

УДК 628.543+579.6

ЛИДАРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

© 2023 г. И. М. Кузнецова^{1, *}, В. Н. Якимов²,
Н. И. Зазнобина², Е. А. Тоневицкий³, В. В. Онищенко⁴

¹ФГАОУ ВО “Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, 101000 Россия

²ФГАОУ ВО “Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”, Н. Новгород, 603022 Россия

³ФГБОУ ВО “Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева”, Москва, 125047 Россия

⁴Фонд “Центр стратегических разработок”, Москва, 125009 Россия

*e-mail: itsypina@hse.ru

Поступила в редакцию 23.11.22 г.

После доработки 29.11.22 г.

Принята к публикации 08.12.22 г.

До недавнего времени основным методом инвентаризации городских лесов были полевые измерения. Появление лидарных технологий и дистанционного зондирования позволило достичь прорыва с точки зрения качества полученных результатов и затраченных на них усилий. Лидарная технология позволяет создавать трехмерную реконструкцию наземной биомассы в виде облака точек, что позволяет выполнять классификацию растительности разного уровня при анализе лесных массивов городской среды. Данные масштабного лидарного сканирования все активнее используются для подробного изучения вертикальной и горизонтальной структуры наземной биомассы в городском ландшафте. В частности, трехмерные облака точек и данные полной волновой формы, полученные лидаром позволяют оценивать изменения лесной биомассы и накопления углерода, индекс листовой поверхности и другие дендрометрические показатели. Кроме того, активно разрабатываются технологии, позволяющие распознавать тип леса и его породный состав. Таким образом, лидарная технология является эффективным инструментом с точки зрения соотношения трудозатрат и качества. Однако при картографировании городской растительности наиболее эффективным способом является комбинация полученных с помощью лидара данных с изображениями высокого разрешения и данными гиперспектральной съемки. Это особенно актуально для городских систем, где распределение зеленых насаждений имеет решающее значение для предоставления экосистемных услуг.

Ключевые слова: LiDAR, городская экосистема, лидарные технологии, наземная биомасса

DOI: 10.56304/S0234275823010052

1. ВВЕДЕНИЕ

Пространственное расположение городской растительности зависит от морфологии городской застройки и социально-экономических условий. В результате антропогенной деятельности со временем меняется и площадь зеленых насаждений города. В ходе застройки территории и в соответствии с эстетическими предпочтениями горожан осуществляется как вырубка деревьев, так и их посадка.

В настоящее время при стремительно растущей численности населения и изменении климата, городские леса признаны важным ресурсом для поддержания комфортных условий жизни горожан [1–3]. С этой целью правительства разных стран ставят амбициозные цели по увеличению площадей городских зеленых насаждений в бли-

жайшей перспективе [4]; например, Мельбурн стремится увеличить растительный покров на 20% к 2040 г. [5]. Для оценки эффективности политики городского планирования необходима всесторонняя оценка структуры современных городских лесов и их влияния на качество жизни населения.

В целях инвентаризации древесно-кустарниковой растительности урбанизированных территорий применяется ряд методов и технологий, наиболее современной и перспективной из которых является лидарная съемка (LIDAR или LiDAR, от англ. Light Detection and Ranging: “обнаружение и определение дальности с помощью света”) с пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также с применением стационарных либо мобильных наземных платформ [6, 7].

2. КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ

При инвентаризации древесно-кустарниковой растительности в городских экосистемах учитываются следующие параметры: координаты местоположения, высота дерева (ТН – *tree height*), ширина кроны (СW – *crown width*), диаметр на высоте груди (ДВН – *diameter at breast height*), высота основания кроны (СВН – *crown base height*), объем основания кроны (BCV – *base crown volume*) и объем полога (CV – *crown volume*).

В целом, для оценки наземной биомассы можно использовать три метода: наземные полевые исследования, использование технологий дистанционного зондирования, в том числе, и спутниковые снимки [89]. Полевые исследования, несмотря на высокую точность измерений, трудно провести в большом масштабе, потому что это крайне трудозатратный способ. Он часто осуществляется выборочным методом, затем данные пересчитываются на полную площадь и даются с учетом погрешности, при этом может быть получена трехмерная картина распределения наземной биомассы на основе оценок высоты и диаметра кроны каждого дерева [10]. Устоявшейся методологией полевых обследований является i-Tree [11, 12]. i-Tree представляет собой набор инструментов для анализа и оценки городского и сельского лесного хозяйства. Он был разработан Лесной службой США для количественной оценки экосистемных услуг, предоставляемых лесной биомассой, включая секвестрацию углерода, предотвращение стока ливневых вод и пр.

Инвентаризация зеленых насаждений городской среды до последнего времени зачастую проводилась с использованием методов, заимствованных из традиционного лесного хозяйства, где на участке фиксируется набор показателей, сетевых и пространственных статистических данных. В последнее время применяется, разработанный Лесной службой Министерства сельского хозяйства США (USDA – *The United States Department of Agriculture*), протокол iTree Eco [13], который получил широкое применение по всему миру [14–16]. Этот протокол позволяет получить не только детальное описание древесно-кустарниковой растительности, но и оценить экосистемные услуги в материальном и стоимостном выражении [14]. Для использования протокола iTree проводятся полевые измерения, которые являются комплексными, локальными, трудоемкими и требуют много времени для обработки данных [17, 18], а также зависят от доступной рабочей силы [4] и ограничений прав собственности [19].

Второй технологией оценки наземной биомассы является использование спутниковых данных [20]. Данный метод имеет ряд преимуществ: доступность и бесплатность архивов по ряду

платформ (например, Landsat), наличие мультиспектральных данных помимо диапазона видимого света, широкомасштабное покрытие. Однако спутниковые данные имеют малое разрешение, которое не дает возможности точно оценить размер отдельных деревьев, зависят от погодных условий и дают возможность получения относительно простой информации (тип землепользования, грубая оценка площади, занятой древесно-кустарниковой растительностью, а при использовании спектральных индексов возможна оценка состояния растительности).

