

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2023-2-13-23>
УДК 911.375:528.85(476.4)

Поступила в редакцию 02.10.2023
Received 02.10.2023

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ г. МОГИЛЁВА

Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. С использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ГИС-проекта территории г. Могилёва исследованы особенности растительного покрова города и его влияния на температуру подстилающей поверхности (LST) в различных типах геотехнических систем (ГТС) крупного города. Наименьшие средние значения LST регистрировались в лесных экосистемах г. Могилёва. За ними следуют резервные озелененные территории, расположенные преимущественно в долинах рек, далее – парки и малые ландшафтные формы. В классе застроенных территорий наиболее высокие средние значения LST относились к производственно-коммунальным ГТС, а низкие – к жилой многоквартирной, общественной застройке и участкам незавершенного строительства. Жилая усадебная застройка характеризовалась наименьшими в данном классе средними значениями LST. Показано наличие обратной связи значений LST с различными характеристиками растительного покрова, полученными по данным ДЗЗ. Коэффициенты корреляции средних значений LST со средними значениями нормализованного разностного индекса растительности (NDVI), индекса листовой поверхности (LAI), содержания в пологе хлорофилла (CCC) и степенью озелененности всех выделов ГТС в городе оцениваются от $-0,6$ до $-0,7$. Более сильные обратные связи отмечены для резервных озелененных территорий, представленных преимущественно древесно-кустарниковой растительностью в долинах рек (варьируют в пределах от $-0,7$ до $-0,8$). Связи ослабевают в ГТС жилой многоквартирной застройки (до $-0,5$ и $-0,6$), ГТС производственно-коммунальных территорий (от $-0,4$ до $-0,6$) и лесах (от $-0,3$ до $-0,6$).

Ключевые слова: город; геотехническая система; растительный покров; дистанционное зондирование.

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М. Оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных геотехнических системах г. Могилёва // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 13–23.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF VEGETATION COVER ON THE LAND SURFACE TEMPERATURE FOR DIFFERENT GEOTECHNICAL SYSTEMS OF MOGILEV CITY

L. A. Kravchuk, A. A. Yanovskiy, N. M. Bazhenova

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The joint analysis of Earth remote sensing data and geographic information system (GIS) project differentiated by type of geotechnical systems (GTS) for the territory of the city of Mogilev, explored the features of the influence of vegetation cover on the land surface temperature (LST) in various types of GTS of a large city. As part of landscape-recreational territories, the lowest average LST values were recorded in forest ecosystems of the city of Mogilev. They are followed by reserved green areas, located mainly in river valleys, then – parks and small landscape forms. In the class of built-up areas, the highest average LST values were related to industrial and communal structures. They were lower in residential multi-apartment, public and in areas of unfinished construction. Residential estate was characterized by the lowest average LST. It is shown a feedback between LST and various characteristics of vegetation cover obtained from remote sensing data. Correlation of average LST with average normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), canopy chlorophyll content (CCC) and the degree of greening for all type system in the city are estimated from -0.6 to -0.7 . Stronger feedbacks were noted for reserved green areas (mainly by trees and shrubs in river valleys) varying from -0.7 to -0.8 . The connections are weakening in the GTS of residential multi-apartment buildings (up to -0.5 and -0.6), in the GTS of industrial and communal areas (from -0.4 to -0.6) and forests (from -0.3 to -0.6).

Keywords: city; geotechnical system; vegetation cover; remote sensing.

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. Assessment of the influence of vegetation cover on the land surface temperature for different geotechnical systems of Mogilev city. *Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 13–23.

Введение. Оценка эффективности функционирования растительного покрова в городах особенно актуальна в связи с вопросами улучшения состояния городской среды как среды жизнедеятельности населения. Растительный покров выступает в качестве компенсационного блока геотехнической системы (ГТС), нейтрализующего негативное воздействие техногенных объектов и процессов на городскую среду, в том числе и тепловое воздействие. Ветровой и температурный комфорт являются двумя основными факторами климатического комфорта людей. В условиях городской застройки дифференцированный комфорт могут создавать различия в архитектурной тени, солнечном излучении и ветровых условиях, при этом насаждения играют немаловажную роль.

Особенности влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных типах и видах ГТС исследовали в г. Могилёве с использованием сопряженной обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и дифференцированного в разрезе типов и видов ГТС ГИС-проекта городской территории.

Город Могилёв – крупный административный, культурный и промышленный центр Беларуси. По состоянию на 1 января 2020 г. площадь города составляла 11,85 тыс. га, численность населения – 384,5 тыс. человек. Территория города приурочена к стыку Оршанско-Могилёвской возвышенности и Центрально-Березинской равнины, входящих в состав Поднепровского округа Восточно-Белорусской физико-географической провинции [1]. Современная поверхность города представляет приподнятую пологоволнистую равнину с перепадами высот до 2–3 м, которая прорезана долинами рек и ложбинами. Преобладающие абсолютные отметки в пределах города составляют 160–189 м, максимальные отметки в его северной и северо-западной части – 190–210 м. Отличительной особенностью рельефа является его расчлененность долинами рек Днепр, Дубровенка и Дебря, ручьями, овражно-балочной сетью и суффозионными западинами. Природный комплекс в городе существенно преобразован. Согласно данным реестра земельных ресурсов на момент исследований в городе под застройкой, землями общего пользования и дорогами находилось 50, 11 и 2 % городских земель соответственно. Земли под лесами, древесно-кустарниковой растительностью, водными объектами и болотами занимали 12, 8, 2 и 0,4 % соответственно, доля неиспользуемых земель – 11,0, доля сельскохозяйственных земель – 4,0 %.

Цель работы – выполнить дифференцированную оценку степени озелененности городской территории и влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в основных типах ГТС г. Могилёва.

