

УДК: 528.852, 551.521.33

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА ЛИПЕЦКА

С.А. Куролап¹, Д.В. Сарычев², И.В. Попова³

^{1,2} Воронежский государственный университет, кафедра геоэкологии и мониторинга окружающей среды

³ Воронежский государственный технический университет, кафедра жилищно-коммунального хозяйства

¹ Профессор, д-р геогр. наук; e-mail: skurolap@mail.ru

² Старший преподаватель; e-mail: sarychev.geo@gmail.com

³ Доцент, канд. геогр. наук; e-mail: iradobr@yandex.ru

Вследствие высоких темпов урбанизации, увеличения площади и плотности застройки, роста автотранспортной нагрузки и эмиссии техногенного тепла в городах происходит образование положительных температурных аномалий – островов тепла, которые снижают комфортность городской среды, неблагоприятным образом влияют на здоровье и качество жизни населения. Использование и анализ результатов дистанционного зондирования Земли, в частности космической съемки в тепловом диапазоне, является широко применяемым и перспективным методом изучения пространственной структуры городских островов тепла. В работе выполнен анализ материалов космической съемки, полученной с аппаратов Landsat 8 и 9 в 2020–2022 гг. для территории города Липецка. С учетом требований к качеству снимков в исследовании тепловых аномалий отобрано пять зимних и четыре летних снимка. В результате их обработки были построены карты превышений температур подстилающей поверхности над фоном и карты варьирования этих температур по сезонам. Созданные карты позволили выявить местоположения 33 основных источников теплового загрязнения в Липецке. При этом 26 источников расположены на промышленно ориентированном левобережье города – в Октябрьском и Левобережном округах Липецка, в том числе 23 источника относятся к территории Новолипецкого металлургического комбината. Поверхностные температуры их очагов были в среднем выше фоновых значений приблизительно на 4–9°C зимой и 11–14°C – летом. Результаты исследования формируют информационно-методическую основу для космического мониторинга теплового загрязнения в г. Липецке.

Ключевые слова: тепловая съемка в инфракрасном диапазоне, Landsat, остров тепла, тепловое загрязнение

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.3

ВВЕДЕНИЕ

Большинство промышленно-ориентированных городов характеризуются высоким уровнем физико-химического загрязнения атмосферы, шумовым, вибрационным, тепловым и другими видами техногенного воздействия [Григорьева, 2019]. Тепловое загрязнение – это физическое загрязнение, выражающееся в периодическом или длительном повышении температуры окружающей среды выше естественного уровня. Наиболее ярко оно проявляется в образовании на территории городов устойчивых положительных аномалий температуры – островов тепла [Куролап и др., 2018; Сутырина, 2020]. Их интенсивность зависит от естественных природно-климатических условий, а также от инфраструктурных особенностей городской среды – главным образом от площади и плотности застройки, ее теплосодержания, количества жителей. Появление тепловых аномалий в городах связано с источниками антропогенного тепла от промышленных предприятий, транспорта, объектов жилищно-коммунального

хозяйства [Балдина и др., 2012; 2015]. В обозримом будущем на фоне глобальных тенденций потепления климата и продолжающегося роста урбанизации проблема городских островов тепла будет только усугубляться. Возникающие при этом устойчивые локальные изменения температурного режима, как правило, снижают качество городской среды для жизнедеятельности, приводя к ухудшению здоровья и благополучия населения [Попова и др., 2018].

Таким образом, комфортность и безопасность окружающей среды во многом зависит от ее температурного режима, поэтому изучение и сокращение теплового загрязнения городов имеет большое значение в медицинской экологии и городском планировании [Григорьева, 2019; Zhao et al., 2021]. Традиционные метеорологические измерения не позволяют детально исследовать пространственную структуру городских островов тепла и выявить источники теплового загрязнения – это стало возможным с появлением методов дистанционного

зондирования Земли (ДЗЗ), в частности космической съемки в тепловом диапазоне инфракрасного излучения [Балдина и др., 2012; Kaplan et al., 2018; Weng, 2019]. Накопленный опыт исследований в области изучения тепловых аномалий показывает, что ДЗЗ является наиболее часто применяемым и доступным методом исследования температурной неоднородности поверхности Земли [Almedia et al., 2021; Miku, 2019].

Для Воронежа нами проводились такие работы по данным с космических аппаратов Landsat 8 и Terra Aster за 2011–2021 гг., в результате чего было выполнено геоинформационное картографирование летнего, зимнего и ночного состояний городского острова тепла, выявлены главные техногенные источники тепла и оценена их активность. Полученный опыт и накопление данных ДЗЗ за новый зимний и летний сезоны 2022 г. дали возможность исследовать тепловой остров и источники теплового загрязнения г. Липецка. Актуальность исследования связана также с внедрением данных с нового спутника Landsat 9, открытых для общественного использования с 10 февраля 2022 г.

Таким образом, цель данной работы заключалась в выявлении и картографировании источников теплового загрязнения окружающей среды в Липецке по данным ДЗЗ. В задачи работы входили:

1. Анализ результатов ДЗЗ космическими аппаратами Landsat 8 и 9 в 2020–2022 гг. для территории исследуемого городского округа.

2. Геоинформационное картографирование теплового загрязнения исследуемого города по данным ДЗЗ и наземных инструментальных наблюдений.

3. Выявление техногенных источников теплового загрязнения и сбор информации (оценка интенсивности, адрес, географические координаты, название объекта и его юридическая принадлежность) для их мониторинга в г. Липецке.

Объект исследования. Объектом исследования являлись температуры подстилающей поверхности и стабильные техногенные источники теплового загрязнения в границах городского округа г. Липецка.

