

УДК 91:004(043.3)

Поступила в редакцию 23.10.2025
Received 23.10.2025

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ГОРОДСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ (НА ПРИМЕРЕ г. ПИНСКА)

Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова,
С. Г. Живнач, Н. К. Быкова, П. В. Книга

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На примере крупного культурного и промышленного центра Полесья – города Пинска – выполнена оценка структуры, состояния и эффективности функционирования растительного покрова в составе различных типов городских геотехнических систем (ГТС) путем совмещенного анализа данных дистанционного зондирования Земли и дифференцированного ГИС-проекта городской территории. Растительный покров различных функциональных зон города оценен по снимкам спутника Sentinel-2 с расчетом нормализованного разностного индекса растительности (NDVI), индекса листовой поверхности (LAI), содержания в пологе хлорофилла (CCC) и степени озелененности (%). На основе подспутниковых исследований структуры и состояния растительного покрова на тестовых полигонах в основных типах городских экосистем г. Пинска определены связи вегетационных индексов с депонированием углерода городскими экосистемами. Полученные связи позволили создать дифференцированную картосхему депонирования CO₂ растительностью в выделах ГТС г. Пинска и рассчитать, что ежегодно депонируется около 13,7 тыс. т CO₂. Дифференцированная оценка температуры подстилающей поверхности (LST) в различных типах ГТС г. Пинска проведена по снимкам спутника Landsat 8 и данным ГИС-проекта. Установлены обратные связи между средними на момент съемки значениями LST, с одной стороны, и LAI, а также степенью озелененности выделов ГТС Пинска, с другой. Соответствующие им значения коэффициента детерминации (R^2) являются невысокими (0,27 и 0,35), что свидетельствует о влиянии на регистрируемую спутником температуру поверхности не только насаждений, но и других факторов городской среды (например: эмиссий техногенного тепла в пойме). Причинами неустранимого для данной работы их влияния являются как различие эффективного пространственного разрешения снимков LST и LAI, так и высокая расчлененность озелененных территорий в застроенной части г. Пинска и мелкоконтурность выделов ГТС, что в совокупности привело к участию в анализе пикселей LST со смешанными поверхностями.

Ключевые слова: растительный покров города; дистанционное зондирование; температура подстилающей поверхности; нормализованный разностный индекс растительности; индекс листовой поверхности; содержание в пологе хлорофилла; Пинск.

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М., Живнач С. Г., Быкова Н. К., Книга П. В. Исследования экосистемных функций городской растительности с использованием геоинформационных систем и спутниковой съемки (на примере г. Пинска) // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 62–74.

STUDY OF ECOSYSTEM FUNCTIONS OF URBAN VEGETATION USING GEOINFORMATION SYSTEMS AND SATELLITE IMAGING (ON THE EXAMPLE OF PINSK)

L. A. Kravchuk, A. A. Yanovskiy, N. M. Bazhenova,
S. G. Zhivnach, N. K. Bykova, P. V. Kniga

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

Abstract. The structure, condition and efficiency of green areas within various types of urban geotechnical systems (GTS) of Pinsk, a major cultural and industrial center in Polesie, were assessed through a combined analysis of Earth remote sensing data and a differentiated GIS project of the urban area. The vegetation cover of the urban areas of various functional zones was assessed using Sentinel-2 satellite images with the calculation of the normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), canopy chlorophyll content (CCC) and the greening degree (%). Relationships between vegetation indices and carbon deposition by urban ecosystems were determined on the basis of subsatellite studies of the structure and condition of vegetation at test sites in the main types of urban ecosystems of Pinsk. The

relationships were used to create a differentiated map of CO₂ deposition by vegetation within various GTS of Pinsk and make the assessment that approximately 13,7·10² tons of CO₂ are being deposited annually. A differentiated assessment of the land surface temperature (LST) in various types of Pinsk GTS was carried out using Landsat 8 satellite images and GIS project data. The negative relationships have been found between the averaged for the time of survey LST values, on the one hand, and the LAI and the greening degree values in GTS of Pinsk, on the other. The corresponding values of the determination coefficient (R^2) are low (0.27 and 0.35), indicating that the surface temperature recorded by the satellite is influenced not only by vegetation, but also by other urban environmental factors (for example, technogenic heat emissions from industrial GTS, irrigation of plantings in residential estates, flooding of wetlands in the floodplain). The reasons for their influence, which cannot be eliminated in this work, are the significant difference in the effective spatial resolution of LST and LAI images, the high fragmentation of green areas in the built-up part of Pinsk and the small-contour nature of its GTS sections, which together led to LST pixels corresponding to mixed surfaces.

Keywords: urban vegetation cover; remote sensing; LST; NDVI; LAI; CCC; Pinsk.

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Zhivnach S. G., Bykova N. K., Kniga P. V. Study of ecosystem functions of urban vegetation using geoinformation system and satellite imaging (on the example of Pinsk). *Nature Management*, 2025, no. 2, pp. 62–74.

Введение. Интенсивная застройка городских территорий актуализирует вопросы оценки эффективности функционирования растительного покрова в городах и оптимизации городской «зеленой инфраструктуры». Данные оценки важны для градостроительного планирования при формировании экологически обоснованной системы озелененных территорий, а также при планировании мероприятий по адаптации к изменению климата и благоустройству городских насаждений.

В исследованиях авторы придерживаются концепции города как интегральной социо-геотехнической системы, состоящей из различных типов территориально распределенных взаимодействующих через систему связей и управление геотехнических систем (ГТС) – жилых многоквартирных, жилых частных, общественных, производственных, коммунально-складских, транспортных, saniрующих, ландшафтно-рекреационных, сельскохозяйственных и др. Разделение их обусловлено как степенью и спецификой техногенного преобразования природных ландшафтов, так и интенсивностью воздействия на компоненты природной среды.

Для характеристики весьма динамичных городских экосистем, наряду с применением традиционных дорогостоящих методов полевых исследований растительного покрова, в настоящее время активно используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Опыт их использования для получения качественных и количественных характеристик структуры природных ландшафтов [1], естественного растительного покрова [2, 3] и городских территорий [4–6 и др.] демонстрирует востребованность данного направления исследований.

Цель работы – апробировать методологию оценки структуры, состояния и эффективности выполнения растительностью основных экосистемных функций в составе городских ГТС различных типов при совмещенном использовании данных ДЗЗ и дифференцированного в разрезе выделов ГТС ГИС-проекта городской территории.

Методика и материалы исследований. Для оценки структуры и состояния насаждений на территории г. Пинска применили совмещенную обработку данных ДЗЗ и ГИС-проекта городской территории, дифференцированного в разрезе выделов ГТС различного функционального назначения.

Исследования включали:

- подготовку дифференцированного в разрезе типов и видов ГТС ГИС-проекта городской территории;
- анализ имеющихся в свободном доступе материалов ДЗЗ, подбор снимков с наиболее высоким пространственным разрешением и наиболее приближенным к проведению подспутниковых натурных исследований временем съемки;
- проведение исследований на тестовых полигонах в составе городских ГТС различных типов для оценки структуры, состояния и продуктивности растительного покрова;
- обработку спутниковых снимков с расчетом индексов, характеризующих растительный покров и температуру подстилающей поверхности городской территории;
- корегистрацию снимков и ГИС-проекта;
- анализ данных ДЗЗ в разрезе структурно-планировочных выделов городских ГТС различных типов и видов;
- расчеты основных экосистемных функций (депонирование углерода, климаторегулирующие) с использованием дифференцированных на уровне выделов данных ДЗЗ и зависимостей, установленных при подспутниковых исследованиях;
- построение дифференцированных картосхем для оценки показателей, характеризующих основные экосистемные функции растительного покрова (депонирование углерода, климаторегулирующие) в составе различных ГТС городской территории.

