

Погорелов Анатолий Валерьевич, д.г.н., профессор,  
Бойко Евгений Сергеевич, к.г.н., доцент,  
кафедры Геоинформатики,  
Кубанский государственный университет, Россия  
Вертлиб Эдуард Михайлович, сотрудник  
ООО “АГМ Системы”, Россия  
E-mail: pogorelov\_av@bk.ru

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ 3D МОДЕЛИ ГОРОДА: ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДА КРАСНОДАРА, РОССИЯ**

*В статье представлены результаты разработки трехмерной модели крупного города (Краснодара, Россия) по данным воздушного лазерного сканирования, т.е. лидарных технологий. Исходные данные для создания модели – облако точек лазерного отражения (5,2 млрд точек) и материалы аэрофотосъемки на площади более 800 км<sup>2</sup>. Созданная высокоточная 3D модель объединила основные цифровые слои: цифровую модель рельефа, объектов гидрографии, зеленых насаждений, зданий. При создании использована группа методов геодезии, фотограмметрии, ГИС-моделирования, геоинформационного картографирования, геостатистики. Область применения – городское планирование, совершенствование архитектурно-строительного проектирования; повышение технико-экономической обоснованности проектных решений, совершенствования системы озеленения, обоснованная оценка качества городской среды.*

*Ключевые слова: Город, трехмерная цифровая модель, воздушное лазерное сканирование, ГИС-моделирование, зеленые насаждения, здания, пространственный анализ.*

Погорелов Анатолий Валерьевич, г. и. д.,  
профессор,  
Бойко Евгений Сергеевич, т. и. к., доцент,  
Геоинформатика кафедрасы,  
Кубан мамлекеттик университети, Орусия,  
Вертлиб Эдуард Михайлович, кызматкер  
ТОО “АГМ системасы”, Орусия

## **ЛИДАР ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН КОЛДОНУУ ЖОГОРКУ ТАКТЫКТЫ ТҮЗҮҮ ҮЧҮН 3 МЕНЧИК ШААР МОДЕЛДЕРИ: ОРУССИЯ, КРАСНОДАР ШААРЫН МОДЕЛДӨӨ ТАЖРЫЙБАСЫ**

*Макалада аба Лазердик сканерлөө, б.а. лидар технологиясы боюнча ири шаардын (Краснодар, Россия) үч өлчөмдүү моделин иштеп чыгуунун натыйжалары келтирилген. Моделди түзүү үчүн бааштапкы маалыматтар-бул лазердик чагылдыруу чекиттеринин булуту (5,2 миллиард чекит) жана 800 км<sup>2</sup> ашык аянттагы аэрофотосүрөт материалдары. Түзүлгөн жогорку тактык 3D модели негизги санариптик катмарларды бириктирди: рельефтин санарип модели, гидрография объектилери, жашыл мейкиндиктер, имараттар. геодезия, фотограмметрия, ГИС-моделдөөнү түзүүдө геомаалыматтык картография, геостатистика методдорунун тобу пайдаланылды. Колдонуу чөйрөсү-шаарды пландаштыруу, архитектуралык-курулуштук долбоорлоону өркүндөтүү; долбоордук чечимдердин техникалык-*

экономикалык негиздүүлүгүн жогорулатуу, жашылдандыруу системасын өркүндөтүү, шаардык чөйрөнүн сапатын негиздүү баалоо.

Негизги сөздөр: Шаар, үч өлчөмдүү санариптик модель, абадагы Лазердик сканерлөө, ГИС моделдөө, жашыл мейкиндиктер, имараттар, мейкиндикти талдоо.

