время в зональных экосистемах весной происходит одновременный рост температуры и NDVI, а к осени происходит снижение обоих показателей.

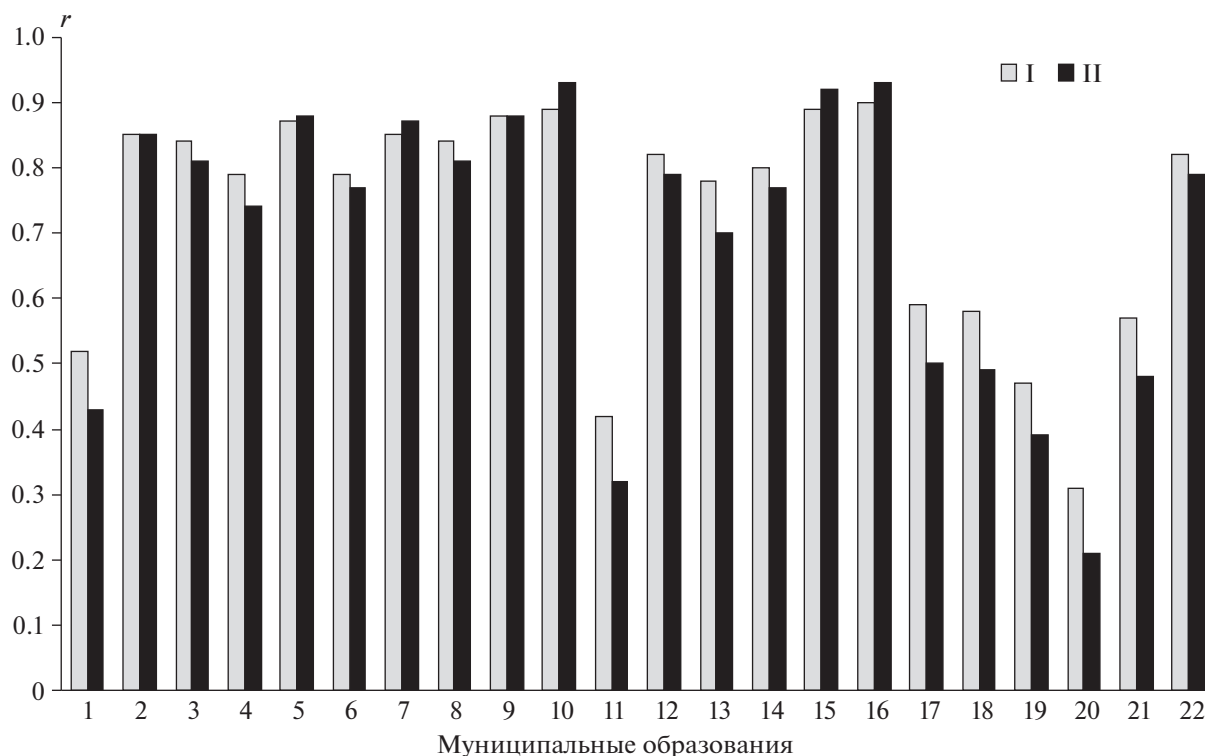


Рис. 3. Связь NDVI и температур поверхности для муниципальных образований и административных районов агломерации (I – дневная, II – ночная температура).

В качестве примера на рис. 4 представлен сезонный ход температуры поверхности и NDVI для Кировского (Светлоярский район) и Клетского сельсоветов. Кировское сельское поселение расположено в правобережье Волги, на западном склоне Волго-Донского водораздела, в то время как Клетское сельское поселение территориально относится к Волго-Ахтубинской пойме и выделяется самой высокой лесистостью среди всех муниципальных образований (46.9%).

На территории Кировского сельского поселения преобладают богарная пашня и пустыри с зональной растительностью (81.7%), поэтому кривая NDVI имеет весенний пик, так как и у озимых культур, и у зональных фитоценозов максимум вегетации приходится на весну, когда в почве достаточно влаги. В это время NDVI растет, как и температуры поверхности и воздуха. Причем к росту NDVI приводит рост температуры воздуха. К середине лета вегетация заканчивается, растительность высыхает и, следовательно, NDVI закономерно снижается, в то время как LST достигает максимальных значений.

