

## Городская экология и планирование Urban ecology and planning

УДК: 528.88

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-412-429

А. В. Погорелов<sup>1</sup>, А. А. Лагута<sup>2</sup>, Е. Н. Киселев<sup>3</sup>, Э. М. Вертлиб<sup>4</sup>

### О СОЗДАНИИ ЦИФРОВОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ГОРОДЕ КРАСНОДАРЕ

#### АННОТАЦИЯ

Среди городов России Краснодар демонстрирует феноменальную динамику роста населения и развития городской инфраструктуры. Рост города сопровождается высокой и плотной застройкой, техногенными преобразованиями почвенно-растительного покрова, приводящими к нарушениям термического и водообменного режима и другим малоисследованным геофизическим эффектам. Эти эффекты, в свою очередь, приводят к нарушениям физиологического комфорта жителей. Оценка состояния крупного города как урбосистемы в показателях местного климата, обеспеченности открытыми пространствами, озеленения возможна при наличии высокоточной трехмерной цифровой модели города. В статье представлены результаты разработки трехмерной модели крупного города (Краснодар) по данным воздушного лазерного сканирования, т. е. лидарных технологий. Исходные данные для создания модели — облако точек лазерного отражения (5,2 млрд точек плотностью 5–15 точек на 1 м<sup>2</sup>) и материалы аэрофотосъемки на площади 839 км<sup>2</sup>. Созданная 3D-модель объединила основные цифровые слои: модель рельефа, объектов гидрографии, зданий, древесных насаждений. В условиях Краснодара, расположенного в семиаридном климате, особое внимание уделено моделированию древесных насаждений по данным лазерного сканирования с точностью до отдельного дерева. Предложена методика моделирования, включающая распознавание деревьев, удаление артефактов и расчет характеристик каждого дерева (координаты, высота, радиус и площадь проекции кроны). На основе полученной базы данных построен комплект аналитических карт, оперирующих количественными показателями озеленения (плотность деревьев, площадь проективного покрытия) и отражающих пространственную структуру древесных насаждений в г. Краснодаре. Карты наглядно показывают дефекты озеленения как внутри функциональных зон, так и в общегородской системе озеленения. Области применения исследования: городское планирование, совершенствование архитектурно-строительного проектирования, повышение технико-экономической обоснованности проектных решений, совершенствование системы озеленения, обоснованная оценка качества городской среды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** урбосистема, воздушное лазерное сканирование, трехмерное моделирование, древесные растения, пространственный анализ

<sup>1</sup> Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, e-mail: [pogorelov\\_av@bk.ru](mailto:pogorelov_av@bk.ru)

<sup>2</sup> Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, e-mail: [alaguta@icloud.com](mailto:alaguta@icloud.com)

<sup>3</sup> Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, Краснодар, Россия, 350040, e-mail: [enkiselev@gmail.com](mailto:enkiselev@gmail.com)

<sup>4</sup> ООО «Аэрогеоматика», ул. Фрунзе, д. 22/1, Краснодар, Россия, 350000, e-mail: [kakipastovitch@yandex.ru](mailto:kakipastovitch@yandex.ru)

Anatoly V. Pogorelov<sup>1</sup>, Andrey A. Laguta<sup>2</sup>, Evgeny N. Kiselev<sup>3</sup>, Eduard M. Vertlib<sup>4</sup>

## ABOUT THE CREATION OF A DIGITAL 3D MODEL OF TREES IN THE CITY OF KRASNODAR

### ABSTRACT

Among Russian cities, Krasnodar demonstrates phenomenal dynamics of population growth and urban infrastructure development. The growth of the city is accompanied by high and dense buildings, technogenic transformations of the soil and vegetation cover, leading to disturbances in the thermal and water exchange regime and other little-studied geophysical effects. These effects, in turn, lead to disturbances in the physiological comfort of residents. Assessing the state of a large city as an urban system in terms of local climate, provision of open spaces, and landscaping is possible with a highly accurate three-dimensional digital model of the city.

The article presents the results of developing a three-dimensional model of a large city (Krasnodar) based on airborne laser scanning data, i. e. lidar technologies. The initial data for creating the model is a cloud of laser reflection points (5.2 billion points with a density of 5–15 points per 1 m<sup>2</sup>) and aerial photography materials over an area of 839 km<sup>2</sup>. The created 3D model combined the main digital layers: a digital elevation model, hydrographic objects, buildings, and tree plantations. In the conditions of Krasnodar, located in a semiarid climate, special attention is paid to modeling tree plantations using laser scanning data with the accuracy of an individual tree. A modeling technique is proposed, including tree recognition, artifact removal, and calculation of the characteristics of each tree (coordinates, height, radius and projection area of the crown). Based on the obtained database, a set of analytical maps was constructed that operate on quantitative indicators of landscaping (tree density, projective cover area) and reflect the spatial structure of tree plantations in the city of Krasnodar. The maps clearly show landscaping defects both within functional zones and in the citywide landscaping system. The scope of the research is: urban planning, improvement of architectural and construction design, increasing the technical and economic feasibility of design solutions, improving the landscaping system and a reasonable assessment of the quality of the urban environment.

**KEYWORDS:** urban system, aerial laser scanning, 3D modeling, spatial analysis

### ВВЕДЕНИЕ

Краснодар — один из наиболее динамично развивающихся и растущих городов Российской Федерации, о чем в последние годы свидетельствуют феноменально высокие темпы роста населения и скорости городской застройки [Погорелов, Киселев, 2020]. По итогам всероссийской переписи населения в 2021 г. численность населения города составила 1,2 млн чел., т. е. Краснодар относится к группе крупнейших городов России. В 2012–2021 гг. на территории муниципального образования г. Краснодар (площадью 839 км<sup>2</sup>) ежегодно вводимая площадь при строительстве домов изменялась в пределах 1,62–2,79 млн м<sup>2</sup>; количество построенных домов варьировало от 259 до 121<sup>5</sup>. Наиболее активно ведется строительство многоэтажного «доступного» жилья, охватывающего, как правило, целые микрорайоны.

<sup>1</sup> Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: [pogorelov\\_av@bk.ru](mailto:pogorelov_av@bk.ru)

<sup>2</sup> Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: [alaguta@icloud.com](mailto:alaguta@icloud.com)

<sup>3</sup> Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: [enkiselev@gmail.com](mailto:enkiselev@gmail.com)

<sup>4</sup> LLC Aerogeomatika, 22/1, Frunze str., Krasnodar, 350000, Russia, e-mail: [kakipastovitch@yandex.ru](mailto:kakipastovitch@yandex.ru)

<sup>5</sup> Сайт общественного инициативного проекта по раскрытию информации о состоянии жилого фонда в Российской Федерации. Электронный ресурс: <https://dom.mingkh.ru/> (дата обращения 10.03.2024)

Известно, что быстрый рост города сопровождается появлением комплекса проблем, в т. ч. связанных с необоснованными градостроительными решениями. Так, многоэтажная высоко- и сверхплотная застройка приводит к нарушению физиологического комфорта жителей — неблагоприятным показателям инсоляции, освещенности, термического режима, проветриваемости, состава воздуха, защищенности от шума и пр. Нельзя недооценивать и последствия техногенных преобразований земной поверхности в городе, способных в результате уничтожения естественного почвенно-растительного покрова и других компонентов ландшафта привести к потере устойчивости городской системы через образование внутригородских геофизических аномалий (термических, водообменных, радиационных). Среди следствий запечатанности почвенного покрова в городе отметим нарушения водного обмена и теплового баланса территории.

Эффекты такого рода нарушений, причины и последствия местных геофизических аномалий остаются плохо исследованными. До сих пор изучению свойств городской среды Краснодара уделялось мало внимания. Объективная оценка состояния урбосистемы на основе показателей озеленения, инсоляции, ветрового режима, экологического загрязнения, обеспеченности открытыми пространствами и жильем возможна лишь при наличии соответствующей цифровой модели города в необходимой полноте. Считаем, что обоснованные градостроительные решения могут приниматься при достаточном информационном обеспечении, предполагающем, среди прочего, построение и последующее прикладное использование цифровой модели города, а также проведение сопутствующих расчетов показателей качества городской среды в их разнообразных аспектах (социальных, экологических, технических). Одновременно при принятии градостроительных решений следует учитывать возможности выполнения администрацией своих социальных обязательств по достижению нормативных свойств городской среды.