Липецк расположен в лесостепной зоне на западной окраинной части Окско-Донской низменности, на ее стыке с восточной частью Среднерусской возвышенности. Липецк является административным центром Липецкой области. Площадь городского округа составляет 330 км². Высота центра города над уровнем моря – 160 м. Город пересекает река Воронеж, ее протяженность в границах городского округа составляет 30 км. Климат города можно охарактеризовать как умеренно-континентальный, с жарким летом и холодной зимой. Отличается неустойчивостью погоды с колебаниями температуры и неравномерным выпадением атмосферных осад-

ков по временам года. Среднемесячная температура января 8°C, лето теплое, средняя температура июля +20°C. Осадков выпадает около 500 мм, с максимумом в июле. Роза ветров имеет равномерное распределение повторяемости всех направлений ветров по румбам [Беляева и др., 2008].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные дистанционного зондирования. Инфракрасное излучение от земной поверхности в диапазоне длин волн 8–15 мкм формируется за счет суммарного эффекта отраженного и поглощенного солнечного излучения, собственного излучения Земли, а также техногенного излучения. Это суммарное тепловое излучение может регистрироваться сенсорами спутников в виде изображений независимо от времени суток. По таким данным ДЗЗ доступно изучение динамики температур подстилающей поверхности и выявление источников теплового загрязнения [Weng, 2019].

Основными «поставщиками» космической съемки в тепловом диапазоне для гражданских целей являются сенсоры AVHRR, MODIS, VIIRS. Они ежедневно производят съемку всей поверхности Земли, однако, пространственное разрешение таких снимков составляет около 1 км на пиксель, что ограничивает их применение для изучения сравнительно небольших по размерам городских островов тепла. Одним из открытых источников более детальной тепловой съемки являются космические аппараты серии Landsat, в частности спутники Landsat 8 и 9, выполняющие свои миссии ДЗЗ, соответственно с апреля 2013 и с сентября 2021 г. Каждый из этих аппаратов несет на борту оптико-электронный сенсор OLI и ИК-радиометр TIRS. Последний регистрирует тепловое излучение по двум диапазонам: 10,6–11,2 мкм (канал съемки № 10) и 11,5–12,5 мкм (канал съемки № 11). По данным каналам получают 12-битные снимки с охватом территории 183×170 км и пространственным разрешением 100 м/пиксель. Повторение кадра происходит каждые 16 суток приблизительно в 11 часов 20 минут по местному времени независимо от погодных условий [Landsat 8, 2019]. С учетом, обращения аппаратов по орбите в противофазе друг относительно друга, а также существенного перекрытия кадров, выполняемых с соседних витков орбиты, регулярность съемки исследуемых городов рассматриваемыми аппаратами может достигать до одних суток.

Таким образом, для выявления и мониторинга источников теплового загрязнения в г. Липецке перспективно использовать данные с гражданских космических аппаратов Landsat 8 и 9 TIRS. Эти съемочные системы обладают сравнительно высоким пространственным и временным разрешением

в диапазоне теплового излучения, а также являются наиболее актуальными по дате ввода в эксплуатацию, собранные ими данные многозональной съемки на исследуемый город за последние зимние и летние сезоны достаточны для решения поставленных задач. Рассмотрим использованные в исследовании данные ДЗЗ подробнее.

Город Липецк по разграфке WRS-2 попадает в ряд № 23 съемки Landsat, при этом на витке 176 полностью входит в кадр, а на витке 175 – только его восточная половина (Левобережный округ и частично Октябрьский и Правобережный округа). Соответственно, периодичность съемки двумя аппаратами для всей территории г. Липецка составляет восемь суток, а для его восточной половины – до четырех суток.

Несмотря на довольно высокую потенциальную возможность получения данных, число подходящих для исследования снимков ограничено из-за облачности: как правило, за сезон удается получить до пяти пригодных разновременных снимков для города. При меньшем количестве подходящих снимков за 2022 г. мы дополняли временной ряд данными за 2021 и 2020 гг. Все исходные многозональные снимки получали в уровне обработки L1TP из открытого официального источника [United States..., 2022]. Главными критериями отбора снимков были полный охват снимком исследуемой городской территории и отсутствие запечатленных облаков над

ней, а также приближенность даты съемки к зимним и летним сезонам. Безотносительно к календарному определению сезонов, условно считали летними все снимки с середины мая по начало сентября, а зимними – снимки, на которых был запечатлен снежный покров на исследуемой территории.

Устойчивый снежный покров в г. Липецке установился приблизительно в 20-х числах декабря 2021 г. и просуществовал до конца марта 2022 г. – космические снимки за этот период условно считали зимними. В свою очередь, летними считали снимки с середины мая по начало сентября, что для рассматриваемого города в целом соответствует периоду климатического лета. Анализ результатов космической съемки аппаратами Landsat 8 и 9 в обозначенные сезоны 2021–2022 гг. выявил следующую обеспеченность данными: выполнено 13 зимних снимков, из которых облачность над городом полностью отсутствует лишь на четырех: снимки от 8 и 16 января, 25 февраля и 21 марта 2022 г., дополнительно к ним был взят снимок от 14 февраля 2021 г. Летних снимков в 2022 г. было выполнено 15, из которых только 2 пригодны для целей исследования (снимки от 9 июня и 12 августа), в дополнение были взяты летние снимки от 22 июня 2021 г. и 6 августа 2020 г.

Идентификационные данные отобранных снимков и сопутствовавшие съемке метеорологические условия приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Список отобранных космических снимков Landsat 8/9 TIRS
и метеорологические условия на момент съемки**

Дата съемки*	Идентификатор снимка Landsat 8/9	Температура фона по снимку**, °C	Температура воздуха***, °C
<i>Зимние снимки</i>			
14.02.2021	LC81760232021045LGN00	–18,2	–17,4
08.01.2022	LC91760232022008LGN01	–8,3	–7,7
16.01.2022	LC81760232022016LGN00	–6,2	–3,5
25.02.2022	LC91760232022056LGN00	–1,7	–0,1
21.03.2022	LC81760232022080LGN00	+2,3	+3,7
<i>Летние снимки</i>			
06.08.2020	LC81760232020219LGN00	+23,7	+27,2
22.06.2021	LC81760232021173LGN00	+29,0	+31,4
09.06.2022	LC81760232022160LGN00	+23,7	+24,0
12.08.2022	LC8176023202224LGN00	+23,6	+28,0

Примечание. * Съемка в указанные даты производилась около 11:20 по местному времени.

