

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ ГОРОДСКОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ Г. ГОМЕЛЯ)

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 белорусского города Гомеля анализируются возможности использования данных спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для дифференцированной оценки структуры, состояния и эффективности функционирования озелененных территорий в городах. Предложен подход совмещенного использования данных ДЗЗ и дифференцированного геоинформационного проекта городских геотехнических систем (ГТС). Растительный покров выделов городской территории различного функционального назначения оценен по снимкам 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 на тестовых полигонах структуры и состояния растительного покрова в основных типах городских экосистем Гомеля выполнена оценка связи индексов растительности с депонированием углерода городскими экосистемами. Данная оценка использована для создания дифференцированной картосхемы депонирования CO₂ растительностью в различных ГТС Гомеля.

Проведена дифференцированная оценка дневной температуры подстилающей поверхности (LST) ГТС Гомеля по снимкам Landsat и данным ГИС-проекта. В различных типах ГТС крупного города установлена значимая отрицательная связь между средними на момент съемки значениями LST и значениями LAI и степенью озелененности. Коэффициенты детерминации связей средних значений LST со средними значениями LAI и степенью озелененности всех выделов ГТС в городе оцениваются 0,41 и 0,48 соответственно.

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

Для цитирования. Кравчук Л. А., Яновский А. А., Баженова Н. М., Живнач С. Г., Быкова Н. К., Книга П. В. Дистанционная оценка экосистемных функций городской растительности (на примере г. Гомеля) // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 38–50.

REMOTE ASSESSMENT OF THE ECOSYSTEM FUNCTIONS OF URBAN VEGETATION (ON THE EXAMPLE OF GOMEL CITY)

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 possibilities of using satellite earth remote sensing (ERS) data for a differentiated assessment of the structure, condition and efficiency of green areas in cities are analyzed on the example of large Belarusian city Gomel. An approach is proposed for the combined use of ERS data and city GIS project differentiated by the types of urban geotechnical systems (GTS). The vegetation cover of the urban areas of various functional zones was assessed using Sentinel-2 images with the calculation of the normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI), canopy chlorophyll content (CCC) and the greening degree (%). An assessment of the relationship between vegetation indices and carbon deposition by urban ecosystems was made on the basis of the sub-satellite studies at test sites of the structure and state of vegetation in the main types of urban ecosystems of Gomel. The assessment was used to create a differentiated map of CO₂ deposition by vegetation in various GTS of Gomel.

A differentiated assessment of the daytime land surface temperature (LST) of Gomel GTS was carried out using Landsat images and GIS project data. The significant negative relationships have been found between the averaged for the time of survey LST values and the LAI and the greening degree values in various types of GTS of the large city. The

coefficients of the determination of the relationships of the average LST values with the average LAI values and the greening degree of all GTS sections in the city were equal to 0.41 and 0.48, respectively.

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

For citation. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Zhivnach S. G., Bykova N. K., Kniga P. V. Remote assessment of the ecosystem functions of urban vegetation (on the example of Gomel city). *Nature Management*, 2025, no. 1, pp. 38–50.

Введение. Проблемы оценки структуры, состояния и эффективности функционирования растительного покрова в городах актуализируются в связи с интенсивной застройкой городских территорий и продиктованы необходимостью оптимизации интегральной геотехсистемы города для создания благоприятной и устойчивой городской среды. Эти оценки востребованы при градостроительном планировании, диагностике состояния окружающей среды и оптимизации структуры озеленения, в том числе при проведении мероприятий по повышению экосистемных функций городских насаждений.

Концепция города как интегральной социо-геотехнической системы, состоящей из различных типов территориально распределенных геотехнических систем (далее – ГТС) – селитебных (жилых многоквартирных, жилых усадебных, общественных), производственных, коммунально-складских, транспортных, saniрующих, ландшафтно-рекреационных и сельскохозяйственных – делает возможной дифференцированную оценку структуры и особенностей функционирования растительного покрова в составе различных ГТС города.

В настоящее время для характеристики ландшафтов, растительного покрова, наряду с использованием сведений мониторинга, традиционных ландшафтных и геоботанических исследований, активно используются данные дистанционного зондирования земли (далее – ДЗЗ). Опыт их использования для получения качественных и количественных характеристик структуры ландшафтов [1], наземных экосистем [2, 3], в том числе для изучения особенностей растительного покрова на урбанизированных территориях [4–6 и др.], демонстрирует важность данного направления исследований для познания динамики и тенденций изменения природных и природно-антропогенных комплексов в составе городов, в том числе для оценки эффективности выполнения ими экосистемных функций.

Цель работы – изучить возможность сопряженного использования данных ДЗЗ и ГИС-проекта ГТС урбанизированной территории для дифференцированной оценки структуры и состояния растительного покрова, а также оценки эффективности выполнения им основных экосистемных функций.

Методика и материалы исследований. Для оценки структуры и состояния растительного покрова в различных ГТС города Гомеля использована сопряженная обработка данных ДЗЗ и дифференцированного в разрезе ГТС геоинформационного проекта (ГИС-проекта) городской территории.

Для территории Гомеля подготовлен ГИС-проект, в котором с использованием данных публичной кадастровой карты (<https://map.nca.by>), Геопортала ЗИС УП Белгипрозем (<https://gismap.by>), картографической подосновы идентифицированы и оконтуры ГТС производственной (П) и коммунально-складской (КС), жилой многоквартирной (ЖМ) и жилой усадебной (ЖУ), общественной различных типов (О) и специальной (СП) застройки, а также сельскохозяйственные (СХ) и ландшафтно-рекреационные (ЛР) территории. В последних выделены виды – леса и лесопарки (ЛП), парки, малые ландшафтные формы (МЛФ), к которым отнесены скверы, бульвары, а также растительность на незастроенных участках – резервных озелененных территориях (РОТ). Она представлена участками, планируемыми в перспективе для рекреационного благоустройства (РОТ_{персп}), согласно схеме озелененных территорий городских районов Гомеля [7], а также защитными насаждениями в санитарно-защитных зонах предприятий и коммунальных объектов (РОТ_з). В целом на территории Гомеля в ГИС-проекте выделено около 2,7 тыс. выделов, среди которых идентифицировано 11 типов и 33 вида ГТС.