Обеспечение зелеными насаждениями городского пространства играет важную социальную и экономическую роль, выраженную в многообразии воздействий на окружающую среду и социум [Чомаева, 2020; Петров, 2021; Gao et al., 2019; Jennings, Bamkole, 2019; Ma et al., 2019; Vargas-Hernández et al., 2020]. Для урбосистемы Краснодара, расположенного в степной зоне, критически значимыми в аспекте средообразования и регулирования геофизических полей являются характеристики озеленения. Без объективной оценки зеленых насаждений невозможны последующие количественные расчеты качества городской среды и городского климата с участием древесной растительности (поле температуры и влажности воздуха, приземная циркуляция воздуха и пр.), геоэкологической ситуации (состав воздуха), оптимизации решений градоустройства (расчеты соблюдения норм озеленения в разных функциональных зонах, расположение ресурсов рекреации и пр.). Городские зеленые насаждения рассматриваются как элемент водно-зеленого каркаса (единого природного каркаса) города<sup>1</sup>.

Современное управление зелеными насаждениями в городе требует применения информационных технологий — как минимум соответствующих баз данных в среде ГИС, обеспечивающих управленцев актуальной и достоверной информацией об объектах озеленения. Разные стороны исследования городских зеленых насаждений с применением современных технологий отражены в ряде полезных публикаций [Морозова и др., 2011; Алешин и др., 2014; Кулакова, 2014; Крючков, 2015; Шайхутдинова, Ивлева, 2016; Трубина и др., 2017; Муллаярова, 2018; Мажитова и др., 2023; M'ikiugu et al., 2012; Mougiakou, Photis, 2014; Vargas-Hernández et al., 2017, 2020; Huerta et al., 2021; Vidal et al., 2022 и др.]. С появлением лидарных технологий древесная растительность и ее свойства выступают

<sup>1</sup> СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\* (утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2016 № 1034/пр)

объектом моделирования [Ризаев и др., 2015; Бойко, Карагян, 2021; Карагян, Крыленко, 2022; Rizaev et al., 2016 и др.]. В своей работе мы опирались на ранее выполненные исследования в Краснодаре [Погорелов и др., 2018, 2019]. До сих пор наш опыт ограничивался использованием мобильной лазерной съемки для моделирования отдельных объектов озеленения города [Погорелов и др., 2018].

В настоящей статье рассматриваются особенности и некоторые результаты построения трехмерной модели г. Краснодара в аспекте исследования зеленых насаждений. Сбор данных наземными способами требует больших усилий и отнимает много времени [Погорелов, Граник, 2018; Kawulich, 2012; Vidal et al., 2022]; приемлемой альтернативой выступает аэросъемка. Основная цель исследования — разработка методического сопровождения и создание трехмерной цифровой модели зеленых насаждений в специфической среде города по материалам воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и аэрофотосъемки.

В последние годы технологии лазерного сканирования, благодаря высокой производительности, точности и возможности сочетания лидаров с различными носителями (воздушная, мобильная съемки), активно применяются в разных сферах — от инженерных изысканий до лесного хозяйства с последующим получением 3D-моделей соответствующих объектов [Ризаев и др., 2015; Погорелов и др., 2018; Бойко, Карагян, 2021]. Современные тенденции в городском и муниципальном управлении, землеустройстве и кадастре, несмотря на отстающую нормативную базу, ориентированы на реализацию трехмерных моделей, отвечающих «геометрическим» реалиям окружающего мира. Наряду с технологическими предпосылками 3D-моделирования существуют и организационные. Необходимость разработки трехмерной модели г. Краснодара обусловлена актуальными и растущими потребностями городского планирования, технической модернизацией архитектурного и строительного проектирования, разработкой обоснованных рекомендаций для совершенствования благоустройства городской территории, включая систему озеленения (городского водно-зеленого каркаса) и повышения качества городской среды. Отметим, что транспарентность сферы городского озеленения, представленной конкретными показателями, служит залогом эффективного сочетания имеющихся финансовых, экологических и пространственных ресурсов [Маркин и др., 2020; Петров, 2021].

В статье решаются следующие задачи:

- 1) разработка и реализация методики высокоточного трехмерного моделирования зеленых насаждений по данным ВЛС как части цифровой 3D-модели г. Краснодара;
- 2) построение 3D-модели зеленых насаждений;
- 3) количественная оценка пространственного распределения растительности на территории МО г. Краснодара.

В методическом плане необходимость создания модели продиктована разработкой комплекса методов, направленных на эффективную обработку данных лазерного сканирования, устранения ошибок (артефактов) распознавания объектов по данным ТЛО, 3D-представления объектов надземной городской инфраструктуры, а также приемов расчета и пространственного анализа распределения зеленых насаждений.

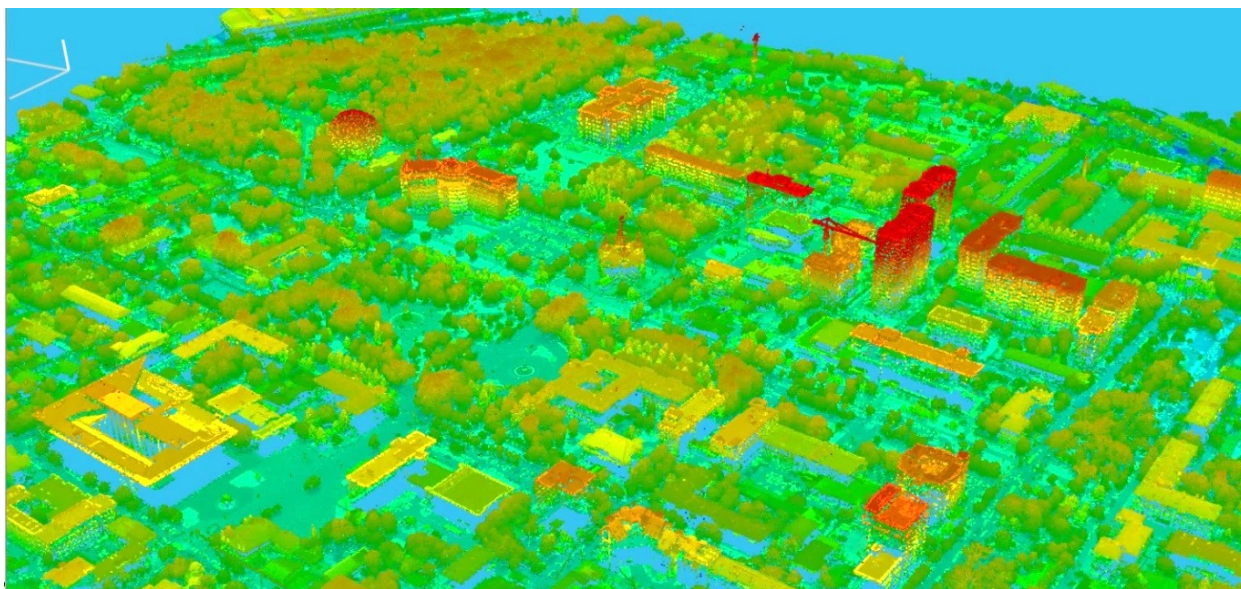
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение трехмерной модели зеленых насаждений г. Краснодара выполнялось на основе материалов, полученных при разработке генерального плана города в 2020 г.:

- 1) облако точек лазерного отражения ТЛО с исходной плотностью 5–15 точек на 1 м<sup>2</sup> (всего около 5,2 млрд точек объемом более 700 Гбайт);
- 2) набор ортофотопланов м-ба 1: 2 000 (964 изображения).

Использование ортофотопланов с пространственным разрешением 10 см вызвано необходимостью устранения возникающих артефактов при автоматизированной классификации земной поверхности, деревьев и зданий. Обработка данных и моделирование сочетали группу методов, относящихся к геодезии и фотограмметрии (обработка данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки), ГИС-моделированию (построение трехмерных моделей, картографирование), геостатистике (геостатистическое моделирование и геоанализ).