В Клетском сельском поселении, то есть в условиях Волго-Ахтубинской поймы, все несколько иначе: из-за лучших условий увлажнения, в том числе и доступности грунтовых вод, вегетация продолжается в течение всего сезона,

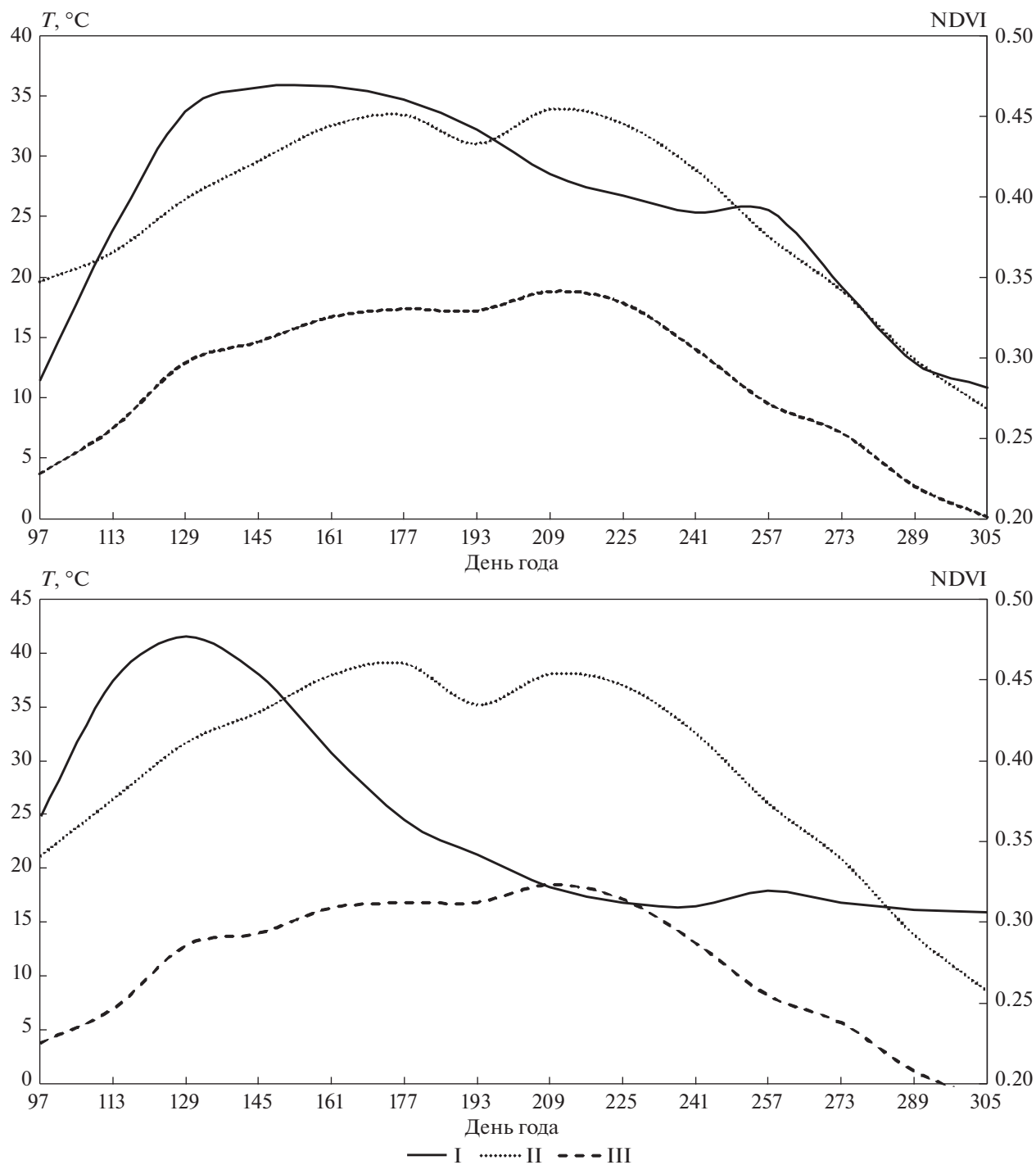
поэтому кривая NDVI имеет выраженное двухступенчатое плато с первым периодом с начала мая по середину июля, когда наблюдаются максимальные значения температуры воздуха (выше 35°C) и продуктивности растительности, и во втором, с середины июля до середины октября, когда температура воздуха превышает 25°C, а NDVI держится на уровне 0.4.