Для получения актуальных данных о структуре и состоянии растительного покрова на территории Гомеля исследования проведены в период максимального его развития – в июле 2024 г. Этапы исследований включали:

- подбор имеющихся в свободном доступе снимков ДЗЗ, наиболее близких по времени съемки с проведением натурных подспутниковых исследований;
- проведение исследований на тестовых полигонах для оценки структуры и состояния растительного покрова в составе различных ГТС;
- обработку снимков с расчетом индексов, характеризующих растительный покров (NDVI, LAI, CCC), а также температуру подстилающей поверхности (LST);
- корегистрацию снимков и ГИС-проекта;
- анализ данных ДЗЗ в разрезе структурно-планировочных выделов городских ГТС, их типов и видов;

– расчеты основных экосистемных функций по дифференцированным данным ДЗЗ и установленным для Гомеля при подспутниковых исследованиях связях с использованием полученных регрессионных уравнений;

– построение дифференцированных картосхем для оценки показателей, характеризующих основные экосистемные функции растительного покрова в разрезе ГТС.

Расчет значений нормализованного разностного индекса растительности (англ. normalized difference vegetation index – NDVI) [8], индекса листовой поверхности (англ. leaf area index – LAI, м²/м²) и содержания в растительном пологе хлорофилла (англ. canopy chlorophyll content – CCC, мкг/см²) выполнен по снимкам спутника серии Sentinel-2.

В работе использованы 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 Гомеля 13 июля 2024 г. Атмосферная коррекция выполнена с помощью программы обработки Sen2Cor [9], которая основана на алгоритме «Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков» (ATCOR) [10] и использует модель переноса излучения LIBRADTRAN [11]. Для повышения точности классификации Sen2Cor водных объектов, городской застройки, открытой поверхности Земли применен дополнительный пакет данных ESACCI-LC для Sen2Cor [12].

При расчете NDVI, LAI, CCC использованы каналы с пространственным разрешением 10 и 20 м; последние привели к разрешению 10 м, согласно [13]. Расчет NDVI выполнен с пространственным разрешением 10 м. При расчете LAI и CCC использованы преимущественно каналы с разрешением 20 м. Из дальнейших расчетов исключены пиксели с искаженными или вышедшими на насыщение значениями, а также облака и их тени.

Для коррекции субпиксельного смещения геопривязки снимков выполнена их корегистрация на снимки сверхвысокого пространственного разрешения. Для идентификации растительности по снимкам Sentinel-2 рассчитан нормализованный разностный индекс растительности

$$\text{NDVI} = (b_7 - b_4) / (b_7 + b_4), \quad (1)$$

где b_4 и b_7 — значения спектральных каналов 4 и 7 соответственно мультиспектрального прибора MSI спутников серии Sentinel-2.

Показатели LAI и CCC рассчитаны с помощью модуля «биофизический обработчик» L2B программы Sentinel-2 Toolbox [14]. Расчет LAI и CCC биофизическим обработчиком проведен на основе нейронных сетей. Обучающая выборка получена авторами модуля с помощью модели переноса излучения [15]. 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 [15].

Температура подстилающей поверхности (англ. land surface temperature – LST) определена по снимкам спутников серии Landsat, которые в настоящее время представлены спектрорадиометрами среднего пространственного разрешения на спутниках Landsat 7 (прибор ETM+, 1 канал в тепловом диапазоне с пространственным разрешением 60 м) и Landsat 8 и 9 (прибор TIRS, 2 канала в тепловом диапазоне с пространственным разрешением 100 м). Для анализа LST Гомеля отобраны снимки, сделанные в безоблачные дни, ближайšie по времени съемки к отобраным ранее для оценки индексов растительности снимкам Sentinel-2. Выбранный снимок LST для Гомеля получен спутником Landsat 8 (дата и время съемки: 10.07.2024 г., 11 ч 54 мин местного времени). Тепловые каналы спутников серии Landsat (яркостная температура) приведены оператором Landsat к разрешению 30 м путем передискретизации методом «кубическая свертка», вследствие чего рассчитанная на их основе кинетическая температура поверхности характеризуется еще меньшим, чем исходное, эффективным пространственным разрешением. Для оценки показателей LST в разрезе основных типов и видов ГТС в городах выполнена коррекция геопривязки снимков Landsat и извлечены значения кинетической температуры поверхности пикселей, соответствующих выделам ГТС в ГИС-проекте Гомеля.

Для последующего анализа данных ДЗЗ выполнена корегистрация данных ДЗЗ и ГИС-проекта Гомеля, дифференцированного в разрезе выделов ГТС (рис. 1).

Степень озелененности в каждом выделе ГТС рассчитана как отношение пикселей, идентифицированных по значениям NDVI как растительность, к общему числу зарегистрированных пикселей.

Результаты и их обсуждение. Анализ ГИС-проекта Гомеля в разрезе выделов ГТС (см. рис. 1) показал, что на городской территории преобладают ГТС застроенных территорий, доля которых оценивается приблизительно в 51 %. Из них около 18 % составляют ГТС жилой усадебной застройки, что вдвое выше площади ГТС жилой многоквартирной застройки (9 %). Доля участков под промышленными и коммунально-складскими ГТС близка к 16 %, а под общественными и специализированными ГТС составляет 6 и 1 % соответственно. Дорожно-транспортные ГТС (с учетом инфраструктуры – стоянок, развязок, автозаправочных станций и др.) занимают около 9 % территории Гомеля, из них собственно дороги и транспортные коммуникации составляют приблизительно 5 % (без учета проездов в составе

застройки). Доля saniрующих и нарушенных ГТС (участков незавершенного строительства) на момент исследования составляет около 1 %.

В составе Гомеля доля водных объектов оценивается в 6 %. Они представлены как участками р. Сож и ее затоками, фрагментом р. Ипуть, входящем в городскую черту, так и карьерными водоемами, расположенными на городской территории и рекультивированными для целей рекреации.