Существующие программные комплексы, предназначенные для работы с данными лазерного сканирования, способны посредством анализа взаимного расположения точек лазерного отражения с учетом соответствия метрики дешифрируемых объектов и геометрического подобия распознавать тип объекта. Для решения большей части задач по обработке ТЛО и созданию элементов 3D-модели г. Краснодара использован программный комплекс MicroStation компании TerraSolid, включающий приемы распознавания (классификации) в облаке точек лазерных отражений объектов моделирования (земная поверхность, деревья, строения) (рис. 1). Дополнительно при создании базы данных деревьев применялось программное обеспечение ENVI Lidar.



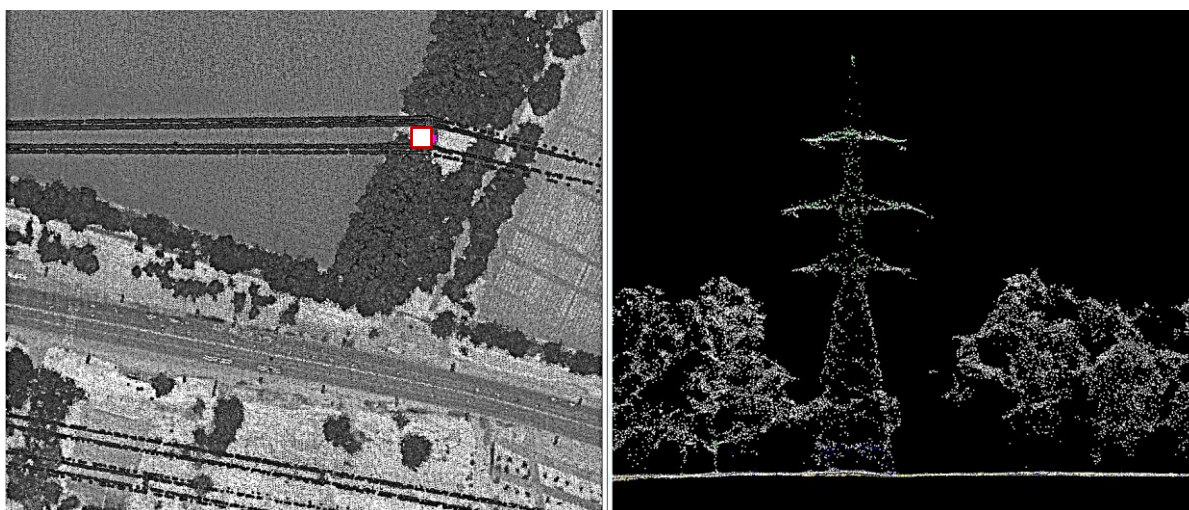
*Рис. 1. Фрагмент облака точек лазерного отражения по данным съемки территории Краснодара*  
*Fig. 1. Fragment of a cloud of laser reflection points according to the survey data of the territory of Krasnodar*

По результатам классификации выполняется автоматизированная векторизация выделенных классов с присвоением атрибутивной информации. Построенная по ТЛО модель топографической поверхности (рельефа) использована для расчета относительной высоты каждой выделенной единицы зеленых насаждений, а также для оцифровки объектов гидрографии, выступающих компонентом городского водно-зеленого каркаса. Моделированию деревьев уделено особое значение в связи с критически важной потребностью озеленения города. 3D-модель отдельного дерева строилась на основе геометрического подобия ТЛО некоему шаблону по данным крайних замыкающих точек [Логорелов и др., 2023]. При распознавании дерева для последующего внесения в базу данных в качестве атрибутов определялись координаты основания ствола дерева, его высота относительно

земли и радиус кроны. Для классификатора растительности, как и в [Бойко, Карагян, 2021], заданный минимальный порог учета растительности по высоте составил 0,7 м, по радиусу — 0,8 м; максимальным пределом радиуса задано значение 5,5 м, верхний предел по высоте, исходя из предусмотренных последующих процедур верификации и удаления артефактов, не устанавливался.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе автоматизированного распознавания деревьев в исходном облаке точек на исследуемой территории получено более 5 млн объектов, часть из которых, как выяснилось, ошибочно отнесены к классу дерева, т. е. оказались артефактами. Первичным значимым признаком артефактов выступала явно завышенная расчетная для условий Краснодара высота дерева (иногда более 100 м), что позволило определить в созданном векторном слое множество объектов, требующих проверки и устранения ошибок. В ходе «ручной» верификации с использованием ортофотопланов установлено, что источниками артефактов при воздушном лазерном сканировании с полученной плотностью точек лазерного отражения могли быть, по сути, любые наземные объекты — строения, опоры ЛЭП (рис. 2), технические конструкции (например, вышки, трубы), автомобили, люди и т. п., а также положительные микроформы рельефа. Таким образом устранено более 1,056 млн артефактов — 19,92 % от начального количества объектов, распознанных как деревья. В нашем случае плотность артефактов в исследуемом пространстве оказалась равной 1 260 ед./км<sup>2</sup>. В базе данных «Деревья» в итоге оказалось 4,246 млн записей. Фрагменты визуализации слоя деревьев из базы данных показаны на рис. 3.

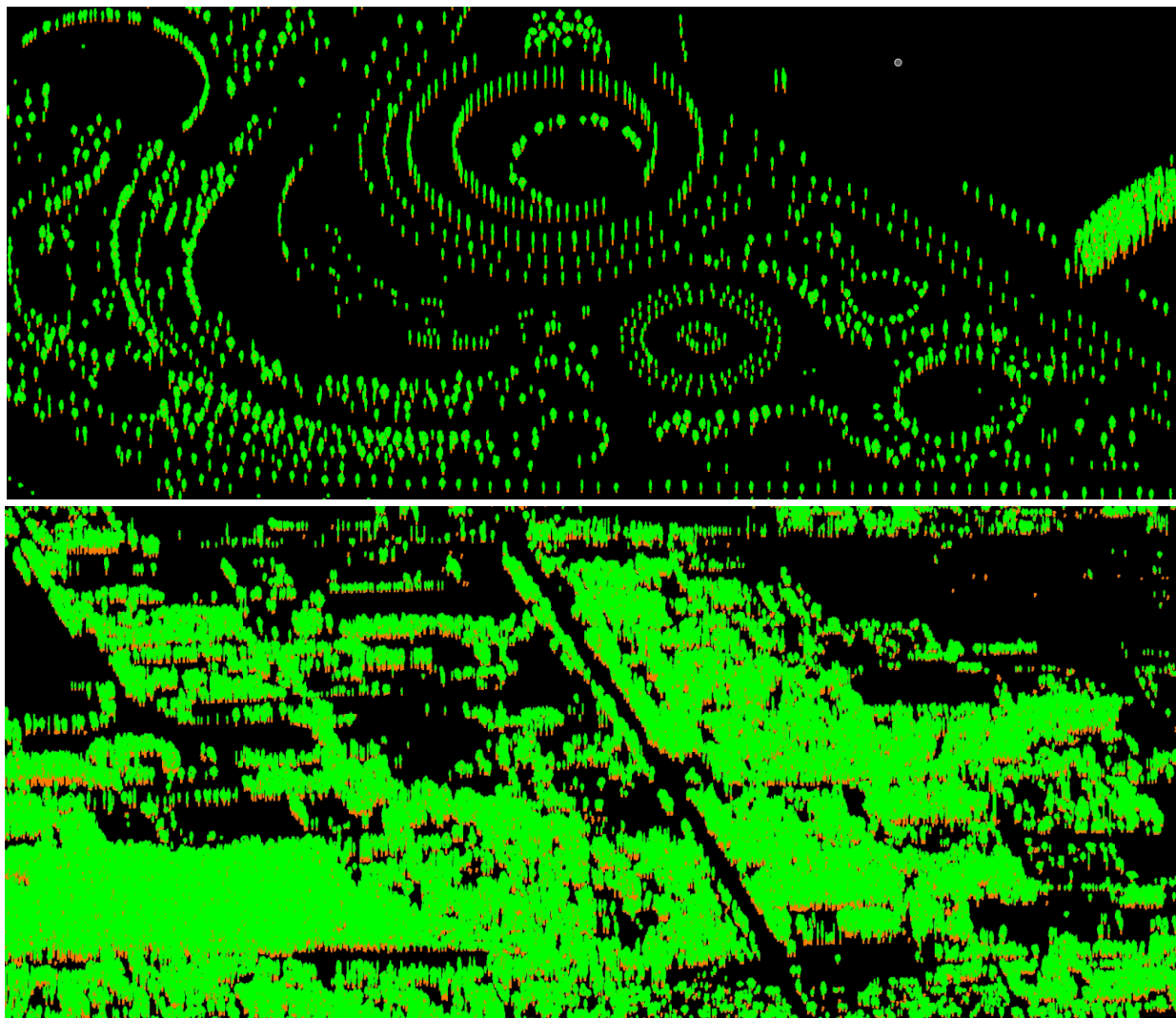


*Рис. 2. Опора ЛЭП, классифицированная в облаке точек лазерного отражения (слева, показана квадратом) как дерево (справа). Пример поиска и устранения артефактов при создании базы данных деревьев*