Сочетание спутниковых изображений из нескольких источников открывает новые возможности в экологических исследованиях. В частности, большинство исследований, посвященных связи между городскими зелеными насаждениями и эффектом городского острова тепла, опираются на спутниковые изображения из нескольких источников. В то время как оптические изображения HSR (*high spatial resolution* – высокого пространственного разрешения), или VHSR (*very high spatial resolution* – очень высокого пространственного разрешения), такие как получаемые со спутников SPOT и IKONOS, способны классифицировать растительный покров и другие виды землепользования на достаточно точном уровне. Однако эти оптические датчики не предоставляют информацию в тепловом инфракрасном диапазоне. Действительно, температура поверхности земли зачастую получена с помощью датчиков Landsat и Terra/MODIS. Кроме того, растущая доступность бесплатных данных является стимулом для использования несколько источников спутниковых снимков. В тоже время у платных снимков есть определенные преимущества, например, более высокое пространственное, временное и спектральное разрешение.

Конг и соавт. [21] использовали два источника спутниковых снимков, изображения IKONOS и Landsat-5 (TM), для изучения влияния пространственной структуры зеленых насаждений на эффект городского острова тепла в крупном мегаполисе на востоке Китая. Было показано, что зеленые насаждения значительно уменьшают этот эффект.

Однако спутниковые снимки, в отличие от лидарных технологий имеют ряд недостатков. Во-первых, погодные условия (например, облачность) накладывают ограничения на доступность снимков и качество изображений, что снижает возможности для сопоставления в мониторинговых исследованиях. Например, в анализе 20-летней временной серии Ди Лео и соавт. [22] вынуждены были отбросить целый ряд изображений, затронутых облачностью или дымкой. Во-вторых, спутниковые изображения редко доступны в высоком пространственном разрешении.

Третий метод оценки наземной биомассы — использование съемок с БПЛА. В отличие от первых двух методов изображения имеют высокое разрешение, что обеспечивает возможность контроля времени и периодичности процесса, а также возможность мультиспектральной съемки. Результаты обрабатываются фотограмметрическими технологиями, которые позволяют получить не только ортофотоплан, но и цифровые модели поверхности и рельефа. Но и здесь есть недостатки. Помимо высокой стоимости оборудования, такой метод имеет ограничение по размерам снимаемых объектов (только локальный масштаб).

По сравнению с традиционными наземными работами методы дистанционного зондирования позволяют получать данные по достаточно протяженным территориям при меньших затратах рабочей силы, материалов и времени, что открывает возможности для быстрой крупномасштабной оценки биомассы в городских экосистемах.

Лейкс [23] и Ли и соавт. [24] выполнили всесторонний обзор применения дистанционного зондирования в исследованиях городской растительности. Тенденция к все более масштабному применению этого метода усиливается. С конца 2000-х годов многие данные с БПЛА перешли от проприетарных к моделям распространения с открытым доступом, что привело к резкому увеличению числа новых приложений [20]. Общедоступность наборов данных не ограничивается спутниковыми данными, ряд стран открыли свои архивы аэрофотоснимков и данных LiDAR, например, Великобритания. Агенство по охране окружающей среды предоставило лидарные данные, покрывающие 72% территории этой страны [25]; похожий доступ возможен к данным для Финляндии, Бельгии, Испании, США и Новой Зеландии.

Исследования, связанные с использованием дистанционного зондирования с помощью пассивных датчиков демонстрируют схожие результаты, как и данные полученные из изображений. Речь идет о пиксельном подходе [26], объектном методе [27–29], а также о системе классификаторов [30], позволяющих проводить систематизацию кластеров или распознавание образов для определения видов зеленых насаждений [31, 32]. Целью использования данных методов является анализ воздействия на окружающую природную среду с течением времени различных видов землепользования [12, 33], или роста города [34].

3. ОСНОВЫ ЛИДАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

По сути, лидар — это технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем. В отличие от радиоволн, эффективно отражающихся только от достаточно крупных металлических це-

лей, световые волны подвержены рассеянию в любых средах, в том числе в воздухе. Это дает возможность, не только определять расстояние до непрозрачных (отражающих свет) дискретных целей, но и фиксировать интенсивность диффузии света в прозрачных средах. Возвращающийся отраженный сигнал проходит через ту же среду, что и луч от источника, подвергается вторичному рассеиванию, поэтому восстановление действительных параметров распределенной оптической среды — достаточно сложная задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами.

Существует три основных типа систем лидарной съемки: космическая, наземная и аэросъемка. В настоящее время лидары установлены на ряде спутников (в частности, на спутнике миссии ICESat-2, предназначенного для картографирования и мониторинга ледников Гренландии и Антарктиды [35]), а также на международной космической станции — проект GEDI. Его целью является получение ответа на вопросы об изменениях в землепользовании, ключевой движущей силе климатического кризиса и потери биоразнообразия, в том числе об объеме запасов углерода в деревьях и влиянии лесных пожаров на атмосферу [36]). При аэросъемке система устанавливается на пилотируемый либо беспилотный летательный аппарат. Поток инфракрасного лазерного излучения направляется в сторону Земли и отражается, попадая обратно на движущийся сенсор лазерного локатора. Наземные лидары делятся на два типа: мобильный и стационарный. При мобильной съемке система лидара устанавливается на движущееся транспортное средство либо может быть выполнена в форме носимого устройства. Мобильные системы, как правило, состоят из лазерного сенсора, камер, GNSS и INS (Внутренней навигационной системы), так же как и системы, применяемые для лазерной аэросъемки. Стационарный лидар — это устройство, осуществляющее съемку из статичного положения. Обычно сенсор лидара устанавливается на штатив и имеет полностью автономную лазерную и фото-съемочную систему.

У технологии LiDAR имеется ряд преимуществ. Данные поверхности собираются быстро, с большой точностью, имеют высокую плотность, что улучшает результаты различных исследований. Лидар не дает геометрических искажений, как например, радиолокационная станция бокового обзора. Лидарные данные могут интегрироваться с другими источниками данных.

В то же время технологии LiDAR не лишена недостатков. Во-первых, следует отметить сравнительно высокую стоимость оборудования для лазерного сканирования. Во-вторых, сбор информации датчиками LiDAR производится без цвета. В итоге получается монохромная модель, которая затрудняет интерпретацию.