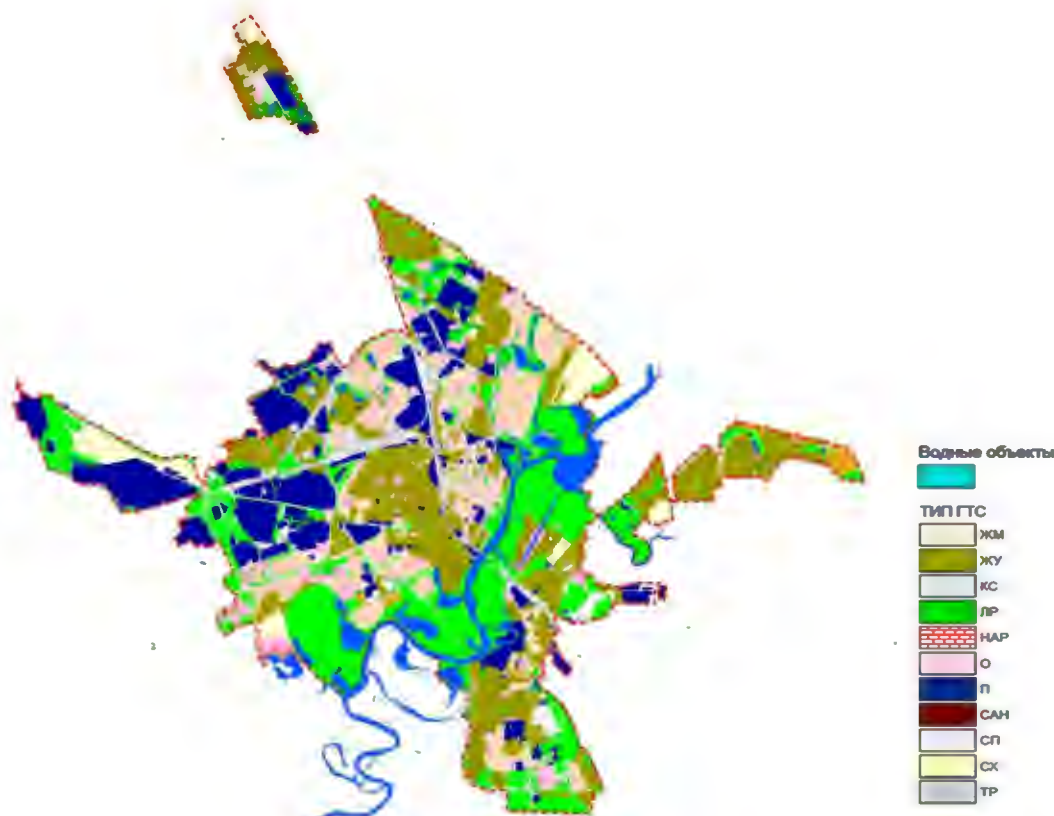


Рис. 1. Структура типов ГТС г. Гомеля:
 ЖМ – жилые многоквартирные; ЖУ – жилые усадебные; КС – коммунально-складские;
 ЛР – ландшафтно-рекреационные; НАР – нарушенные (в том числе незавершенное строительство);
 О – общественные; П – производственные; САН – saniрующие; СП – специальные;
 СХ – сельскохозяйственные;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

Fig. 1. Structure of the Gomel 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

Ландшафтно-рекреационные территории без учета водных объектов (леса, лесопарки, парки, малые архитектурные формы, резервные благоустроенные территории) занимают приблизительно 26 % городской территории. В составе ЛР Гомеля высока доля природных комплексов, которые представлены лесами, лесопарками, а также резервными озелененными территориями (РОТ и РОТ_{персп}) с древесно-кустарниковой растительностью, луговыми и болотными экосистемами, приуроченными в своем большинстве к доливному комплексу р. Сож и водоемам. На них же созданы зоны кратковременного отдыха у воды с пляжами.

Учитывая высокое участие промышленных ГТС и транспортной инфраструктуры, в Гомеле высока доля защитных насаждений (РОТ_з), расположенных в санитарно-защитной зоне предприятий, в санитарных разрывах между промзонами и коммуникациями, вдоль магистралей (около 5 %).

Участие благоустроенных рекреационных объектов общего пользования – парков, скверов, бульваров, озелененных территорий общественных центров – в составе городской территории составляет около 2 %.

Полученные данные ДЗЗ представлены в виде средних значений NDVI, LAI и CCC в разрезе выделов городских ГТС различного функционального назначения (см. рис. 2–5).

Распределение средних значений NDVI в структурно-планировочных выделах различных ГТС городской территории Гомеля, которые содержат растительный покров, приведены на рис. 2. Как видно из картосхемы, наиболее высокие средние значения NDVI (0,6–0,7) регистрируются в долине

р. Сож, поросшей древесно-кустарниковой растительностью, представленной ивами, тополями, осинной, местами – дубом, кленом и ольхой, нередко заболоченной, а также в лесах на южной окраине города и лесопарке левобережья. Сравнительно высокие средние значения NDVI (0,5–0,6) регистрируются также в жилой усадебной застройке в центре и на северной окраине города.

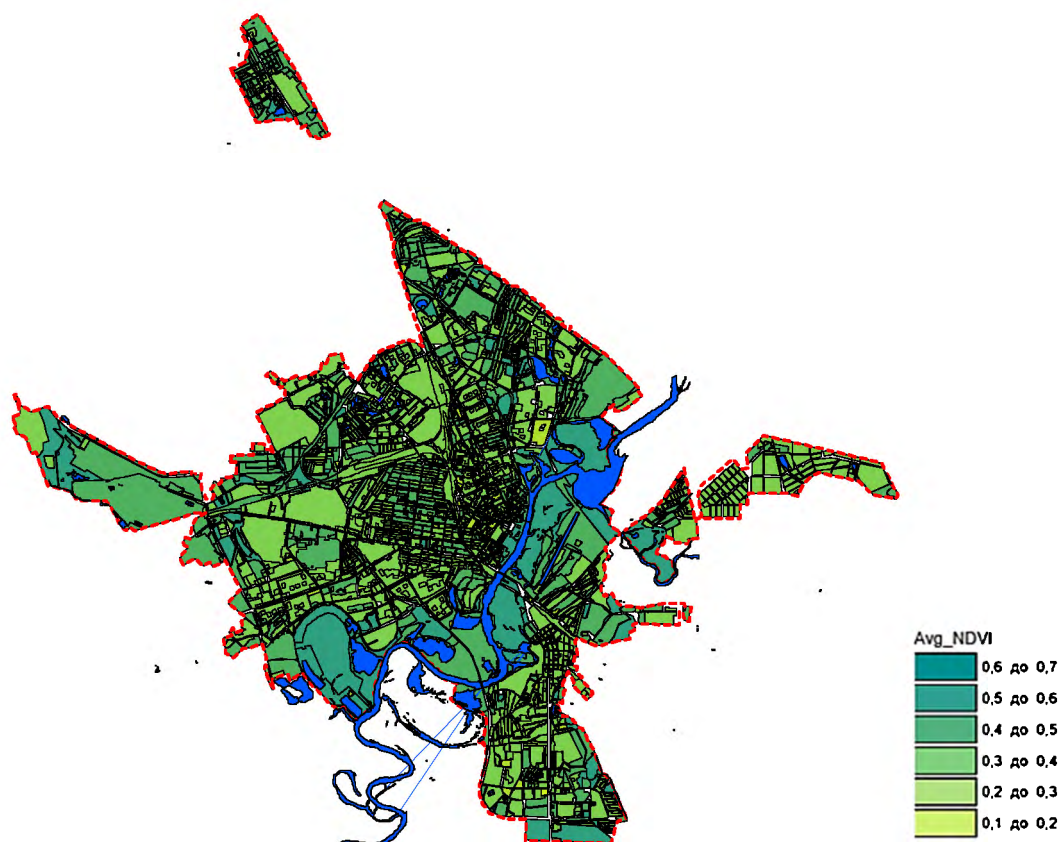


Рис. 2. Схема распределения средних значений NDVI (Avg_NDVI) в выделах ГТС г. Гомеля