Pogorelov Anatoly Valerievich,  
doctor of geographical sciences, professor,  
Boyko Evgeny Sergeevich, candidate of  
geographical sciences, associate professor,  
Department of Geoinformatics,  
Kuban State University, Russia,  
Vertlieb Eduard Mikhailovich, employee  
LLC "AGM Systems", Russia

### USING LIDAR SURVEY TECHNOLOGIES TO CREATE A HIGH-ACCURACY 3D CITY MODEL: EXPERIENCE OF MODELING THE CITY OF KRASNODAR, RUSSIA

*The article presents the results of the development of a three-dimensional model of a large city (Krasnodar, Russia) 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) and aerial photography materials over an area of more than 800 km<sup>2</sup>. The created high-precision 3D model combined the main digital layers: a digital model of the relief, hydrographic objects, green spaces, and buildings. When creating, a group of methods of geodesy, photogrammetry, GIS modeling, geoinformation mapping, geostatistics were used. Scope - urban planning, improvement of architectural and construction design; improving the feasibility of design solutions, improving the landscaping system, a reasonable assessment of the quality of the urban environment.*

*Key words: City, 3D digital model, aerial laser scanning, GIS modeling, green spaces, buildings, spatial analysis.*

**Введение.** Город Краснодар – один из крупнейших городов на юге России с численностью населения более 1 млн человек. Площадь муниципального образования – 839 км<sup>2</sup>. Среди городов России в последние десятилетия Краснодар демонстрирует феноменальную динамику роста населения и развития городской инфраструктуры [Погорелов, Киселев, 2020]. Так, с 2012 г. ежегодно вводимая в городе жилая площадь составляет 2,1... 2,8 млн м<sup>2</sup> при количестве ежегодно построенных зданий от 274 до 608 (<https://dom.mingkh.ru/>). Беспрецедентная скорость застройки и реорганизации пространства города путем антропогенных преобразований земной поверхности способна усилить опасность потери устойчивости городской среды. Проявлением последней могут быть локальные внутригородские геофизические аномалии (например, термических полей), вызванные уничтожением природных или квазиприродных элементов. Запечатанность почвенного покрова вследствие застройки оказывает очевидное неблагоприятное воздействие на водный обмен, тепло- и радиационный баланс территории. Критически важными для города как урбосистемы являются характеристики озеленения – в аспекте средообразования и регулирования геофизических полей. Расположение Краснодара в степной зоне обуславливает необходимость объективной оценки состояния зеленых насаждений как ключевого средоформирующего компонента урбосистемы в условиях семиаридного климата.

В последние годы технологии лазерного сканирования, благодаря высокой производительности, точности и возможности сочетания лидаров с различными носителями (воздушная, мобильная и др. 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 города 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.

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 и зданий (сооружений).

**Материалы и методы исследования.** Построение трехмерной модели города Краснодара выполнялось с использованием материалов, полученных при разработке генерального плана города Краснодара в 2020 г.: 1) облако точек лазерного отражения ТЛО (около 5,2 млрд точек объемом более 700 гигабайт); 2) набор ортофотопланов масштаба 1:2000 (964 изображения). Плотность исходного облака точек составила 10...60 точек на 1 м<sup>2</sup>.

Для решения большей части задач по обработке ТЛО и созданию элементов 3D модели использовано программное обеспечение MicroStation компании TerraSolid, включающее автоматизированные приемы распознавания в облаке точек лазерных отражений объектов моделирования (земная поверхность – рельеф, деревья, строения). Построение триангуляционной модели рельефа выполнено на основе полуавтоматической и ручной классификации точек земной поверхности. В дальнейшем модель рельефа использована для оцифровки объектов гидрографии, расчета относительной высоты каждой единицы растительности, а также для классификации точек зданий, их последующей векторизации и расчета геометрических характеристик каждого здания (проекционная площадь, высота, объем).

Моделированию деревьев уделено особое значение в связи с критически важной проблемой озеленения Краснодара. При создании базы данных деревьев применялось программное обеспечение ENVI Lidar, предназначенное для обработки данных лазерного сканирования. В случае с распознаванием деревьев определялись координаты основания ствола дерева, его высота относительно земли и радиус кроны. При этом 3D модель отдельного дерева строилась на основе геометрического подобия некоему шаблону по данным крайних замыкающих точек. Для классификатора растительности минимальный порог учета растительности по высоте составил 0,7 м, по радиусу 0,8 м; верхний предел по высоте не устанавливался, по радиусу пределом служило значение 5,5 м [Бойко, Карагян, 2021].