Обнаружение удаленных или нижестоящих деревьев с использованием данных дистанционного зондирования остается сложной задачей в городских районах, где разнообразие городских лесов может быть высоким [37]. Более того, разрешение наборов данных LiDAR и мультиспектральных данных не позволяет различать роды или виды деревьев. Улучшить детекцию можно с помощью классификации видов деревьев на основе наборов данных LiDAR с более высокой плотностью точек и новых методов дистанционного зондирования [38, 39].

4. ПРИМЕНЕНИЕ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ В ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ЛЕСОВ

4.1. Оценка площади, высоты и площади листовой поверхности

При оценке древесного покрова в городах данные полевой инвентаризации применяются для изучения временных изменений в структуре растительности, выявления особенностей роста деревьев в городских условиях, измерения продуктивности городских лесов, оценки восстановления после катастрофических атмосферных явлений, таких как штормы и ураганы [40–45]. Исследования такого типа неизбежно выполняются на ограниченных по протяженности участках. В больших пространственных масштабах большая часть работ [46, 47] дает мало информации о местоположении и структурных характеристиках (например, высоте и диаметре кроны) утраченных деревьев и о потенциальных экологических и социально-экономических факторах, вызывающих эти изменения.

Данные LiDAR могут предоставить ряд характеристик, связанных со структурой деревьев. В то время как геометрическая часть информации LiDAR относится к архитектуре кроны, ветвей и листвы [48, 49], интенсивность сигнала обратного рассеяния дополнительно связана с типом листвы [50], размером листа, его ориентацией, листовой мозаикой и густотой листвы [51, 52]. Все эти свойства частично дополняют данные, собранные пассивными оптическими датчиками дистанционного зондирования [38].

Диаметр на высоте груди (DBH) считается наиболее важным параметром при инвентаризации деревьев. Многие страны хранят DBH городских деревьев в кадастровых базах данных для целей мониторинга [53]. Несколько исследований дали оценку DBH [54], при этом погрешность оценок достигает среднеквадратичной ошибки 14% [55]. Другими важными параметрами являются высота дерева (TH) и объем кроны (CV), которые предоставляют качественную информацию о насаждении и количественную информацию о дереве, корреляция с данными *in situ* с DBH и TH на ос-

нове лидарного сканирования составляет от 0.91 до 0.97 и 0.92 соответственно [54]. Другим ключевым параметром является высота основания кроны (CBH), которую можно оценить по данным LiDAR с помощью методов вокселизации, основанных на движущихся вокселях [56].

Перекрытие кроны деревьев может также привести к недооценке параметров по сравнению с полевыми данными, собранными вручную [57]. Так, при исследовании пространственной структуры растительности в Шарлотте (Северная Каролина) было показано, что изменение разрешения данных дистанционного зондирования вносит неопределенности в оценку запасов углерода в лесах на уровне микрорайонов. Это объясняется изменением плотности точек LiDAR (8.7–11.0% вариации). Как для LiDAR, так и для NAIP городские кварталы с более высокой степенью антропогенного воздействия демонстрируют существенный уровень неопределенности в картировании запасов углерода. Однако интерпретация этому факту для разных технологий своя. На результаты, основанные на LiDAR, с большей вероятностью влияет связность участков ландшафта и перекрытие растительности, а на оценку, основанную на NAIP — сложность формы участков [58].

Если говорить о погрешности, то точность измерения высоты дерева и диаметра кроны с помощью LiDAR были оценены на основе сопоставления с данными полевой инвентаризации деревьев. Определение высоты с помощью этой технологии считается очень точным с небольшим отклонением в сторону занижения фактической высоты дерева [59], либо, что чаще, в сторону завышения [60, 61]. Вторая геометрическая мера, протяженность кроны, может быть определена с точностью до 1.4 м по среднеквадратичному отклонению с применением лидарной технологии [60]. При этом наблюдается высокая корреляция как для малых, так и для больших по диаметру кроны [62].

Существуют также подходы к применению лидарной технологии для оценки площади листьев и индекса листовой поверхности [71, 73, 75], при этом зачастую используется комбинация лидарной съемки, спутниковых данных и фотографий на уровне улиц. Индекс листовой поверхности (leaf area index, LAI) в изучении растительности и экосистемных услуг имеет первостепенное значение [63], так как соответствует одному из основных требований оценки наземной биомассы [64], эвапотранспирации [65], биогенных летучих органических выбросов [66] и поглощения излучения [67].

4.2. Оценка породного состава

Оценки параметров индивидуальных деревьев, получаемые с помощью LiDAR, могут быть

использованы для определения породы дерева. Анализ данных о высоте с последующим делением на широколиственные и хвойные деревья прекрасно зарекомендовал себя при использовании набора данных LiDAR в разных фенологических фазах [68]. В этом исследовании проведена лидарная съемка на одном и том же анализируемом участке в условиях наличия и отсутствия листвы. Сравнение высот крон позволяет идентифицировать широколиственные насаждения, поскольку отсутствие листвы дает более высокое число возвратов сигналов LiDAR от земли и стеблей [52, 69]. Проблемы могут возникнуть только с листопадными хвойными растениями. Ким с соавт. [52] указали, что анализ данных без листвы является более точным для картирования.

Другой подход, используемый для определения породного состава, основан на применении более сложных геометрических признаков. Например, Холмгрен с соавт. [70] показали, что относительная высота основания кроны является отличительной чертой разных пород деревьев. Так, основание кроны сосны обычно имеет большую высоту, чем другие виды. Это связано с типичным габитусом светолюбивых видов сосны, которые часто имеют сравнительно короткую крону на вершине высокого ствола. Однако Холмгрен с соавт. [70] отмечают, что относительная высота основания кроны сильно варьирует в пределах древостоя в зависимости от таких факторов, как плотность стволов, качество участка произрастания и методы ухода. Таким образом, структурные признаки видовозависимы и определяются такими характеристиками, как форма кроны (например, коническая форма елей по сравнению с округлой формой многих широколиственных деревьев) и распределение биомассы в кроне (широколиственные деревья, как правило, имеют большую биомассу в верхней части кроны) [71]. Однако в этой же работе авторы отмечают, что любая структурная характеристика, рассчитываемая на основе данных LiDAR и описывающая свойства кроны, может зависеть от высоты дерева, а различное распределение высоты у разных видов может вызвать проблемы при распознавании породной принадлежности. Авторы также дополняют процедуры нормализации (предложенные, например, в работе [72]) как один из вариантов увеличения точности распознавания.