Методика и материалы исследований. Для оценки структуры и состояния растительного покрова в г. Могилёве использовали сопряженную обработку данных ДЗЗ и дифференцированного в разрезе типов и видов ГТС ГИС-проекта городской территории. ГТС представлены следующими видами: производственными и коммунально-складскими; жилыми многоквартирными и усадебными высоко-, средне- и низкоплотными; общественными различных типов (административно-деловая, лечебно-оздоровительная, культурно-просветительская, научно-образовательная, спортивная, торгово-бытовая); специальными; сельскохозяйственными; ландшафтно-рекреационными. В последних выделяли леса и лесопарки, парки, малые ландшафтные формы (МЛФ – скверы, сады, бульвары), кладбища, резервные озелененные территории (древесно-кустарниковая, луговая и рудеральная растительность на неудобьях). В целом на территории города идентифицировано около 3 тыс. выделов, где определено 16 типов и 44 вида ГТС. Анализ данных провели преимущественно по типам ГТС, при этом производственные и коммунально-складские объединили (ПК), но ландшафтно-рекреационные анализировали в разрезе видов для выявления их особенностей.

Для характеристики растительности по ДЗЗ использовали данные мультиспектрального прибора (multispectral instrument – MSI) спутника Sentinel-2A, который регистрирует излучение в 13 спектральных каналах видимого диапазона, как ближнего, так и коротковолнового ИК-диапазонов спектра. Использовали каналы с разрешением 10 и 20 м, последние привели к 10 м согласно [3]. Характеристики используемых в работе спектральных каналов спутника Sentinel-2A отражены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики используемых в работе спектральных каналов спутника Sentinel-2A

Table 1. Characteristics of the spectral channels of the Sentinel-2A satellite used in operation

Показатель	Номер канала									
	2	3	4	5	6	7	8	8a	11	12
Центральная длина волны, нм	492,4	559,8	664,6	704,1	740,5	782,8	832,8	864,7	1613,7	2202,4
Ширина канала 0.5 max, нм	66	36	31	15	15	20	106	21	91	175
Пространственное разрешение, м	10	10	10	20	20	20	10	20	20	20

Значения индекса NDVI (normalized difference vegetation index, нормализованный разностный индекс растительности) [4] рассчитали по формуле (номера каналов соответствуют табл. 1):

$$\text{NDVI} = (\text{канал } 7 - \text{канал } 4) / (\text{канал } 7 + \text{канал } 4).$$

Маску растительности извлекли из карты классификации снимка Sentinel-2, созданную при его обработке до уровня 2A.

Индекс листовой поверхности (leaf area index – LAI) и содержание в пологе хлорофилла (canopy chlorophyll content – CCC, мкг/см²) рассчитали с помощью модуля биофизического процессора L2B (L2B biophysical processor) программы Sentinel-2 Toolbox [5]. Расчет LAI и CCC биофизическим процессором проводится на основе нейронных сетей. Обучающая выборка получена авторами модуля с помощью модели переноса излучения [6]. В частности, выполнено моделирование отражательной способности полога для большинства типов и состояния растительности при условии регистрации излучения в спектральных диапазонах каналов Sentinel-2 при возможных значениях геометрии съемки [6].

Из дальнейших расчетов исключили значения LAI и CCC, для которых 1) исходные значения каналов выходят за границы диапазона обучающей выборки; 2) рассчитанные значения LAI и CCC выходят за границу ожидаемого диапазона, т. е. диапазона значений, полученного по обучающей выборке, поскольку в обоих случаях результаты алгоритма в общем случае являются недостоверными.

Для количественной оценки температуры земной поверхности (land surface temperature – LST) г. Могилёва использовали снимки спектрорадиометра ASTER уровня обработки 2, поскольку рассчитанная на их основе кинетическая температура поверхности характеризуется наибольшим эффективным пространственным разрешением из всех доступных на 2019 г. данных ДЗЗ в тепловом диапазоне. Кинетическая температура поверхности (AST_08) рассчитывается на основе атмосферно скорректированных значений яркостной температуры поверхности пяти каналов спектрорадиометра ASTER в диапазоне 8–12 мкм путем применения закона Планка с использованием значений излучательной способности, рассчитываемых по алгоритму разделения температуры и излучательной способности (TES). Алгоритм TES вначале оценивает излучательную способность в тепловых каналах с помощью метода нормализованной излучательной способности (NEM). Данные оценки используются в законе Кирхгофа для учета вклада в яркостную температуру поверхности излучения атмосферы. Затем получаемое значение итеративно вычитается из значения яркостной температуры для оценки излучения поверхности, на основе которого рассчитывается кинетическая температура поверхности.

Единственный безоблачный снимок ASTER территории г. Могилёва за летние месяцы 2019 г. приходился на 3 июня. В работе использован полученный на основе данного снимка продукт AST_08 v003 (ASTER L2 surface kinetic temperature). При расчете AST_08 в качестве источника профилей температуры, влажности и давления атмосферы выбрали, соответственно, продукт MOD07_L2, значений содержания в атмосфере озона – Total ozone analysis using solar backscatter ultraviolet Version 2 (SBUV/2) и TOVS (TOAST) / Earth probe-total ozone mapping spectrometer (EPTOMS). Для оценки содержания в атмосфере аэрозолей использованы данные глобальной модели аэрозолей Научно-исследовательской лаборатории (Naval research laboratory). Выполнили коррекцию геопривязки снимка ASTER и извлекли значения пикселей снимка (значения кинетической температуры поверхности), соответствующие выделам в ГИС-проекте интегральной ГТС г. Могилёва.

Дату используемого в работе снимка Sentinel-2 – 15.06.2019 – определил первый доступный для загрузки безоблачный снимок г. Могилёва, полученный после используемого снимка ASTER. Подбор снимка Sentinel-2 выполнен с помощью web-интерфейса Copernicus open access hub [7]. Выбран снимок Sentinel-2 уровня обработки 1C, который является орторектифицированным снимком, представленным значениями коэффициента отражения на уровне апертуры радиометра с субпиксельной точностью совмещения спектральных каналов. Атмосферную коррекцию выполнили с помощью программы обработки Sen2Cor [8]. Атмосферная коррекция процессора Sen2Cor основана на алгоритме «Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков» (ATCOR) [9] и использует модель переноса излучения LIBRADTRAN [10]. Все параметры атмосферных газов и аэрозолей либо определяются непосредственно алгоритмом, либо фиксируются при некотором значении до запуска модели.