Fig. 2. Scheme of average normalized difference vegetation index (NDVI) values of geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Значимым социально-экологическим показателем уровня организации озелененных территорий в городах является степень озелененности городской застройки, которая регламентируется в Беларуси экологическими и строительными нормами [16, 17]. Данный показатель оценен путем расчета отношения числа пикселей со значениями NDVI, соответствующих растительности, к общему числу пикселей, попавших в анализируемый выдел. Дифференцированная оценка степени озелененности городской территории позволила выявить участки с низкой озелененностью (рис. 3).

Картосхема на рис. 3 наглядно демонстрирует пониженные показатели степени озелененности на участках ряда производственных ГТС на севере города, в некоторых кварталах новой жилой многоквартирной, усадебной и общественной застройки в микрорайонах Кленки (в границах ул. Свиридова, Макаенка, Олимпийской), Шведская Горка, Южный, Хутор, Мельников Луг, в новой жилой усадебной застройке Романовичи, а также ряда общественных территорий (преимущественно ГТС торгово-бытовой застройки).

Для оценки ряда экосистемных функций (потенциал пылезадержания и ассимиляции загрязняющих веществ, интенсивность транспирации, перераспределение атмосферных осадков, депонирование углерода и др.) важной характеристикой растительности является индекс листовой поверхности – LAI. Он характеризует степень развития ассимиляционных органов растений и определяется суммарной площадью односторонней поверхности листьев или хвои на единицу поверхности почвы. Выражается либо безразмерной величиной, либо в мерах площади (m^2/m^2 , га/га). Коррелирует с фотосинтезирующей биомассой, чистой продукцией (приростом), депонированием углерода и др. Зависит от типа растительности, степени ее угнетения, условий произрастания. Согласно [18, с. 175] он «...признан одним из важнейших показателей в лесоведении, экофизиологии растений, метеорологии, при ДЗЗ,

а также служит ключевой переменной для региональных и глобальных моделей обмена энергии, углекислоты, влаги и других соединений биосферы и атмосферы». Следует отметить, что значения LAI существенно варьируют в связи с сезонным ростом и дефолиацией, а также угнетением растений. На сельскохозяйственных землях и лугах LAI определяется видом сельскохозяйственной культуры, стадией ее развития и агротехническими мероприятиями. Уборка сельскохозяйственных культур, косьба лугов, газонов, обрезка деревьев, деградация газонов приводят к снижению LAI. При оценках LAI с использованием ДЗЗ можно определить эффективный LAI.