Еще одна характеристика LiDAR, которая хорошо зарекомендовала себя для распознавания видовой принадлежности, связана с так называемым возвратом сигнала (англ. *return*) или эхо-типом. Например, Холмгрен с соавт. [70] отметили, что доля одиночных лазерных возвратов обычно выше для хвойных деревьев, которые часто имеют более плотную крону по сравнению с лиственными деревьями. Точно так же Суратно с соавт. [50] указывают, что вертикальное распределение

возвратов полезно для идентификации видов. В работе [71] обсуждается взаимосвязь между формами кроны и типами возврата. Показано, что у берез (*Betula pendula*; *Betula pubescens*) наблюдается больше однократных возвратов сигнала из-за более густой листвы в верхней части кроны, а у елей наблюдается более высокая доля множественных и запоздалых возвратов из-за более низкого основания кроны. Это в некоторой степени противоречит анализу Холмгрена [70]. При этом необходимо отметить, что исследование Юрка с соавт. [71] основано на изучении только двух видов деревьев. Одной из причин противоречивых наблюдений может быть шумовое загрязнение сенсорной системы.

Наиболее многообещающая группа характеристик LiDAR для классификации пород деревьев связана с зарегистрированной интенсивностью сигнала [51, 73]. Точного определения интенсивности сигнала LiDAR в литературе не дается, и часто также неизвестен точный алгоритм расчета значений интенсивности [73]. Из 17 рассмотренных исследований, использующих данные об интенсивности, только в 9 содержится точное определение. Все эти определения связаны с количеством отраженной энергии при пиковой амплитуде отраженного сигнала (например, в работах [51, 73–75]) или общей мощностью отраженного сигнала [52], далее определяемого [73] как “полное обратное рассеянное излучение от рассеивателей на пути следования импульса”. В многочисленных исследованиях было обнаружено, что характеристики, связанные с интенсивностью сигнала, являются одними из наиболее релевантных предикторов [68, 74, 76].

Согласно исследованию Вауконен с соавт. [77] хвойные деревья имеют более низкие средние значения интенсивности сигнала по сравнению с большинством широколиственных деревьев. Это соответствует ряду других исследований [51, 71, 75], в которых было показано, что береза в целом имеет более высокие значения этого параметра сигнала по сравнению с елью и сосной. Тем не менее, установлено, что величина возврата сигнала от берез также сильно зависит от размера дерева (крона и высота ствола) [51, 75]. Эти различия в интенсивности в основном вызваны различной структурой листьев с более крупными одиночными листьями у широколиственных деревьев и линейным строением хвои [52]. Для хвойных пород Ким с соавт. [52] наблюдали более высокие значения этого параметра, при этом предполагалось, что виды со сгруппированными иглами имеют более высокую долю открытых ветвей. Однако следует учитывать, что величина сигнала зависит не только от отражательной способности поверхности, но и от эффектов рассеяния, которые связаны с формой данного дерева (включая размер и ориентацию листьев, густоту кроны), которая, в

свою очередь, частично объясняется возрастом дерева и плодородием участка [51]. Кроме того, фотоны, испускаемые каждым лучом и возвращающиеся к датчику, часто подвержены многократному рассеянию (взаимодействию фотонов лазерного луча с более чем одним объектом в кроне). Многократное рассеяние может исказить отраженные лазерные сигналы в системах обнаружения дальности пиковой амплитуды.

Одним из способов уменьшения таких эффектов рассеяния в системах с дискретным возвратом может быть сосредоточение внимания на значениях интенсивности эхо-сигналов, записанных как первый или одиночный отраженный сигнал, где эффекты рассеяния обычно менее выражены. Юрка с соавт. [71] наблюдали повышение точности такого подхода для крупных деревьев. Однако определение видовой принадлежности более мелких деревьев маловероятно. Измерения диффузии сигнала, рассчитанные по первому или одиночному эхо-сигналу, также были рекомендованы в работах [51] и [73]. При этом есть сведения о точном картировании городской местности при анализе всех возвратов [50]. В целом, такие факторы, как двунаправленное отражение и геометрия объемных поверхностей мишеней, существенно влияют на значения данных LiDAR. Выбор оптимальных параметров при оптимизации алгоритма распознавания зависит от вида дерева [51, 75].

На показатели пиковой амплитуды также может влиять применяемая сенсорная система. Так, было показано, что результаты классификации улучшаются, когда сопоставляются данные о величине сигнала с двух отдельных датчиков LiDAR [51]. Стоит отметить, что нормализация полученных данных требует радиометрической калибровки значений интенсивности. В исследовании [51, 75] это имело место только для одного из двух протестированных наборов данных.

В ряде исследований отмечается повышение точности при применении наборов волновых данных (например, [68, 73, 78, 79]). Одной из заявленных причин улучшения является увеличение количества эхо-сигналов [68]. Более плотные облака точек способствуют различению хвойных пород [78]. Однако преобразование волновых сигналов в дискретные точки обобщает подробную информацию, содержащуюся в волновых сигналах [78]. Например, такие характеристики как среднее значение и стандартное отклонение ширины эхо-сигнала в пределах одиночных лазерных лучей, являются важными переменными при классификации групп листовых и хвойных деревьев по записи волновой формы. При этом вертикальное распределение полноволнового сигнала содержит видоспецифические характеристики, которых нет в дискретных данных [68, 79, 80].

4.3. Оценка экосистемных услуг

Комбинирование оптических изображений и результатов лидарной съемки является наиболее многообещающим для анализа данных из нескольких источников. Кроме того, будущие усилия должны быть сосредоточены на повышение эффективности обработки данных. В настоящее время для долгосрочных мониторинговых исследований данные спутниковых снимков являются единственным доступным источником [81].

Однако интеграция оптических спутниковых снимков и данных LiDAR позволяет точнее идентифицировать структуру растительности в сложной городской среде. Мультиспектральные изображения HSR позволяют оценить покрытие растительности, что дает возможность использовать облака точек LiDAR для оценки структуры древесно-кустарниковой растительности. Например, Расити и соавт. [82] произвели картирование наземной биомассы Бостона, используя данные LiDAR в сочетании со спутниковыми снимками VHSR. Впоследствии исследователями данные облака точек 3D LiDAR были использованы для определения крон отдельных деревьев. По данным о высоте деревьев, полученных на основе LiDAR, оценивали биомассу и секвестрацию углерода. В работе исследователей показано, что использование данных дистанционного зондирования только от одного источника имеет тенденцию переоценивать запасы углерода.