В процессе исследований для территории г. Пинска подготовили ГИС-проект, в котором с использованием данных публичной кадастровой карты (<https://map.nca.by>), Геопортала ЗИС УП Белгипрозем (gismar.by), картографической подосновы, ведомственных сведений идентифицировали и оконтурили выделы ГТС различных типов: производственные (П) и коммунально-складские (КС), жилой многоквартирной (ЖМ), жилой усадебной (ЖУ), общественной (О) различных видов специальной (СП) застройки, а также санирующие (САН), нарушенные (НАР), сельскохозяйственные (СХ) и ландшафтно-рекреационные (ЛР) территории. При дифференциации выделов ГТС застроенных территорий на виды использовали следующие обозначения: жилая усадебная высокоплотная и смешанная – ЖУв, ЖУсм, жилая многоквартирная высоко-, средне-, низкоплотная и смешанная – ЖМв, ЖМс, ЖМн, ЖМсм соответственно. В составе общественных типов ГТС выделяли следующие виды: административно-деловые (Оад), лечебно-оздоровительные (Оло), научно-образовательные (Оно), торговобывтовые (Отб), культурно-просветительские (Окп), культурные (Окульт), спортивные (Оспорт), смешанные (Осм). В составе производственных и коммунально-складских выделяли теплоэнергетические (ПЭ), промышленные (ПП) транспортные (ПКтранс), смешанные (ПКсм), складские (Кскл), гаражи (Кгар), инженерные объекты и сооружения (Кинж). Ландшафтно-рекреационные территории дифференцировали на следующие виды: леса и лесопарки (ЛП), парки (П), малые ландшафтные формы (МЛФ – скверы, бульвары, озелененные участки общественных центров), а также спонтанная растительность на незастроенных участках города – резервных озелененных территориях (РОТ). Они представлены как участками природного комплекса (болота, луга – РОТприр), так и защитными насаждениями в санитарных разрывах, санитарно-защитных зонах предприятий, коммунальных объектов и коммуникаций (РОТз), древесно-кустарниковой растительности на незастроенных участках (РОТдкр). В целом на территории г. Пинска в ГИС-проекте идентифицировано близко к тысяче выделов 11 типов и 33 видов ГТС.

Обработка данных ДЗЗ включала расчет значений нормализованного разностного индекса растительности (англ. Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) [7], индекса листовой поверхности (англ. Leaf Area Index, LAI, m^2/m^2) и содержания в растительном пологе хлорофилла (англ. Canopy Chlorophyll Content, CCC, mg/cm^2). Ее осуществили по снимкам спутника серии Sentinel-2. Использовали снимки спутников S2A и S2B уровня обработки 1C (орторектифицированные снимки, представленные значениями коэффициента отражения на уровне апертуры радиометра с субпиксельной точностью совмещения спектральных каналов) с датой съемки для территории г. Пинска 16 июля 2024 г. Атмосферную коррекцию выполнили с помощью программы обработки Sen2Cor [8], которая основана на алгоритме «Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков» (ATCOR) [9] и использовании модели переноса излучения LIBRADTRAN [10]. Для повышения точности классификации Sen2Cor водных объектов, городской застройки, открытой поверхности Земли использовали дополнительный пакет данных ESACCI-LC для Sen2Cor [11].

При расчете NDVI, LAI, CCC использовали каналы с пространственным разрешением 10 и 20 м, последние приведены к разрешению 10 м согласно [12]. Расчет NDVI выполнили с пространственным разрешением 10 м. Из расчетов исключили пиксели с искаженными или вышедшими на насыщение значениями, а также облака и их тени.

Озелененность (%) каждого выдела ГТС рассчитали как процентное отношение числа пикселей со значениями NDVI, соответствующих растительности, к общему числу пикселей, центры которых находятся в данном выделе.

Значения LAI и CCC рассчитали с помощью модуля «биофизический обработчик» L2B программы Sentinel-2 Toolbox [13]. Расчет LAI и CCC биофизическим процессором проводится с применением нейронных сетей с использованием моделей переноса излучения [14].

Температуру подстилающей поверхности (англ. Land Surface Temperature – LST) определяли по снимкам спутников серии Landsat. Выбранный снимок LST для г. Пинска получен прибором TIRS спутника Landsat 8 (дата и время съемки: 16.07.2024, 12 ч 07 мин местного времени). Данный прибор регистрирует яркостную температуру в двух тепловых диапазонах при пространственном разрешении 100 м. Последующее приведение оператором Landsat данных каналов к разрешению 30 м путем передискретизации методом «кубическая свертка» не приводит к увеличению их эффективного пространственного разрешения. Для оценки показателей LST в разрезе основных типов и видов ГТС в городах выполнили коррекцию геопривязки снимков Landsat и извлекли значения кинетической температуры поверхности для пикселей, соответствующих выделам ГТС в ГИС-проекте г. Пинска.

Результаты и их обсуждение. Анализ дифференцированного в разрезе выделов ГТС ГИС-проекта территории Пинска в пределах городской черты (рис. 1) продемонстрировал преобладание застроенных территорий, доля которых оценивается близко к 54 %. Из них около 22 % составляют ГТС жилой усадебной застройки, что выше площади ГТС жилой многоквартирной застройки (9 %). Доля участков под промышленными и коммунально-складскими ГТС оценивается в 14 %, а под общественными и специализированными ГТС – 7 и 1 % соответственно. Санирующие ГТС, к которым

отнесены очистные сооружения, на момент исследования занимали 1 %, а транспортные ГТС (с учетом инфраструктуры – стоянок, развязок, АЗС и др.) – близко к 9 % территории г. Пинска (без учета проездов в составе застройки).

Водные объекты занимают 2 % и представлены участками рек Пины и Припяти с притоками и затоками, а также мелиоративными каналами и небольшими прудами, входящими в городскую черту.

Озелененные территории (без учета водных объектов) вне кварталов застройки занимают около 32 % городских земель. В г. Пинске высоко участие относительно малоизмененных природных комплексов, которые представлены заболоченными массивами на южной малозастроенной части города в пойме рек Припяти и Пины (14 % от площади городских земель), лесами (2 %), а также древесно-кустарниковой и луговой растительностью на резервных территориях (10 %). Участие благоустроенных озелененных рекреационных территорий общего пользования – парков, скверов, бульваров, озелененных территорий общественных центров – в составе городской территории несущественно. Парки занимают только 0,2 % площади городской территории и представлены городским парком им. Днепроградской флотилии, а также городским детским парком, на момент исследований находящемся на стадии благоустройства и практически не имеющем рекреационной инфраструктуры. Скверы, бульвары и озелененные территории общественных центров – небольшие по площади, расположены преимущественно в центральной части города и занимают около 1 % городской территории. На берегу рек Пины и Припяти функционируют благоустроенные зоны кратковременного отдыха у воды (пляжи) (0,2 %). Доля защитных насаждений (РОТз), расположенных в санитарных разрывах между промзонами и коммуникациями, вдоль магистралей оценивается близко к 5 %.