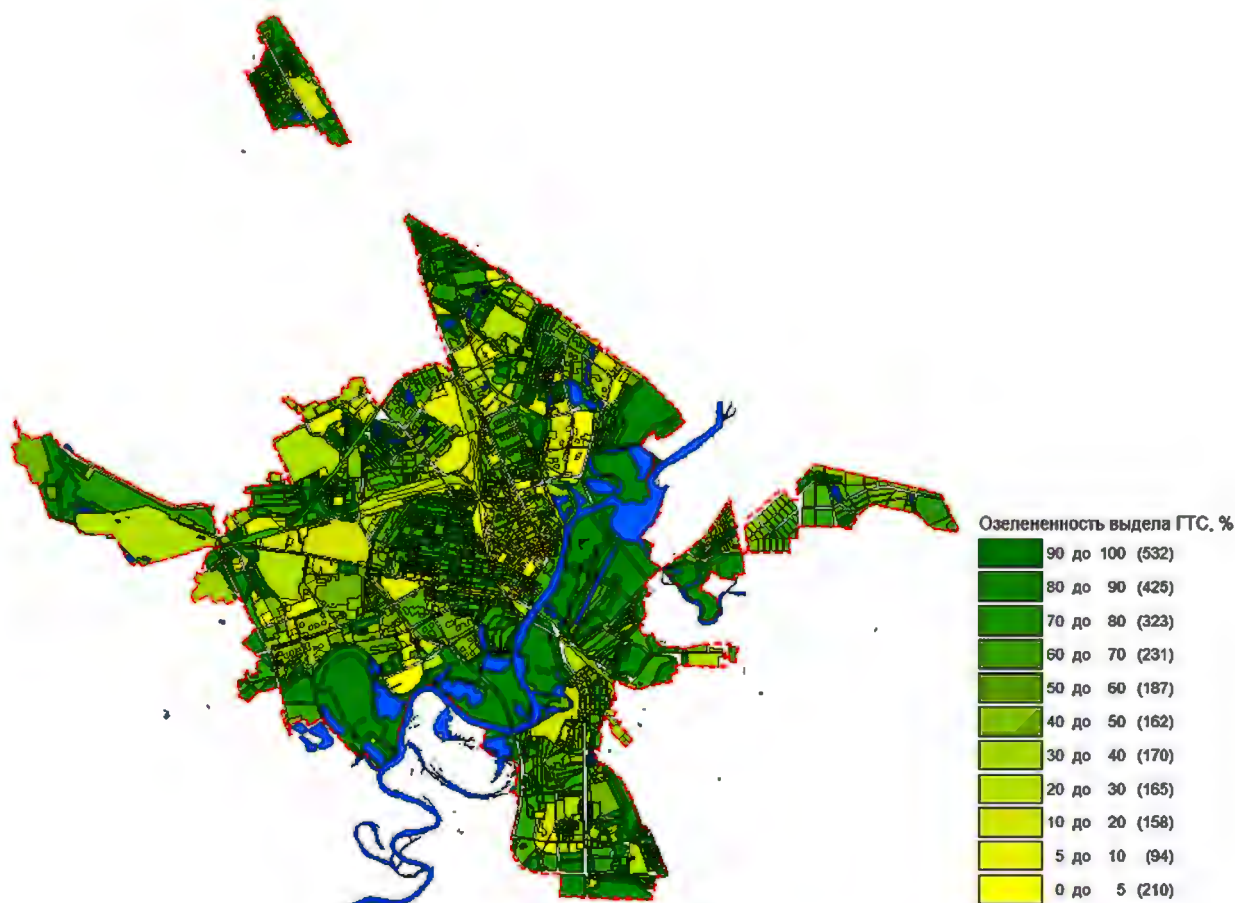


Рис. 3. Схема степени озелененности (%) выделов ГТС на территории г. Гомеля

Fig. 3. Scheme of greenery degree (%) of geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Распределение средних значений LAI растительного покрова в ГТС Гомеля, полученных по данным ДЗЗ, приведено на картосхеме рис. 4. Низкие значения LAI в выделе свидетельствуют о незначительном участии древесно-кустарниковой растительности, разреженном травянистом покрове в нем. Низкие средние значения LAI в Гомеле регистрируются преимущественно для участков новостроек в составе ГТС жилой многоквартирной застройки в микрорайоне Кленки (в границах ул. Свиридова, Макаенка, Олимпийской), Шведская Горка, Южный, Хутор, Мельников Луг (в границах ул. Бородина, Мазурова, бульвара Газеты Гомельская Правда), новой жилой усадебной застройки в Романовичах, ряда общественных территорий (преимущественно ГТС торгово-бытовой застройки).

Визуально весьма близким к LAI является распределение для выделов Гомеля содержания хлорофилла в пологе (ССС), которое зависит как от плотности, так и от степени дефолиации древесно-кустарниковой растительности, деградации травянистого яруса на городских территориях, угнетения растительности. Средние значения NDVI, LAI и СССР (деленное на 100 для отражения на единой диаграмме) в разрезе типов ГТС Гомеля приведены на рис. 5.

На основе зависимостей, выявленных на тестовых полигонах (ТП) подспутниковых исследований, возможно оценить депонирование углерода растительностью в составе городских ГТС Гомеля.

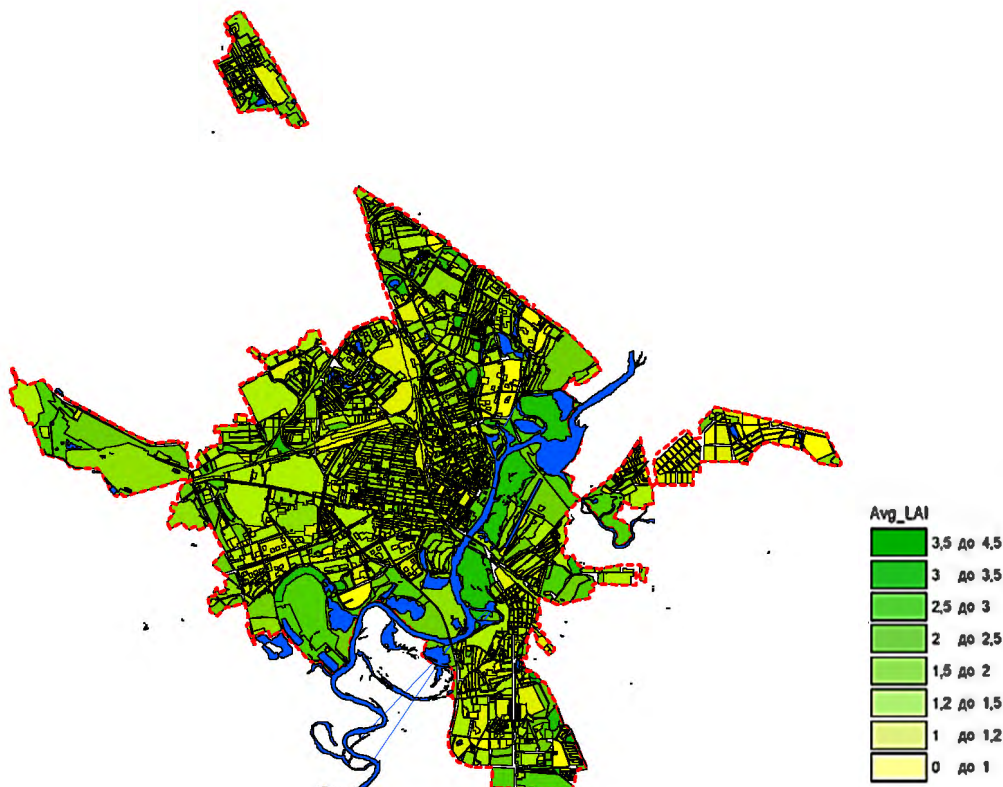


Рис. 4. Схема распределения средних значений индекса листовой поверхности (Avg_LAI) в выделах ГТС на территории г. Гомеля

Fig. 4. Scheme of average leaf area index (LAI) values in geotechnical systems (GTS) units in Gomel

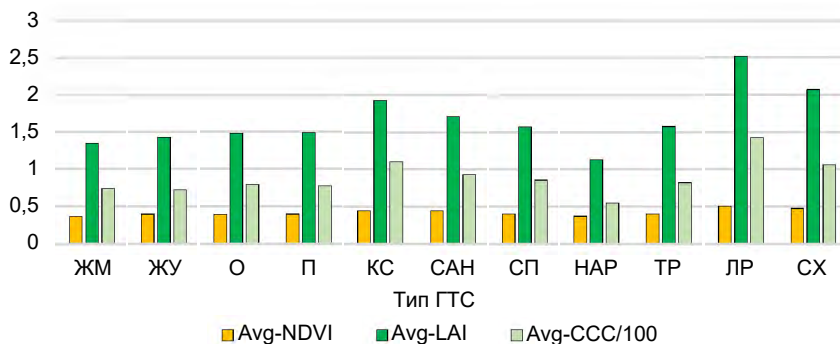


Рис. 5. Средние значения нормализованного вегетативного индекса (Avg-NDVI), индекса листовой поверхности (Avg-LAI) и содержания хлорофилла в пологе (Avg-CCC/100) для основных типов ГТС г. Гомеля. Обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 5. Average normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI) and canopy chlorophyll content (CCC) values of main GTS types in Gomel. The designations are the same as in the fig. 1

Исследования на ТП проводились в период, наиболее приближенный к времени спутниковой съемки (22–25.07.2024) и подразделялись на два типа – точечные и площадные. В качестве ТП точечного типа выбирали наименее фрагментированные участки растительного покрова (леса, парки, скверы, древесно-кустарниковую растительность в составе резервных озелененных территорий, насаждения в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки). Площадные полигоны выделяли в ГТС с высокой фрагментацией насаждений техногенными зданиями, сооружениями и покрытиями. В последних с использованием геопортала ЗИС (GISmap.by) оценивали степень озелененности отдельных выделов основных типов ГТС-анализа и картографирования, на основании которых рассчитывали ошибку дистанционных оценок. Оценка состояния растительного покрова на точечных ТП включала выявление структуры и состояния древесно-кустарникового яруса, его морфометрические обмеры, а также изучение проективного покрытия травянистого яруса с определением высоты и видового состава травостоя. По таблицам и моделям хода роста и биологической продуктивности с использованием работ [19, 20]

определяли продуктивность и удельные показатели депонирования углерода растительностью на тестовых полигонах. Исследовали связь NDVI, LAI и CCC с депонированием углерода. Для 27 точечных ТП в Гомеле наиболее плотные связи депонирования углерода получены для LAI. Регрессионные уравнения связи депонирования углерода для Гомеля с LAI отражены на рис. 6.