По тому же принципу Шрайер и соавт. [83] разработали более конкретный метод объединения данных LiDAR и VHSR спутниковых снимков для оценки запасов углерода в городских экосистемах Берлина (Германия) [84, 85].

Пармер и соавт. [86] применили другую стратегию совместного использования данных для идентификации крон городских деревьев: снимки WorldView-2 и данные LiDAR. Совместная регистрация спутниковых снимков в LiDAR данные — это процесс, известный как окрашивание облака точек. Каждой точке, полученной путем лидарной съемки, за счет точного позиционирования сопоставляется конкретный пиксель мультиспектрального изображения. В результате каждая точка LiDAR получает дополнительные значения RGB (аббревиатура английских слов *red*, *green*, *blue* — красный, зеленый, синий — аддитивная цветовая модель, описывающая способ кодирования цвета для цветовоспроизведения с помощью трех цветов, которые принято называть основными) и NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* — нормализованный относительный индекс растительности — простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом)). Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих

количественные оценки растительного покрова), что позволяет отделять зеленые насаждения от других городских объектов.

Лин и соавт. [87] объединили активные и пассивные датчики LiDAR для получения комплексной картины растительного покрова с одновременной оценкой температуры. Исследователи использовали гиперспектральные и снимки с помощью цифрового тепловизионного монокуляра Forward, а также метод преобразования инфракрасного излучения (ИК) в изображение [88], а затем в сочетании с лидарной съемкой картировали местность.

Существенное влияние на объем предоставляемых экосистемных услуг могут оказывать инвазивные растения. Их влияние изучается на основе классификационного анализа растительности с использованием данных лидарной съемки [89].

В работе [90] авторы также пришли к выводу, что объединение мультиспектральных изображений с данными LiDAR для картирования состояния древесно-кустарниковой растительности и оценки экосистемных услуг является оптимальным сочетанием методов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки экосистемных услуг, оказываемых зелеными насаждениями в городской среде, LiDAR остается, по сути, единственным возможным решением. Так как городская среда содержит большое количество различных зданий, лесных насаждений или других препятствий, разумно обратиться к методу лазерного сканирования. LiDAR позволяет с высокой точностью оценить перепады высот и скрытые под растительностью объекты.

Однако для принятия решений в рамках оптимизации экосистемных услуг при городском планировании необходимо получать высокоточную, полноцветную трехмерную модель территории. Для этого логично использовать совместно и метод фотограмметрии, и LiDAR. При этом программными средствами производится “наложение” изображений, получаемых методами фотограмметрии, на 3D-модель, созданную на основе данных LiDAR, с учетом разной степени точности технологий, описанных выше. Выход можно найти в использовании геоинформационных систем и объединении пространственных данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной программы академического лидерства “Приоритеты 2030”, проект Н-476-99_2021–2023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Endreny T., Santagata R., Perna A., Stefano C. De, Rallo R.F., Ulgiati S.* Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing. *Ecol. Modell.*, 2017, 360, 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.07.016>
2. *Davies H., Doick K., Handley P., O'Brien L., Wilson J.* Delivery of Ecosystem Services by Urban Forests: Forestry Commission. Forestry Commission: Edinburgh. 2017, 25(9), 36.
3. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. General Technical Report NE-186, McPherson E. G., Nowak D.J., Rowntree R.A. eds., 1994, p.201.
4. *Doick K.J., Davies H.J., Moss J., Coventry R., Handley P., Vazmonteiro M., Rogers K., Simpkin P.* The Canopy Cover of England's Towns and Cities: baselining and setting targets to improve human health and well-being. Conference: Urban Trees Research Conference. Trees People and the Built Environment 3, 2017, Birmingham
5. City of Melbourne. Urban Forest Strategy: Making a Great City Greener 2012–2032, City of Melbourne. 2012. 68 p.
6. *Choi H., Song Y.* Comparing tree structures derived among airborne, terrestrial and mobile LiDAR systems in urban parks. *Gisci.Remote Sens.*, 2022, 59(1), 843–860. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2076381>
7. *Saarinen N., Vastaranta M., Kankare V., Tanhuanpää T., Holopainen M., Hyypää J., Hyypää H.* Urban-Tree-attribution update using multisource single-tree inventory. *Forests*, 2014, 5(5), 1032–1052. <https://doi.org/10.3390/F5051032>
8. *Chen F., Zhou Z., Wang P., Li H., Zhong Y.* Green space vegetation quantity and workshop area of wuhan iron and steel company. *Chinese J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(4), 592–596.
9. *Tianzong S.* Study on Remote Sensing Model of Three-Dimensional green biomass and the estimation of environmental benefits of greenery. *J. Remote Sens.*, 1995, 3, 162–174.
10. *He C., Convertino M., Feng Z., Zhang S.* Using LiDAR data to measure the 3D green biomass of Beijing urban forest in China. *PLoS One*. 2013, 8(10). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0075920>
11. *Pace R., Guidolotti G., Baldacchini C., Pallozzi E., Grote R., Nowak D.J., Calfapietra C.* Comparing i-Tree Eco estimates of particulate matter deposition with leaf and canopy measurements in an urban Mediterranean holm oak forest. *Environ. Sci. Technol.*, 2021, 55(10), 6613–6622. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C07679>
12. *Nowak D.J., Hoehn R.E., Bodine A.R., Greenfield E.J., O'Neil-Dunne J.* Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY. *Urban Ecosyst.*, 2013, 19(4), 1455–1477. <https://doi.org/10.1007/S11252-013-0326-Z>
13. US Forest Service. i-Tree Eco User's Manual v 6.0. 2020. Available online: https://www.itreetools.org/documents/275/EcoV6_UsersManual..2020.07.15.pdf (accessed on 23 February 2021).