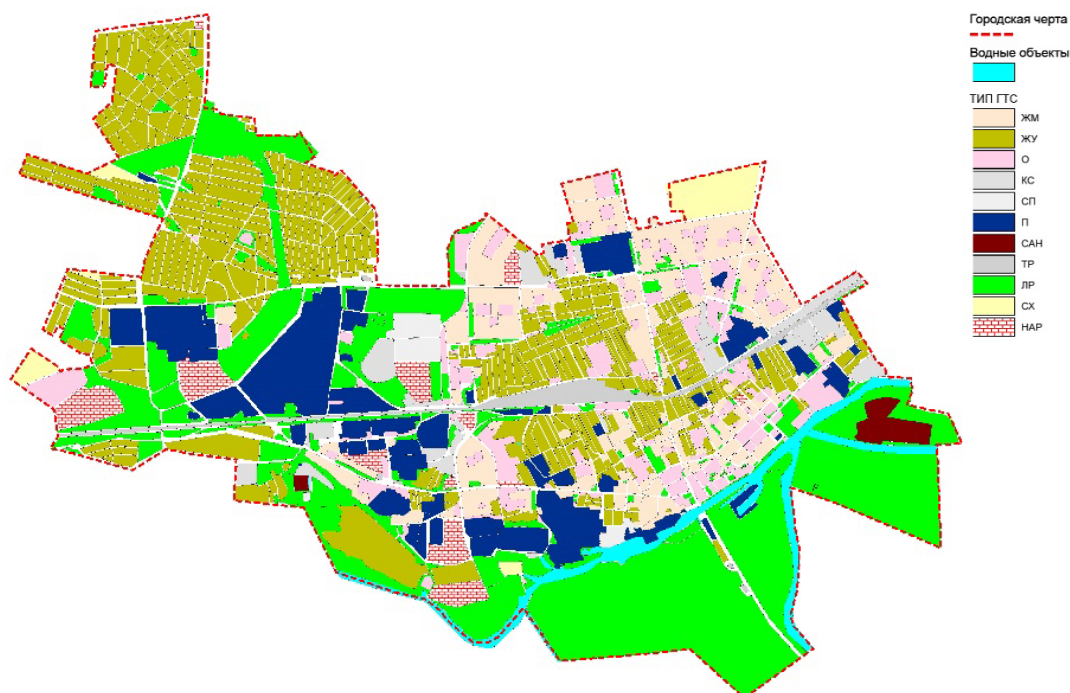


Рис. 1. Структура ГТС г. Пинска (в разрезе типов): ЖМ – жилые многоквартирные; ЖУ – жилые усадебные; КС – коммунально-складские; ЛР – ландшафтно-рекреационные; НАР – нарушенные (в том числе незавершенное строительство); О – общественные; П – производственные; САН – saniрующие; СП – специальные; СХ – сельскохозяйственные; ТР – транспортные

Fig. 1. Structure of the Pinsk GTS types: ЖМ – residential multi-apartment; ЖУ – residential estate; КС – communal warehouse; ЛР – landscape-recreation; НАР – disturbed areas (including under construction); О – public; П – industrial; САН – sanitizing; СП – special; СХ – agricultural; ТР – transportational

Результаты совмещенной обработки данных ДЗЗ и ГИС-проекта для г. Пинска, дифференцированного в разрезе выделов ГТС, позволили построить картосхемы распределения NDVI, LAI и ССС в разрезе выделов ГТС различного типа и вида. Средние значения NDVI растительного покрова в структурно-планировочных выделах различных ГТС городской территории Пинска (рис. 2), демонстрируют наиболее высокие средние показатели NDVI (0,60–0,62) на южной окраине города в долине рек Пины и Припяти. Растительность здесь представлена болотными экосистемами с участием деревьев и кустарников (ивы, осина, ольха и др.). В городских сосновых лесах данные показатели являются

более низкими (0,42–0,46). Сравнительно высокими средними значениями NDVI (0,48–0,51) характеризуется древесно-кустарниковая растительность резервных озелененных территорий, расположенных вблизи промзон, а также насаждения в жилой усадебной застройке (рис. 2).

Нормируемым показателем качества городской среды является озелененность городской территории и различных ее функциональных типов. Эти показатели в Беларуси регламентируются экологическими и строительными нормами [15, 16]. Дифференцированная оценка озелененности в разрезе выделов ГТС позволила выявить участки городской территории с низкими показателями (рис. 3).



Рис. 2. Распределения средних значений NDVI (Avg_NDVI) в ГТС г. Пинска

Fig. 2. Distribution NDVI (Avg_NDVI) of vegetation cover in GTS units of Pinsk

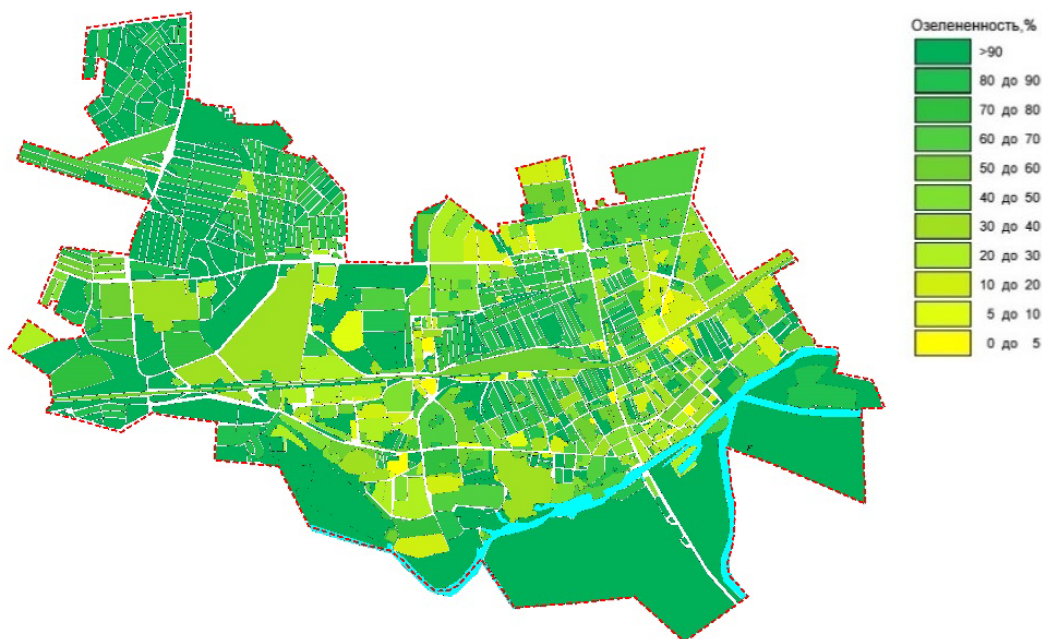


Рис. 3. Схема озелененности (%) выделов ГТС на территории г. Пинска

Fig. 3. Scheme of greenery degree (%) of GTS units in Pinsk

Низкие значения озелененности, как видно из рис. 3, отмечаются в г. Пинске на участках ряда производственных и коммунальных ГТС (промобъекты, гаражные массивы, складские территории), а также в кварталах новой жилой многоквартирной и общественной (преимущественно торгово-бытовой) застройки, на участках незавершенного строительства.