** В качестве фоновых значений взяты средние температуры по данным снимков для однородного участка лесопарковой зоны (координаты участка: 52,680° с. ш., 39,718° в. д.).

*** Данные государственной метеостанции № 27930 «Липецк» в 12:00 по местному времени.

Расчет поверхностных температур. Отобранные снимки обрабатывали следующим образом: для каналов съемки № 10 и 11 производили пересчет условных единиц спектральной яркости теплового излучения, записанных в пикселях по соответствующим каналам съемки, в яркостные значения температур (T_{DN}) по формуле:

$$T_{DN} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}, \quad (1)$$

где L_λ – спектральная яркость на апертуре сенсора, Вт/(м²·ср·мкм); K_1 и K_2 – калибровочные константы (они приводятся в метаданных каждого снимка).

Далее, согласно [Weng et al., 2004], производился пересчет полученных яркостных температур в температуры подстилающей поверхности по формуле:

$$T = \frac{T_{DN}}{1 + \frac{1}{c_2}(\lambda \cdot T_{DN} \cdot \ln \varepsilon)}, \quad (2)$$

где λ – длина волны испускаемого излучения; c_2 – константа, определяющая отношение постоянной Планка, помноженной на скорость света, к постоянной Больцмана, и равная $1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К; ε – коэффициент излучения, или «степень черноты» (например, для асфальта принимали $\varepsilon = 0,942$, для бетона $\varepsilon = 0,937$, для открытой почвы и газонов $\varepsilon = 0,928$ и $0,982$ соответственно [Mallick et al., 2012]).

Далее было произведено усреднение полученных значений температур в пикселях между каналами за каждую дату, затем вычисление превышений температур в каждом пикселе над температурой фоновой подстилающей поверхности, на заключительном этапе – усреднение температур превышений и определение варьирования температур превышений в каждом отдельном пикселе по сезонам. По полученным растровым слоям выявляли тепловые аномалии исследуемой территории визуально и количественно: по выбранной пороговой изотерме средних превышений температур над фоном с учетом их стандартных отклонений. В качестве значений фоновых температур для каждого снимка в пределах исследуемых городских округов был условно взят участок однородной подстилающей поверхности 100×100 м – в лесопарковой зоне, удаленной от жилой и промышленной застройки, автомагистралей и прочих объектов инфраструктуры.

Для проведения описанных выше расчетов и картографирования использовали геоинформационную среду QGIS 3.26 и модуль Semi-Automatic Classification Plugin 7.10.8 [Congedo, 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Картографирование городского острова тепла. В результате обработки отобранных снимков (см. табл. 1) согласно описанной выше методике, были получены производные растровые слои, отображающие превышения температур подстилающей поверхности над фоном в Липецке на каждую дату съемки. Объединение этих растров в мультिवременные композитные слои для зимнего и летнего сезонов позволило для каждого получившегося мультивременного пикселя рассчитать среднее значение превышения температуры над фоном и ее стандартное отклонение в каждом сезоне. Полученные таким образом карты (рис. 1) позволяют установить местоположение тепловых аномалий, оценить их относительную интенсивность и стабильность во времени.

На картах А и В (см. рис. 1) оранжевые и красные пятна отображают очаги с наибольшими превышениями температуры над фоновыми значениями и, как правило, соответствуют источникам теплового загрязнения от промышленных зон. Причем красные вкрапления – это в основном отдельные сооружения, от которых происходят эмиссии тепла (например, цеха заводов, дымовые трубы промышленных предприятий, гидротехнические очистные сооружения и др.). Поверхностные температуры для таких объектов зимой 2021/22 г. по данным использованных снимков в среднем на $3\text{--}5^\circ\text{C}$ превышали температурный фон от окружающих жилых кварталов и на $5\text{--}7^\circ\text{C}$ – от загородных ненаселенных пространств. В то время как летом средние превышения температур над фоном в этих очагах оценивались уже в $7,5$ и $15,5^\circ\text{C}$ соответственно. Оттенки синего цвета на картах А и В показывают участки, где наблюдались температуры ниже фоновых: в зимний сезон (карта А) это, как правило, открытые заснеженные пространства, а летом (карта В) – поверхность воды. В целом, на картах А и В достаточно четко выделяются границы городского острова тепла, видны различия его пространственной структуры в зимний и летний сезоны.

В свою очередь, карты стандартных отклонений Б и Г (см. рис. 1) дают возможность оценить стабильность видимых на картах А и В очагов температурных аномалий. Для карт Б и Г оранжевый и красный цвета индицируют участки с сильной изменчивостью температур внутри сезона, синий показывает территории, где от снимка к снимку в ходе сезона температура в среднем варьировалась минимально. На карте Б видно, что зимой высокие перепады температур больше характерны для городской застройки, в том числе выявленных промышленных зон – это говорит о низкой стабильности приуроченных к ним тепловых аномалий во времени, что

может быть связано с большей амплитудой температур контрастных подстилающих поверхностей, более динамичной циркуляцией атмосферы и, соответственно, более быстрым рассеиванием теплового загрязнения от источников в сравнении с летним сезоном. Летом, наоборот, амплитуда температур для очагов техногенного теплового загрязнения меньше по отношению к абсолютным показателям их температур. На карте Г видно, что летом для ряда очагов отмечены очень высокие перепады температур, особенно для участков, где между датами съемки происходили коренные изменения подстилающей поверхности (например, вырубки и гари леса, распашка полей, осушение или затопление территорий и т. п.).