14. Valuing London's urban forest: results of the London i-Tree eco project. Rogers K., Sacre K., Goodenough J., Doick K. Treeconomics London, 2015. Available online: https://www.london.gov.uk/sites/default/files/valu-ing_londons_urban_forest_i-tree_report_final.pdf (accessed on 11 October 2022).
15. Nowak D.J., E.R., Hoehn I., Crane D.E., Stevens J.C., Walton J.T. Assessing urban forest effects and values, New York City's urban forest. *Resour Bull NRS-9 Newt Square, PA US Dep. Agric. For Serv. North Res. Station* 22 p. 2007, 9. <https://doi.org/10.2737/NRS-RB-9>
16. Chaparro L. Ecological Services of Urban Forest in Barcelona. *Environmental Science*. Spain, 2009. Available online: <https://www.itreetools.org/documents/302/Barcelona%20Ecosystem%20Analysis.pdf>.
17. Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C., Hoehn R.E., Walton J.T., Bond J. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Abo-ric. Urban For.*, 34(6) 347–358. 2008, 34(6). <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.048>
18. Shojanoori R., Shafri H.Z.M. Review on the use of remote sensing for urban forest monitoring. *Arboric. Urban For.*, 2016, 42(6), 400–417. <https://doi.org/10.48044/JAUF.2016.034>
19. Paletto A., Geitner C., Grilli G., Hastik R., Pastorella F., Rodriguez Garcia L., Rogers K., Hansford D., Sunderland T., Brunt A., Coish N., Suich H., Howe C., Mace G. Measuring the ecosystem services of Torbay's trees: the Torbay i-Tree Eco pilot project. *Trees, People Built Environ*, 2015, 12(1), 137–147.
20. Wulder M.A., Coops N.C. Satellites: Make Earth observations open access. *Nature*, 2014, 513(7516), 30–31. <https://doi.org/10.1038/513030a>
21. Kong F., Yin H., James P., Hutyra L.R., He H.S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landsc. Urban Plan.*, 2014, 128, 35–47. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURB-PLAN.2014.04.018>
22. Di Leo N., Escobedo F.J., Dubbeling M. The role of urban green infrastructure in mitigating land surface temperature in Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. *Environ. Dev. Sustain.*, 2016, 18(2), 373–392. <https://doi.org/10.1007/S10668-015-9653-Y/FIGURES/8>
23. Tigges J., Lakes T. High resolution remote sensing for reducing uncertainties in urban forest carbon offset life cycle assessments. *Carbon Bal. Manag.*, 2017, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/S13021-017-0085-X>
24. Li X., Chen W.Y., Sanesi G., Lafortezza R. Remote sensing in urban forestry: recent applications and future directions. *Remote Sens*, 2019, 11(10), 1144. <https://doi.org/10.3390/RS11101144>
25. Whitworth M. Laser surveys light up open data | creating a better place. *UK Environment Agency*. UK, 2015. Available online: <https://environmentagency.blog.gov.uk/2015/09/18/laser-surveys-light-up-open-data/>.
26. McGee J.A., Day S.D., Wynne R.H., White M.B. Using geospatial tools to assess the urban tree canopy: decision support for local governments. *J. For.*, 2012, 110(5), 275–286. <https://doi.org/10.5849/JOF.11-052>
27. Locke D., Romolini M., Galvin M., O'Neil-Dunne J., Strauss E. Tree canopy change in Coastal Los Angeles, 2009–2014. *Cities Environ.*, 2017, 10(2).
28. Zhang Y., Murray A.T., Turner B.L. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. *Landsc. Urban Plan.*, 2017, 165, 162–171. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURB-PLAN.2017.04.009>
29. Zhang Y., Li Q., Huang H., Wu W., Du X., Wang H. The combined use of remote sensing and social sensing data in fine-grained urban land use mapping: A case study in Beijing, China. *Remote Sens.*, 2017, 9(9), 865. <https://doi.org/10.3390/RS9090865>
30. Shi D., Yang X. Mapping vegetation and land cover in a large urban area using a multiple classifier system. *Remote Sens.*, 2017, 38(16), 4700–4721. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1331059>
31. Yang L., Zhang L., Li Y., Wu S. Water-related ecosystem services provided by urban green space: A case study in Yixing City (China). *Landsc. Urban Plan.*, 2015, 136, 40–51. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2014.11.016>
32. de la Barrera F., Rubio P., Banzhaf E. The value of vegetation cover for ecosystem services in the suburban context. *Urban For. Urban Green.*, 2016, 16, 110–122. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2016.02.003>
33. Trinder J., Liu Q. Assessing environmental impacts of urban growth using remote sensing. *Geo-spat. Inf. Sci.*, 2020, 23(1), 20–39. <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1710438>
34. Richards D.R., Belcher R.N. Global Changes in urban vegetation cover. *Remote Sens.*, 2019, 12(1), 23. <https://doi.org/10.3390/RS12010023>
35. Brown K. NASA, ULA Launch Mission to Track Earth's Changing Ice. *NASA organisation release*, USA, 2018. Available online: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-ula-launch-mission-to-track-earths-changing-ice>.
36. Hancock S., Armston J., Hofton M., Sun X., Tang H., Duncanson L.I., Kellner J.R., Dubayah R. The GEDI Simulator: A large-footprint waveform LiDAR simulator for calibration and validation of spaceborne missions. *Earth Sp. Sci. (Hoboken, N.j)*. 2019, 6(2), 294. <https://doi.org/10.1029/2018EA000506>
37. Gillespie T.W., de Goede J., Aguilar L., Jenerette G.D., Fricker G.A., Avolio M.L., Pincetl S., Johnston T., Clarke L.W., Pataki D.E. Predicting tree species richness in urban forests. *Urban Ecosyst.*, 2017, 20(4), 839–849. <https://doi.org/10.1007/S11252-016-0633-2/FIGURES/6>
38. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sens. Environ.*, 2014, 148, 70–83. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.03.018>
39. Asner G.P., Martin R.E., Knapp D.E., Tupayachi R., Anderson C.B., Sinca F., Vaughn N.R., Lactayo W. Airborne laser-guided imaging spectroscopy to map forest trait diversity and guide conservation. *Science*, 2017, 355(6323), 385–389. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAJ1987>