Обработка данных лазерного сканирования для получения векторных трехмерных моделей зданий выполнена с использованием заданной на этапе классификации рельефа проектной структуре данных – сетке со стороной 1 км. Методика

классификации элементов застройки в облаке точек лазерных отражений включала следующие основные этапы: 1) предварительная классификация ТЛО, 2) разработка макроса автоматической фильтрации и классификации ТЛО, 3) верификация результатов автоматической классификации элементов застройки. Отметим, что вследствие неоднородности застройки в границах Краснодара, наибольшую сложность при моделировании зданий вызывала по ряду причин обработка территорий частного сектора. Опыт показал, что элементы растительности – наиболее частые причины возникновения ошибок классификации зданий (особенно в местах лесных полос) [Погорелов и др., 2019], а фильтрация элементов растительности – одна из наиболее трудоемких процедур в технологической цепочке моделирования.

**Основные результаты.** Созданная высокоточная 3D модель города Краснодара объединила основные цифровые слои: цифровую модель рельефа (заданное пространственное разрешение 1 м), объектов гидрографии (280 объектов), зеленых насаждений (более 4,24 млн деревьев), зданий (около 158 тыс. объектов).

В ходе «ручной» верификации результатов распознавания деревьев устранено 1 056 227 артефактов (19,92% от начального количества единиц растительности). Пример неправильной классификации деревьев и распознавания артефактов показан (рис. 1). При этом плотность артефактов в исследуемом пространстве оказалась равной 1260 единиц на квадратный километр. Итоговая база данных элементов древесного покрова в пределах МО города Краснодара насчитывает 4245576 записей. Фрагмент визуализации слоя деревьев представлен на рисунке 2.

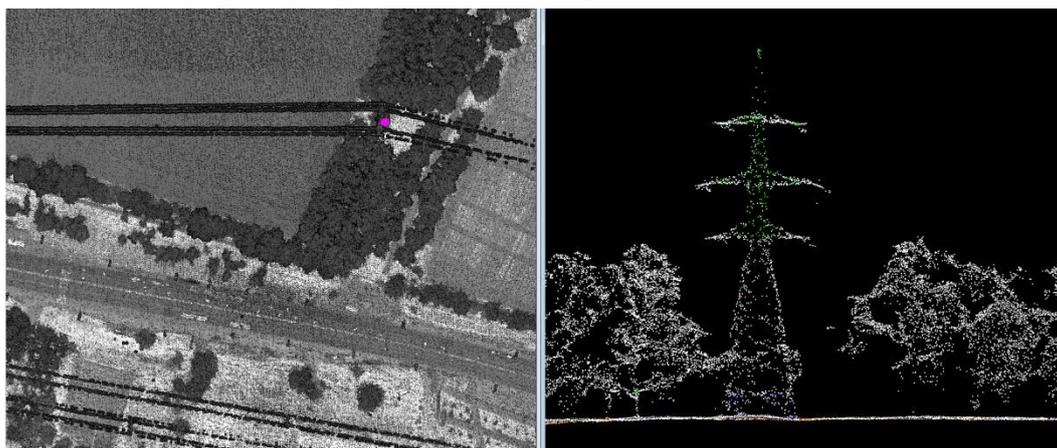


Рис. 1. Опора ЛЭП, классифицированная в облаке точек лазерного отражения (слева) как дерево (справа). Пример поиска и устранения артефактов при создании базы данных деревьев



Рис. 2. Визуализация трехмерного слоя деревьев (фрагмент). Район Чистяковской рощи, город Краснодар

Созданная база данных позволяет наглядно проанализировать распределение деревьев на территории города Краснодара с построением соответствующих аналитических карт и расчетом показателей озеленения в заданных границах. Так, расчет площади древесных насаждений в разных функциональных зонах (рекреационного назначения, сельскохозяйственного использования, специального назначения, общественно-деловые зоны, зоны режимных территорий, производственные зоны, жилые зоны) дает возможность объективно оценить обеспеченность зелеными насаждениями внутри этих зон. Как видим (рис. 3), показатели удельной площади древесной растительности внутри жилой зоны Краснодара изменяются в широких пределах – от 0 до 5000 м<sup>2</sup>/га, при этом выявляются участки с критическими показателями озеленения. Построенные карты служат основанием для разработки мер по улучшению озеленения внутригородской территории.