*Fig. 2. A power line support classified in a cloud of laser reflection points (on the left, shown by a square) like a tree (on the right). An example of finding and eliminating artifacts when creating a tree database*

Представляют интерес статистические характеристики атрибутов полученного множества деревьев в Краснодаре (табл. 1). Высота деревьев отражает вертикальную структуру зеленых насаждений в городе. При средней высоте деревьев 10,3 м стандартное отклонение, показывающее изменчивость их высоты, оказалось равным 7,1 м, что свидетельствует о значительной вариативности высоты деревьев в городе. Средний радиус кроны дерева,

согласно построенной 3D-модели зеленых насаждений, равен 1,46 м, стандартное отклонение — 0,97 м (табл. 1). Гистограммы указывают на выраженную положительную (правостороннюю) асимметрию в распределении высоты деревьев: подавляющая часть деревьев (3,1 млн), по нашим оценкам, имеет высоту менее 10 м. То же самое следует сказать и о распределении радиусов кроны — 3,75 млн деревьев имеют радиус кроны до 2 м.



*Рис. 3. Визуализация слоя деревьев. Районы парка «Краснодар» (вверху) и центральной части города (внизу)*

*Fig. 3. Visualization of the tree layer. Krasnodar Park area (above) and the central part of the city (below)*

*Табл. 1. Статистические характеристики полученного в результате моделирования множества деревьев*

*Table 1. Statistical characteristics of the set of trees obtained as a result of modeling*

Показатель (атрибут)	Среднее, м	Медиана, м	Стандартное отклонение, м	Коэффициент вариации
Высота дерева, м	10,3	8,8	7,1	0,69
Радиус кроны, м	1,46	1,20	0,97	0,66

Приведем нормативные требования к городскому озеленению. Нормативы озеленения в России имеют в основном рекомендательный характер и изменяются в зависимости от размеров города. Согласно своду правил<sup>1</sup>, в городских и сельских поселениях необходимо предусматривать непрерывную систему озелененных территорий общего пользования и других открытых пространств в увязке с природным каркасом. При этом основными структурными элементами каркаса являются особо охраняемые природные территории (ООПТ). По принятым нормативам площадь озелененных территорий общего пользования в общегородских территориях должна составлять 10 м<sup>2</sup>/чел., в жилых районах — 6 м<sup>2</sup>/чел. Для степных условий площадь озелененных территорий общего пользования следует увеличивать на 10–20 %. В структуре озелененных территорий общего пользования крупные парки и лесопарки шириной 0,5 км и более должны составлять не менее 10 %. По ряду причин для исследуемой территории оказалось невозможным рассчитать показатели с приемлемой точностью, поэтому мы воспользовались экспериментальными характеристиками озеленения, дающими, тем не менее, внятное представление о пространственных особенностях зеленых насаждений в Краснодаре.

На основе созданной базы данных удалось проанализировать распределение деревьев на территории г. Краснодара, построить соответствующие аналитические карты и рассчитать предлагаемые показатели озеленения в заданных границах. При анализе озеленения мы опирались на полученные экспериментальные характеристики озеленения — координатное описание каждого дерева и площадь проективного покрытия кроны. При оценках горизонтальной структуры древесных насаждений мы воспользовались функциональным зонированием территории Краснодара (рис. 4), поскольку понятно, что показатели озеленения в разных функциональных зонах (жилая зона, зона рекреационного назначения, производственная зона и др.) имеют различную средообразующую и средорегулирующую значимость и должны рассматриваться дифференцированно.

Обратимся к количественным оценкам. Распределение деревьев в границах города в целом весьма неравномерно (рис. 5). Так, в западной и восточной частях муниципального образования плотность деревьев на землях сельскохозяйственного назначения (см. рис. 4) понижена, а их «геометрия» соответствует искусственным линейным посадкам — защитным лесным полосам. Количественные оценки озеленения можно получить несколькими способами картографирования, из которых выделим способы, оперирующие деревьями как точками векторного слоя (point):

- 1) расчет локальной плотности деревьев (метод Kernel Density);
- 2) расчет плотности деревьев внутри ячеек регулярной сетки с заданной стороной квадрата;
- 3) расчет плотности деревьев внутри заданных зон (например, функциональных зон).

Картографирование методом Kernel Density, отражая условную «континуальность» в распределении деревьев, позволяет определить особенности озеленения в континууме города (рис. 6) и тем самым проанализировать соблюдение рекомендаций непрерывности системы городского озеленения с учетом плотности деревьев (в единицах на гектар). Как видим, эта рекомендация в реалиях Краснодара далека от воплощения, в т. ч. применительно к территориям общего пользования, а также жилым и общественно-деловым зонам, зонам рекреационного назначения.

<sup>1</sup> СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89\* (утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2016 № 1034/пр)

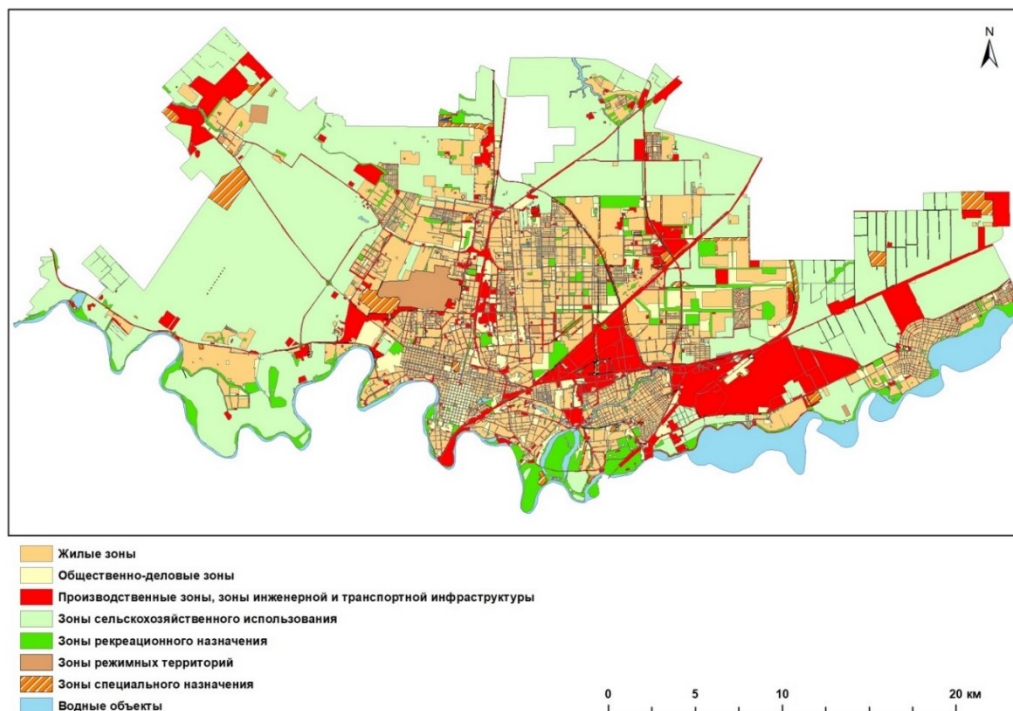
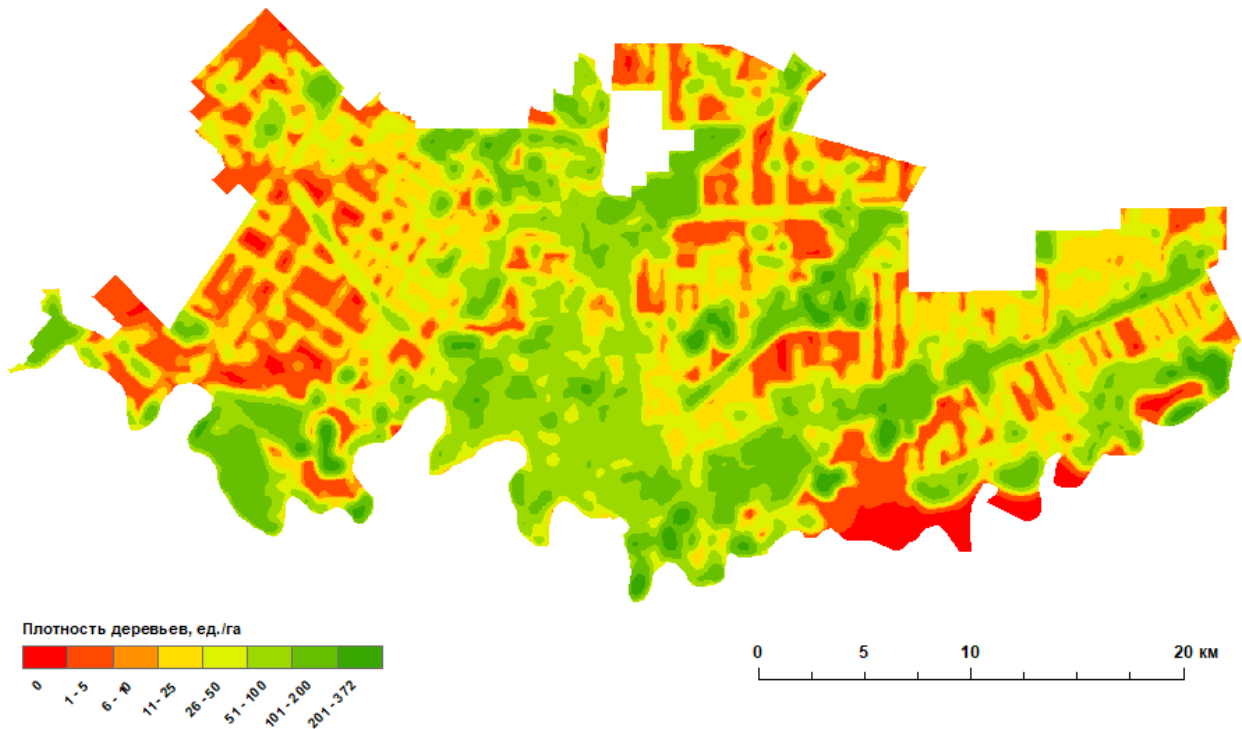