Разница температур поверхности в наиболее контрастных условиях двух указанных выше муниципальных образований в период максимального прогрева составляет около 5°C днем и практически не выражена ночью. В то же время разница ночных LST Клетского сельского поселения и наиболее застроенного в агломерации Центрального района Волгограда составляет около 5°C в ночное время и не выражена в дневное время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Около 70% территории Волгоградской агломерации и окрестностей слабо озеленены, большая часть площади представлена пустырями, застройкой и богарной пашней. Наибольшие массивы лесов и лугов территориально приурочены к Волго-Ахтубинской пойме и балкам. Сезонная динамика температуры поверхности связана с типом растительного покрова, долей его площади и





**Рис. 4.** Сезонная динамика NDVI и температуры поверхности Клетского сельского поселения (вверху) и Кировского сельского поселения Светлоярского района (внизу) I – NDVI, II – дневная температура, III – ночная температура.

состоянием. Весной отмечена значимая положительная связь NDVI, дневной и среднесуточной температуры поверхности, вызванная односторонним процессом роста зеленой массы в начале вегетационного сезона и прогрева поверхности. В летнее время наблюдается значимая от-

рицательная связь между NDVI и температурой в ночное время, в то время как отсутствует связь с дневными и среднесуточными температурами. Осенью усиливается отрицательная связь между среднесуточными и ночными температурами и NDVI.

Реакция температуры поверхности на изменения состояния растительного покрова, выраженного через NDVI, существенно зависит от соотношения типов земного покрова. Если в площади преобладает застройка, то независимо от состояния растительного покрова, эффект городского острова тепла наиболее явно проявляется в ночное время. Насаждения способствуют охлаждению в дневное время. При сопоставимом соотношении запечатанных поверхностей и озеленения, наоборот, отсутствует связь между NDVI и дневной температурой, и наблюдается отрицательная связь в ночное время. Для пустырей и богарной пашни характерна отрицательная связь между NDVI и температурой поверхности летом, что свидетельствует об охлаждающей роли растительности. Для площадей с преобладанием озеленения связь NDVI и LST практически не выражена, только летом наблюдается охлаждающее действие растительности.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках проекта № 19-45-343001 “Пространственно-временные особенности теплового поля урбанизированных территорий засушливой зоны по данным спутниковой съемки” с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования “ИКИ-Мониторинг” (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса Вега (Барталев и др., 2012).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Еришов Д.В., Лупян Е.А., Толпин В.А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
- 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.
- Горлач И.А., Кислов А.В., Алексеева Л.И.* Опыт исследования вертикальной структуры городского острова тепла на основе спутниковых данных // *Исслед. Земли из космоса*. 2015. № 2. С. 37–46.
- Колбовский Е.Ю.* Ландшафтное планирование. М.: Изд. центр “Академия”, 2008. 336 с.
- 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. № 2. С. 27–33.
- Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.* Суточная и сезонная динамика температуры поверхности города Волгограда // *Вест-*

*ник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*. 2021. № 1. С. 14–24.

*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) // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 34–44.

*Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычужов 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 // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

*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(57). С. 147–158.

*Сажин А.Н., Кулик К.Н., Васильев Ю.И.* Погода и климат Волгоградской области. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. 334 с.

*Стакакис Д., Перакис К., Савин И.Ю.* Дешифрирование урбанизированных территорий по спутниковым данным LANDSAT // *Исслед. Земли из космоса*. 2012. № 5. С. 22–28.

*Шарый П.А., Шарая Л.С., Сидякина Л.В.* Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 4. С. 154–163.

*Шевырногов А.П., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С.* Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // *Исслед. Земли из космоса*. 2012. № 6. С. 77–87.

*Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194.

*Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.* Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 5. С. 125–141.

*Adulkongkaew T., Satapanajaru T., Charoenhirunyingyos S., Singhirunnusorn W.* Effect of land cover composition and building configuration on land surface temperature in an urban-sprawl city, case study in Bangkok Metropolitan Area, Thailand // *Heliyon*. 2020. V. 6. P. 1–13.

*Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 89. P. 467–483.

*Yang Ch., He X., Yan F., Yu L., Bu K., Yang J., Chang L., Zhang Sh.* Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect – a case study of Changchun, China // *Sustainability*. 2017. V. 9(312). P. 1–17.

*Yuan F., Bauer M.E.* Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 106. P. 375–386.

Zhang X.X., Wu P.F., Chen B. Relationship between vegetation greenness and urban heat island effect in Beijing City of China // *Procedia Environmental Sciences*. 2010. V. 2. P. 1438–1450.

Zhang Y., Yiyun Ch., Qing D., Jiang P. Study on urban heat island effect based on normalized difference vegetated index: a case study of Wuhan City // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. V. 13. P. 574–581.

## Relationship of Seasonal Dynamics of Surface Temperature and NDVI of Urbanized Territories of Arid Zone (on the Example of the Volgograd Agglomeration)

S. S. Shinkarenko<sup>1,2,3</sup>, O. Yu. Kosheleva<sup>1</sup>, O. A. Gordienko<sup>1,3</sup>, A. A. Dubacheva<sup>3</sup>, and R. S. Omarov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS, Volgograd, Russia*

<sup>2</sup>*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Volgograd State University, Volgograd, Russia*

The values of the Earth's surface temperature and NDVI for the territory of the Volgograd agglomeration have been determined and compared according to the data of MODIS products. Based on Sentinel-2 images, landscape zoning of the agglomeration has been carried out with allocation of 5 categories of land, which differ in the ratio of the areas of sealed surfaces, green surfaces and reservoirs, including those within the boundaries of administrative and territorial units. We have built a map of landscape zones spatial distribution over the territory of the Volgograd agglomeration and established the area of each category of land. The correlation coefficients and their seasonal variation for the interdependence between daytime, nighttime, and daily mean temperatures with NDVI have been established. The features of interdependence between NDVI and surface temperature for various categories of land and within individual municipalities have been revealed. The analysis results show that the weakest interdependence between surface temperature and NDVI is observed in municipalities, where dry arable land and wastelands prevail, and the strongest one is peculiar of the most green areas. The study shows that if the area is dominated by buildings, then regardless of the state of vegetation cover, the effect of the urban heat island manifests itself at night. For areas with a predominance of green landscaping, the relationship between NDVI and surface temperature is practically not pronounced; only in summer, a cooling effect of vegetation is observed.

*Keywords:* land surface temperature (LST), MODIS, Volgograd, agglomeration, urban heat island, underlying surface, soil sealing, landscaping

### REFERENCES

Bartalev S.A., Ershov D.V., Lupjan E.A., Tolpin V.A. Vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovogo servisa VEGA dlya resheniya razlichnyh zadach monitoringa nazemnyh ekosistem [Possibilities of satellite service VEGA using for different tasks of land ecosystems monitoring] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V. 9. № 1. P. 49–56 (In Russian).

Gordienko O.A., Manaenkov I.V., Holodenko A.V., Ivancova E.A. Kartografirovaniye i ocenka stepeni zapечатannosti pochv goroda Volgograda [Mapping of soils and assessment of sealed areas in the city of Volgograd] // *Pochvovedenie*. 2019. V. 52. № 11. P. 1383–1392 (In Russian).

Gorlach I.A., Kislov A.V., Alekseeva L.I. Opyt issledovaniya vertikal'noy struktury gorodskogo ostrova tepla na osnove sputnikovoyh dannyh [Experience of learning of the vertical structure of urban heat island based on the satellite data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 2. P. 37–46 (In Russian). DOI: 10.7868/S0205961417040042

Kolbovskij E.Ju. Landshaftnoe planirovaniye. Moscow: Izd. centr "Akademija", 2008. 336 p. (In Russian).