Для оценки влияния растительного покрова на LST использовали сведения о структуре и функциональной специфике городской застройки, особенностях природных и природно-антропогенных объектов на территории г. Могилёва. Идентификацию типов и видов ГТС на момент исследования уточняли по данным Геопортала ЗИС УП «БелГипрозем» (gismap.by), схемам озелененных территорий общего пользования г. Могилёва, ведомственным материалам и данным натурных исследований, проведенных ранее.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных ГИС-проекта г. Могилёва, дифференцированного в разрезе ГТС (рис. 1), показал, что в пределах городской черты в застроенной части города по площадям преобладают ГТС жилой усадебной, производственно-коммунальной и многоквартирной застройки, встречается также общественная и специализированная, которые составляют 19, 18, 10, 4 и 1 % соответственно. Ландшафтно-рекреационные территории (ЛРТ) – леса, лесопарки, парки малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.) – занимают приблизительно 35 % городской территории с учетом водных объектов.

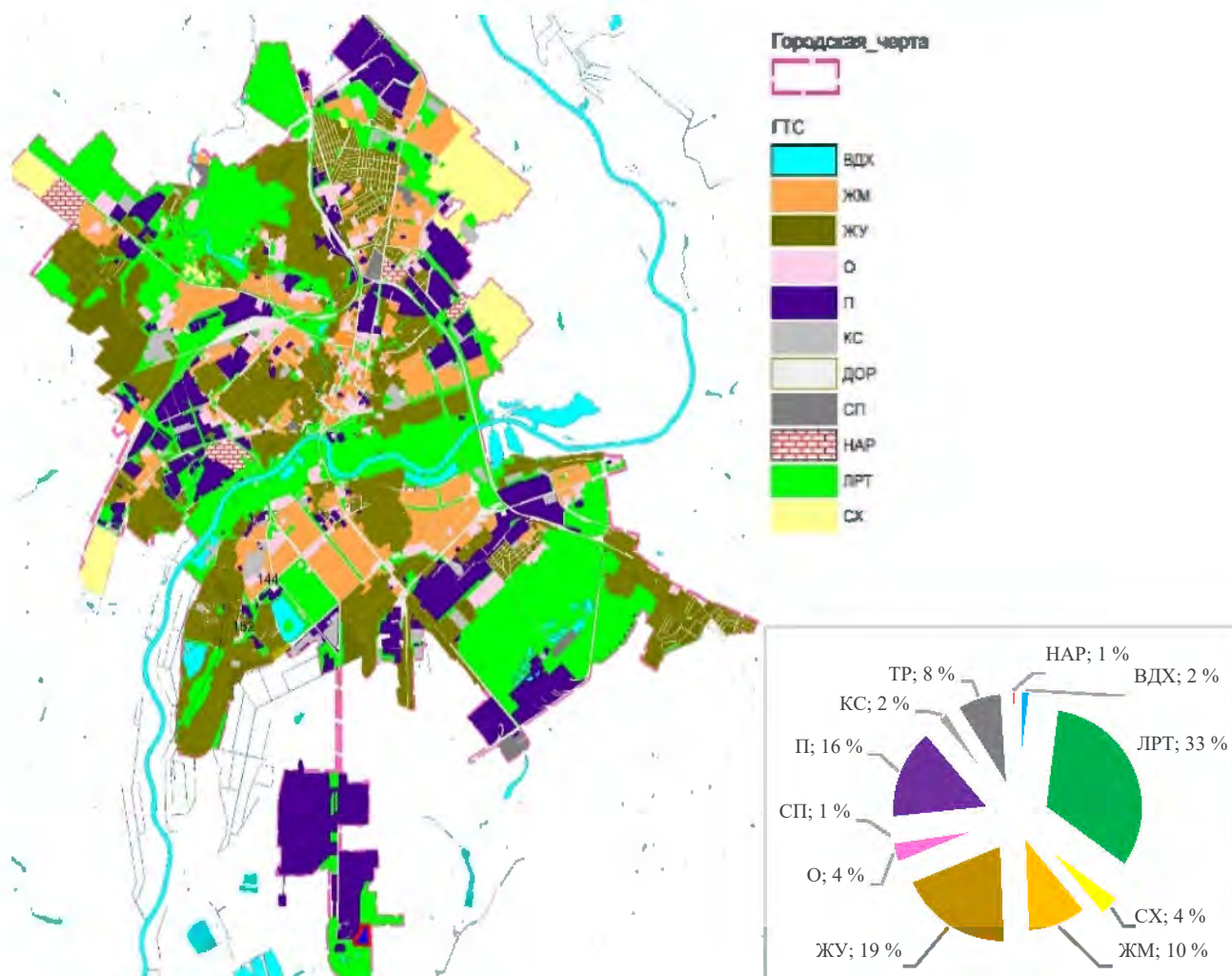


Рис. 1. Структура территории г. Могилёва в разрезе типов ГТС:
 ВДХ – водохозяйственные; ДОР – дорожно-транспортные; ЖМ – жилые многоквартирные, в том числе исторический центр; ЖУ – жилые усадебные; КС – коммунально-складские; ЛРТ – ландшафтно-рекреационные; НАР – нарушенные участки (незавершенное строительство); О – общественные; П – производственные; СП – специальные; СХ – сельскохозяйственные

Fig. 1. Structure of the Mogilev city in the context of GTS types:
 ВДХ – water use areas; ДОР – road and transport infrastructure; ЖМ – residential multi-apartment, including a historical center; ЖУ – residential estate; КС – communal warehouse; ЛРТ – landscape-recreation; НАР – disturbed areas (construction in progress); О – public; П – industrial; СП – special; СХ – agricultural

Как видно из рис. 1, в составе интегральной ГТС г. Могилёва высока доля производственных и коммунально-складских ГТС (18 %). В производственном секторе города функционируют предприятия машиностроения и металлообработки, химической и нефтехимической промышленности, пищевой и легкой промышленности, а также другие, которые образуют крупные комплексы на севере, востоке, западе и юге города. Отдельные предприятия встречаются и в центральной части города. Они, наряду с транспортом, являются основными источниками выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты загрязняющих веществ.