Рис. 4. Функциональное зонирование города Краснодара согласно генплану 2020 г.  
 Fig. 4. Functional zoning of the city of Krasnodar according to the master plan of 2020



Рис. 5. Распределение деревьев (точки) в границах города Краснодара по данным обработки материалов воздушного лазерного сканирования. Во врезке — характерный участок с землями сельскохозяйственного назначения  
 Fig. 5. The distribution of trees (points) within the boundaries of the city of Krasnodar according to the data of processing materials of aerial laser scanning. In the inset map there is a characteristic plot with agricultural land



*Рис. 6. Плотность деревьев в границах города Краснодара, рассчитанная методом Kernel Density. Сторона пиксела на растровом изображении 50 м*  
*Fig. 6. The density of trees within the boundaries of the city of Krasnodar, calculated by the Kernel Density method. The side of a pixel in a raster image is 50 m*

Приведем результаты картографирования с применением способа регулярной сетки. Такой способ дает возможность дискретизировать пространство как внутри города в целом (рис. 7), так и внутри функциональных зон. Применена сетка с размером ячейки  $0,5 \times 0,5$  км (площадь 25 га), которая, на наш взгляд, соразмерна территориальным единицам организации городского пространства Краснодара и представлениям об озеленении на уровне человеческого восприятия. Как видим, на большей площади Краснодара число деревьев в ячейках сетки  $0,5 \times 0,5$  км находится в интервале от 0 до 1 000 ед.; в весьма ограниченном количестве ячеек число их составляет 5 000 деревьев и более. Дополнительно рассчитаны показатели числа деревьев внутри каждой из функциональных зон по данным регулярной сетки в пересчете на 1 га (табл. 2), что характеризует частотное распределение показателей плотности древостоя в каждой из функциональных зон.

Показатель числа деревьев (дерево как точка) никак не характеризует занимаемую ими площадь, именно поэтому в оценках озеленения мы прибегли к площади. Расчет площади древесных насаждений осуществлялся по данным о радиусе кроны каждого дерева как суммарная площадь проективного покрытия крон деревьев внутри заданных территориальных дискретностей. Показатель проективного покрытия древесного полога широко используется в геоботанике для описания растительности. Проективное покрытие крон может определяться с использованием ДДЗЗ, в частности для мониторинга растительности, и характеризует горизонтальную структуру лесов [Барталев и др., 2016]. Построены карты, отражающие относительную проективную площадь (единица измерения —  $m^2/га$ ) внутри всех функциональных зон города. Из 5,7 тыс. локальных участков, представляющих все функциональные зоны Краснодара (рис. 4), около 0,9 тыс. имеют нулевой показатель проективной площади древостоя.

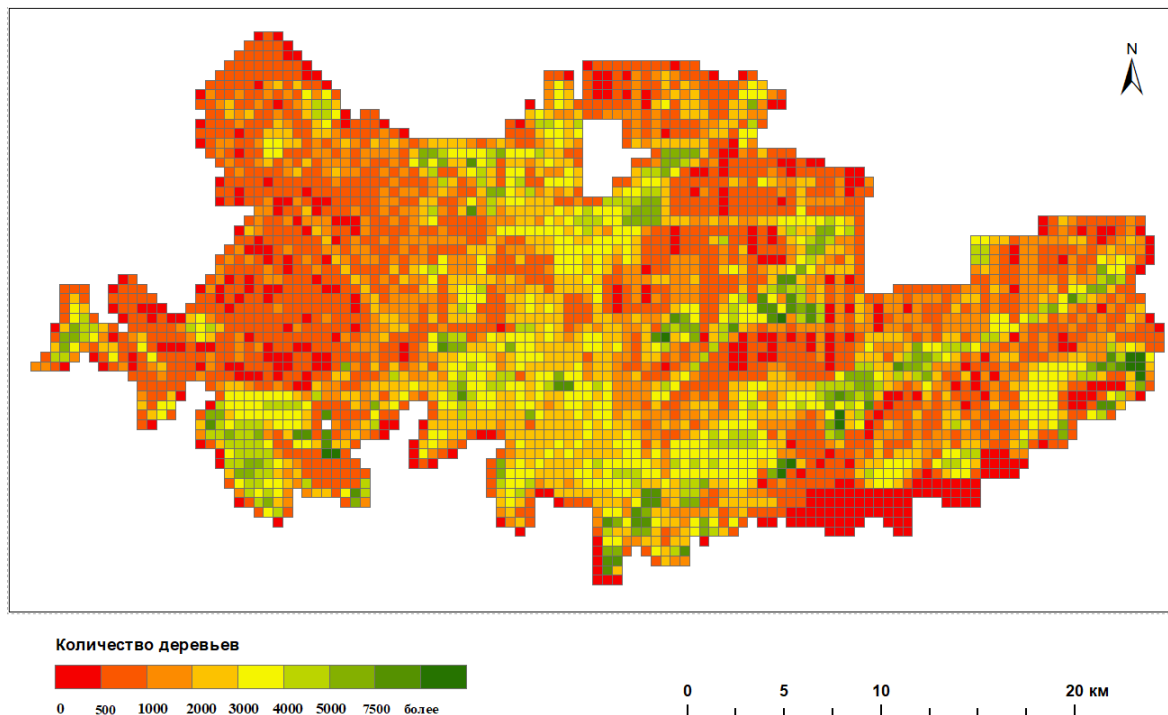
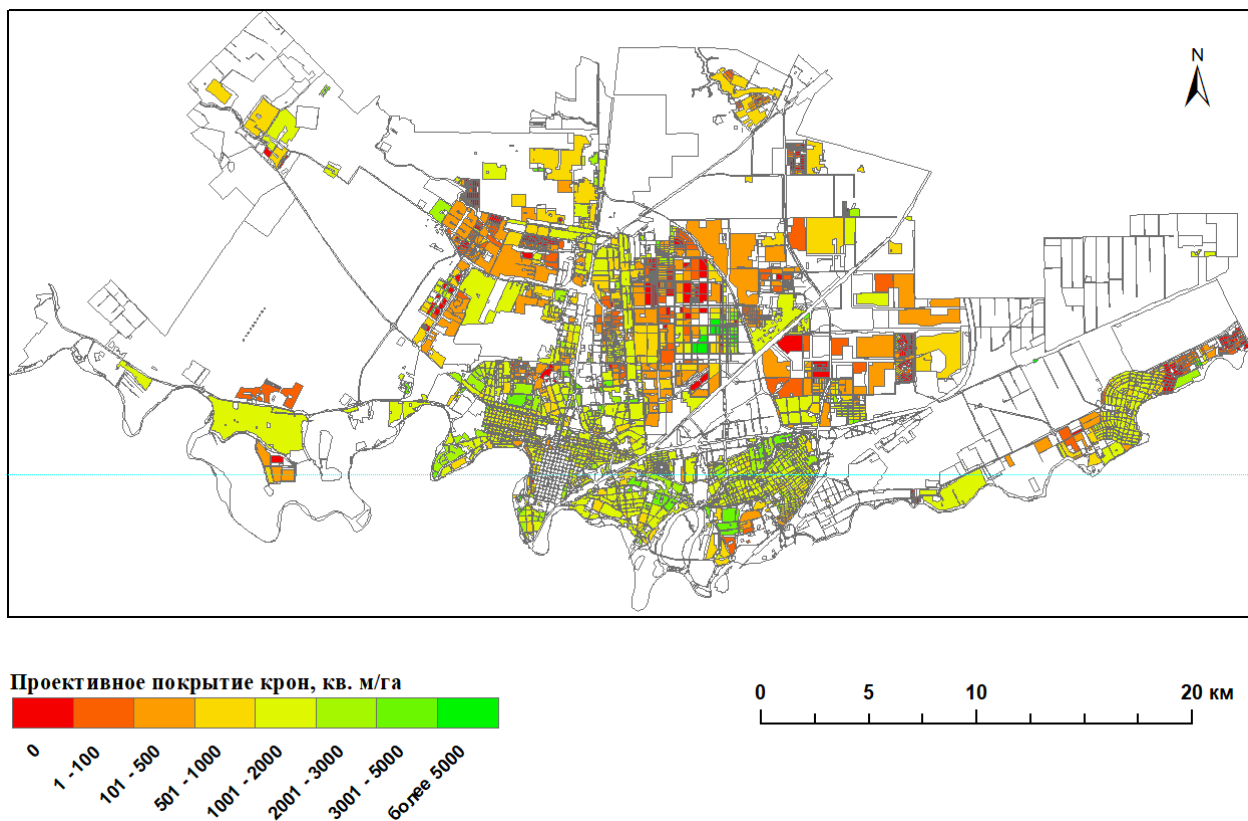