40. *Burley S., Robinson S.L., Lundholm J.T.* Post-hurricane vegetation recovery in an urban forest. *Landsc. Urban Plan.*, 2008, 85(2), 111–122. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2007.10.003>
41. *Staudhammer C., Escobedo F., Lawrence A., Duryea M., Smith P., Merritt M.* Rapid assessment of change and hurricane impacts to Houston's urban forest structure. *Arboric. Urban For.*, 2011, 37(2), 60–66. <https://doi.org/10.48044/jauf.2011.009>
42. *Gregg J.W., Jones C.G., Dawson T.E.* Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424(6945), 183–187. <https://doi.org/10.1038/NATURE01728>
43. *Ziska L.H., Bunce J.A., Goins E.W.* Characterization of an urban-rural CO₂/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 2004, 139(3), 454–458. <https://doi.org/10.1007/S00442-004-1526-2>
44. *Singh K.K., Bianchetti R.A., Chen G., Meentemeyer R.K.* Assessing effect of dominant land-cover types and pattern on urban forest biomass estimated using LiDAR metrics. *Urban Ecosyst.*, 2017, 20(2), 265–275. <https://doi.org/10.1007/S11252-016-0591-8/FIGURES/5>
45. *Searle S.Y., Turnbull M.H., Boelman N.T., Schuster W.S.F., Yakir D., Griffin K.L.* Urban environment of New York City promotes growth in northern red oak seedlings. *Tree Physiol.*, 2012, 32(4), 389–400. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/TPS027>
46. *Hostetler A.E., Rogan J., Martin D., Delauer V., Oneil-Dunne J.* Characterizing tree canopy loss using multi-source GIS data in Central Massachusetts, USA. *Remote Sens. Lett.*, 2013, 4(12), 1137–1146. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.852704>
47. *Nowak D.J., Greenfield E.J.* Tree and impervious cover change in U.S. cities. *Urban For. Urban Green.*, 2012, 11(1), 21–30. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2011.11.005>
48. *Riaño D., Chuvieco E., Condés S., González-Matesanz J., Ustin S.L.* Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 92(3), 345–352. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2003.12.014>
49. *Coops N.C., Hilker T., Wulder M.A., St-Onge B., Newnham G., Siggins A., Trofymow J.A.* Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. *Trees – Struct Funct.*, 2007, 21(3), 295–310. <https://doi.org/10.1007/S00468-006-0119-6/FIGURES/7>
50. *Suratno A., Seielstad C., Queen L.* Tree species identification in mixed coniferous forest using airborne laser scanning. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2009, 64(6), 683–693. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2009.07.001>
51. *Korpela I., Ørka H.O., Hyypä J., Heikkinen V., Tokola T.* Range and AGC normalization in airborne discrete-return LiDAR intensity data for forest canopies. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2010, 65(4), 369–379. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2010.04.003>
52. *Kim S., McGaughey R.J., Andersen H.E., Schreuder G.* Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.*, 2009, 113(8), 1575–1586. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.03.017>
53. *Open Data Portaal Delft. Delft Open Data.* Available online: <https://data-delft.opendata.arcgis.com/search> (accessed 10 November 2022).
54. *Srinivasan S., Popescu S.C., Eriksson M., Sheridan R.D., Ku N.W.* Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sens.*, 2015, 7(2), 1877–1896. <https://doi.org/10.3390/RS70201877>
55. *Forsman M., Holmgren J., Olofsson K., Liang X., Puttonen E., Hyypä J.* Tree Stem Diameter estimation from mobile laser scanning using line-wise intensity-based clustering. *Forests*, 2016, 7(9), 206. <https://doi.org/10.3390/F7090206>
56. *Maguya A.S., Tegel K., Junttila V., Kauranne T., Korhonen M., Burns J., Leppänen V., Sanz B.* Moving voxel method for estimating canopy base height from airborne laser scanner data. *Remote Sens.*, 2015, 7(7), 8950–8972. <https://doi.org/10.3390/RS70708950>
57. *Moskal L.M., Zheng G.* Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sens.*, 2012, 4(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/RS4010001>
58. *Herrero-Huerta M., Lindenbergh R., Rodríguez-González P.* Automatic tree parameter extraction by a mobile LiDAR system in an urban context. *PLoS One*. 2018, 13(4). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0196004>
59. *Kaartinen H., Hyypä J., Yu X., Vastaranta M., Hyypä H., Kukko A., Holopainen M., Heipke C., Hirschmugl M., Morsdorf F., Næsset E., Pitkänen J., Popescu S., Solberg S., Wolf B.M., Wu J.C.* An International Comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sens.*, 2012, 4(4), 950–974. <https://doi.org/10.3390/RS4040950>
60. *Zhang C., Zhou Y., Qiu F.* Individual Tree Segmentation from LiDAR point clouds for urban forest inventory. *Remote Sens.*, 2015, 7(6), 7892–7913. <https://doi.org/10.3390/RS70607892>
61. *Ferraz A., Bretar F., Jacquemoud S., Gonçalves G., Pereira L., Tomé M., Soares P.* 3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data. *Remote Sens. Environ.*, 2012, 121, 210–223. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2012.01.020>
62. *Münzinger M., Prechtel N., Behnisch M.* Mapping the urban forest in detail: From LiDAR point clouds to 3D tree models. *Urban For. Urban Green.*, 2022, 74, 127637. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2022.127637>
63. *Zheng G., Moskal L.M.* Retrieving Leaf area index (LAI) using remote sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 2009, 9(4), 2719–2745. <https://doi.org/10.3390/S90402719>
64. *Bréda N.J.J.* Leaf area index. In: *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier; 2018, 457–462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63768-0.00849-0>
65. *Fang H., Liang S.* Leaf Area Index Models, Reference module in Earth systems and environmental sciences. *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09076-X>