Жилая застройка представлена многоквартирной, усадебной и смешанной застройкой. Особенностью г. Могилёва является высокая доля жилой усадебной застройки (около 19 %). Многоквартирная жилая застройка расположена как в центральной части правобережья города, так и в виде крупных массивов левобережья, при этом она составляет около 10 % от площади городской территории. В г. Могилёве она сформирована в разные годы и отличается по конфигурации, этажности зданий, плотности, степени развития сети проездов, парковок и площадок с твердым покрытием. В жилой многоквартирной застройке разных лет формирования различается и структура озелененных территорий, как по степени озелененности, так и по возрасту и состоянию насаждений.

В состав ЛРТ города включены как природные, так и природно-антропогенные объекты. В г. Могилёве преобладают лесные и лесопарковые территории, занимающие площадь 1385 га (с учетом Лесопарка Печерский). Они представлены преимущественно сосновыми и еловыми формациями с незначительным участием дуба и мягколиственных пород. Лесопарк Печерский приурочен к северо-западной окраине города. Лесные массивы на юго-востоке г. Могилёва, чередуясь с древесно-кустарниковой растительностью и заболоченными землями, расположены между крупными промышленными зонами.

В городе функционируют парки (Парк имени 60-летия Октября, Детский парк аттракционов, Парк имени А. М. Горького, Парк Подниколье) на площади близкой к 161 га. Почти 133 га занимают бульвары (Непокоренных, Днепровский, по ул. Ленина, Юбилейный и др.), многочисленные скверы и озелененные территории общественных центров. На отдельных участках вблизи р. Днепр, на озерах Святое и Гребеневское организованы благоустроенные зоны кратковременного отдыха у воды с пляжами, которые занимают площадь около 87 га, которую горожане активно используют для отдыха. Остальную часть ЛРТ составляют резервные озелененные территории, представленные преимущественно древесно-кустарниковой и луговой растительностью в долинах рек.

Степень озелененности различных ГТС определяли как процентное отношение числа пикселей со значениями NDVI, соответствующими растительности ($>0,4$), к общему числу пикселей в выделе. Это позволило провести дифференцированную оценку степени озелененности территории города, представленную на рис. 2. Из него видно, что в г. Могилёве низкой степенью озелененности характеризуются как ГТС жилой и общественной застройки исторического центра, ряда производственных и коммунально-складских территорий, так и кварталы жилой многоквартирной и общественной застройки левобережья Днепра и северо-западной части города.

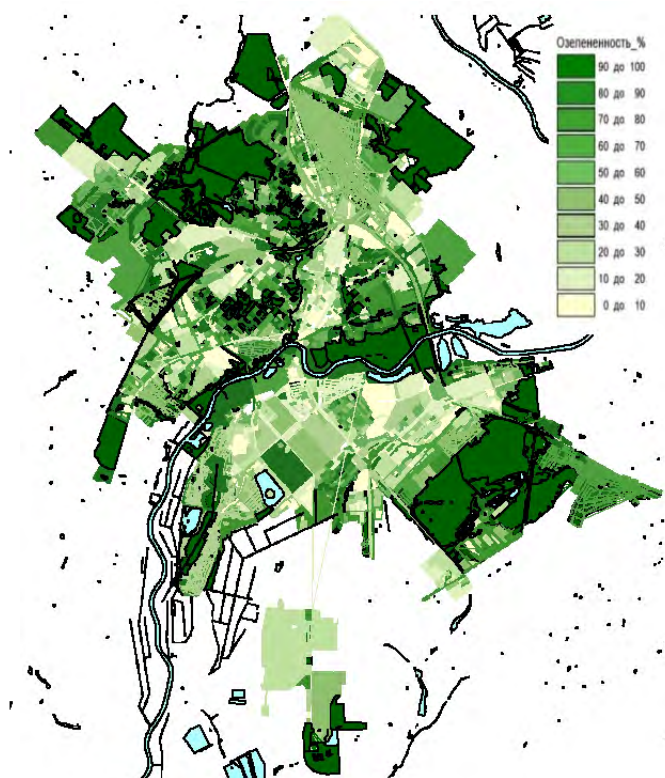


Рис. 2. Схема степени озелененности (%) различных геотехнических систем (ГТС) в г. Могилёве

Fig 2. Scheme of greenery degree (%) of the different geotechnical systems (GTS) in Mogilev

Полученные при обработке ДЗЗ значения вегетационных индексов (NDVI, LAI, CCC) в различных ГТС г. Могилёва отражены на рис. 3, распределение средних значений LAI и CCC на городской территории приведено на рис. 4.

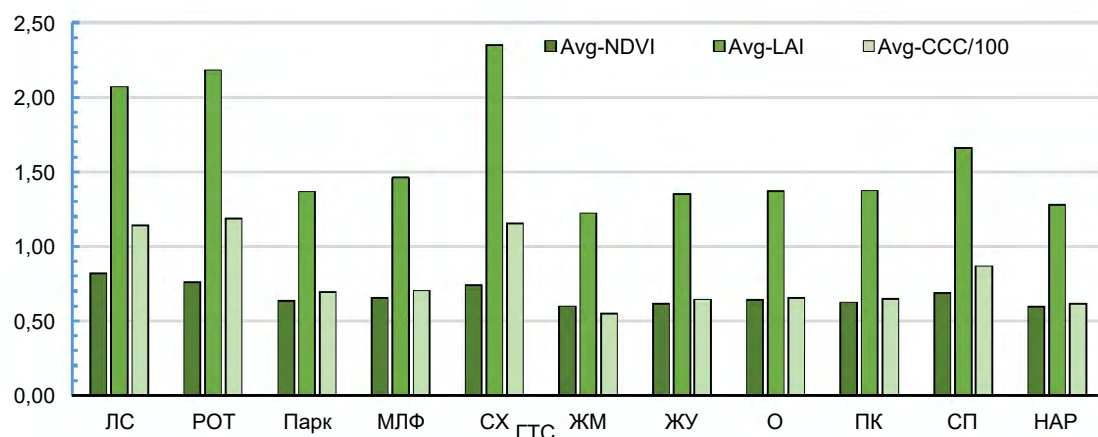


Рис. 3. Средние значения NDVI, LAI, CCC в различных типах ГТС г. Могилёва:
ЛС – лесные; РОТ – резервные озелененные территории; МЛФ – малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.); СХ – сельскохозяйственные; ЖМ – жилая многоквартирная, в том числе исторический центр; ЖУ – жилая усадебная; О – общественная; ПК – производственная и коммунально-складская; СП – специальная застройка; НАР – участки незавершенного строительства