Ряд средозащитных и средоформирующих функций растительности (ассимиляционная, пылезадерживающая, климаторегулирующая, стокорегулирующая и др.) определяются значением индекса листовой поверхности – LAI, который коррелирует с фотосинтезирующей биомассой и приростом согласно [17, с. 175], и зависит от типа растительности и ее состояния. Следует отметить, что LAI существенно варьирует в связи с сезонной динамикой развития растений, дефолиацией при их ослаблении. В городах косьба и деградация газонов, обрезка и удаление деревьев приводят к снижению значений LAI. Низкие значения LAI свидетельствуют о незначительном участии древесной и кустарниковой растительности, разреженном травянистом покрове, ослаблении растений. Однако высокие значения LAI в городах могут регистрироваться при интенсивном развитии сорной растительности, в том числе инвазивных видов.

Распределение средних значений LAI в выделах ГТС г. Пинска приведены на рис. 4. Низкие средние показатели LAI в выделах ГТС г. Пинска идентифицируются в основном для участков новой жилой многоквартирной и усадебной застройки, на сельскохозяйственных землях, а также для общественных ГТС (преимущественно торгово-бытовой застройки) и промышленно-коммунальных объектов.

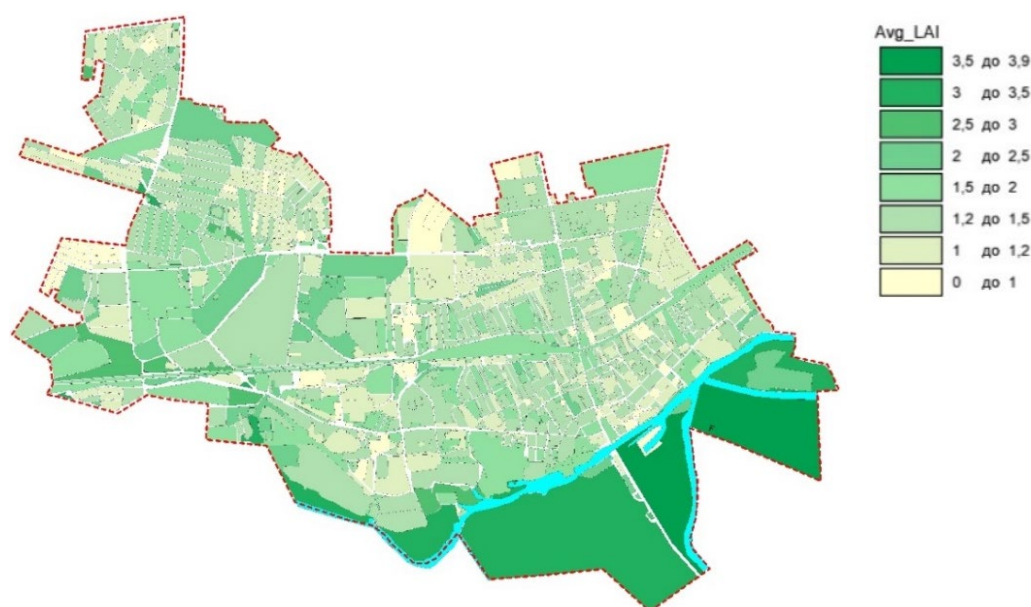


Рис. 4. Схема распределения средних значений индекса листовой поверхности (Avg_LAI) в выделах ГТС на территории г. Пинска

Fig. 4. Scheme of average LAI values in GTS units of Pinsk

Значения NDVI, LAI и CCC (разделенное на 100 для удобства отражения на единой диаграмме) в разрезе различных видов ГТС в г. Пинске приведены на рис. 5, из которого видно, что средние показатели вегетационных индексов в застроенной части г. Пинска по видам ГТС варьируют незначительно, наибольшие различия наблюдаются в максимальных показателях, а это указывает, прежде всего, на высокое участие в составе растительного покрова древесно-кустарниковой растительности. Наиболее существенные отличия от насаждений в других ГТС отмечаются у насаждений в составе ЛР территорий, где заболоченные территории на южной незастроенной части Пинска (РОТприр) и защитные насаждения (РОТз) демонстрируют более высокие значения всех индексов по сравнению, например, с лесами, парками и МЛФ.

Для оценки эффективности выполнения растительностью города экосистемных функций (например, депонирования углерода) использовали зависимости, установленные при спутниковых исследованиях на тестовых полигонах (ТП). Исследования проводили в период, наиболее приближенный к времени спутниковой съемки (15–18.07.2024), на полигонах точечного и площадного типов. В качестве ТП точечного типа выбирали наименее фрагментированные участки растительного покрова (в лесах, парках, в составе резервных озелененных территорий, насаждений в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки). Площадные полигоны выделяли в ГТС с высокой фрагментацией

насаждений техногенными зданиями, сооружениями и покрытиями. Оценка растительного покрова на ТП точечного типа заключалась в выявлении структуры и состояния древесного и кустарникового яруса, их морфометрических обмеров. Для травянистого покрова определяли проективное покрытие доминирующих видов, высоту травостоя.

С использованием таблиц и моделей хода роста и биологической продуктивности [18, 19] определяли продуктивность и удельные показатели депонирования углерода растительностью на ТП. Для этого проанализировали связь между значениями NDVI, LAI и CCC и депонированием углерода. Для 27 точечных ТП в г. Пинске наиболее сильные связи депонирования углерода получены для LAI. Регрессионные уравнения связи депонирования углерода со средними значениями LAI, полученные на тестовых полигонах в г. Пинске, отражены на рис. 6.

Использование регрессионных уравнений связи расчетных показателей депонирования углерода (С, т/га в год) со средними показателями LAI на тестовых полигонах г. Пинска (см. рис. 6) позволило провести оценку удельных показателей депонирования углерода растительностью в выделах ГТС Пинска по средним значениям LAI данных выделов (см. рис. 3). Полученные результаты приведены на рис. 7 в пересчете на CO₂.