66. Aboelghar M., Arafat S., Saleh A., Naeem S., Shirbeny M., Belal A. Retrieving leaf area index from SPOT4 satellite data. *Egypt J. Remote Sens. Sp. Sci.*, 2010, 13(2), 121–127. <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2010.06.001>
67. Nowak D.J. Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees. *For. Sci.*, 1996, 42(4), 504–507.
68. Reitberger J., Krzystek P., Stilla U. Analysis of full waveform LiDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *Remote Sens.*, 2008, 29(5), 1407–1431. <https://doi.org/10.1080/01431160701736448>
69. Wasser L., Day R., Chasmer L., Taylor A. Influence of vegetation structure on LiDAR-derived canopy height and fractional cover in forested riparian buffers during leaf-off and leaf-on conditions. *PLoS One*. 2013, 8(1), e54776. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0054776>
70. Holmgren J., Persson Å., Söderman U. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. *Remote Sens.*, 2008, 29(5), 1537–1552. <https://doi.org/10.1080/01431160701736471>
71. Ørka H.O., Næsset E., Bollandsås O.M. Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.*, 2009, 113(6), 1163–1174. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.02.002>
72. Brandtberg T. Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2007, 61(5), 325–340. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2006.10.006>
73. Hovi A., Korhonen L., Vauhkonen J., Korpela I. LiDAR waveform features for tree species classification and their sensitivity to tree- and acquisition related parameters. *Remote Sens. Environ.*, 2016, 173, 224–237. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2015.08.019>
74. Heinzl J., Koch B. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2011, 13(1), 152–160. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2010.09.010>
75. Korpela I., Ole Ørka H., Maltamo M., Tokola T., Hyyppä J. Tree species classification using airborne LiDAR – effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fenn.*, 2010, 44(2), 319–339. <https://doi.org/10.14214/SF.156>
76. Holmgren J., Persson Å. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 90(4), 415–423. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00140-8)
77. Vauhkonen J., Ørka H.O., Holmgren J., Dalponte M., Heinzl J., Koch B. Tree Species Recognition based on airborne laser scanning and complementary data sources. In: Forestry applications of airborne laser scanning. Managing forest ecosystems, eds. Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J., 2014, 27, 135–156. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8663-8_7
78. Vaughn N.R., Moskal L.M., Turnblom E.C. Tree species detection accuracies using discrete point Lidar and airborne waveform LiDAR. *Remote Sens.*, 2012, 4(2), 377–403. <https://doi.org/10.3390/RS4020377>
79. Yu X., Litkey P., Hyyppä J., Holopainen M., Vastaranta M. Assessment of low density full-waveform airborne laser scanning for individual tree detection and tree species classification. *Forests*, 2014, 5(5), 1011–1031. <https://doi.org/10.3390/F5051011>
80. Hollaus M., Mücke W., Höfle B., Dorigo W., Pfeifer N., Wagner W., Bauerhansl C., Regner B. Tree species classification based on full-waveform airborne laser scanning data. College Station. 2009, 54–65.
81. Li X., Chen W.Y., Sanesi G., Laforteza R. Remote sensing in urban forestry: Recent applications and future directions. *Remote Sens.*, 2019, 11(10). <https://doi.org/10.3390/RS11101144>
82. Raciti S.M., Hutyrá L.R., Newell J.D. Mapping carbon storage in urban trees with multi-source remote sensing data: Relationships between biomass, land use, and demographics in Boston neighborhoods. *Sci. Total Environ.*, 2014, 500–501, 72–83. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.08.070>
83. Schreyer J., Tigges J., Lakes T., Churkina G. Using Airborne LiDAR and quickbird data for modelling urban tree carbon storage and its distribution—A case study of Berlin. *Remote Sens.*, 2014, 6(11), 10636–10655. <https://doi.org/10.3390/RS61110636>
84. Popescu S.C., Wynne R.H. Seeing the trees in the forest: Using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2004, 70(5), 589–604. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.589>
85. Hyyppä J., Hyyppä H., Leckie D., Gougeon F., Yu X., Maltamo M. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *Remote Sens.*, 2008, 29(5), 1339–1366. <https://doi.org/10.1080/01431160701736489>
86. Parmehr E.G., Amati M., Fraser C.S. Mapping urban tree canopy cover using fused airborne LiDAR and satellite imagery data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, III–7. 2016, 181–186. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-7-181-2016>
87. Lin B.B., Meyers J., Beaty R.M., Barnett G.B., Grunewald K., Bastian O., Rosen M.A. Urban green infrastructure impacts on climate regulation services in Sydney, Australia. *Sustain.*, 2016, 8(8), 788. <https://doi.org/10.3390/SU8080788>
88. Thermal imaging techniques to survey and monitor animals in the wild: A Methodology. Havens K.J., Sharp E.J. eds., 2015, 1–354.
89. Potgieter L.J., Gaertner M., O'Farrell P.J., Richardson D.M. A fine-scale assessment of the ecosystem service-disservice dichotomy in the context of urban ecosystems affected by alien plant invasions. *For. Ecosyst.*, 2019, 6(1). <https://doi.org/10.1186/S40663-019-0200-4>
90. García-Pardo K.A., Moreno-Rangel D., Domínguez-Amarillo S., García-Chávez J.R. Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied. *Urban For. Urban Green.*, 2022, 74, 127636. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2022.127636>

LIDAR Technology in Modern Inventory of Urban Forests

I. M. Kuznetsova^{a, #}, V. N. Yakimov^b, N. I. Zaznobina^b, E. A. Tonevitsky^c, and V. V. Onishchenko^d

^aHigher School of Economics National Research University, Moscow, 101000 Russia

^bNational Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhniy Novgorod, 603022 Russia

^cMendeleev University of Chemical Technology, Moscow, 125047 Russia

^dCenter for Strategic Research, Moscow, 125009 Russia

[#]e-mail: itsypina@hse.ru

Abstract—Until now, field measurements have been the main method for inventorying urban forests. The advent of LiDAR and remote sensing technology has made a breakthrough possible in terms of the effort and quality balance. LiDAR technology allows a three-dimensional reconstruction of aboveground biomass in the form of a point cloud and thereby to classify vegetation at different levels in the analysis of urban forests. Large-scale LiDAR scan data are increasingly being used to study in detail the vertical and horizontal structure of aboveground biomass in the urban landscape. In particular, 3D point clouds and full LiDAR waveform data allow estimation of changes in forest biomass and carbon stock, leaf area index and other dendrometric indicators. In addition, technologies for recognizing the type of forest and its species composition are being actively developed. Thus, LiDAR technology is an effective tool for reducing the ratio of labor costs and quality. However, when mapping urban vegetation, the most effective way is to combine LiDAR data with high-resolution imagery and hyperspectral imaging data. This is especially true for urban systems where the green space distribution is critical to the provision of ecosystem services.

Keywords: LiDAR, urban ecosystem, LiDAR technology, urban biomass