Источники теплового загрязнения. На основе созданных карт были установлены местоположения основных, стабильных во времени источников теплового загрязнения по условно выбранным изотермам средних превышений температур над фоном более чем на $3,5^{\circ}\text{C}$ зимой и более чем на 10°C летом (рис. 2). Для обеспечения последующего мониторинга были получены координаты выявленных таким образом источников теплового загрязнения – сведения по ним представлены в табл. 2. Выявленные источники теплового загрязнения совпали с местоположениями строений, отдельных цехов или объектов инфраструктуры и локализируются в пределах таких промышленных зон.

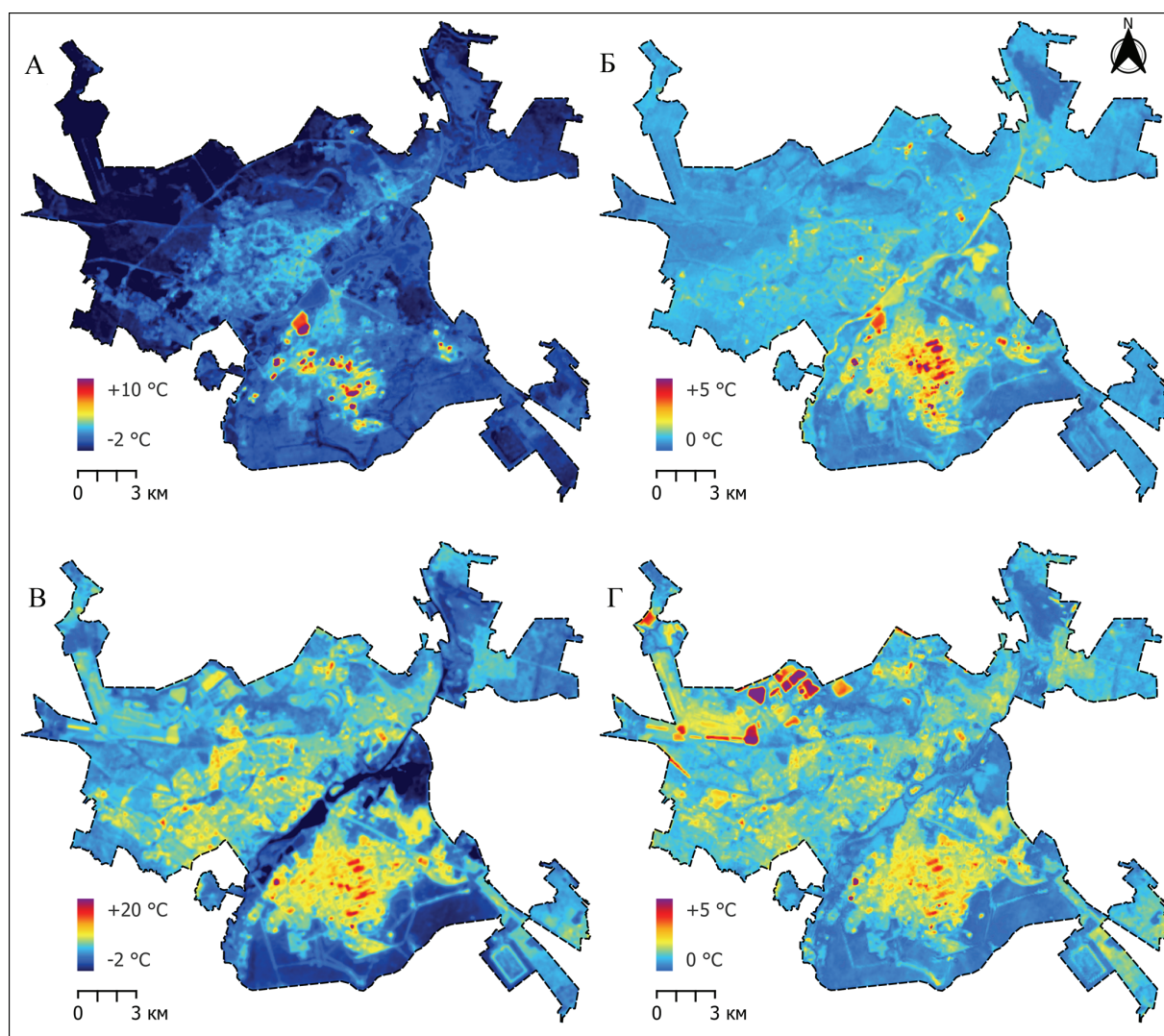


Рис. 1. Карта характеристик теплового острова в пределах городского округа Липецка в 2022 г.:

А – среднее превышение температуры подстилающей поверхности над температурой фона зимой; Б – стандартное отклонение среднего превышения температуры зимой; В – среднее превышение температуры подстилающей поверхности над температурой фона летом; Г – стандартное отклонение среднего превышения температуры летом

Fig. 1. Map of heat island parameters within the urban district of Lipetsk in 2022:

А – mean excess of urban land surface temperature (LST) over the background LST in winter; Б – standard deviations of mean LST excess in winter; В – mean excess of the urban LST over the background LST in summer; Г – standard deviations of mean LST excess in summer