Fig. 3. The average NDVI, LAI, CCC in different GTS of Mogilev:
ЛС – forest; РОТ – reserve green areas; МЛФ – small landscape forms (squares, boulevards); СХ – agricultural; ЖМ – residential multi-apartment, inkling a historical center; ЖУ – residential estate; О – public; ПК – industrial and communal warehouse; СП – special; НАР – areas of current development

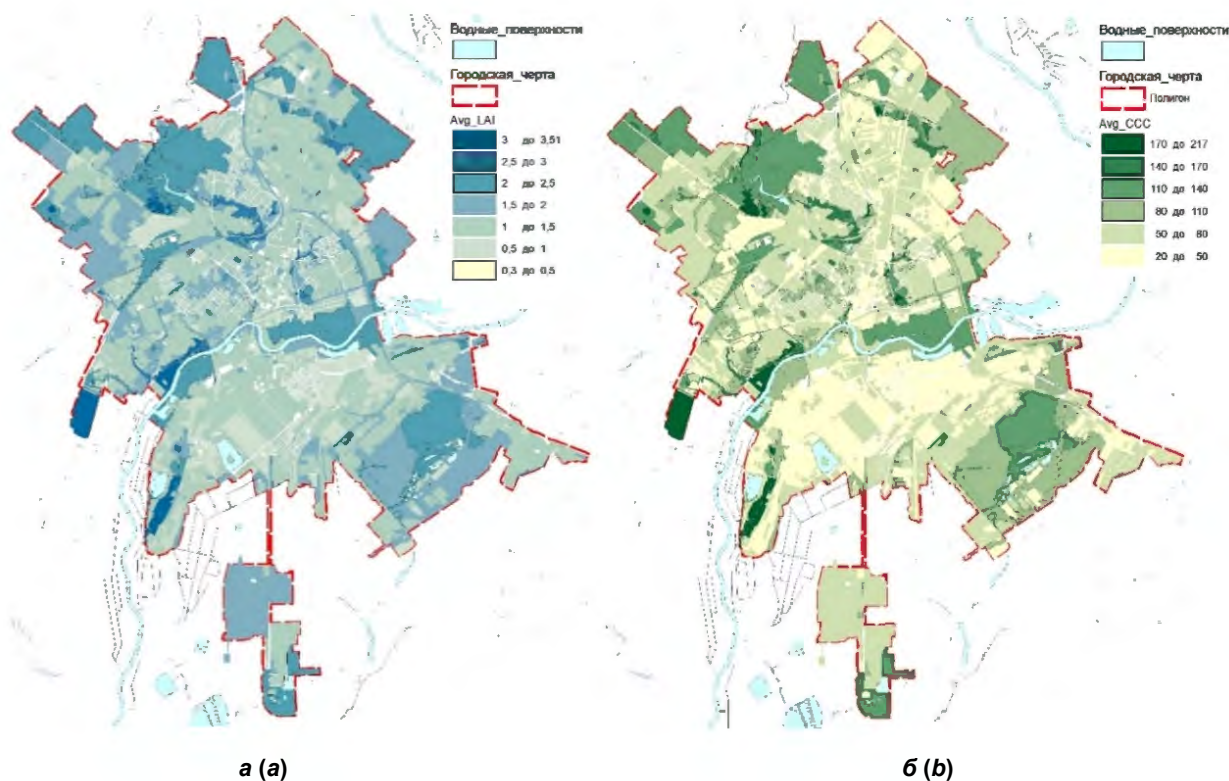


Рис. 4. Схема распределения в различных ГТС г. Могилёва: а – средних значений индекса листовой поверхности (Avg_LAI); б – содержания хлорофилла в пологом (Avg_CCC)

Fig. 4. Scheme of distribution in the different GTS of Mogilev city:
a – the mean values of leaf area index (LAI); b – canopy chlorophyll content (CCC)

Из рис. 3 и 4 видно, что на незастроенных территориях наиболее высокими средними значениями вегетационных индексов характеризуются лесные и лесопарковые территории, несколько ниже они на сельскохозяйственных землях и резервных озелененных территориях. Последние представлены древесно-кустарниковой и луговой растительностью, расположенной преимущественно в долинах рек, балках и на заболоченных территориях. Из всех вегетационных индексов средние значения LAI наиболее высокие в лесах, а также на сельскохозяйственных землях, находящихся на момент съемки на стадии интенсивного вегетативного развития.

Парки г. Могилёва (Парк аттракционов, Парк имени 60-летия Октября, Парк Подниколье и др.) отличаются сравнительно невысокими значениями NDVI, LAI и CCC. Например, в Парке аттракционов причинами этого являются низкое участие деревьев и кустарников, высокая доля рекреационной инфраструктуры (аттракционы, дорожки, площадки). В парке 60-летия Октября невысокие показатели LAI и CCC связаны с разреженными древостоями, преобладающим участием саженцев и молодых деревьев в составе насаждений, а также с деградацией травянистого покрова из-за рекреационных нагрузок. Для МЛФ (скверов, бульваров и озелененных территорий общественных центров) сравнительно низкие значения индексов возможно объяснить высокой долей поверхностей с искусственным покрытием. Это обуславливает более существенное участие смешанных пикселей, включающих одновременно несколько классов поверхностей.

В составе ГТС застроенной части города средние значения вегетационных индексов ниже и варьируют для NDVI в пределах 0,6–0,7 мкг/см², для LAI – 1,2–1,7, для CCC – 55–87 мкг/см². Незначительное увеличение этих показателей характерно для жилой усадебной застройки, а также спецтерриторий.

Структура и состояние всех компонентов ГТС (зданий и сооружений, поверхностей с покрытием, растительного покрова) обуславливают особенности температуры подстилающей поверхности, которая в конечном итоге определяет температурный режим атмосферного воздуха в городе.