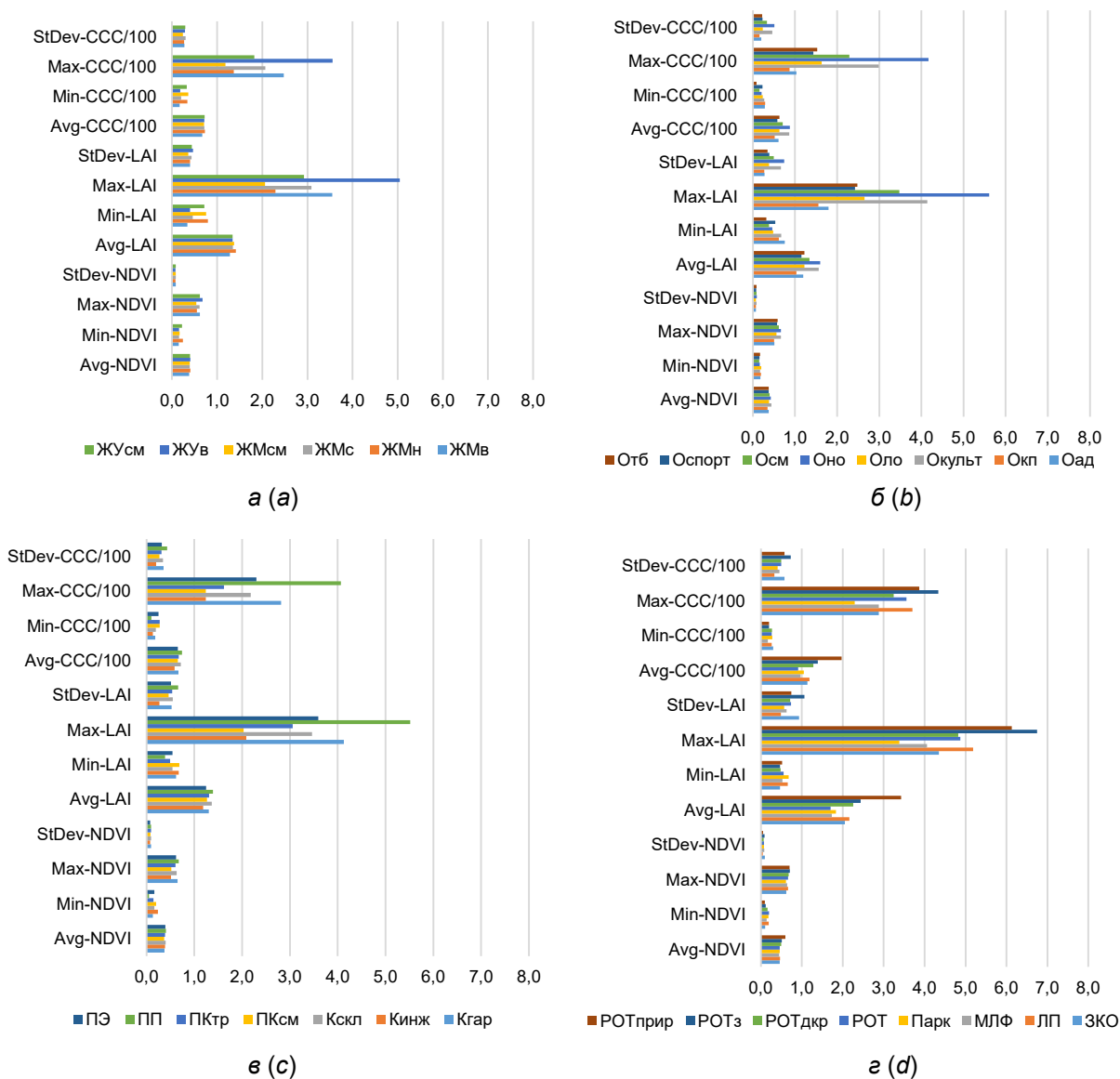


Рис. 5. Вегетационные индексы в ГТС г. Пинска: а – жилые; б – общественные; в – производственные и коммунально-складские; г – ландшафтно-рекреационные

Fig. 5. Vegetation indices in GTS of Pinsk: a – residential; b – public; c – industrial and communal warehouse; d – landscape-recreational

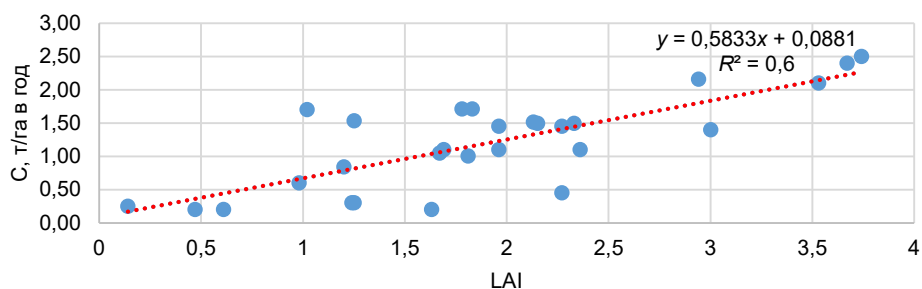


Рис. 6. Связь расчетных значений депонирования углерода (С, т/га в год) со средними значениями LAI на тестовых полигонах г. Пинска

Fig. 6. Relationships between calculated carbon sequestration values (C, tons per hectare per year) with average LAI values at test sites in Pinsk

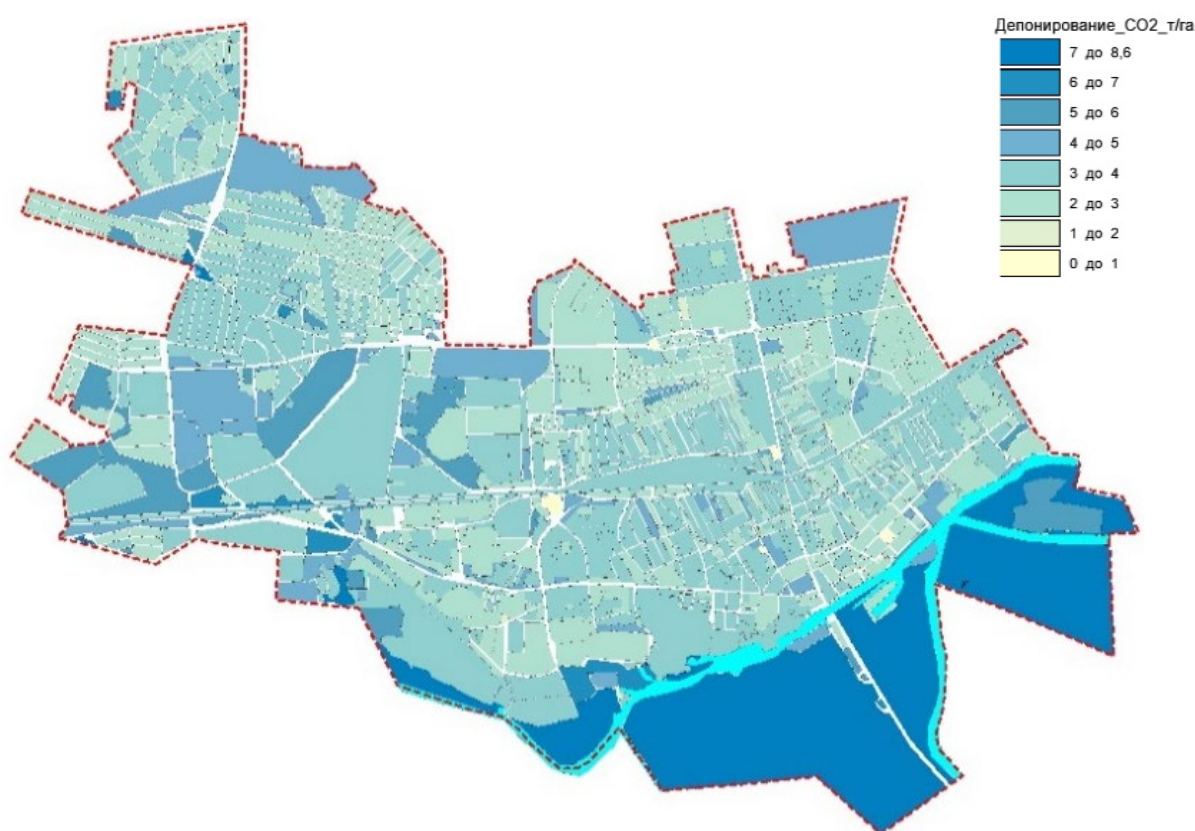


Рис. 7. Схема депонирования CO₂ растительным покровом в выделах ГТС г. Пинска, т/га в год