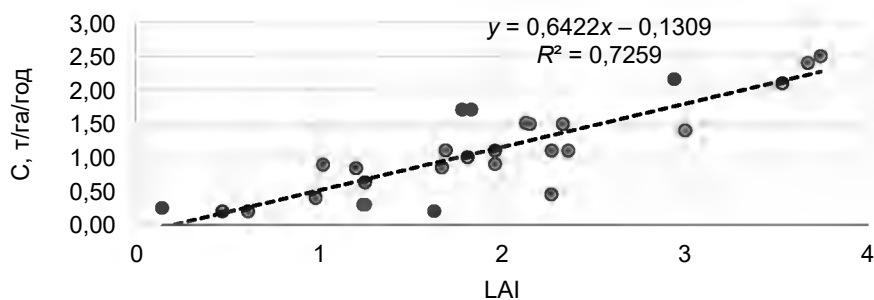


Рис. 6. Связь расчетных показателей депонирования углерода (C, т/га/год) с показателями LAI на тестовых полигонах г. Гомеля

Fig. 6. Relationships between calculated carbon sequestration indicators (C, tons/hectare/year) and leaf area index (LAI) values at test sites in Gomel

Использование регрессионных уравнений линейной зависимости связи расчетных показателей депонирования углерода (C, т/га /год) со средними показателями LAI на тестовых полигонах Гомеля (см. рис. 6) позволило провести оценку удельных показателей депонирования углерода растительностью в разрезе ГТС различных типов, используя значения средних показателей LAI в данных ГТС Гомеля (см. рис. 3). Полученные результаты приведены на рис. 7 в пересчете на CO₂.

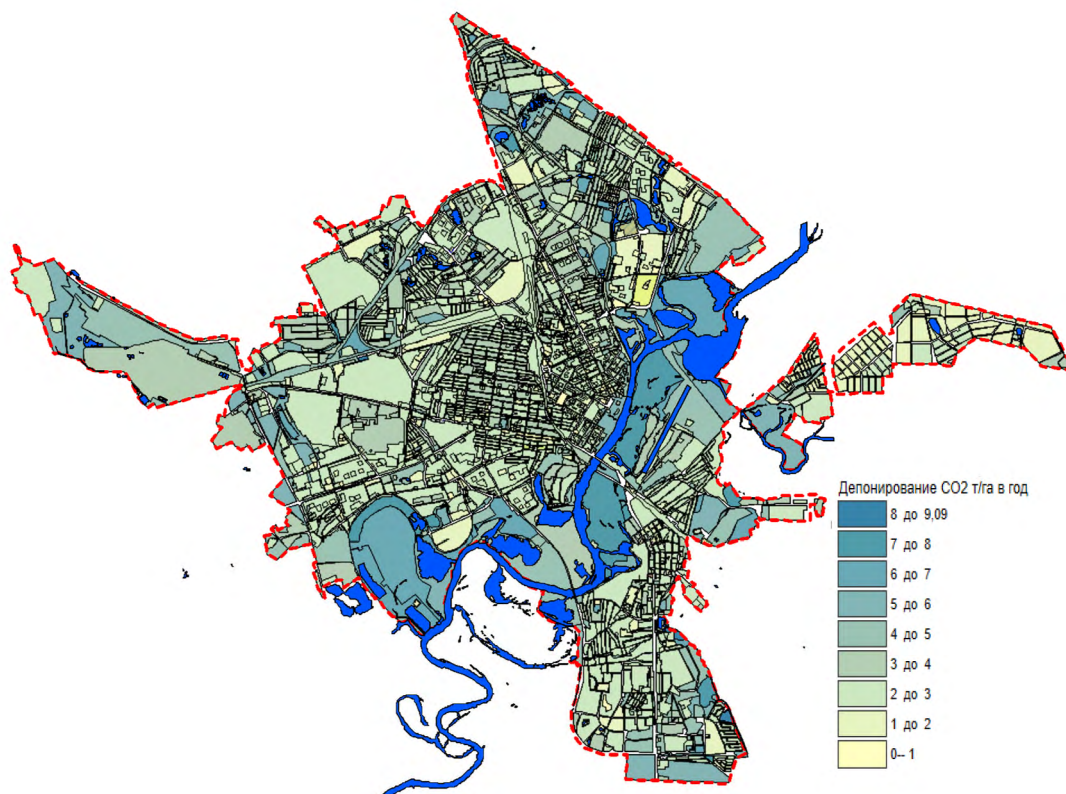


Рис. 7. Схема удельного депонирования углекислого газа растительным покровом в выделах ГТС на территории г. Гомеля, т/га в год

Fig. 7. Scheme of CO₂ sequestration by vegetation cover at geotechnical systems (GTS) units in Gomel, tons per hectare per year

В целом, как показали оценки на момент исследований, растительностью в составе основных ГТС Гомеля ежегодно депонируется приблизительно 31 тыс. т углекислого газа. При этом на территории города наибольшее количество – около 17,4 тыс. т – депонируется насаждениями ландшафтно-рекреационных территорий, к которым относятся леса и лесопарки, парки, скверы, бульвары, защитные насаждения вблизи промышленных предприятий, незастроенные резервные озелененные территории в долинах рек Сож и Ипуть. Насаждения в составе ГТС жилой усадебной застройки Гомеля ассимилируют около 5,8 тыс. т CO₂, в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки – 1,5 и 1,3 тыс. т соответственно, производственной и коммунально-складской – близко к 1,8 тыс. т, дорожно-транспортной инфраструктуры и спецтерриторий 0,6 и 0,2 тыс. т соответственно.

Одной из важнейших для городов экосистемных функций насаждений является регулирование микроклиматических условий. Информация о локализации городских островов тепла необходима для принятия оптимизационных мер.