Для выявления особенностей формирования «островов тепла» в летний период для г. Могилёва выполнили расчеты значений LST в разрезе выделов городских ГТС на момент наиболее интенсивного развития растительности. Средние значения LST в различных ГТС г. Могилёва приведены на рис. 5 и 6.

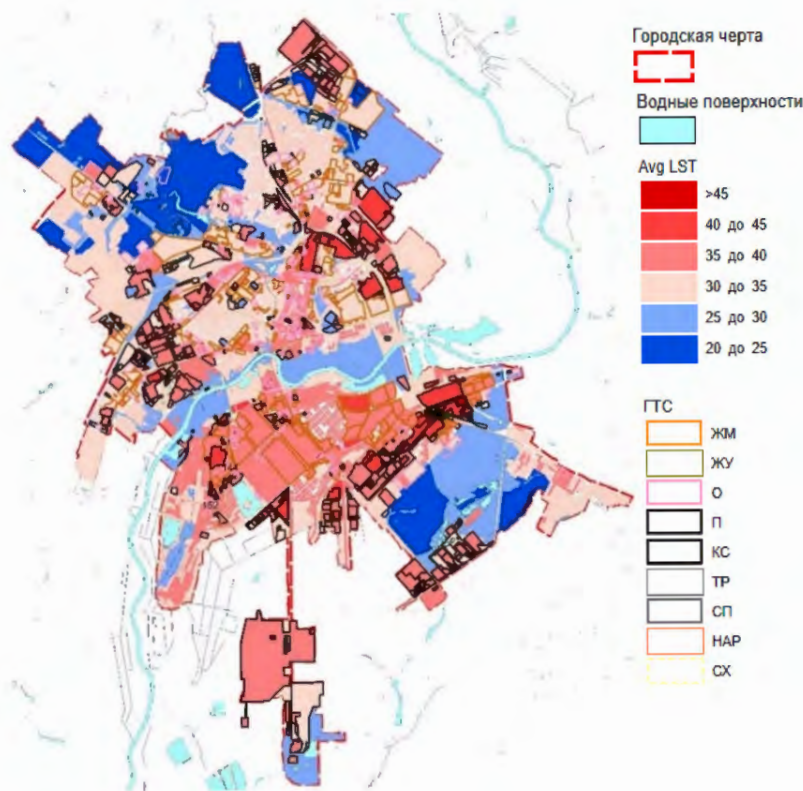


Рис. 5. Средние значения температуры подстилающей поверхности (Avg_LST) в различных геотехнических системах (ГТС) на территории г. Могилёва (дата съемки 03.06.2019, температура воздуха по данным архива погоды +23 °С). Обозначения те же, что и на рис. 1

Fig 5. Average values of the land surface temperature (Avg_LST) in different geotechnical systems (GTS) on the territory of Mogilev (imaging date 03.06.2019, air temperature according to the weather archive +23 °C). The designations are the same as in the fig. 1

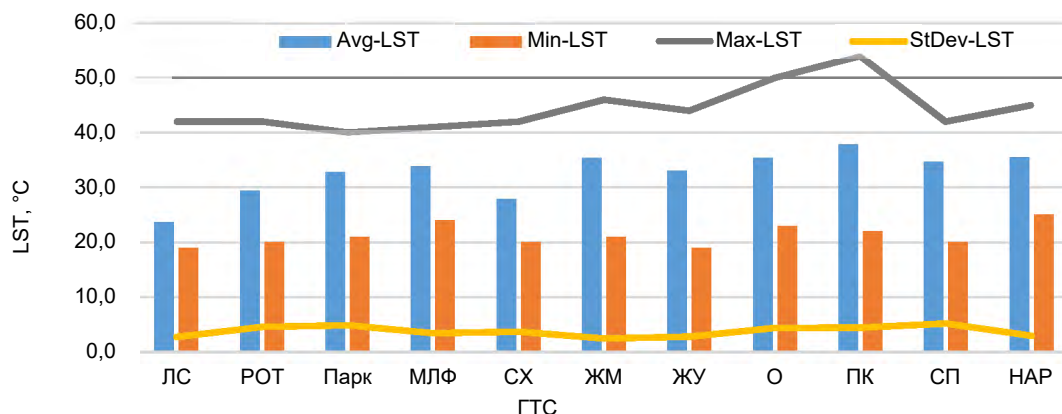


Рис. 6. Значения LST в различных геотехнических системах (ГТС) на территории г. Могилёва. Обозначения те же, что и на рис. 3

Fig 6. LST values in various geotechnical systems (GTS) of Mogilev. The designations are the same as in the fig. 3

Как видно из рис. 5 и 6, на момент исследования наименьшие средние значения LST (23,6 °C с некоторым варьированием) регистрировались в лесных экосистемах г. Могилёва. Несколько более высокими температурами, нежели леса, характеризуются древесно-кустарниковая растительность в долинах рек Днепр и Дубровенка, а также на юго-востоке города на участках с лесной и древесно-кустарниковой растительностью. Средние значения LST в парках варьируют в пределах 32,4...32,8 °C. Это объясняется высоким участием в их составе рекреационной инфраструктуры (дорожек, площадок, аттракционов). Наиболее высокими средними показателями LST характеризуются МЛФ (скверы, бульвары и др.), где средние значения LST достигают почти 34 °C.

В классе застроенных территорий наиболее высокие средние значения LST (близкие к 38 °C) отмечаются для производственно-коммунальных ГТС, здесь же регистрируется и наиболее высокий максимальный показатель LST (54 °C). В составе данных ГТС высока доля техногенно-преобразованных участков – производственных зданий, сооружений, коммуникаций, площадок, дорожной инфраструктуры. Помимо этого, ряд производственно-коммунальных объектов является источником техногенных эмиссий тепла, пара и загрязняющих веществ от технологических процессов и транспорта. Насаждения в них обычно представлены небольшими декоративными группами, аллеями или одиночными деревьями и кустарниками. В составе этих ГТС иногда встречается спонтанная древесно-кустарниковая и сорная травянистая растительность на неудобьях и нарушенных землях.