Fig. 7. Scheme of CO₂ sequestration by vegetation cover at GTS units in Pinsk, tons per hectare per year

В целом расчеты показали, что растительностью в составе основных ГТС г. Пинска ежегодно депонируется около 13,7 тыс. т углекислого газа. При этом на территории города наибольшее количество – близко к 8 тыс. т, депонируется насаждениями незастроенных озелененных территорий (ЛР ГТС), к которым относятся территории природного комплекса (заболоченные участки в долине рек Пины и Припяти, леса и лесопарки, парки, скверы, бульвары, защитные насаждения вблизи промышленных объектов, незастроенные резервные озелененные территории и др.). Насаждения в составе ГТС жилой усадебной застройки ежегодно ассимилируют около 2,8 тыс. т, в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки – 0,7 и 0,6 тыс. т соответственно, производственной и коммунальной – близко к 0,6 тыс. т.

Важнейшей для городов экосистемной функцией насаждений является регулирование микроклиматических условий. Информация о локализации городских «островов тепла» необходима для принятия мер по адаптации городского хозяйства к изменению климата.

Для г. Пинска оценка распределения значений LST выполнена в разрезе выделов ГТС, различного функционального назначения. Для улиц и автодорог оценку LST не проводили, поскольку характерная их ширина меньше пространственного разрешения снимков, что существенно снижает точность оценок. Картограмма распределения средних значений LST на городской территории отображена на рис. 8.

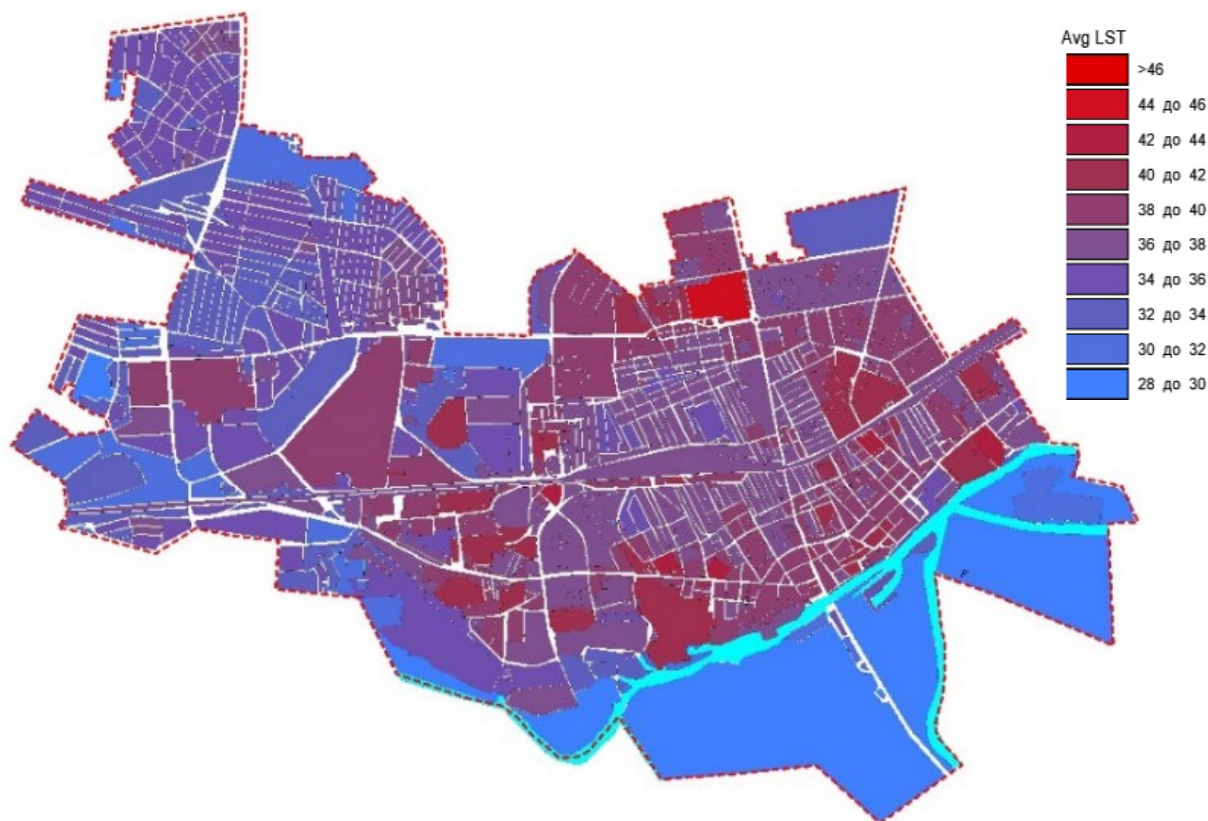


Рис. 8. Схема распределения средних значений температуры подстилающей поверхности (Avg_LST °C) в выделах ГТС в г. Пинске (дата съемки: 16.07.2024, 12 ч 07 мин местного времени)

Fig. 8. Distribution scheme of average land surface temperature values (Avg_LST °C) at GTS units in Pinsk (date: 16.07.2024, 12:07 a.m. local time)

Наиболее охлажденными на территории Пинска на момент съемки, как видно из картограммы на рис. 8, являются заболоченные территории долинного комплекса рек Пины и Припяти, городские леса, а также СХ ГТС и POT на северной и западной окраине города. Отмечается снижение LST в жилой усадебной застройке на северо-западной окраине города. Наиболее высокие средние и максимальные показатели LST регистрируются в производственных и коммунально-складских ГТС, в том числе на севере города (промплощадка СООО «ПП Полесье», Пинский мясокомбинат, западный пром-узел, ТЭЦ, ряд гаражных массивов), а также в отдельных общественных ГТС (Оспорт: напр., Ледовый дворец). Отмечаются повышенные показатели LST в отдельных кварталах ГТС новой жилой многоквартирной застройки (Радужный, Луги и др.), что можно связать с низкими показателями их озелененности из-за большого количества поверхностей с покрытием и молодых посадок. Оценка показателей LST выявила наибольшие различия LST между ЛР территориями и производственными, коммунально-складскими ГТС (рис. 9). Из элементов транспортной инфраструктуры (ТР*) LST оценивали для придорожных полос, отводов железной дороги и др.

Оценка связи между средней температурой подстилающей поверхности (LST_{avg}) и анализируемыми показателями растительности в г. Пинске показала наиболее значимые отрицательные связи LST с озелененностью (%) и средними значениями LAI в выделах ГТС (рис. 10).