Оценка распределения средних значений LST на городской территории Гомеля в разрезе выделов ГТС позволила определить наиболее охлажденные и нагретые участки на территории Гомеля (рис. 8). Средние, максимальные и минимальные значения LST во всех выделах ГТС различного типа приведены на рис. 9 соответственно. Следует отметить, что для улиц и автодорог оценку LST не проводили, поскольку характерная ширина их меньше пространственного разрешения снимков, что существенно снижает точность оценок, LST оценивали для транспортной инфраструктуры (развязки, придорожные полосы, отводы железной дороги, заправки и др.).



Рис. 8. Схема средних значений температуры подстилающей поверхности (Avg_LST, °C) в выделах ГТС на территории г. Гомеля

Fig. 8. Scheme of average land surface temperature (LST) values (Avg_LST, °C) at geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Как видно из рис. 8, наиболее охлажденными на территории Гомеля на момент съемки являются незастроенные участки поймы р. Сож, заболоченные и покрытые древесно-кустарниковой и луговой растительностью, а также участки городских лесов на юге города и лесопарка левобережья. На застроенных территориях сравнительно низкие значения LST отмечаются в жилой усадебной застройке

в центре города и на его северной окраине. Высокие средние и максимальные значения LST регистрируются в пределах промышленных ГТС на севере («Гомсельмаш», ОАО «Салео-Гомель») и северо-западе города (ОАО «Гомельский завод литья и нормалей»), что возможно объяснить, как наличием «горячих» производственных циклов, так и низкой степенью озелененности этих промышленных территорий. Сравнительно повышенные средние значения LST регистрируются также в кварталах новой жилой многоквартирной (Шведская горка, Мельников луг) и усадебной (Романовичи) застройки, что возможно связать с низкими показателями озелененности этих участков и невысокой долей древесных растений в новой застройке. Наименьшие средние значения LST регистрируются в лесных массивах на южной окраине Гомеля, а также на территории природного парка Дубовая роща и лесопарке левобережья.

Особенности изменения LST в различных типах ГТС приведены на рис. 9.

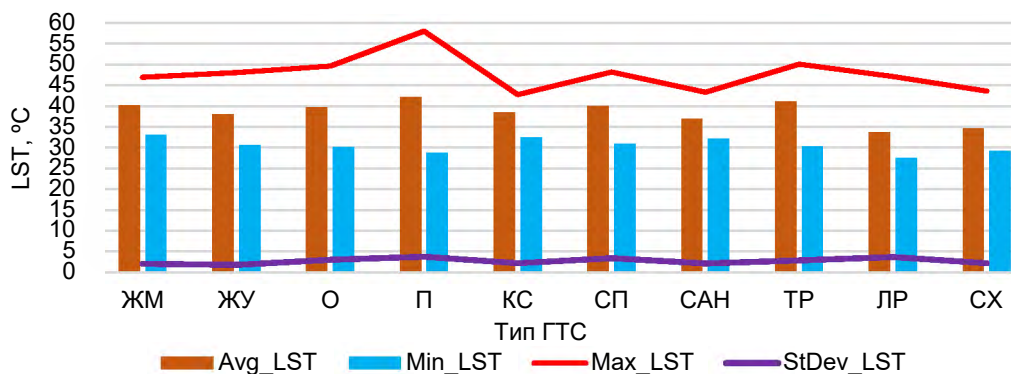


Рис. 9. Показатели в основных типах ГТС на территории г. Гомеля. Обозначения те же, что и на рис. 1

Fig. 9. land surface temperature (LST) values of main geotechnical systems (GTS) types in Gomel. The designations are the same as in the fig. 1

Оценка связи между средней температурой подстилающей поверхности (LST_{avg}) и показателями растительности позволила установить наиболее значимые отрицательные связи LST со степенью озелененности (%) выделов ГТС в Гомеле (рис. 10). Зависимости LST_{avg} от средних в выделах значений NDVI, LAI и CCC являются менее значимыми.

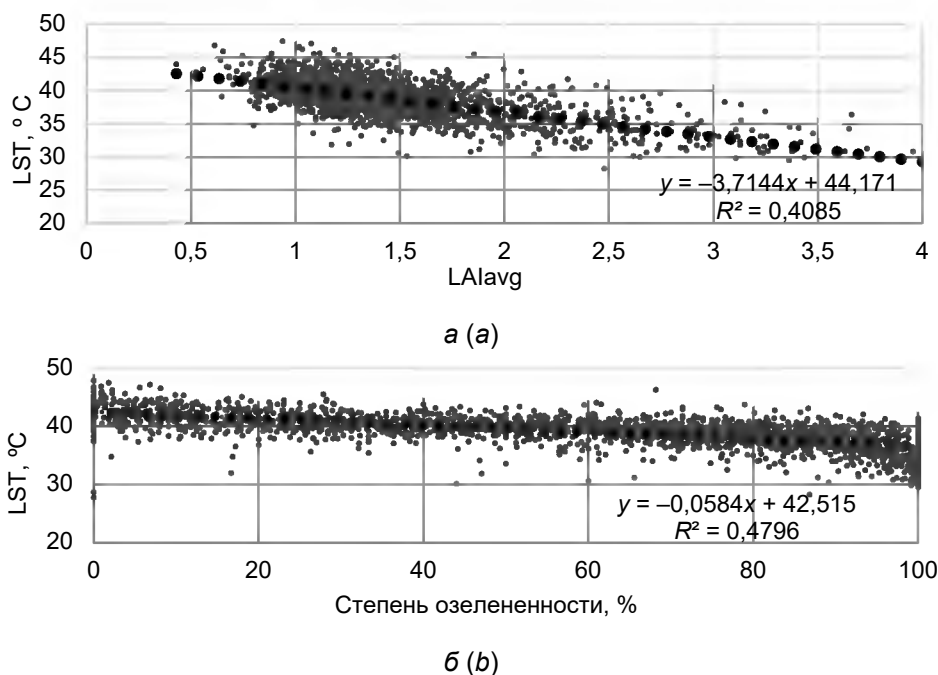


Рис. 10. Связь средней температуры подстилающей поверхности (LST_{avg}): а – со средними значениями индекса листовой поверхности (LAI_{avg}); б – со степенью озелененности (%) в выделах ГТС в г. Гомеле

Fig. 10. Relationships between average of the land surface temperature (LST): а – average of the leaf area index (LAI) values; б – greenery degree (%) of geotechnical systems (GTS) units in Gomel

Заключение. Использованный методический подход к дифференцированной оценке экосистемных функций озелененных территорий в различных ГТС Гомеля предполагает последовательное выполнение процедуры сопряженного анализа данных ДЗЗ и ГИС-проекта города, дифференцированного в разрезе основных типов и видов ГТС. Созданный дифференцированный ГИС-проект структуры ГТС Гомеля позволил идентифицировать местоположение, установить уникальный идентификационный номер, провести кодировку ГТС по типам и видам, определить площадь, степень участия различных типов ГТС в составе городских территорий. Выявлено, что доля ГТС застроенных территорий составляет около 51 % от площади территории Гомеля. ГТС усадебной застройки в Гомеле занимают 18 %, жилой многоквартирной практически вдвое ниже, а производственно-коммунальной 16 %. Выявлено участие озелененных территорий в составе незастроенной части Гомеля (26 %), среди них высоко участие природных комплексов, расположенных в долине р. Сож.