Рис. 7. Количество деревьев в ячейках сетки  $0,5 \times 0,5$  км в пространстве г. Краснодара  
 Fig. 7. The number of trees in the grid cells is  $0.5 \times 0.5$  km in the space of the city of Krasnodar

Табл. 2. Распределение числа ячеек  $0,5 \times 0,5$  км с разной плотностью деревьев (ед./га) в функциональных зонах г. Краснодара  
 Table 2. Distribution of  $0.5 \times 0.5$  km cells with different tree densities (units/ha) in the functional zones of the city of Krasnodar

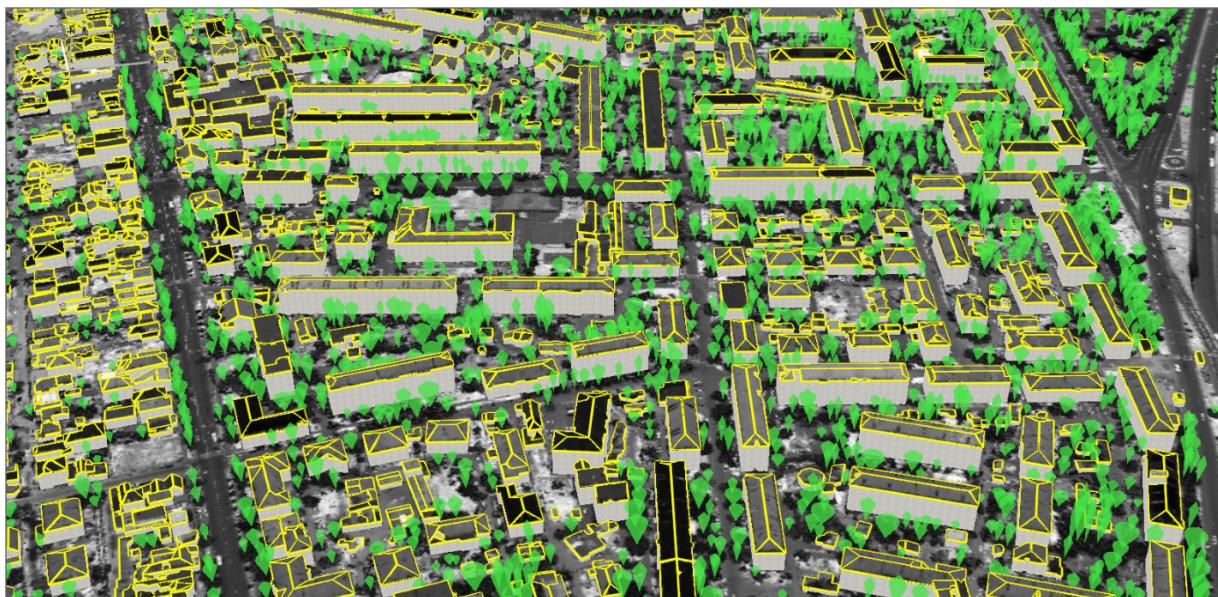
Плотность деревьев, ед./га	Функциональные зоны							Всего
	Жилая зона	Общественно-деловая	Производственная зона	Сельскохозяйственного использования	Рекреационная	Специального назначения	Режимных территорий	
0	1	1	1	14	1	0	0	18
1–5	60	11	55	230	13	13	2	384
6–10	34	11	36	176	8	5	4	274
11–25	123	36	104	379	24	22	11	699
26–50	119	35	133	226	38	26	9	586
51–100	278	70	133	160	48	9	9	707
101–200	105	22	58	217	41	11	5	459
более 200	4	3	3	9	15	3	0	37

Наиболее значимы в средорегулирующем аспекте (суточные и сезонные амплитуды температуры воздуха и земной поверхности и др.) показатели озеленения селитебных территорий, городских жилых зон и зон рекреационного назначения. Приведем карту для жилой зоны Краснодара, занимающей суммарную площадь 178,2 км<sup>2</sup> (22,5 % территории МО г. Краснодар) и состоящую из более 2,6 тыс. локальных участков (рис. 8). Среди участков жилой застройки, по нашим расчетам, 396 (15 %) имели на время съемки (2019 г.) нулевой показатель площади древостоя. Карта объективно свидетельствует о качестве жилой застройки в аспекте озеленения: красные (0 м<sup>2</sup>/га) и коричневые ареалы (1–500 м<sup>2</sup>/га) выявляют места с явно проблемными показателями проективного покрытия древостоя (рис. 8).



*Рис. 8. Распределение площади проективного покрытия крон на участках жилой зоны г. Краснодара*  
*Fig. 8. Distribution of the area of the projective cover of tree crowns in the residential areas of the city of Krasnodar*

В заключение отметим, что наличие в созданной 3D-модели г. Краснодара, наряду со слоем деревьев, слоев рельефа, гидрографии, зданий (рис. 9), закладывает предпосылки для полноценного климатического моделирования (включая расчеты состава городского воздуха, аэродинамических свойств поверхности), элементной и интегральной оценок свойств урбосистемы.



*Рис. 9. Визуализация 3D-модели г. Краснодара (фрагмент)*  
*Fig. 9. Visualization of a 3D model of the city of Krasnodar (fragment)*

## ВЫВОДЫ

Крупный город (Краснодар) представляет собой, по сути, геофизическую аномалию, проявляющуюся в нарушении фоновых термических, водообменных, аэродинамических полей, а также в радикальной перестройке природного ландшафта в целом. Мезо- и микро-масштабные последствия такого рода аномалий, важные для понимания средообразующих механизмов урбосистемы, недостаточно изучены. Необходимым условием правильной оценки состояния урбосистемы, в т. ч. с использованием характеристик озеленения, по нашему мнению, является создание высокоточной цифровой модели города.