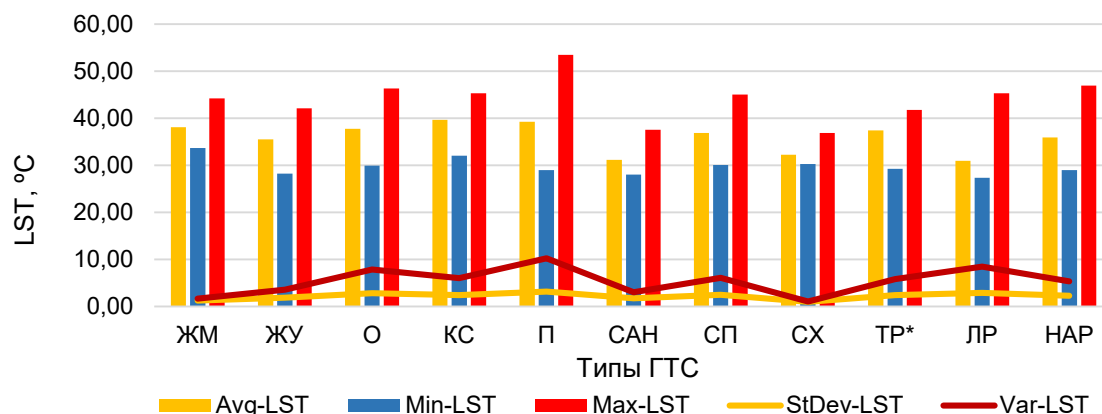


Рис. 9. Показатели LST в основных типах ГТС на территории г. Пинска

Fig. 9. LST values of main GTS types in Pinsk

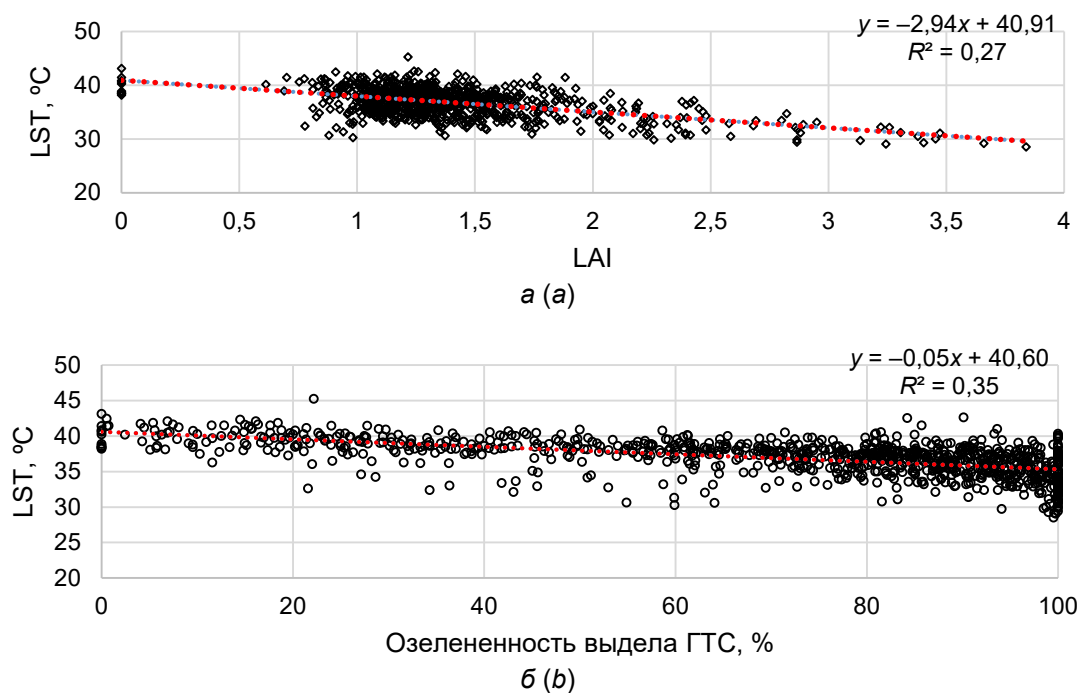


Рис. 10. Связь средней температуры подстилающей поверхности (LST_{avg}): а – со средними значениями LAI_{avg} ; б – со степенью озелененности (%) в выделах ГТС в г. Пинске

Fig. 10. Relationships between average LST and: а – average LAI values; б – greenery degree (%) of GTS units in Pinsk

Заключение. Использованный методический подход к дифференцированной оценке экосистемных функций озелененных территорий (депонирование CO_2 , климаторегулирующие) различных ГТС в городе предполагает выполнение совмещенного анализа данных ДЗЗ и ГИС-проекта города, дифференцированного в разрезе основных типов ГТС. Данный анализ позволил определить структуру интегральной ГТС г. Пинска. Для территории этого города построены дифференцированные карто-схемы распределения средних значений NDVI, LAI, LST, что позволило выявить участки с низкими показателями озелененности, слабым развитием растительного покрова. Оценка LST в г. Пинске за час до астрономического полдня летнего периода (июль 2024 г.) выявила на территории города участки с высокими значениями LST, к которым относятся территории промзон крупных предприятий, коммуналь-ных объектов (гаражные массивы), новой жилой многоквартирной застройки, нарушенные территории (участки незавершенного строительства).

Проанализирована связь между значениями NDVI, LAI и ССС и депонированием углерода растительностью на точечных подспутниковых полигонах в г. Пинске, при этом наиболее сильная связь получена для LAI. Регрессионные уравнения связи депонирования углерода со средними значениями LAI характеризуются значением коэффициента детерминации 0,6. Полученные зависимости позволили создать дифференцированную картосхему депонирования CO₂ растительным покровом в выделах ГТС г. Пинска и рассчитать, что растительностью в составе основных ГТС г. Пинска ежегодно депонируется около 13,7 тыс. т углекислого газа. Установлены обратные отрицательные связи между средними на момент съемки значениями LST с одной стороны и LAI и степенью озелененности в выделах ГТС г. Пинска с другой. Соответствующие им значения коэффициента детерминации являются невысокими (0,27 и 0,35), что свидетельствует о влиянии на регистрируемую спутником температуру поверхности не только насаждений, но и других факторов городской среды (например: эмиссий техногенного тепла в промышленных ГТС, полива насаждений в жилой застройке, подтопления заболоченных территорий в пойме). Причинами неустраняемого для данной работы их влияния являются как различие эффективного пространственного разрешения снимков LST и LAI, так и высокая расчлененность озелененных территорий в застроенной части г. Пинска и мелкоконтурность выделов ГТС, что в совокупности привело к участию в анализе пикселей LST со смешанными поверхностями.

Исследования проведены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках выполнения проекта № Х23КУБ-001.