С использованием сопряженного анализа данных ДЗЗ и ГИС-проекта ГТС Гомеля проведена дифференцированная оценка основных индексов, характеризующих растительный покров (NDVI, LAI, CCC), а также температуры подстилающей поверхности. Для территории города в ГИС-проекте ГТС построены дифференцированные картосхемы распределения средних значений NDVI, LAI, LST, а также степени озелененности для 2,7 тыс. выделов. Они позволили выявить участки с низкими показателями озелененности, слабым развитием растительного покрова. Полученные оценки температуры подстилающей поверхности (LST) в полдень летнего периода (июль 2024 г.) в Гомеле выявили на территории города участки с высокими средними и максимальными показателями LST – территории промзон крупных градообразующих предприятий, новой жилой многоквартирной и усадебной застройки, нарушенные территории (участки незавершенного строительства).

С использованием зависимостей, полученных на точечных полигонах при подспутниковых наземных исследованиях растительного покрова в Гомеле, было оценено депонирование углекислого газа городскими экосистемами и рассчитано, что растительностью в составе основных ГТС Гомеля ежегодно депонируется приблизительно 31 тыс. т углекислого газа. Наибольшее количество – около 17,4 тыс. т – депонируется насаждениями ландшафтно-рекреационных территорий, к которым относятся леса и лесопарки, парки, скверы, бульвары, защитные насаждения вблизи промышленных предприятий, незастроенные резервные озелененные территории в долине р. Сож. Насаждения в составе ГТС жилой усадебной застройки Гомеля ассимилируют около 5,8 тыс. т CO₂, в ГТС жилой многоквартирной и общественной застройки – 1,5 и 1,3 тыс. т соответственно, производственной и коммунально-складской – около 1,8 тыс. т, дорожно-транспортной инфраструктуры и спецтерриторий 0,6 и 0,2 тыс. т соответственно.

Оценка связи LST со средними для выделов значениями LAI и степенью озелененности выделов ГТС показала наличие значимых отрицательных связей: коэффициент детерминации равен 0,41 и 0,48 соответственно.

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. Яновский, А. А. Автоматизированная дистанционная экспресс-оценка расположения зарослей *Phragmites australis*, перспективных для заготовки энерготехнологической фитомассы / А. А. Яновский, О. В. Созинов // Растительные ресурсы. – 2017. – Т. 53, № 4. – С. 555–580.
3. 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: Беларус. навука, 2023. – 351 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. Схема озелененных территорий общего пользования Железнодорожного, Новобелицкого, Советского, Центрального районов города Гомель // Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск: УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», 2020. – 54 с.
8. 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.
9. Sen2Cor 2.12. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (date of access: 09.10.2024).

10. Richter, R. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide / R. Richter, D. Schlöpfer. – DLR IB 565-01/15. – 2016. – 263 p.
11. 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.
12. Pignatale, F. C. Sen2Cor 2.12.03 Configuration and User Manual [Electronic resource]. – 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).
13. 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.
14. Sentinel-2 Toolbox. – 2024. – URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (date of access: 09.09.2024).
15. Weiss, M. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1) / M. Weiss, F. Baret. – 2016. – 53 p.
16. 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/%D1%8%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%8B-%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0> (дата обращения: 09.10.2024).
17. Планировка и застройка населенных пунктов = Планіроўка і забудова населеных пунктаў : СН 3.01.03-2020 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 59 с.
18. 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.
19. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). – М., 2008. – 886 с.
20. Биогеоэкологическое разнообразие Беларуси : информационно-моделирующая система / Г. И. Сачок, Д. В. Татьянак, В. В. Коляда [и др.]. – Минск, 1996. – 240 с.

References

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. Yanovskiy A. A., Sozinov O. V. *Avtomatizirovannaya distancionnaya ekspress-ocenka raspolozheniya zaroslej Phragmites australis, perspektivnyh dlya zagotovki energotekhnologicheskoy fitomassy* [Automated remote express assessment of the location of *Phragmites australis* thickets, promising for harvesting energy-technological phytomass]. *Rastitelnye resursy = Plant resources*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 555–580. (in Russian)
3. 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, 2023, 351 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 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)
6. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M. *Ocenka vliyaniya rastitelnogo 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. *Shema ozelenennykh territorij obshego polzovaniya Zheleznodorozhnogo, Novobelickogo, Sovetskogo, Centralnogo rajonov goroda Gomel* [Scheme of green areas for public use in Zheleznodorozhny, Novobelitsky, Sovetsky, Tsentralny districts of the city of Gomel]. Minsk, 2020, 54 p. (in Russian)
8. 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.
9. Sen2Cor 2.12. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed 9 October 2024).
10. Richter R., Schlöpfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15, 2016, 263 p.
11. 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: 10.5194/acp-5-1855-2005.
12. 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%20Configura-tion%20and%20User%20Manual.pdf> (accessed 9 October 2024).
13. 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.
14. Sentinel-2 Toolbox. 2024. Available at: <http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox> (accessed 9 September 2024).

15. Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER (Ver. 1.1). 2016, 53 p.
16. 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/%D1%8D%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%8B-%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0> (accessed 9 October 2024). (in Russian)
17. SN 3.01.03-2020. *Planirovka i zastrojka naseleennykh punktov* = Planirouka i zabudova naselenykh 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)
18. 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)
19. *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)
20. Sachok G. I., Tatyank D. V., Kolyada V. V., Kamysheiko G. A., Kolkovskiy V. M., Rybka V. I. *Biogeocenticheskoe raznoobrazie Belarusi: Informacionno-modeliruyushaya sistema* [Biogeocenotic diversity of Belarus: Information and modeling system]. Minsk, 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@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

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: knigarpv@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

Aleksander A. Yanovskiy – Ph. D. (Technical), 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

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: knigarpv@mail.ru