Несколько ниже средние показатели LST в ГТС жилой многоквартирной, общественной застройки и на участках незавершенного строительства (35,3...35,4 °C). Здесь природная основа существенно преобразована подземными сооружениями, коммуникациями, многоэтажными жилыми зданиями, дорожками, проездами, бытовыми устройствами и элементами рекреационной инфраструктуры (детские игровые, спортивные площадки и др.). Насаждения представлены небольшими массивами, группами или одиночными деревьями и кустарниками. Травянистый ярус, как правило, разрежен из-за систематической косыбы и рекреационных нагрузок, представлен газонными травами и изредка цветниками на придомовых территориях.

Жилая усадебная застройка имеет сходные средние показатели LST (около 32 °C). Здесь природный комплекс преобразован коммуникациями, зданиями и подсобными хозяйственными постройками, дорожками и площадками. Размер и состояние участков с овощными, плодовыми и декоративными культурами зависит от вида усадебной застройки, приемов ухода за ними.

В составе ГТС общественных территорий природный комплекс преобразуется коммуникациями, зданиями, сооружениями, дорожками и площадками с твердым покрытием, состав которых определяется видом общественных ГТС (научно-образовательные, лечебные, административно-деловые и др.). Структура озелененных территорий также во многом определяется видом общественных ГТС и может варьировать от массивов или групп древесно-кустарниковой растительности до единичных деревьев и кустарников, партерных, спортивных газонов или цветников.

Оценку LST дорожно-транспортной инфраструктуры не проводили по причине несоответствия данной задаче пространственного разрешения используемых в работе снимков в тепловом диапазоне.

Оценка связи средних значений LST с различными характеризующими растительный покров показателями, полученными по данным ДЗЗ для всей территории г. Могилёва и различных типов ГТС, отражена в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты парной линейной корреляции средних значений LST с показателями дистанционного зондирования, характеризующими растительный покров г. Могилёва

Table 2. Paired linear correlation coefficients of mean LST values with remote sensing indicators characterizing the vegetation cover of Mogilev

Тип ГТС	NDVI _{ср.}	LAI _{ср.}	CCC _{ср.}	Степень озелененности, %	Тип ГТС	NDVI _{ср.}	LAI _{ср.}	CCC _{ср.}	Степень озелененности, %
Все типы	-0,6	-0,7	-0,6	-0,7	РОТ	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7
ЖМ	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	ЛЕС	-0,6	-0,3	-0,3	-0,3
ЖУ	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	ПАРК	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6
ПК	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	МЛФ	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
О	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	—	—	—	—	—

Связь средних значений LST со степенью озелененности для всех ГТС города просматривается на рис. 7, а, со средними значениями LAI для отдельных типов ГТС – на рис. 7, б–д.

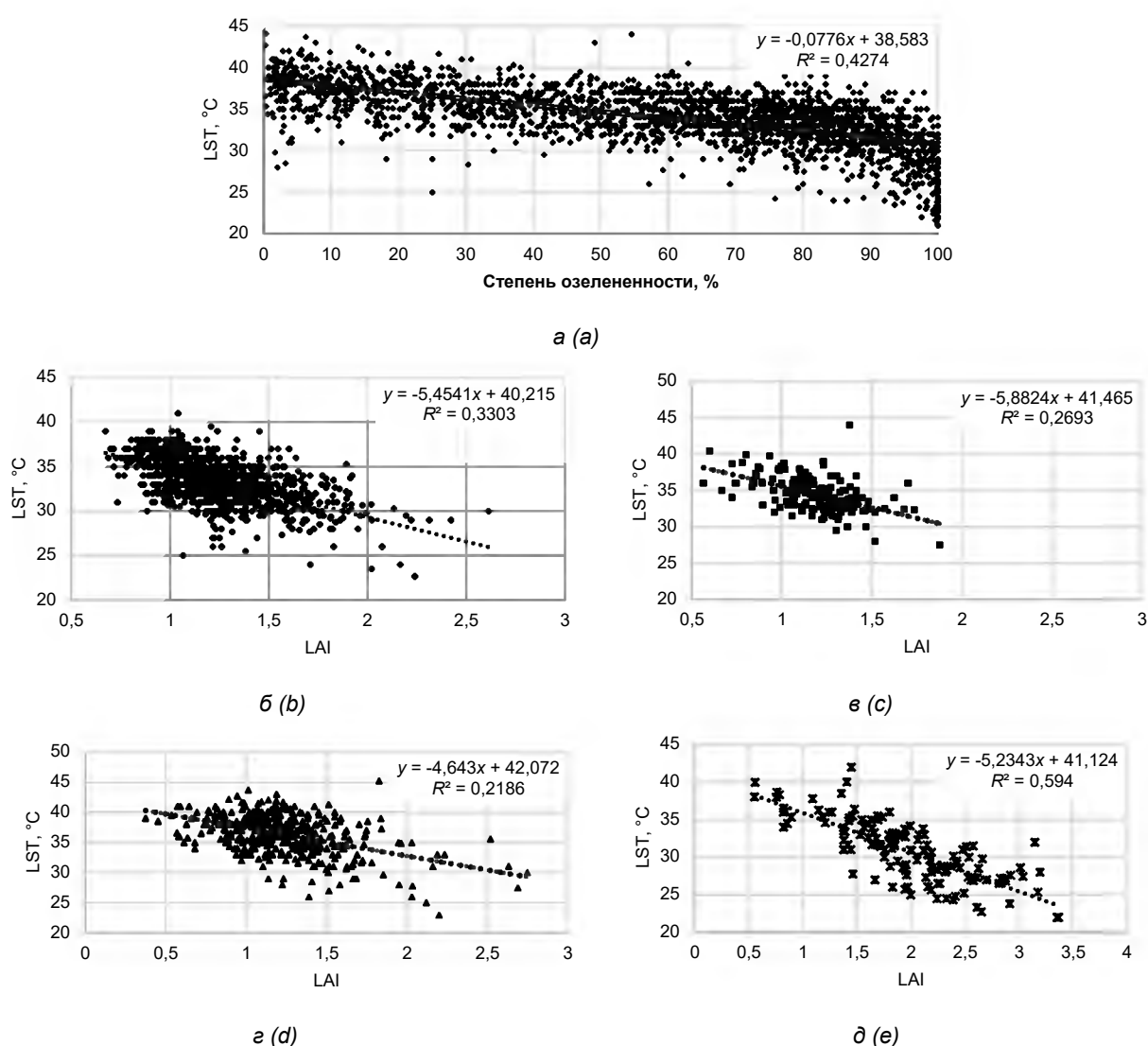


Рис. 7. Связь средней температуры подстилающей поверхности (LST_{avg}): а – со средними показателями степени озелененности в ГТС для всей территории Могилёва; со средними значениями LAI: б – для ГТС жилой усадебной застройки; в – для ГТС жилой многоквартирной застройки с учетом исторического центра; г – для производственно-коммунальных ГТС; д – для резервных озелененных территорий