Материалы воздушного лазерного сканирования — современный источник высокоточных пространственных данных для построения 3D-модели города. Вместе с тем, обработка массива данных ВЛС, наряду с процедурами классификации облака точек лазерного отражения (рельеф, строения, деревья), включает удаление артефактов. В нашем случае при исходной плотности ТЛО 5–15 точек на 1 м<sup>2</sup> на исследуемой территории Краснодара на площади 839 км<sup>2</sup> среди распознанных как деревья объектов (более 5 млн) оказалось 19,9 % артефактов.

Заданный алгоритм классификации деревьев позволяет получить полезные показатели озеленения в виде базы данных — координаты дерева, высоту и радиус проекции кроны каждого дерева. Эти показатели служат основой для последующего пространственного анализа древесной растительности в Краснодаре.

Построенный комплект карт и результаты 3D-моделирования города с применением слоев топографической поверхности, объектов гидрографии, зданий и деревьев отражают в количественных показателях горизонтальную структуру древесных насаждений в Краснодаре. Наиболее существенные, на наш взгляд, результаты получены при оценке озеленения разных функциональных зон территории города. Установлено, что из 5,7 тыс. участков, образующих функциональные зоны города, 0,9 тыс. участков лишены древесных насаждений. В жилой зоне города, занимающей 22,5 % территории Краснодара, из 2,6 тыс. участков 396 имели нулевую площадь древесных насаждений. Полученные карты не только выявляют участки, требующие безотлагательных мер по озеленению, но и в масштабе урбосистемы Краснодара вскрывают недостатки общегородской системы озеленения в

увязке с природным каркасом, существующими ООПТ и функциональным зонированием территории. В перспективе построенная модель позволит оценить потенциал экосистемных услуг соответствующих участков зеленых насаждений.

Таким образом, построена высокоточная трехмерная модель древесных насаждений крупного города. Тем самым созданы предпосылки для обоснованного анализа качества городской среды с опорой на предметные оценки озеленения и перехода на новый технический уровень городского планирования и градостроительства.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20005 и при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-20005 and with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 24-27-20005.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Алёшин Р., Спивак И., Давыденко Е., Куликов В.* Разработка и внедрение ГИС учтенных зеленых насаждений. САПР и графика, 2014. № 3. С. 18–20.

*Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

*Бойко Е. С., Карагян А. В.* Цифровое моделирование древесно-кустарниковой растительности аккумулятивных берегов по данным воздушного лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ, 2021. Т. 26. № 2. С. 103–114. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-103-114.

*Карагян А. В., Крыленко С. В.* Выделение породного состава древесно-кустарниковой растительности по данным воздушного лазерного сканирования на примере Анапской пересыпи (Черное море). Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2022. № 3. С. 93–103.

*Крючков А. Н.* Мониторинг состояния городских зеленых насаждений как часть эффективного управления зеленым хозяйством Г. О. Тольятти. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2015. Т. 11(27). № 1(6). С. 1170–1173.

*Кулакова С. А.* Учет зеленых насаждений города Перми. Известия Самарского научного центра РАН, 2014. № 1-3. С. 769–771.

*Мажитова Г. З., Седельников И. А., Шугулова Д. К.* Использование ГИС-технологий для планирования озеленения городской среды. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 2. С. 423–436. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-423-436.

*Маркин В. В., Малышев М. Л., Землянский Д. Ю.* Мониторинг региональных стратегий пространственного развития российских городов: моделирование политико-управленческих практик. Часть 1. Мониторинг правоприменения, 2020. № 3. С. 51–65. DOI: 10.21681/2226-0692-2020-3-51-65.

*Морозова Г. Ю., Глухов В. А., Бабурин А. А.* Геоинформационная система «Зеленасадения города Хабаровска». Известия Самарского научного центра РАН, 2011. № 1-6. С. 1367–1370.

*Муллаярова П. И.* О модернизации существующей методики инвентаризации зеленых насаждений с учетом современных достижений аэрокосмических исследований и ГИС-технологий. Вестник СГУГиТ, 2018. Т. 23. № 1. С. 132–141.

*Петров Ю. В.* Информационное обеспечение управления зелеными насаждениями в Тюменской области. Геополитика и экогеодинамика регионов, 2021. Т. 7(17). Вып. 2. С. 292–301.

*Погорелов А. В., Бойко Е. С., Вертлиб Э. М.* Использование технологий лидарной съемки для создания высокоточной 3D модели города: Опыт моделирования города Краснодара, Россия. Известия Ошского технологического университета, 2023. № 2-1. С. 70–76.

*Погорелов А. В., Брусило В. А., Граник Н. В.* Моделирование объектов озеленения города по данным мобильного лазерного сканирования. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 5–17. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120.

*Погорелов А. В., Киселев Е. Н.* Анализ роста города по данным спутниковых снимков: феномен Краснодара. Цифровая география. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. Пермь, 2020. С. 129–133.

*Погорелов А. В., Прокопенко Х. С., Липилин Д. А.* Лесные полосы в городе Краснодаре: оценка состояния и изменения. Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика, 2019. № 4(36). С. 77–91. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.08.

*Ризаев И. Г., Погорелов А. В., Антоненко М. В., Кузякина М. В.* Геоинформационное моделирование лесного покрова на основе воздушного лазерного сканирования. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Международной научной конференции. Краснодар: КубГУ, 2015. С. 420–427.

*Трубина Л. К., Николаева О. Н., Муллаярова П. И., Баранова Е. И.* Инвентаризация зеленых насаждений средствами ГИС. Вестник СГУГиТ, 2017. Т. 22. № 3. С. 107–118.

*Чомаева М. Н.* Роль зеленых насаждений для городской среды. Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 2020. № 4-3. С. 12–14. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-10387

*Шайхутдинова А. А., Ивлева Я. С.* Городские зеленые насаждения как элемент системы экологического каркаса. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Общественные и гуманитарные науки, 2016. № 8(161). С. 91–96.

*Gao T., Song R., Zhu L., Qiu L.* What characteristics of urban green spaces and recreational activities do self-reported stressed individuals like? A case study of Baoji, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019. V. 16. Iss. 8. P. 1348. DOI: 10.3390/ijerph16081348.

*Huerta R. E., Yépez F. D., Lozano-García D. F., Guerra Cobián V. H., Ferriño Fierro A. L., De León Gómez H., Cavazos González R. A., Vargas-Martínez A.* Mapping urban green spaces at the metropolitan level using very high-resolution satellite imagery and deep learning techniques for semantic segmentation. Remote Sensing, 2021. V. 13. P. 2031. DOI: 10.3390/rs13112031.

*Jennings V., Bamkole O.* The relationship between social cohesion and urban green space: an avenue for health promotion. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019. V. 16. Iss. 3. P. 452. DOI: 10.3390/ijerph16030452.

*Kawulich B.* Collecting data through observation. Doing Social Research: A Global Context. New York: McGraw Hill, 2012. P. 150–160.

- Ma B., Zhou T., Lei S., Wen Y., Htun T. T.* Effects of urban green spaces on residents' well-being. *Environment, Development and Sustainability*, 2019. V. 21. P. 2793–2809. DOI: 10.1007/s10668-018-0161-8.
- M'Ikiugu M. M., Kinoshita I., Tashiro Y.* Urban Green Space Analysis and Identification of its Potential Expansion Areas. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2012. V. 35. P. 449–458.
- Mougiakou E., Photis Yorgos N.* Urban green space network evaluation and planning: optimizing accessibility based on connectivity and raster GIS analysis. *European Journal of Geography*, 2014. V. 5. P. 19–46.
- Rizaev I. G., Pogorelov A. V., Krivova M. A.* A technique to increase the efficiency of artefacts identification in lidar-based canopy height models. *International Journal of Remote Sensing*, 2016. V. 37. No. 7. P. 1658–1670. DOI: 10.1080/2150704X.2016.1160299.
- Vargas-Hernández J. G., Pallagst K., Zdunek-Wielgolaska J.* Urban green spaces as a component of an ecosystem. Functions, services, users, community involvement, initiatives and actions. *Revista De Urbanismo*, 2017. No. 37. P. 1–26. DOI: 10.5354/0717-5051.2017.47057.
- Vargas-Hernández J. G., Pallagst K., Zdunek-Wielgolaska J.* The Role of Urban Green Spaces in the Transformation of Community Ecosystem in Developing Countries. *Developing Eco-Cities Through Policy, Planning, and Innovation: Can It Really Work?* Hershey, PA, United States: Information Resources Management Association, IGI Global, 2020. P. 284–311. DOI: 10.4018/978-1-7998-0441-3.ch011.
- Vidal D. G., Dias R. C., Teixeira C. P., Fernandes C. O., Filho W. L., Barros N., Maia R. L.* Clustering public urban green spaces through ecosystem services potential: A typology proposal for place-based interventions. *Environmental Science and Policy*, 2022. V. 132. P. 262–272. DOI: 10.1016/j.envsci.2022.03.002.