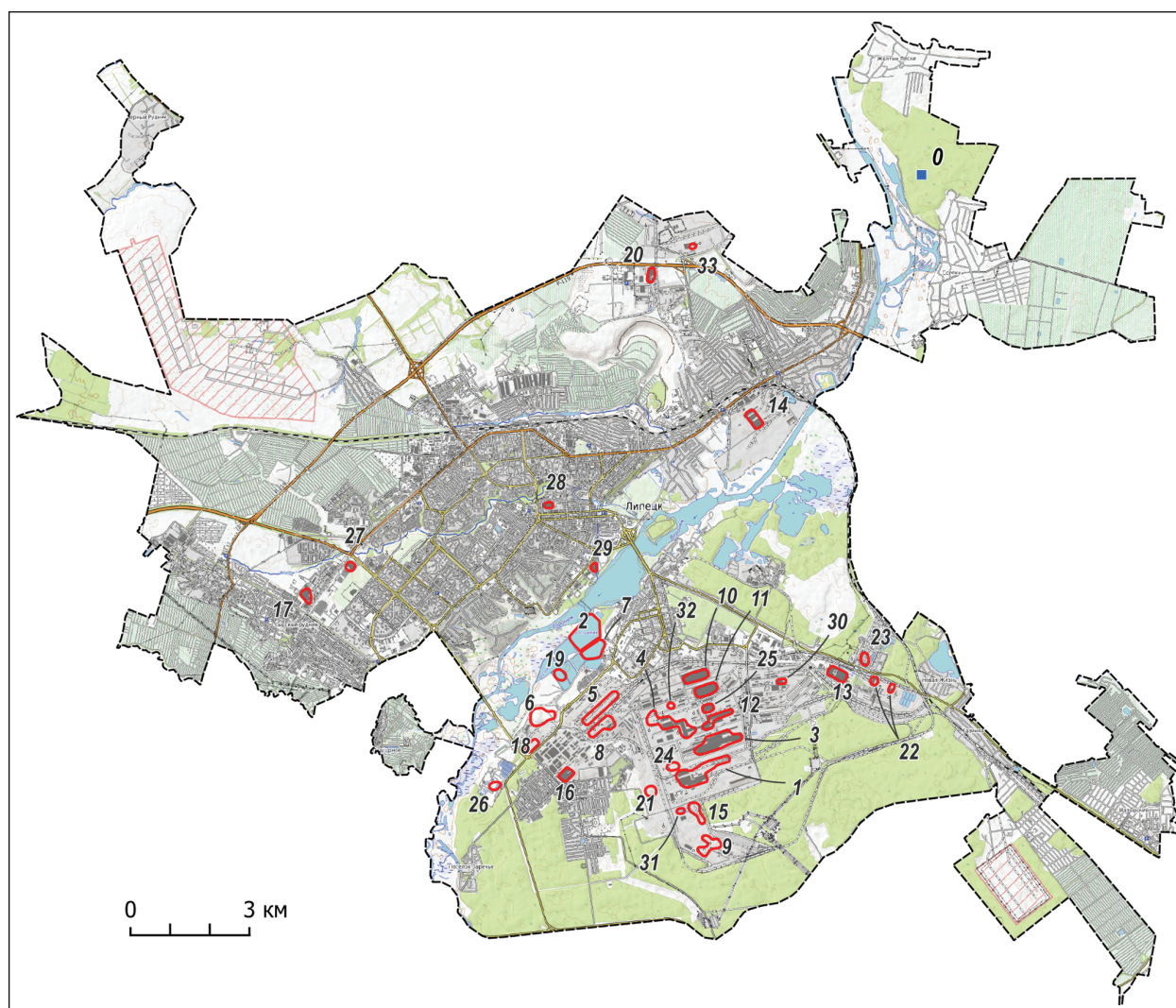


Рис. 2. Карта источников теплового загрязнения г. Липецка на 2021–2022 гг. (нумерация объектов на карте соответствует строкам табл. 2, точка 0 – показывает место определения фоновых значений)

Fig. 2. Map of thermal pollution sources in Lipetsk in 2021–2022 (numbers of objects on the map correspond to the lines of Table 2, point 0 shows the place where the background values were measured)

В городском округе Липецка по данным ДЗЗ нами выявлено 33 основных источника теплового загрязнения, активных в 2021–2022 гг. (см. табл. 2). Из них 26 источников расположено на промышленно ориентированном левобережье Липецка – в Октябрьском и Левобережном округах города, в том числе 23 источника относятся к территории Новолипецкого металлургического комбината (ПАО «НЛМК»). Суммарная площадь выявленных источников теплового загрязнения оценивается по использованным космическим снимкам приблизительно в 310 га, как в зимний, так и в летний сезоны, что составляет около 1% от площади исследованной территории. При этом состав и сезонная активность выявленных источников неравномерна: в зимний и летний сезоны наиболее крупные и интенсивные тепловые следы наблюдались от целого ряда цехов ПАО «НЛМК»

(ПХПП, ЦПМШ, ТЭЦ, конверторные, огнеупорные, агломерационный и коксохимический), а также от Липецкой ТЭЦ-2 и промышленных зон ОАО «Липецкцемент». Для ряда объектов тепловой след в зимний период был относительно более выражен, чем летом, – это характерно, например, для источников тепла от прудов отстойников № 2, 6, 7, доменного цеха и цеха водоснабжения ПАО «НЛМК», а также городских очистных сооружений. В летний сезон относительно более выражены были источники тепла от механосборочных цехов № 4 и 5, цеха подготовки производства, цехов ПТС, ПДС, ПГП и склада ПАО «НЛМК», а также от промышленных зон ОАО «Липецкий металлургический завод “Свободный сокол”», АО «Индезит Интернэшнл», ОАО «Прогресс», ООО «Л-ПАК», а также торгово-развлекательных центров «Ривьера», «Европа», «Л’СИТИ» и др.