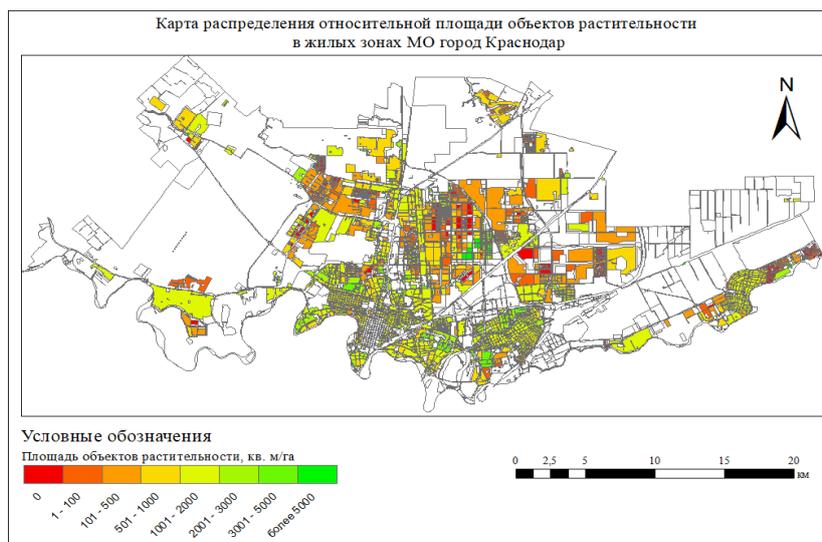


Рис. 3. Пример карты, отражающей дифференцированные показатели озеленения в границах города Краснодара. Жилая зона

Нами предлагаются разные способы анализа пространственно распределенных показателей. В аспекте 3D моделирования города среди показателей застройки наиболее значимыми являются плотность застройки и объем. Последний показатель крайне редко используется при решении задач оценки свойств городской среды, территориального планирования и градостроительства; гораздо чаще применяется нормативный показатель плотности застройки функциональных зон. Между тем, поскольку город в действительности – трехмерный объект, физические объемы зданий, в нашем представлении, прямо и опосредованно определяют множество свойств городской среды, в том числе свойства комфортности, городской «эстетики», городского климата (аэродинамика городской застройки, формирование термических полей и пр.). Дифференциация городской застройки в показателях плотности и занимаемого объема зданий может быть представлена с использованием регулярной полигональной метрической сетки с заданной стороной. Таким способом картографируется распределение объема зданий (рис. 4). В соответствии с построенной картой в ячейках 0,5×0,5 км суммарные объемы зданий внутри Краснодара изменяются в интервале от 0 до 2,5 млн м<sup>3</sup> и более.

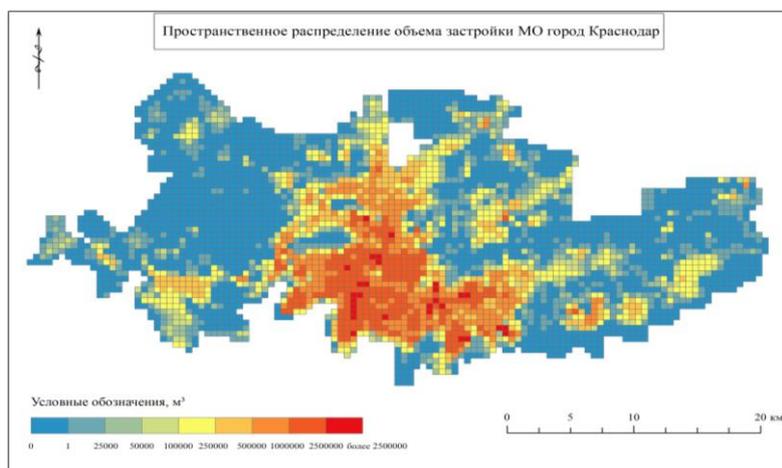


Рис. 4. Распределение показателей объема застройки (зданий) с использованием регулярной полигональной метрической сетки  $0,5 \times 0,5$  км

Наконец, путем автоматической векторизации точек, относящихся к классу зданий и полученных в результате полуавтоматической и ручной классификации, выполнено точное построение трехмерной модели зданий с учетом подстилающего рельефа. Приведем фрагмент 3D модели города, сочетающей слои рельефа, деревьев и зданий (рис. 5).