Konstantinov P.I., Grishhenko M.Ju., Varencov M.I. Kartografirovaniye ostrovov tepla gorodov Zapoljar'ja po sovmeshhennym dannym polevyh izmereniy i kosmicheskikh snimkov na primere g. Apatity (Murmanskaja oblast') [Mapping of arctic cities urban heat island based on the composition of field meteorological measurements and sat-

ellite-derived imagery (example of Apatity, Kola peninsula)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 2. P. 27–33 (In Russian). DOI: 10.7868/S0205961415030069

Kosheleva O.Ju., Shinkarenko S.S., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S. Sutochnaja i sezonnaja dinamika temperatury poverhnosti goroda Volgograda [Daily and seasonal temperature dynamics surfaces of Volgograd city] // *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geojekologiya*. 2021. № 1. P. 14–24 (In Russian). DOI: 10.17308/geo.2021.1/3252

Kricuk S.G., Gornyj V.I., Latypov I.Sh., Pavlovskij A.A., Troinin A.A. Sputnikovoe kartirovaniye riska peregreva poverhnosti gorodskoj sredy (na primere Sankt-Peterburga) [Satellite risk mapping of urban surface overheating (by the example of Saint Petersburg)] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 5. P. 34–44 (In Russian).

Lupjan E.A., Proshin A.A., Burcev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Ju., Kashnickij A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Centr kolektivnogo pol'zovaniya sistemami arhivacii, obrabotki i analiza sputnikovoyh dannyh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhajuschej 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 distancionnogo zondirovaniya*

- Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 5. P. 263–284 (In Russian).
- Omarov R.S., Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Ju.* Geomorfologicheskie osobennosti territorii Volgograda kak bazovye harakteristiki, vlijajushhie na “gorodskoj ostrov tepla” [Geomorphological features of the territory of Volgograd as basic characteristics that affect the city’s heat island] // *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional’noe obrazovanie*. 2020. № 1(57). P. 147–158 (In Russian).
- Sazhin A.N., Kulik K.N., Vasil’ev Ju.I.* Pogoda i klimat Volgogradskoy oblasti. Volgograd: FNC agrojekologii RAN. 2017. 334 p (In Russian).
- Statakis D., Perakis K., Savin I Ju.* Deshifirovanie urbanizirovannyh territorij po sputnikovym dannym LANDSAT [Masking of urban areas based on Landsat data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2012. № 5. P. 22–28 (In Russian).
- Sharyy P.A., Sharaya L.S., Sidjakina L.V.* Svyaz’ NDVI lesov i harakteristik klimata Volzhskogo bassejna [The relation of forest NDVI to climate in Volga basin] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 4. P. 154–163 (In Russian).
- Shevyrnogov A.P., Cherneckij M.Ju., Vysockaja G.S.* Mnogoletnie trendy NDVI i temperatury na juge Krasnojarskogo kraja [Interannual trend of NDVI and temperature in the south of Krasnoyarsky kray] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2012. № 6. P. 77–87 (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A.* Sezonnaja dinamika NDVI pastbishnyh landshaftov Severnogo Prikaspija po dannym MODIS [NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes from MODIS data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 4. P. 179–194 (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Ju., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S.* Analiz vlijaniya zapechatanosti pochvennogo pokrova i ozelenenija na pole temperatur Volgogradskoj aglomeracii po dannym MODIS [Analysis of the effect of soil sealing and landscaping on the thermal field of the Volgograd agglomeration from MODIS data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 5. P. 125–141 (In Russian).
- Adulkongkaew T., Satapanajaru T., Charoenhirunyingyos S., Singhirunnusorn W.* Effect of land cover composition and building configuration on land surface temperature in an urban-sprawl city, case study in Bangkok Metropolitan Area, Thailand // *Heliyon*. 2020. V. 6. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04485
- Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 89. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005
- Yang Ch., He X., Yan F., Yu L., Bu K., Yang J., Chang L., Zhang Sh.* Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect – a case study of Changchun, China // *Sustainability*. 2017. V. 9 (312). P. 1–17. DOI: 10.3390/su9020312
- Yuan F., Bauer M.E.* Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 106. P. 375–386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003
- Zhang X.X., Wu P.F., Chen B.* Relationship between vegetation greenness and urban heat island effect in Beijing City of China // *Procedia Environmental Sciences*. 2010. V. 2. P. 1438–1450. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.157
- Zhang Y., Yiyun Ch., Qing D., Jiang P.* Study on urban heat island effect based on normalized difference vegetated index: a case study of Wuhan City // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. V. 13. P. 574–581. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.048