Таблица 2

Основные источники теплового загрязнения города Липецка

№	Источник теплового загрязнения (в скобках указан ближайший адрес)	Географические координаты		Площадь объекта по снимку, га	Превышение максимума средних температур очага над фоном*, °С	
		град. с. ш.	град. в. ш.		зимой	летом
1	Конвертерный цех № 2 ПАО «НЛМК» (пр. Строителей)	52,5442	39,6325	42,6	18,5	18,7
2	Пруд-отстойник № 7 ПАО «НЛМК» (ул. Лесная)	52,5769	39,5915	42,5	8,8	1,4
3	Цех ПХПП ПАО «НЛМК» (пр. Железнодорожников)	52,5525	39,6419	36,8	5,6	17,3
4	Конвертерный цех № 1 ПАО «НЛМК» (пр. Прокатчиков)	52,5544	39,6279	32,0	26,8	18,1
5	Коксохимическое производство ПАО «НЛМК» (пр. Химиков)	52,5597	39,5965	21,8	13,7	14,5
6	Шлаковый отвал ЦПМШ ПАО «НЛМК» (ул. Metallургов)	52,5578	39,5724	19,7	30,8	29,0
7	Пруд-отстойник № 6 ПАО «НЛМК» (ул. Лесная)	52,5729	39,5943	18,0	15,6	4,2
8	ТЭЦ ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)	52,5562	39,5998	16,6	9,1	12,5
9	Доменный цех № 2 ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)	52,5289	39,6387	14,9	7,0	8,7
10	Цех ПТС ПАО «НЛМК» (пр. Центральный)	52,5667	39,6322	13,6	3,1	16,4
11	Цех ПДС ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)	52,5636	39,6359	13,5	3,0	17,1
12	Цех ПГП ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)	52,5564	39,6375	12,5	4,0	14,9
13	АО «Индезит Интернэшнл» (пл. Metallургов, 2, вл. 3)	52,567	39,6849	12,2	1,0	14,8
14	ОАО «Липецкий металлургический завод “Свободный сокол”» (ул. Студеновская, 126В)	52,625	39,6548	11,5	2,9	14,5
15	Цех ЦПМШ ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)	52,5363	39,632	10,3	29,9	26,1
16	Механосборочные цеха № 4 и 5 ПАО «НЛМК» (ул. Ильича, 4)	52,5447	39,5836	8,1	2,1	13,9
17	ОАО «Прогресс» (ул. Ангарская, вл. 2)	52,5858	39,4875	6,8	1,5	16,0
18	Цех ЦПМШ ПАО «НЛМК» (ул. Metallургов, станция Шлаковая)	52,5513	39,5709	6,4	12,4	15,5
19	Пруд-отстойник № 2 ПАО «НЛМК» (ул. Metallургов)	52,5673	39,5816	6,2	6,7	2,5
20	ООО «Л-ПАК» (ул. Ковалева, 125А)	52,6579	39,6168	5,8	1,2	15,3
21	Огнеупорный цех ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)	52,5408	39,615	5,8	18,0	14,5
22	Агломерационное производство ПАО «НЛМК» (Грязинское шоссе)	52,5653	39,6985	5,6	11,2	11,3
23	Липецкая ТЭЦ-2 (Грязинское шоссе, 5)	52,5703	39,695	5,2	4,8	10,7
24	Цех ЦПМШ ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)	52,5464	39,6234	5,0	8,2	9,2
25	Цех подготовки производства ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)	52,5595	39,6365	4,9	1,6	14,8
26	Городские очистные сооружения (ул. Краснозаводская, вл. 4А)	52,5423	39,5571	4,4	7,1	7,5
27	ТРЦ Ривьера (ул. Каткова, 51)	52,5923	39,5039	4,1	1,3	14,7
28	ТРЦ Европа (ул. Советская, 66)	52,6059	39,5778	2,8	2,5	15,2
29	ТРЦ Л’СИТИ (ул. 50 лет НЛМК, 4А)	52,5917	39,5946	2,7	1,9	14,1
30	Склад ПАО «НЛМК» (ул. Алмазная, 12В)	52,5655	39,664	2,5	0,5	14,7
31	Цех водоснабжения ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)	52,5362	39,6261	2,2	5,4	5,2
32	Огнеупорный цех ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)	52,5602	39,6228	2,0	11,4	13,2
33	ОАО «ЛипецкЦемент» (ул. Ковалева, 126Б)	52,6644	39,6324	1,8	7,8	10,4

Примечание. *В качестве фоновых значений взяты температуры лесопарковой зоны (52,680° с. ш., 39,718° в. д.) по данным снимков (см. табл. 1).

В среднем по 33 объектам максимальные температуры от выявленных источников превышали фоновые значения на 13,5°C летом и на 9°C зимой. Особенно выделяется ПАО «НЛМК» по максимальной площади, количеству и интенсивности очагов. Наибольшее превышение – до 31°C над фоновыми температурами зимой и летом – отмечено у шлакового отвала ЦПМШ ПАО «НЛМК» (см. табл. 2).

Выявляемые по картам пространственные структуры городского острова тепла в общих чертах повторяет рисунок застройки с очагами в промышленных зонах, умеренными превышениями температур над фоном в областях плотной жилой застройки и низкими значениями превышений над фоном в зонах малоэтажной жилой застройки. Так, в летний период температура воздуха в условиях городской застройки отличается от фоновых характеристик в среднем на 4,5–5°C, причем наименьшие вариации температуры наблюдаются в частном секторе и на территории застройки средней плотности с достаточным озеленением, а наиболее высокие – на открытых пространствах, вблизи проезжей части крупных дорог, либо на участках плотной высокорослой застройки, где минимально внутриквартальное озеленение.

Апробированная нами методика исследования пространственной структуры городского острова тепла имеет определенные ограничения. Они связаны прежде всего с предвзятостью исходных данных: для расчетов и картографирования мы использовали только космические снимки, отражающее состояние объектов в антициклональную погоду, тогда как при наличии облачности характер циркуляции атмосферы иной, что также влияет на структуру и интенсивность теплового острова. В то же время это обстоятельство практически не влияет на точность и полноту выявления источников теплового загрязнения среды. Исходя из объема доступных данных ДЗЗ, нам удалось оценить интенсивность выявленных источников в зимний и летние периоды. Оценка проявления температурных аномалий в отдельные экстремально жаркие и холодные периоды, которые могут быть опасными для населения, в данном исследовании не проводилась, но в перспективе также может быть выполнена для г. Липецка при накоплении большего объема данных.