## REFERENCES

- Alyoshin R., Spivak I., Davydenko E., Kulikov V.* Development and introduction of GIS of registered green plantations. *CAD and Graphics*, 2014. No. 3. P. 18–20 (in Russian).
- Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyan E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V.* Satellite mapping of the vegetation cover of Russia. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS), 2016. 208 p. (in Russian).
- Boyko E. S., Karagyan A. V.* Digital modeling of tree and shrub vegetation of accumulative shores based on aerial laser scanning data. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2021. V. 26. No. 2. P. 103–114 (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-2-103-114.
- Chomaeva M. N.* The role of green spaces in the urban environment. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2020. No. 4-3. P. 12–14 (in Russian). DOI: 10.24411/2500-1000-2020-10387.
- Gao T., Song R., Zhu L., Qiu L.* What characteristics of urban green spaces and recreational activities do self-reported stressed individuals like? A case study of Baoji, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019. V. 16. Iss. 8. P. 1348. DOI: 10.3390/ijerph16081348.
- Huerta R. E., Yépez F. D., Lozano-García D. F., Guerra Cobián V. H., Ferriño Fierro A. L., De León Gómez H., Cavazos González R. A., Vargas-Martínez A.* Mapping urban green spaces at the metropolitan level using very high-resolution satellite imagery and deep learning techniques for semantic segmentation. *Remote Sensing*, 2021. V. 13. P. 2031. DOI: 10.3390/rs13112031.

- Jennings V., Bankole O.* The relationship between social cohesion and urban green space: an avenue for health promotion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019. V. 16. Iss. 3. P. 452. DOI: 10.3390/ijerph16030452.
- Karagyan A. V., Krylenko S. V.* Isolation of the species composition of woody and shrubby vegetation according to aerial laser scanning data on the example of the Anapa embankment (Black Sea). *Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2022. No. 3. P. 93–103 (in Russian).
- Kawulich B.* Collecting data through observation. *Doing Social Research: A Global Context*. New York: McGraw Hill, 2012. P. 150–160.
- Kryuchkov A. N.* Monitoring of the state of urban green spaces as part of effective management of green economy of Tolyatti city. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN (News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)*, 2015. V. 11(27). No. 1(6). P. 1170–1173 (in Russian).
- Kulakova S. A.* Accounting the green plantations of the city of Perm. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN (News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)*, 2014. No. 1-3. P. 769–771 (in Russian).
- Ma B., Zhou T., Lei S., Wen Y., Htun T. T.* Effects of urban green spaces on residents' well-being. *Environment, Development and Sustainability*, 2019. V. 21. P. 2793–2809. DOI: 10.1007/s10668-018-0161-8.
- Markin V. V., Malyshev M. L., Zemlyansky D. Ju.* Monitoring of regional spatial development strategies of Russian cities: modeling of political and managerial practices. Part 1. Monitoring of Law Enforcement, 2020. No. 3. P. 51–65 (in Russian). DOI: 10.21681/2226-0692-2020-3-51-65.
- Mazhitova G. Z., Sedelnikov I. A., Shugulova D. K.* The use of GIS technologies for planning the greening of the urban environment. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2023. V. 29. Part 2. P. 423–436 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-2-29-423-436.
- M'Ikiugu M. M., Kinoshita I., Tashiro Y.* Urban Green Space Analysis and Identification of its Potential Expansion Areas. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2012. V. 35. P. 449–458.
- Morozova G. Yu., Gluhov V. A., Baburin A. A.* Geoinformation system “Green plantations of the city of Khabarovsk”. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN (News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences)*, 2011. No. 1-6. P. 1367–1370 (in Russian).
- Mougiakou E., Photis Yorgos N.* Urban green space network evaluation and planning: optimizing accessibility based on connectivity and raster GIS analysis. *European Journal of Geography*, 2014. V. 5. P. 19–46.
- Mullayarova P. I.* On the modernization of the existing methodology for the inventory of green spaces, taking into account modern achievements of aerospace research and GIS technologies. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2018. V. 23. No. 1. P. 132–141 (in Russian).
- Petrov Yu. V.* Information support for the management of green spaces in the Tyumen Region. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 2021. V. 7(17). Iss. 2. P. 292–301 (in Russian).
- Pogorelov A. V., Boyko E. S., Vertlib E. M.* Using lidar imaging technologies to create a high-precision 3D model of the city: The experience of modeling the city of Krasnodar, Russia. *Proceedings of the Osh Technological University*, 2023. No. 2-1. P. 70–76 (in Russian).
- Pogorelov A. V., Brusilo V. A., Granik N. V.* Modeling of urban landscaping objects based on mobile laser scanning data. *InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable*

development of territories: Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk: KarSC of RAS, 2018. V. 24. P. 2. P. 5–17 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120.

*Pogorelov A. V., Kiselev E. N.* Analysis of the city's growth according to satellite images: the phenomenon of Krasnodar. Digital Geography. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation: in 2 vols. Perm, 2020. P. 129–133 (in Russian).

*Pogorelov A. V., Prokopenko H. S., Lipilin D. A.* Forest strips in the city of Krasnodar: assessment of the state and changes. PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban Development, 2019. No. 4(36). P. 77–91 (in Russian). DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.08.

*Rizaev I. G., Pogorelov A. V., Antonenko M. V., Kuzyakina M. V.* Geoinformation modeling of forest cover based on aerial laser scanning. InterCarto. InterGIS. Proceedings of International Scientific Conference. Krasnodar: KubSU, 2015. P. 420–427 (in Russian).

*Rizaev I. G., Pogorelov A. V., Krivova M. A.* A technique to increase the efficiency of artefacts identification in lidar-based canopy height models. International Journal of Remote Sensing, 2016. V. 37. No. 7. P. 1658–1670. DOI: 10.1080/2150704X.2016.1160299.

*Shaikhutdinova A. A., Ivleva Ya. S.* Urban green spaces as an element of the ecological framework system. Scientific notes of Petrozavodsk State University. Social Sciences and Humanities, 2016. No. 8(161). P. 91–96 (in Russian).

*Trubina L. K., Nikolaeva O. N., Mullayarova P. I., Baranova E. I.* Inventory of green spaces by means of GIS. Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT), 2017. V. 22. No. 3. P. 107–118 (in Russian).

*Vargas-Hernández J. G., Pallagst K., Zdunek-Wielgolaska J.* Urban green spaces as a component of an ecosystem. Functions, services, users, community involvement, initiatives and actions. Revista De Urbanismo, 2017. No. 37. P. 1–26. DOI: 10.5354/0717-5051.2017.47057.

*Vargas-Hernández J. G., Pallagst K., Zdunek-Wielgolaska J.* The Role of Urban Green Spaces in the Transformation of Community Ecosystem in Developing Countries. Developing Eco-Cities Through Policy, Planning, and Innovation: Can It Really Work? Hershey, PA, United States: Information Resources Management Association, IGI Global, 2020. P. 284–311. DOI: 10.4018/978-1-7998-0441-3.ch011.

*Vidal D. G., Dias R. C., Teixeira C. P., Fernandes C. O., Filho W. L., Barros N., Maia R. L.* Clustering public urban green spaces through ecosystem services potential: A typology proposal for place-based interventions. Environmental Science and Policy, 2022. V. 132. P. 262–272. DOI: 10.1016/j.envsci.2022.03.002.