Fig. 7. Relationship between the average land surface temperature (LST_{avg}) with: а – the average of the greenery degree for the entire territory of Mogilev; average LAI: б – for residential estate; в – for residential multi-apartment buildings and historical centre, д – for industrial GTS; е – for reserve green areas

Заключение. С использованием сопряженного анализа данных ДЗЗ из космоса и дифференцированного в разрезе видов ГТС ГИС-проекта территории г. Могилёва были определены особенности распределения показателей, характеризующих структуру и состояние растительного покрова (NDVI, LAI, CCC), а также степени озелененности городской территории на момент обследования. Это позволило выявить участки с низкой озелененностью, ослабленной растительностью в составе интегральной ГТС города. Низкой степенью озелененности отличаются как ГТС жилой и общественной застройки исторического центра, ряда производственных и коммунально-складских территорий, так и кварталы жилой многоквартирной и общественной застройки левобережья Днепра и северо-западной части города.

Температурный режим воздуха городской территории определяется прежде всего температурой подстилающей поверхности, которая, в свою очередь, в существенной степени зависит от типа ГТС (структуры и состояния всех компонентов – зданий и сооружений, поверхностей с покрытием, растительного покрова и др.). На момент исследования наименьшие средние значения LST регистрировались в лесных экосистемах г. Могилёва. За ними следовали резервные озелененные территории (древесно-кустарниковая растительность в долинах рек Днепр и Дубровенка, а также на юго-востоке города). Далее следовали парки города, а наиболее высокими средними значениями LST в составе ландшафтно-рекреационных территорий характеризовались малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.). В классе застроенных территорий наиболее высокие, средние и максимальные значения LST относились к производственно-коммунальным ГТС. Несколько ниже они были в ГТС жилой многоквартирной, общественной застройки и на участках незавершенного строительства. Замыкает данный ряд жилая усадебная застройка.

Для территории города показано наличие обратной связи значений LST с различными показателями, характеризующими растительный покров: коэффициенты парной линейной корреляции средних значений LST со средними значениями NDVI, LAI, CCC и степенью озелененности наиболее высокие для парков и резервных озелененных территорий, представленных древесно-кустарниковой и луговой растительностью в долинах рек, а также для города в целом. Они слабее в ГТС застроенной части города. Низкими связями отличаются леса и лесопарки, где выявленные особенности связи требуют дополнительных исследований с учетом размеров и местоположения выделов, структуры и состояния растительности.

Список использованных источников

1. Нацыянальны Атлас Беларусі / Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэспублікі Беларусь. – Мінск, 2002. – 292 с.
2. Кравчук, Л. А. Дистанционная оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности основных геотехнических систем крупного города (на примере Минска) / Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова // Природопользование. – 2022. – № 1. – С. 71–82.
3. Brodu, N. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels / N. Brodu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 55, no. 8. – P. 4610–4617. doi:10.1109/TGRS.2017.2694881
4. Copernicus Open Access Hub [Electronic resource]. – Mode of access: <https://scihub.copernicus.eu/>. – Date of access: 23.02.2022.
5. Mayer, B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use / B. Mayer, A. Kylling // Atmos. Chem. Phys. – 2005. – Vol. 5. – P. 1855–1877. doi:10.5194/acp-5-1855-2005
6. Richter, R. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15 / R. Richter, D. Schlöpfer. – 2016. – 263 p.
7. Sen2Cor 2.10 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>. – Date of access: 23.02.2022.
8. Sentinel-2 Toolbox [Electronic resource]. – Mode of access: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox>. – Date of access: 23.02.2022.
9. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sens. Environ. – 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
10. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 2.0) / M. Weiss, F. Baret, S. Jay. – 24.08.2020. – 60 p.

References

1. *Nacyyanal'ny Atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. *Kamitet pa zyamel'nyh resursah, geadezii i kartagrafii pry Savece Minictrau Respubliki Belarus' = Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus*. Minsk, 2002, 292 p. (in Belarusian)

2. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. *Distancionnaya ocenka vliyaniya rastitelnogo pokrova na temperaturu podstilayushej poverhnosti osnovnykh geotekhnicheskikh sistem krupnogo goroda (na primere Minska)* [Remote evaluation of the influence of vegetation cover on the land surface temperature in main geotechnical systems of the large city (by the example of Minsk)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2022, no. 1, pp. 71–82. (in Russian)
3. Brodu N. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, vol. 55, iss. 8, pp. 4610–4617. doi:10.1109/TGRS.2017.2694881
4. Copernicus Open Access Hub. 2022. Available at: <https://scihub.copernicus.eu> (accessed 23 February 2022).
5. Mayer B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, vol. 5, pp. 1855–1877. doi:10.5194/acp-5-1855-2005
6. Richter R., Schläpfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15, 2016, 263 p.
7. Sen2Cor 2.10. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed 23 February 2022).
8. Sentinel-2 Toolbox. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed 23 February 2022).
9. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
10. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 2.0), 2020, 60 p.

Информация об авторах

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Яновский Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanouski@ya.ru

Баженова Наталья Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nata.bazh@mail.ru

Author information

Lyudmila A. Kravchuk – Ph. D. (Geography), Associate Professor, Leader Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Aleksander A. Yanovskiy – Ph. D. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanouski@ya.ru

Natallia M. Bazhenova – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nata.bazh@mail.ru