Рис. 5. Финальный образ 3D модели города Краснодара (фрагмент). Слои: рельеф, растительность, здания

#### **Заключение.**

1. Разработана концепция 3D модели города Краснодара (слои, геоинформационное воплощение, аналитические и тематические карты и пр.).
2. По данным воздушного лазерного сканирования создана база данных растительности и зданий МО город Краснодар.
3. Разработаны приемы интеграции базы данных растительности и зданий в 3D модель города Краснодара.
4. Разработан и реализован комплексный алгоритм фильтрации данных лазерного сканирования, включающий процедуры классификации точек рельефа и элементов застройки.
5. Проведена верификация результатов полуавтоматической классификации облака точек лазерного отражения (рельеф, деревья, строения).
6. Выполнено построение 3D модели надземной части города Краснодара.
7. Определены и отчасти реализованы прикладные аспекты использования трехмерной модели города Краснодара в решении вопросов климатического

зонирования города, геоэкологического зонирования и использования в задачах территориального планирования и градостроительства.

Наибольшее внимание уделено построению и анализу распределения деревьев и зданий в границах МО город Краснодар. О масштабе проделанной работе свидетельствует количество анализируемых объектов – 4,24 млн деревьев и 160,5 тыс. зданий общим объемом 833,7 млн м<sup>3</sup>.

Таким образом, впервые создана трехмерная модель наземной части крупного города на площади более 800 км<sup>2</sup>. Полученная модель закладывает предпосылки для обоснованного анализа качества городской среды с позиции оценки распределения трехмерных объектов урбосистемы (здания, растительность, водные объекты), тем самым, выводит на новый технический уровень процедуры городского планирования и градостроительства.

#### Литература:

1. Бойко Е.С. Цифровое моделирование древесно-кустарниковой растительности аккумулятивных берегов по данным воздушного лазерного сканирования [Текст] / А.С. Карагян // Вестник СГУГиТ. 2021. № 2. С. 103–114.
2. Погорелов А.В., Моделирование объектов озеленения города по данным мобильного лазерного сканирования [Текст] / В.А. Брусило, Н.В. Граник // ИнтерКарто / ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – Т. 24, ч. 2. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. С. 5–17. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120
3. Погорелов А.В. Анализ роста города по данным спутниковых снимков: феномен Краснодара [Текст] / Е.Н. Киселев // В сборнике: Цифровая география. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. Пермь, 2020. С. 129-133.
4. Погорелов А.В. Лесные полосы в городе Краснодаре: оценка состояния и изменения [Текст] / Х.С. Прокопенко, Д.А. Липилин // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. №4 (36). С. 77-91. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.08
5. Ризаев И.Г., Геоинформационное моделирование лесного покрова на основе воздушного лазерного сканирования [Текст] / А.В. Погорелов, М.В. Антоненко, М.В. Кузякина // ИнтерКарто-ИнтерГИС-21: материалы. междунар. науч. конф., 2015 г., Краснодар / КубГУ. – Краснодар: 2015. С. 420–427.

---

УДК 681.586.53

Шипулин Юрий Геннадьевич, д.т.н., профессор,  
Акбарова Нигора Алимджановна, доцент, PhD,  
Ташкентский государственный технический  
университет  
Кадиров Омон Хамидович, к.т.н., доцент,  
Ташкентский институт текстильной и лёгкой  
промышленности,  
Мойдунов Тайрь Толонович, к.т.н., доцент,  
Саримсаков Адилкан Азимжанович к.т.н., доцент,  
Ошский технологический университет  
E-mail: om\_kad@mail.ru, tayr.moydunov@vail.rru

#### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ

*В настоящее время значительное внимание уделяется повышению надежности всех категорий зданий и сооружений. Особенно для анализа поля деформаций и*