В ходе более ранних исследований на основе данных ДЗЗ и результатов наземных измерений нами была создана тематическая ГИС «Источники теплового загрязнения городской среды», являющаяся основой для мониторинга теплового загрязнения в г. Воронеже [Сарычев и др., 2021; Sarychev

et al., 2019]. Это исследование позволило расширить территориальный охват созданной тематической ГИС Липецка. Цифровые карты пространственно-временных структур городского острова тепла, входящие в данную ГИС, могут служить для учета влияния термодинамических факторов в изучении распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Такие карты необходимо учитывать в моделировании и урбоэкодиагностике состояния воздушной среды, так как структура теплового поля города является определяющим фактором возникновения конвекционных потоков и перераспределения загрязняющих веществ в его атмосфере.

ВЫВОДЫ

По данным космической съемки, выполненной в тепловом диапазоне съемочными системами Landsat 8 и 9 TIRS за 2021–2022 гг. нами была картографирована структура городского острова тепла г. Липецка в зимний и летний сезоны. По созданным картам в границах городского округа Липецка выявлено 33 основных стабильных источника теплового загрязнения, которые оказались приурочены к объектам инфраструктуры промышленных предприятий, а также к гидротехническим очистным сооружениям и торгово-развлекательным центрам. Поверхностные температуры выявленных очагов были в среднем выше фоновых значений приблизительно на 4–9°C зимой и на 11–14°C летом. Установленные техногенные источники тепла вносят основной вклад в формирование теплового острова г. Липецка. При этом наибольшая концентрация и интенсивность источников теплового загрязнения оказалась характерна для промышленной левобережной части города и связана главным образом с Новолипецким металлургическим комбинатом. Для правобережной части Липецка количество источников теплового загрязнения и интенсивность их проявления оказались сравнительно ниже, а около половины источников оказалось связано с крупными торгово-развлекательными центрами.

Таким образом, на основе данных ДЗЗ были созданы наиболее детальные и точные на текущий момент карты вариаций температур подстилающей поверхности и источников теплового загрязнения г. Липецка. Полученные данные могут служить для учета пространственного влияния термодинамических факторов в медицинской экологии и городском планировании. Проведенное исследование является информационно-методической основой для мониторинга и сокращения теплового загрязнения г. Липецка.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балдина Е.А., Грищенко М.Ю., Федоркова Ю.В. Использование космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для географических исследований. М.: Мысль, 2012. 120 с.
- Балдина Е.А., Константинов П.И., Грищенко М.Ю., Варенцов М.И. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне // *Земля из космоса – наиболее эффективные решения*. 2015. № 26. С. 38–42.
- Беляева Л.Н., Зубкова В.Л., Климов С.М. География Липецкой области: природа, население, хозяйство. Липецк: Ориус, 2008. 304 с.
- Григорьева Е.А. Комфорт и здоровье человека в климатических условиях городской среды // *Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: материалы Международной научно-практической конференции*, Воронеж, 03–05 октября 2019 г. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. Т. 2. С. 320–322.
- Куrolap С.А., Попова И.В., Сарычев Д.В., Клепиков О.В., Виноградов П.М. Оценка техногенного загрязнения воздушного бассейна и микроклиматической комфортности городской среды // *Экологическая ситуация и риски для здоровья населения города Воронежа: сб. науч. ст.* Воронеж: Научная книга. 2018. С. 34–56.
- Попова И.В., Куrolap С.А., Закусилов В.П., Мазуров Г.И. Интегральное эколого-микроклиматическое зонирование городской среды (на примере г. Воронежа) // *Естественные и технические науки*. 2018. № 11(125). С. 277–281.
- Сарычев Д.В., Попова И.В., Куrolap С.А. Дистанционное зондирование источников теплового загрязнения города Воронежа // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2021. № 4(19). С. 54–65.
- Сутырина Е.Н. Изучение параметров городских «островов тепла» на территории Иркутской области по данным дистанционного зондирования // *Известия Иркутского гос ун-та. Серия: Науки о Земле*. 2020. Т. 34. С. 131–140.
- Almeida C.R.D., Teodoro A.C., Gonçalves A. Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data, *Techniques: A Systematic Review. Environments*, 2021, vol. 8(10), p. 105.
- Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS, *Journal of Open Source Software*, 2021, vol. 64, p. 3172.
- Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y. Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: A case study in Skopje. Macedonia, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2018, vol. 2(7), p. 358.
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, USGS, EROS, Version 5.0, 2019, 114 p.
- Mallick J., Singh C.K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 19, p. 348–358.
- Miky Y.H. Remote sensing analysis for surface urban heat island detection over Jeddah. Saudi Arabia, *Appl. Geomat.*, 2019, vol. 11, p. 243–258.
- Sarychev D.V., Kurolap S.A., Popova I.V. Verification of Urban Heat Island Microclimatic Model by Using Thermal Remote Sensing Data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, 022085, DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022085.
- Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, no. 89, p. 467–483.
- Weng Q. *Techniques and Methods in Urban Remote Sensing*, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2019, 353 p.
- Zhao Q., Guo Y., Ye T. et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modeling study, *The Lancet Planetary Health*, 2021, vol. 5(7), e415–e425, DOI: 10.1016/s2542-5196(21)00081-4.

Электронный ресурс

United States Geological Survey, EarthExplorer, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 20.10.2022).