Список использованных источников

1. Кренке, А. Н. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации / А. Н. Кренке, Ю. Г. Пузаченко // Экологическое планирование и управление. – 2008. – № 2 (7). – С. 10–25.
2. Наземные и дистанционные методы оценки состояния экосистем особо охраняемых природных территорий / Д. Г. Груммо [и др.] ; под общ. ред. Д. Г. Груммо, А. В. Судника ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича. – Минск : Бел. наука, 2023. – 351 с.
3. Груммо, Д. Г. Научные основы и методология оценки структурно-функциональной организации растительного покрова Беларуси с использованием дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Груммо Дмитрий Геннадьевич ; Ин-т эксперим. ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2025. – 48 с.
4. Кравчук, Л. А. Средоформирующие функции зеленой инфраструктуры города Витебска / Л. А. Кравчук, Н. М. Баженова, А. Н. Гайшун // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 127–137.
5. 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.
6. Кравчук, Л. А. Оценка влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности в различных геотехнических системах г. Могилёва / Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 13–23.
7. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C. J. Tucker // Remote Sensing Environment. – 1979. – Vol. 8, iss. 2. – P. 127–150. – DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
8. Sen2Cor 2.12. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (date of access: 09.10.2024).
9. Richter, R. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide / R. Richter, D. Schläpfer. – DLR IB 565-01/15. – 2016. – 263 p.
10. Mayer, B. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use / B. Mayer, A. Kylling // Atmospheric Chemistry Physics. – 2005. – Vol. 5. – P. 1855–1877. – DOI: 10.5194/acp-5-1855-2005.
11. Pignatale, F. C. Sen2Cor 2.12.03 Configuration and User Manual. – 10.09.2024. – URL: <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.12.0/docs/OMPC.TPZG.SUM.002%20-%20i1r0%20-%20Sen2Cor%202.12.03%20Configuration%20and%20User%20Manual.pdf> (date of access: 09.10.2024).
12. 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, iss 8. – P. 4610–4617. – DOI: 10.1109/TGRS.2017.2694881.
13. Sentinel-2 Toolbox. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (date of access: 09.09.2024).
14. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1) / M. Weiss, F. Baret. – 2016. – 53 p.
15. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности : ЭкоНИП 17.01.06-001-2017 : утв. и введ. в действие постановлением Мин-ва природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 18.07.2017 № 5-Т. – URL: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/03/%D0%97-%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F-%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F-%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.01.06-001-2017.pdf> (дата обращения: 09.10.2024).
16. Планировка и застройка населенных пунктов = Планіроўка і забудова населеных пунктаў : СН 3.01.03-2020 / Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 59 с.

17. Уткин А. И. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование / А. И. Уткин, Л. С. Ермолова, И. А. Уткина ; отв. ред. С. Э. Вомперский ; Рос. акад. наук, Ин-т лесоведения. – М.: Наука, 2008. – 292 с.
 18. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). – М., 2008. – 886 с.
 19. Биогеоэкологическое разнообразие Беларуси: информационно-моделирующая система / Г. И. Сачок, Д. В. Татьянок, В. В. Коляда [и др.] – Минск : ИПИПРЭ АН Беларуси, 1996. – 240 с.
1. Krenke A. N., Puzachenko Yu. G. *Postroenie karty landshaftnogo pokrova na osnove distancionnoj informacii* [Construction of map of landscape cover on the basis of the controlled from distance information]. *Ekologicheskoe planirovanie i upravlenie = Ecological planning and management*, 2008, no. 2 (7), pp. 10–25. (in Russian)
 2. Grummo D. G., e.a. *Nazemnye i distancionnye metody ocenki sostoyaniya ekosistem osobo ohranyaemykh prirodnykh territorij* [Ground-based and remote sensing methods for assessing the state of ecosystems in specially protected natural areas]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2023, 351 p. (in Russian)
 3. Grummo D. G. *Nauchnye osnovy i metodologiya ocenki strukturno-funkcional'noj organizacii rastitel'nogo pokrova Belarusi s ispol'zovaniem distancionnogo zondirovaniya Zemli i geoinformacionnykh tekhnologij: avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* [Scientific foundations and methodology for assessing the structural and functional organization of vegetation in Belarus using remote sensing and geoinformation technologies. Dr. boil. sci. author's abstract diss.]. Minsk, 2025, 48 p. (in Russian)
 4. Kravchuk L. A., Bazhenova N. M., Haishun A. N. *Sredoformiruyushchie funktsii zelenoj infrastruktury goroda Vitebska* [Environment-forming function of green infrastructure of Vitebsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 127–137. (in Russian)
 5. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. *Distancionnaya ocenka vliyaniya rastitel'nogo 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)
 6. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. *Ocenka vliyaniya rastitel'nogo pokrova na temperaturu podstilayushej poverhnosti v razlichnykh geotekhnicheskikh sistemah g. Mogilyova* [Evaluation of the influence of vegetation cover on the temperature of the underlying surface in various geotechnical systems of Mogilev]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2023, no. 2, pp. 13–23. (in Russian)
 7. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1979, vol. 8, iss. 2, pp. 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
 8. Sen2Cor 2.12. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed October 9, 2024).
 9. Richter R., Schlöpfer D. Atmospheric/Topographic correction for satellite imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15, 2016, 263 p.
 10. Mayer B., Kylling A. 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: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>.
 11. Pignatale F. C. Sen2Cor 2.12.03 Configuration and user manual. Available at: <https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.12.0/docs/OMPC.TPZG.SUM.002%20-%20i1r0%20-%20Sen2Cor%202.12.03%20Configuration%20and%20User%20Manual.pdf> (accessed October 9, 2024).
 12. 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: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2694881>.
 13. Sentinel-2 Toolbox. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed September 9, 2024).
 14. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1). 02.05.2016, 53 p.
 15. EkoNIP 17.01.06-001-2017 *Ohrana okruzhayushej sredy i prirodopolzovanie. Trebovaniya ekologicheskoy bezopasnosti* [Environmental norms and rules 17.01.06-001-2017 Environmental protection and nature management. Environmental safety requirements]. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/03/%D0%97%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.01.06-001-2017.pdf> (accessed 9 October 2024). (in Russian)
 16. SN 3.01.03-2020. *Planirovka i zastrojka naselennykh punktov = Planirouka i zabudova naselennykh punktau* [Building regulations 3.01.03-2020 Planning and construction of settlements]. Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. Minsk, Minstrojarkhitektury Publ., 2023, 59 p. (in Russian)
 17. Utkin A. I., Ermolova L. S., Utkina I. A. *Ploshad poverhnosti lesnykh rastenij: sushnost, parametry, ispolzovanie* [Surface area of forest plants: essence, parameters, use]. Minsk, 2008, 292 p. (in Russian)
 18. *Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnykh lesoobrazuyushih porod Severnoj Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* [Tables and models of the growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (normative and reference materials)]. Minsk, 2008, 886 p. (in Russian)
 19. Sachok G. I., Tatyank D. V., Kolyada V. V., Kamysenko G. A., Kolkovsky V. M., Rybka V. I. *Biogeocenoticheskoe raznoobrazie Belarusi: Informacionno-modeliruyushaya sistema* [Biogeocenotic diversity of Belarus: Information and modeling system]. Minsk, Institute of Natural Resource Management and Ecology of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 1996. 240 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, 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, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanouski@yandex.ru

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

Живнач Светлана Геннадьевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhyunach@gmail.com

Быкова Наталья Константиновна – кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: bnk_@tut.by

Книга Павел Витальевич – аспирант, младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: knigapv@mail.ru

Information about the authors

Lyudmila A. Kravchuk – Ph. D. (Geography), 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

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

Natalia 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

Svetlana G. Zhivnach – Ph. D. (Geography), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhyunach@gmail.com

Natalia K. Bykava – Ph. D. (Geography), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: bnk_@tut.by

Pavel V. Kniga – graduate student, Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: knigapv@mail.ru