Поступила в редакцию 08.06.2023

После доработки 15.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

REMOTE SENSING OF HEAT POLLUTION SOURCES IN THE LIPETSK URBAN AREA

S.A. Kurolap¹, D.V. Sarychev², I.V. Popova³

^{1,2} Voronezh State University, Department of Geoecology and Environmental Monitoring

³ Voronezh State Technical University, Department of Housing and Communal Services

¹ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: skurolap@mail.ru

² Senior Lecturer; e-mail: sarychev.geo@gmail.com

³ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: iradobr@yandex.ru

Positive temperature anomalies called “urban heat islands” (UHI) are formed in cities as a result of progressing urbanization, increasing area and density of buildings, motor transport load and anthropogenic heat emissions. Such UHI reduce the comfort of the urban environment, and affect population health and quality of life. Remote sensing data from the thermal band satellite sensors are widely used to study the UHI intensity and spatial structure. We analyzed Landsat 8 and 9 satellite imageries from 2020 to 2022 representing the Lipetsk urban area in Central Russia. Taking into account the image quality requirements, 5 “winter” and 4 “summer” scenes were selected to examine thermal anomalies. As a result of their processing a map of land surface temperature (LST) excesses over the background values and a map of LST seasonal variations were compiled. The produced maps made it possible to identify 33 principal sources of anthropogenic heat in Lipetsk. 26 of them are located within industrial zones of the left bank side of Lipetsk, including. 23 sources within the territory of the NLMK Group metallurgical combine. LST of the identified heat sources were approximately 4–9°C above the background temperatures in winter and 11–14°C above the background temperatures in summer. The results of the study could become an information-methodical basis for the space monitoring of thermal pollution in Lipetsk.

Keywords: infrared thermal bands, Landsat, urban heat island, thermal pollution

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-17-00172).

REFERENCES

- Almeida C.R.D., Teodoro A.C., Gonçalves A. Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data Techniques: A Systematic Review, *Environments*, 2021, vol. 8(10), p. 105, DOI: 10.3390/environments8100105.
- Baldina E.A., Grishchenko M.Yu., Fedorkova Yu.V. *Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov v teplovom infrakrasnom diapazone dlya geograficheskikh issledovaniy* [Application of satellite images in thermal infrared band for geographical research], Moscow, Mysl Publ., 2012, 120 p. (In Russian)
- Baldina E.A., Konstantinov P.I., Grishchenko M.Yu., Varentsov M.I. Issledovanie gorodskih ostrovov tepla s pomoshch'yu dannyh distancionnogo zondirovaniya v infrakrasnom diapazone [Investigation of urban heat islands using remote sensing data in the infrared band], *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya*, 2015, no. 26, P. 38 – 42. (In Russian)
- Belyaeva L.N., Zubkova V.L., Klimov S.M. *Geografiya Lipeckoj oblasti: priroda, naselenie, hozyajstvo* [Geography of the Lipetsk region: nature, population, economy], Lipeckij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet, Lipeck, Orius Publ., 2008, 304 p. (In Russian)
- Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS, *Journal of Open-Source Software*, 2021, vol. (64), p. 3172, DOI: 10.21105/joss.03172.
- Grigor'eva E.A. [Comfort and human health under the climatic conditions of the urban environment], *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy* [Global climate change: regional effects, models, forecasts], materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 03–05 oktyabrya 2019 goda, Voronezh, Cifrovaya poligrafiya Publ., 2019, vol. 2, p. 320–322. (In Russian)
- Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y. Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: A case study in Skopje. Macedonia, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2018, vol. 2(7), p. 358, DOI: 10.3390/eecs-2-05171.
- Kurolap S.A., Popova I.V., Sarychev D.V., Klepikov O.V., Vinogradov P.M. [Assessment of the technogenic air pollution and microclimatic comfort of the urban environment], *Ekologicheskaya situatsiya i riski dlya zdorov'ya naseleniya goroda Voronezha* [Environmental situation and risks for human health in the city of Voronezh], Sbornik nauchnykh statej, Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2018, p. 34–56. (In Russian)
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*, USGS, EROS, Version 5.0, 2019, 114 p.
- Mallick J., Singh C.K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 19, p. 348–358, DOI: 10.1016/j.jag.2012.06.002.
- Miky Y.H. Remote sensing analysis for surface urban heat island detection over Jeddah. Saudi Arabia, *Appl. Geomat*, 2019, vol. 11, p. 243–258, DOI:10.1007/s12518-019-00256-9.

- Popova I.V., Kurolap S.A., Zakusilov V.P., Mazurov G.I. Integral'noe ekologo-mikroklimaticeskoe zonirovaniye gorodskoj sredy (na primere g. Voronezha) [Integral ecological and microclimatic zoning of the urban environment (case study of Voronezh)], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 11(125), p. 277–281. (In Russian)
 - Sarychev D.V., Kurolap S.A., Popova I.V. Verification of Urban Heat Island Microclimatic Model by Using Thermal Remote Sensing Data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, 022085, DOI:10.1088/1755-1315/272/2/022085.
 - Sarychev D.V., Popova I.V., Kurolap S.A. Distancionnoe zondirovaniye istochnikov teplovogo zagryazneniya goroda Voronezha [Remote sensing of thermal pollution sources in the city of Voronezh], *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura*, 2021, no. 4(19), p. 54–65, DOI 10.36622/VSTU.2021.19.4.006. (In Russian)
 - Sutyryna E.N. Izuchenie parametrov gorodskih "ostrovov tepla" na territorii Irkutskoj oblasti po dannym distancionnogo zondirovaniya [Study of the Parameters of Urban Heat Islands within the Irkutsk Region Territory According to Remote Sensing Data], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*, Seriya: Nauki o Zemle, 2020, vol. 34, p. 131–140, DOI: 10.26516/2073-3402.2020.34.131. (In Russian)
 - Weng Q. *Techniques and Methods in Urban Remote Sensing*, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2019, 353 p.
 - Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, no. 89, p. 467–483, DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
 - Zhao Q., Guo Y., Ye T., Gasparrini A., Tong S., Overcenco A., Vicedo-Cabrera A. M. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study, *The Lancet Planetary Health*, 2021, no. 5(7), e415–e425, DOI: 10.1016/s2542-5196(21)00081-4.
- Web source*
United States Geological Survey, EarthExplorer, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 20.10.2022).

Received 08.06.2023

Revised 15.07.2023

Accepted 27.07.2023